

REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
Dr. Antonio Núñez Jiménez

TESIS EN OPCION AL TITULO DE MASTER

TITULO: Estudio de la distribución fraccional de las arenas del placer de Playa Mejías.

AUTOR: Ing. Beatriz Ramírez Serrano

TUTOR: Dr. Alfredo L. Coello Velázquez.

Moa, 2002

"Año de los héroes prisioneros del imperio"

Resumen.

Por la importancia que se le concede al estudio y aprovechamiento de los recursos naturales, en el presente trabajo se realiza un estudio sobre la distribución fraccional másica y de contenido de las arenas negras del placer de la playa Mejías utilizando como propiedades de separación el tamaño de la partícula e intensidad de corriente y su combinación con el objetivo de modelar estas funciones. Para lograr el mismo se le realizó análisis granulométrico y magnético a la muestra inicial, este último se aplicó además a cada clase de tamaño de forma independiente. A la muestra inicial y las obtenidas durante el proceso se les realizó análisis químico.

Como principales resultados se obtuvieron los modelos de las funciones de distribución diferencial másica $\bar{\gamma}(\ell)$, $\bar{\gamma}(I)$ y $\bar{\gamma}_i(\ell, I)$ y las ecuaciones matemáticas que describen la función de distribución de contenido $\beta(\ell)$, $\beta(I)$ y $\beta(\ell, I)$ para los óxidos de hierro, cromo, titanio, vanadio, aluminio y silicio de las propiedades de separación antes mencionadas.

Índice

Introducción	4
Capítulo 1. Marco conceptual	6
Introducción	6
1.1.- Tratamiento de placeres a escala mundial.....	6
1.2.- Consideraciones sobre la génesis y las características generales del placer Mejías.	12
1.3.- Antecedentes y estado actual del estudio de los placeres cubanos.....	14
1.4. - Composición mineralógica del placer.	17
1.5.- Fundamento del método de análisis fraccional.	17
Capítulo 2. Métodos y materiales.....	24
Introducción.	24
2.1.-Toma y preparación de la muestra.	24
2.2. - Análisis granulométrico.	24
2.3.- Separación magnética.....	25
2.4.- Análisis de separación magnética por clases de tamaño.....	27
2.5.- Análisis químico.	27
2.6.- Tratamiento de los resultados.	28
Conclusiones parciales.....	29
Capítulo 3. Análisis y discusión de los resultados.....	30
Introducción.	30
3.1. Resultados del análisis químico de la muestra inicial.....	30
3.2. - Resultados del análisis granulométrico.	30
3.2.1. Características sumarias del análisis granulométrico.	30
3.2.2.- Análisis fraccional másico según el tamaño de las partículas.....	31
3.2.3.- Análisis fraccional de contenido según el tamaño de las partículas.....	33
3.3.- Resultado del análisis magnético.	35
3.3.1. Características sumarias del análisis magnético.	35
3.3.2.- Análisis fraccional másico según la intensidad del campo magnético.	36
3.3.3.- Análisis fraccional de contenido según la intensidad del campo magnético.....	38
3.4.- Resultado del análisis magnético por fracciones de tamaño.	40
3.4.1. Resultado másico del análisis magnético por fracciones de tamaño.	40
3.4.2.- Análisis fraccional másico según la intensidad del campo magnético por clases de tamaño.....	42
3.4.3.- Análisis fraccional de contenido según la intensidad del campo magnético y tamaño de partícula.....	44
Conclusiones parciales	48
Conclusiones finales.	49
Recomendaciones.....	50
Anexos.....	57

Introducción

El estudio y aprovechamiento de los recursos naturales está contenido dentro de las estrategias de desarrollo del Estado Cubano, de aquí que el estudio de las reservas de arenas negras ubicadas en la parte norte oriental del país donde se concentran minerales pesados de gran valor resulte de gran interés.

Los minerales pesados que forman parte de los concentrados pesados o arenas negras se han clasificado como de alto precio y bajo volumen, (Almaguer, 1992), una particularidad que los hace preferenciales es que la gran parte de ellos se aplican directamente en la industria metalúrgica sin tratamiento industrial previo, por ejemplo entre ellos se encuentran el rutilo, ilmenita, circón entre otros, además con pequeñas cantidades de concentrados se pueden obtener cantidades considerables de productos, lo que los hace asimilables por la pequeña minería, considerando estos aspectos, los recursos pronósticos de 320 000 t de arena y 130 000 t de minerales pesados que componen este placer así como su amplio campo de aplicación resulta de vital importancia el estudio del mismo.

Estudios preliminares realizados en el ISMM por varios autores presuponen la factibilidad de la beneficiabilidad de los minerales presentes en el yacimiento de arenas negras de la Playa Mejías que contiene varios minerales polimetálicos a partir de los cuales se pueden obtener concentrados minerales, contenedores de elementos como el Fe, Ti, Cr, Ni y V, entre otros. A partir de estos concentrados es posible obtener ferroaleaciones multicomponentes de alta demanda que son imprescindibles en el desarrollo de materiales para soldar, su adquisición se realiza en moneda libremente convertible y su precio oscila entre 2 570 – 2 655 USD / ton aproximadamente.

Consideramos que el conocimiento sobre este placer es insuficiente, por esta razón declaramos que el problema de esta investigación consiste en la insuficiente caracterización de las arenas negras del placer aluvial de la playa de Mejías para su concentración.

Objeto de estudio: El placer Aluvial de la playa de Mejías.

Campo de acción: Diferencias de las propiedades físicas y químicas.

Objetivo general: Modelar la función de distribución másica y de contenido de las

arenas del placer Mejías a partir de las propiedades de separación tamaño de la partícula, intensidad de corriente y la combinación de estas.

Objetivos específicos:

- 1- Caracterizar el placer desde el punto de vista físico y químico.
- 2- Establecer la función de distribución másica y de contenido para las diferentes propiedades de separación; tamaño de partícula, intensidad de corriente y su combinación como base para la caracterización de las arenas del placer de la playa de Mejías.

Para resolver dicho problema nos hemos planteado la siguiente hipótesis:

El estudio de la distribución fraccional de las arenas negras permitirá establecer las regularidades físicas y químicas del placer aluvial de la playa Mejías, a partir de lo cual se pueden obtener los modelos matemáticos de distribución diferencial másica $\gamma(\ell, I)$ y de contenido $\beta(\ell, I)$ en los intervalos de tamaño e intensidades de corriente, aspecto que enriquecería el conocimiento sobre las características de este placer.

Metodología de la investigación:

Obtenida la información necesaria se determinaron las principales propiedades físico químicas mediante los métodos de análisis pertinentes, se procedió a la determinación de las funciones de distribución y los modelos matemáticos que las describen, utilizando el enfoque fraccional propuesto en la teoría de separación de Tijonov combinado con métodos estadísticos.

Capítulo 1. Marco conceptual

Introducción

Los yacimientos de placeres ocupan el primer lugar en la industria mundial del titanio, con mayor significación para los placeres litorales que son la principal fuente de extracción de rutilo e ilmenita, contienen además, magnetita, granate y otros, constituyendo la ilmenita, el rutilo y leucoxeno los minerales que tienen significado económico de importancia. (Gambogi, 1999).

Más del 90% de la ilmenita (FeTiO_3) constituye la fuente de suministro mundial para la producción de dióxido de titanio para su utilización como pigmento blanco para pinturas, papel, y plásticos (Luke, 2001), así como para el desarrollo de consumibles de soldadura. (Puchols, et. al, 2001).

Por su alta resistencia a la corrosión las aleaciones de titanio se usan en la industria aeroespacial y otras. (Gambogi, 1999).

1.1.- Tratamiento de placeres a escala mundial.

Las principales reservas de arenas donde se concentra el titanio a nivel mundial están concentradas principalmente entre Australia y la India, esta última posee una reserva de 278 millones de toneladas de ilmenita, casi el 20 % de la ilmenita conocida en el mundo. En estos depósitos se encuentran contenidos minerales de gran valor como el rutilo, el circón y la monazita, junto con la ilmenita que generalmente constituye la mitad de los minerales pesados. Esta ilmenita es una 'variedad de hierro' que contiene 50-53 % TiO_2 . El proceso de ERMS de la firma Austpac es eficaz para el tratamiento de las ilmenitas indias. (Veldhuizen, 2001; Austpac Resources NI a), 2001)

En el caso de Australia la industria de arenas de playa produce el 70 % de los concentrados del mundo. En específico la producción es dominada por Australia Occidental que se considera es la fuente del 43 % de la ilmenita mundial, 27 % de rutilo, 40 % de circón y el 60 % de monazita. Estas arenas minerales son de grano muy fino y el método de separación tradicional por gravedad no es considerado conveniente. Se han realizado experimentos y se han implementado a nivel industrial para la concentración de éstas por métodos de flotación. (Stewart, 1991).

El circuito de Capel, Australia Occidental, para la separación de monazita incluye procesos gravitacionales, magnético y electrostático y se ha considerado además, la utilización de la flotación como una alternativa para la concentración de estas

arenas. En este circuito Bruckard, Heyes y Guy realizaron estudios para mejorar la eficacia de separación de los minerales pesados. Al utilizar la flotación con el objetivo de separar los minerales de titanio-productivos (leucoxeno) de aluminosilicatos se resuelve de forma eficaz la separación de monazita y circón de la ilmenita y leucoxeno como un problema lateral, también reduce significativamente la radioactividad del producto rico en titanio, pues se considera que el 95 % del torio y el uranio presente está asociado con la monazita. (Bruckard, et. al, 2001).

La flotación como un proceso de enriquecimiento y separación de las fases presentes en las arenas de la Playa Mejías, las cuales son de grano fino constituye una posibilidad para separar fases como la ilmenita y la cromita que no es posible separarlas con técnicas tradicionales como la separación magnética debido a que ambas fases son débilmente electromagnéticas.

Estudios realizados para beneficiar los depósitos de ilmeno-magnetitas para obtener concentrados de ilmenita en Nueva Zelanda demostraron que los minerales de titanio, ilmeno-magnetitas se concentran en las fracciones menores de $<150\ \mu\text{m}$ y el tamaño promedio de estos es $113\ \mu\text{m}$. Ellos, definieron las condiciones para la separación de la ilmenita/hematita intergranular por medio de la separación magnética en tres áreas utilizando la ecuación de Owen-Honda. (Panov, et. al, 2000).

Estas condiciones son:

1. Fuerza del campo magnético baja donde la hematita entra preferencialmente en el fragmento magnético;
2. Fuerza del campo magnético intermedio donde la ilmenita y hematita tienen las susceptibilidades magnéticas casi iguales;
3. Fuerza del campo magnético más alto donde hay una inducción magnética crítica en la que se concentra la ilmenita preferentemente en la fracción magnética.

No solo en estos países existen depósitos de minerales pesados, también al sur del Desierto Oriental de Egipto en El Hebal Área, Shalatein - el Sector de Halayeb, aparecen minerales pesados en depósitos de arena de Dunas. En ellas los minerales económicos presentes principalmente son ilmenita y magnetita, en menor grado el granate y menos de monazita y circón. Los silicatos pesados son representados principalmente por anfíboles y epidota. (Anon, 2000).

Estos se caracterizan por:

1 - En las dunas el 94 % se encuentra representado por la clase de tamaño (0.25 + 0.06) mm, aproximadamente 4.5 % de (0.5 + 0.25) mm, y 1.5 % de la fracción (0.06 + 0.04) mm.

2 - Las dunas contienen aproximadamente 45 % y 54 % de minerales económicos y silicatos pesados respectivamente.

3 - La distribución aproximada de los minerales económicos es como sigue:

- Ilmenita: Representa el 25 % del concentrado y el 55 % de los minerales económicos.

- Magnetita: Representa el 16 % del concentrado y el 35 % de los minerales económicos.

- Granate: Representa el 2.5 % del concentrado y 6 % de los minerales económicos.

- Circón: Representa el 1% del concentrado y 2 % de los minerales económicos.

Para el tratamiento de estos minerales se utilizan métodos gravitacionales, separación electromagnética y medios densos para la fracción no magnética.

Como resultado del estudio geoquímico realizado por Eppinger y colaboradores a las arenas de tamaño de partícula menor de 0.84 mm de los ríos de Idaho Central, utilizando separación en medios densos para eliminar los minerales ligeros, principalmente cuarzo y feldespato y separación magnética, se obtuvo como resultado un concentrado magnético a 0.25 A que contiene magnetita e ilmenita principalmente y una fracción débilmente magnética a 1.75 A compuesta fundamentalmente por silicatos de ferromagnesio. La fracción no magnética contiene sulfuros, oro y otros metales nativos y algunos óxidos adicionales y silicatos. (Eppinger, et. al 2000).

Los minerales pesados más abundantes en los depósitos que están en el lado sur del Río St de Marys que divide Georgia y Florida son ilmenita, circón, epidota, rutilo, sillimanita, stautolita, leucoxeno, turmalina, kyanita, y hornblenda. De éstos, la ilmenita, el leucoxeno, rutilo y el circón son los minerales más importantes. Para el tratamiento de estas arenas se utilizan métodos gravitacionales, magnéticos y electromagnéticos de alta tensión. (Rogers, 2000).

De forma general los minerales pesados de significativo valor económico que se concentran en depósitos de arenas son separados por vía seca usando una

combinación de las técnicas magnética, electromagnéticas de alta tensión y electrostática, previamente se utilizan canales de espiral para eliminar fragmentos de cuarzo, feldespato y otros materiales ligeros, o sea, técnicas gravimétricas.

La combinación de los métodos magnéticos y electromagnéticos para el tratamiento del placer Mejías, permite obtener un concentrado de magnetita enriquecido con titanomagnetita y un preconcentrado de ilmenita, aunque este último debe estar contaminado con cromo debido a la presencia de espinelas cromíferas en el placer, ambas fases son débilmente electromagnéticas.

En ocasiones la utilización de las técnicas convencionales para el beneficio de algunas menas da lugar a concentrados de baja calidad, considerando como campo de aplicación la producción de pigmentos y la producción de consumibles para la soldadura: Ejemplo ilustrativo de este tipo de depósito son las magnetitas titaníferas de Minnesota y Wyoming (Finlay, et. al, 1983), esto se debe a la gran complejidad que presentan desde el punto de vista químico y mineralógico.

De igual manera ocurre en los depósitos de arena de minerales pesados de Murray Basin de Australia sur-oriental que se caracteriza por una fracción pesada que incluye 31% ilmenita, 9% rutilo, 12% leucoxeno y 13% circón, la mayoría de los minerales pesados valiosos están dentro del rango 38 a 75 micras. (Austpac Resources N.L b), 2000). En este caso la ilmenita contiene más del 60% de TiO_2 , y se encuentra de forma muy leucoxenisado, además estos depósitos contienen minerales tales como la cromita, granate e impurezas menores como uranio, torio y fósforo donde el uso de las técnicas convencionales de alta tensión y separación magnéticas por vías secas o húmedas en el procesamiento de este placer no es factible para obtener concentrados de ilmenita.(Csiro Reserch, 2000).

Si la concentración de estos minerales e impurezas es alta, el concentrado de ilmenita pierde prácticamente su valor, como se hace referencia anteriormente, esto puede evitarse con un proceso de tostación que provoca un incremento de la susceptibilidad magnética de la ilmenita, este aumento en la susceptibilidad magnética es causado por los cambios en morfología del grano que resulta de la interacción entre la ilmenita ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$) y hematita (Fe_2O_3) durante el proceso termal entre 800°C y 900°C . A estas temperaturas el hierro se difunde a la superficie del grano, produciéndose una magnetita artificial en la superficie. Esto produce un efecto pequeño en cualquier otro mineral en el concentrado, separándolos posteriormente utilizando un circuito magnético simple de separación magnética.

Este método es factible para la ilmenita fresca, o sea, donde la mayor parte del volumen de hierro está como óxido de hierro (II) (FeO) a diferencia de la ilmenita leucoxenisada, donde el hierro aparece fundamentalmente como óxido de hierro (III) (Fe_2O_3) debido a que en este proceso se mantiene una atmósfera oxidante para alcanzar buenos resultados, en este caso es necesario mantener un bajo potencial de oxígeno en el horno (Proceso ERMS de Austpac).

En estas condiciones se trataron muestras con 56% TiO_2 , 1.3% Cr_2O_3 y otro con 60% TiO_2 , 1.1% Cr_2O_3 y se obtuvo ilmenita con 61% TiO_2 , 0.15% Cr_2O_3 y 68% TiO_2 , 0.1% Cr_2O_3 respectivamente. (Winter, 1999; Veldhuizen, 2000; Austpac Resources N.L c, d, e, f, g), 2000; Sparrow, 2000).

De forma general, para incrementar la susceptibilidad magnética de algunas fases minerales como la ilmenita y lograr una marcada diferenciación de esta con respecto a otras fases minerales mediante la tostación magnetizante, esta puede realizarse tanto en hornos rotatorios como tratamiento por microonda; Este es un aspecto al que se debe prestar atención pues podría ser una alternativa para el tratamiento del placer objeto de estudio. A continuación se expone un ejemplo de aplicación de estos resultados.

Producto de estudios preliminares para el tratamiento del depósito Kwale, Kenya en África; que cuenta con una reserva de 140 millones de toneladas de arenas mineralizadas en las cuales los minerales económicos fundamentales son el rutilo, la ilmenita y el circón; se realiza una tostación previa a la separación magnética para producir una ilmenita con una calidad superior. El producto contiene más de 51% de dióxido del titanio. (Potvin JC, 1999). Además, en este concentrado los niveles de calcio y magnesio son bajos, así como otros óxidos de metales asociados. La calidad del rutilo y el circón exceden las normas comerciales de 97% dióxido del titanio y 66.3% ZrO_2 respectivamente, incrementando el potencial del depósito significativamente. (Tiomin Resources Inc, 1999)

Sin embargo, en el caso de los depósitos Ginkgo, Australia, la cromita aparece en forma de solución sólida con la ilmenita, por tal motivo la aplicación de este método no es eficiente y es necesario mezclar estos concentrados con otros de menor contenido para lograr la reducción del contenido de cromo (Bemax Resources NI, 2000).

La compañía CSIRO ha demostrado que con una sola etapa de tostación no se alcanzan buenos rendimientos si se tiene en cuenta que estos concentrados

constituyen la materia prima para la producción de pigmentos a través de procesos sulfato o cloruro, relacionando estos resultados con posibles asociaciones de fases mineralógicas (Sparrow, 2000).

Esta no es la única vía posible para mejorar la calidad de los concentrados, así lo demuestra la compañía, Lakefield Ontario al continuar las investigaciones iniciadas por la compañía Carpco la cual realizó estudios sobre las reservas minerales de Limon en el área del Colorado, en EE.UU, sobre la recuperación de minerales pesados combinando las técnicas de separación por gravedad y técnicas de separación magnéticas de alta intensidad, alcanzando recuperaciones en el orden del 27% para la ilmenita, sin embargo, este concentrado contenía impurezas como el cromo, el vanadio, uranio y torio dando lugar a un concentrado de baja calidad.

Las investigaciones realizadas por Lakefield Notario, utilizando otras técnicas para incrementar las recuperaciones alcanzadas, en este caso la combinación del deslame, separación gravitacional con espirales y la flotación selectiva de ilmenita y minerales de garnierita/circón, lograron obtener recuperaciones del 92,6% para la ilmenita y 96,4% para el circón, mejorando significativamente la calidad del producto con respecto a niveles aceptables de cromo, vanadio y uranio (Bergen, 2001).

Fan X, y colaboradores realizan un tratamiento a través de microondas previo a la flotación con el objetivo de mejorar la flotabilidad de la ilmenita. Después de un tiempo corto de exposición a la radiación de microonda la recuperación de ilmenita se incrementó aproximadamente en un 20%, al acelerarse la oxidación de iones Fe(II) a iones Fe(III) en la superficie de la ilmenita, esto produce un perfeccionamiento de la adsorción de oleato de sodio y por consiguiente mejora el comportamiento de la ilmenita en la flotación.(Fan, Kelly and Rowson, 2000).

Trabajos de la Universidad de Birmingham han mostrado que las recuperaciones y la calidad de los concentrados de ilmenita de arenas de arroyos en el circuito de la separación magnética pueden mejorarse después del tratamiento con microonda.

En ese trabajo se evalúa el efecto de la energía de microonda en las propiedades magnéticas de los minerales, prediciendo las alteraciones físicas y químicas que ocurren durante el calentamiento. Algunos minerales exhiben un cambio brusco en la susceptibilidad magnética después de la irradiación de microonda. Entre los minerales que mostraron aumento significativo se encuentran: calcopirita, ilmenita y wolframita y una disminución significativa de: bornita, magnetita y pyrrotina. Estos

cambios pueden facilitar la posibilidad de la recuperación de algunas de estas fases minerales de las menas complejas (Kingman y Rowson, 2000).

Para el tratamiento de placeres de forma general la utilización de la combinación de los métodos electrostático y magnético, se aplica con gran frecuencia debido a que las técnicas de flotación a pesar de obtener buenos resultados son mucho más costosas que la separación por métodos eléctricos.

Lo anterior se sustenta en estudios realizados para la concentración de minerales de titanio de los placeres de arroyos de Manisa-Demirci-Köseler y Gördes-Gördes utilizando métodos gravimétricos, eléctricos y magnéticos, los que dieron como resultado utilizando el primer método concentrados con un contenido de TiO_2 de 22.84% y 25.09% para muestras iniciales con contenidos de 1.46% y 5.30% y un por ciento en peso de 3.11% y 20.54% respectivamente, las recuperaciones de TiO_2 son de 49.01% y 82.58%. En el segundo caso, o sea, la combinación de los métodos electrostático-magnético y magnético, el concentrado de ilmenita obtenido tiene 40.18% - 42.54% TiO_2 y recuperaciones de 18.61% - 48.89%.

Es importante señalar que solo la combinación de diferentes técnicas daría lugar a concentrados de calidad permitiendo separar de manera eficaz las diferentes fases presentes.

Por todo lo planteado anteriormente, teniendo en cuenta que las características del placer Mejías están en correspondencia con algunos de los yacimientos antes mencionados, consideramos que para poder lograr una eficiente recuperación de los minerales pesados presentes en Mejías se deben aplicar combinaciones de métodos magnéticos y eléctricos o magnéticos y circuitos de flotación analizando en ambos casos la posibilidad de realizar una tostación magnetizante.

1.2.- Consideraciones sobre la génesis y las características generales del placer Mejías.

Los depósitos costeros de la región noreste de Cuba según los estudios realizados por (Díaz, 1996) se fundamentan sobre las siguientes premisas geológicas:

- Presencia del macizo ofiolítico Mayarí – Baracoa, el cual constituye la fuente principal de minerales pesados y resistentes.
- Presencia de la secuencia volcánica del arco insular cretácico, cuya composición es eminentemente básica.

- Desarrollo de los límites de la cuenca del río de Sagua de Tánamo (Subcuenca Río Miguel) de rocas metamórficas portadoras de minerales de titanio (rutilo y esfena).
- Existencias de potentes cortezas de meteorización sobre las rocas del complejo ofiolítico.
- Amplio desarrollo de la red hidrográfica (fundamentalmente de tipo dentrítica) que corta este macizo transportando grandes masas de material dentrítico hacia la costa del Océano Atlántico.
- Cercanía del macizo montañoso Nipe – Cristal – Baracoa a las costas del Océano Atlántico.
- Amplio desarrollo de playas, lo que evidenció un régimen estable en el perfil de la costa y óptimas condiciones hidrodinámicas para la concentración de los minerales pesados (predominio de rocas estables de tipos acumulativas).
- Ausencia de barreras arrecifales en las proximidades de las desembocaduras de los principales ríos y corrientes eólicas con dirección predominante noreste, permitiendo a las olas preparar el material del placer.
- El hallazgo de arenas negras de granos finos en la superficie de los sedimentos de la playa Mejías muy enriquecida en minerales pesados (magnetita, ilmenita, cromita, rutilo, circón, oro).

El mismo autor en el período del 1995 al 1997 aborda una serie de aspectos sobre este placer, entre las que podemos citar:

El placer Mejías presenta gran complejidad desde el punto de vista geológico pues en él están presentes diversas formaciones geológicas de diferentes edades portadoras de minerales que dan lugar a su heterogeneidad. Está ubicado a ambos lados de la desembocadura del Río Sagua, su cuerpo tiene forma de hoz y se extiende por más de 1500 m a todo lo largo de la costa; el ancho máximo del placer es de 350 m y la potencia media es de 0,75 m. El cuerpo mineral lo conforman numerosos lentes finos que no sobrepasan los 20 – 30 cm de espesor y tiene un volumen equivalente a 140 000 m³ para un total de recursos pronósticos de 320 000 t de arena y 130 000 t de minerales pesados, considerando peso volumétrico de 2,3

para la arena seca y un contenido de minerales pesados equivalente al 40%. (Díaz, et. al 1995, 1996, 1997).

1.3.- Antecedentes y estado actual del estudio de los placeres cubanos.

Entre 1987- 1989, el Instituto de Geología y Paleontología del MINBAS, realizó investigaciones temáticas en la región de Moa – Baracoa con la finalidad de: a) estudiar las características mineralógicas de las rocas del complejo ofiolítico b) caracterizar los flujos de dispersión mecánica para determinar áreas perspectivas con mineralización cromítica c) búsqueda de cromitas. Como resultado de esto se estableció la presencia de importantes concentraciones de minerales pesados; cromita, ilmenita y magnetita. (Morales y Rodríguez, 1988) reportan que los recursos hipotéticos de esta región ascienden a 91125 t de magnetita, 80241 t de cromita y 500 t de ilmenita.

Kulachkov, Díaz y Rodríguez establecieron la presencia en varios sectores de la costa de importantes zonas enriquecidas de magnetita, cromita, ilmenita con contenidos apreciables de rutilo, leucoceno y circón, entre otros. (Kulachkov, et. al, 1989)

Investigaciones en el sector de la desembocadura del río Sagua de Tánamo reportan la existencia de valiosos elementos como el titanio, vanadio, circonio, hierro, cromo, entre otros. Se realizó un estudio sobre la composición granulométrica del placer Mejías llegando a la conclusión del predominio de los granos finos menores de 0,2 mm, se realiza además una caracterización mineralógica semicuantitativa del placer y de la fracción (-0,2 + 0,1) mm donde se pone de manifiesto el enriquecimiento de algunas fases tales como la ilmenita, la cromita, entre otros y un empobrecimiento de otras como la picotita, hornblenda; se confirman además como fases principales en los depósitos costeros de playa Mejías la magnetita, ilmenita y cromita, pronosticando la existencia de más de 130 000 t de minerales pesados. Se estableció además que el cromo y el titanio de las fracciones electromagnéticas están asociados a las espinelas cromíticas y la ilmenita. Resulta interesante el hecho de que este mismo autor considera que el vanadio guarda una relación paragenética con las fases de magnetita, ilmenita y cromita. (Díaz, 1995)

Es necesario destacar que en este trabajo solo se hace énfasis en una clase de tamaño, (-0,2 + 0,1) mm que a su vez está incluida en la fracción menor de 0,2 mm que es la más representativa del placer, pero no se realiza la caracterización de toda la fracción ni de todo el placer.

Como resultado de los estudios sobre las particularidades de los concentrados pesados en el placer Mejías, dunas costeras, desembocadura del río Jiguaní, cuenca hidrográfica Santa Catalina, río Cañete y cuenca hidrográfica del río Yamanigüey se determinaron las particularidades de distribución de los minerales pesados, oro y platinoideos (Díaz, 1996), se retoman además los resultados comentados anteriormente y se concluye sobre los sectores más perspectivas de los estudiados desde el punto de vista económico, en este caso: La playa de Mejías, Desembocadura del río Jiguaní y las Dunas costeras de Sagua.

Díaz, junto a otros investigadores, realizaron un estudio detallado con la fracción (-0.2+0.08) mm, con el fin de determinar posibles áreas fuente, mecanismos de transporte y procesos postdeposicionales definiendo la composición mineral del placer, para lo cual sometieron la muestra a una separación con un imán

permanente inicialmente y luego a la fracción diamagnética se le realizó un análisis en un separador electromagnético, en este caso el separador magnético isodinámico de Franz para diferentes intensidades de corriente (0.1, 0.2, 0.4, 0.6 y 1) A. Entre los principales resultados de este trabajo aparece el análisis por difracción de Rx de las fracciones diamagnéticas que evidencian la presencia de ilmenita y cromita en todo el rango de intensidad de corriente estudiado. (Díaz, et. al, 1998).

La limitación fundamental de este trabajo radica en que solo se aborda una clase de tamaño, esto trae como consecuencia que no se pueda realizar el análisis de la distribución de las fases mineralógicas en todo el espectro granulométricas

Los trabajos de (Coello y Ramírez, 1996; Díaz, 1996) demuestran la factibilidad de obtención de concentrados de magnetita con contenidos de hierro superiores a 65% a partir de las arenas negras de la playa Mejías. Por otra parte, los análisis fraccionales realizados por (Coello y Ramírez, 1995, 1996; Díaz, 1996), de las arenas negras de Mejías y Río Cañete, establecen la posibilidad de obtener fracciones de intensidades de campo enriquecidas en ilmenita, cromita y otros minerales y en el segundo caso, prácticamente monoconcentrados de ilmenita. Esto presupone la posible beneficiabilidad de estos minerales, permitiendo la obtención de concentrados multiminerales para su aprovechamiento como materias primas para la producción de ferroaleaciones y productos destinados a la soldadura.

Como se puede apreciar los trabajos que abordan la temática del placer de la playa Mejías resultan parciales o preliminares debido a que no se realiza el estudio del placer de forma integral, ya sea por clases de tamaño o fracciones de intensidad de campo, aspecto que imposibilita el establecimiento de la distribución de las diferentes especies metálicas.

Ramayo, (1996) realiza un estudio de los concentrados pesados; la distribución de oro y otros minerales pesados de diferentes cuencas; Quesigua, Yamanigüey, Macaguanigua y Santa María; así como el depósito de la desembocadura del río Jiguaní; además de la caracterización geoquímica y mineralógica de los flujos mecánicos de dispersión y zonas de alteración hidrotermal, reportando la composición por fases en las fracciones fuertemente magnética, débilmente electromagnética, no electromagnética pesada y electromagnética ligera, constituyendo como fases fundamentales la ilmenita, magnetita y cromita.

Este trabajo orienta al estudio de otros depósitos por sus potencialidades, fundamentalmente el de la desembocadura del río Jiguaní teniendo en cuenta el predominio de las fases antes mencionadas.

A diferencia del placer Mejías en este caso la granulometría de sus arenas pudiera clasificarse como de fina a media si se tiene en cuenta que aproximadamente el 58% corresponde a la clase $(-0.5+0.2)$ mm y solo el 23% a la clase $(-0.2+0.1)$ mm, además la fracción débilmente magnética es la más representativa para todas las clases de tamaño seguida por la fracción fuertemente magnética, la que alcanza valores alrededor del 20%. En esta fracción se concentra la ilmenita.

Como resultado de la aplicación del método geoquímico a los concentrados pesados en el análisis metalogénico y la prospección geoquímica (Rodríguez, 1995) reporta como elemento más importante de la especialización geoquímica de los concentrados pesados del río Cañete el titanio, en correspondencia plena con la concentración elevada en los mismos de ilmenita proveniente de los extensos cuerpos de gabroides, que afloran en la cuenca fluvial de este río.

Rodríguez, (2000) realiza un estudio petrológico de las rocas ofiolíticas de la zona de Cayo Grande en el macizo Moa- Baracoa con el objetivo de realizar una caracterización de la mineralización ilmenítica que está presente en los cumulos máficos, en la zona de Cayo Grande en la cuenca hidrográfica del río Cañete. Como resultado se obtuvo que la mayor concentración de la ilmenita aparece en la gabronorita, con una composición promedio de TiO_2 de 49,74%, FeO 40.94%, MnO 3,77% y aproximadamente 0,09% de MgO; además la ilmenita aparece en forma de microcristales alotriomórficos siguiendo los planos de exfoliación de los clinopiroxenos y en la mayoría de los casos se encuentra de forma alterada a leucoxeno.

Estudios realizados plantean que la concentración de ilmenita en el río Jiguaní (Díaz, 1996; Ramayo, 1996) y en el río Cañete (Rodríguez, 2000) se debe a que en estas cuencas se desarrollan las secuencias de rocas básicas características del complejo cumulativo de la asociación ofiolítica en plena correspondencia con los planteamientos realizados por Díaz sobre la génesis de los placeres de la región.

En un estudio realizado sobre los principales rasgos de distribución de oro en los depósitos exógenos de la región Sagua – Moa donde se incluye el río Quesigua y el placer de la playa Mejías, se plantea que en este último el oro se encuentra en forma

de pepitas de hasta 150 micras, este se concentra además en la fracción menor de 0.08 mm (Vila, 1999).

En investigaciones preliminares realizadas por (Puchols, et. al, 2001) y sus colaboradores, obtuvieron a partir de las arenas negras de Mejías, una ferroaleación multicomponente con contenidos apreciables de V (1,20 %), Ti (3.6 %) y otros metales importantes.

1.4. - Composición mineralógica del placer.

La composición mineralógica del placer es bastante compleja si se tienen en cuenta los aspectos señalados con anterioridad.

Los contenidos de las principales fases del placer reportados por Días (1995,1996) se muestran a continuación:

Magnetita – 22,36%, Ilmenita –13,74%, Cromita – 8,66%, Piroxenos – 15,6%, Epidota – 10,3%, Anfíboles – 7,5%, Óxidos e hidróxidos de hierro – 5,9%, Cuarzo – 5,3%, Feldespatos – 4,3%, Granates – 0,3%, Esfena – 0,19%, Rutilo – 0,16%, Circón – 0,03%, Oro – 0,00006% entre otros.

La magnetita se concentra en la fracción fuertemente magnética, es importante destacar además que este autor manifiesta que en esta fracción está presente la titanomagnetita o maghemita ulvita en la cual es frecuente la sustitución isomorfa del titanio por vanadio aspecto de gran importancia, pues se prevé la utilización de este concentrado para la producción de ferroaleaciones, esta fase también se concentra en esta fracción.

La ilmenita y la cromita se concentran en la fracción débilmente magnética en el rango estudiado por Díaz, et. al, (1998) (0.1, 0.2, 0.4, 0.6 y 1) A para la fracción (-0.2+0.08) mm, ambas fases mineralógicas se encuentran presentes en todas las clases de intensidad de corriente. A juzgar por estos resultados la separación de estas fases debe realizarse utilizando técnicas de flotación o técnicas de separación electrostática.

Otras fases mineralógicas como el rutilo, esfena, circón y oro se concentran en la fracción no electromagnética, la cual puede ser tratada en líquidos densos separando el oro en la fracción pesada.

1.5.- Fundamento del método de análisis fraccional.

La selección de un método para el tratamiento de placeres es de gran importancia,

para ello el conocimiento del comportamiento de las fases mineralógicas de manera independiente frente a las diferentes técnicas de enriquecimiento es vital, sin embargo el enfoque clásico en la investigación de la beneficiabilidad de los minerales; curva de beneficiabilidad y contraste de propiedades físicas, físico-químicas u otras; no brinda toda la información necesaria para el pronóstico y diseño tecnológico en el tratamiento de menas complejas.

Esto se fundamenta en el hecho de que el índice de contraste; desviación ponderada relativa del contenido del componente útil; y la desviación media probable (I , E_p) como parámetros para medir el grado de beneficiabilidad pueden conducir a errores, pues menas con distintos grados de beneficiabilidad $\gamma(\xi)$ y $\beta(\xi)$ pueden tener igual índice de contraste. Además, Wills manifiesta que la desviación media probable por lo general no se usa para la evaluación de la eficiencia de operaciones unitarias como las mesas de concentración, canales helicoidales, separadores cónicos, entre otros, debido a la gran cantidad de variables operacionales que pueden afectar la eficiencia de la separación. (Wills, 1992). Además, en ambos casos no ofrecen información sobre las características de la materia prima mineral o producto de la separación.

En cuanto a las curvas de beneficiabilidad si bien ellas constituyen una vía eficiente para la evaluación de la separación de menas cuyos minerales se diferencian en una sola propiedad física ξ ; densidad ρ , susceptibilidad magnética χ y otras; cuando se trabaja con minerales complejos o multicomponentes resulta extremadamente complejo. Tijonov demostró matemáticamente la posibilidad de cálculo de los parámetros de estas curvas a partir las funciones de distribución diferencial másica y de contenido ($\gamma(\xi)$ y $\beta(\xi)$) (Tijonov, 1984).

Según Coello, et. al, (1998) cuando se trabaja con menas complejas es necesario tener en cuenta que:

- Las partículas minerales se diferencian no por una propiedad física, sino por varias, lo cual implica el uso de diferentes métodos de beneficio.
- Las partículas minerales son portadoras no solo de un mineral útil, sino que lo son de varios componentes útiles.

En el trabajo citado anteriormente Coello y colaboradores demuestran la factibilidad del método propuesto por Tijonov. El estudio se realiza para el mineral laterítico que de igual forma que el placer de la playa de Mejías se caracteriza por la diversidad de

minerales presentes, esto permite realizar consideraciones sobre ciertas analogías, por ejemplo, la presencia de un elemento en diferentes fases mineralógicas tales como, en el caso de la laterita el níquel se presenta en la gohetita, la maghemita entre otras y el titanio en la titanomagnetita, ilmenita, rutilo, esfena y otros en el placer de la playa de Mejías, estas fases son portadoras de diferentes elementos y se diferencian por varias propiedades físicas como son la densidad, susceptibilidad magnética, electroconductibilidad y otras.

Las funciones de distribución diferencial másica y de contenido ($\gamma(\xi)$ y $\beta(\xi)$) son un medio sencillo, necesario y suficiente para la caracterización de cualquier materia prima mineral o producto por tanto, coincidimos con estos investigadores en que cualquier otro método es insuficiente o excesivamente complicado.

Las funciones de distribución diferencial másica; $\gamma(\xi)$ y de contenido; $\beta(\xi)$ no sólo permiten el cálculo de los indicadores clásicos del beneficio, sino que también contribuyen a realizar el pronóstico de los índices tecnológicos de cualquier esquema de beneficio, independientemente de la propiedad de separación.

La función de distribución diferencial másica; $\gamma(\xi)$; de las partículas de cualquier mezcla de cualquier propiedad física (ξ), es aquella función para la cual el producto $\gamma(\xi) d\xi$ es igual a la fracción másica de cualquier intervalo elemental $[\xi, \xi + d\xi]$ y su incremento $d\xi$; la función $\gamma(\xi)$ no es más que la distribución diferencial de la densidad de distribución del sólido en las fracciones elementales. (Tijonov, 1984).

Por su parte, la función $\beta(\xi)$ es una función continua del conjunto de valores de los contenidos medios del componente útil o nocivo en cada fracción i $[\xi_i, \xi_{i+1}]$ cuando $\Delta \xi \rightarrow 0$ y $n \rightarrow \infty$ (número de fracciones) en el intervalo $[\xi_{\min}, \xi_{\max}]$.

Si se denota mediante $\gamma(\rho)$ la distribución de probabilidades de la variable ρ se tendrá que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \gamma(\rho) d\rho = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \gamma(\rho) d\rho = 1 \quad (1)$$

$$y \quad \gamma(\rho_o) = \frac{1}{\Delta\rho} \lim_{\Delta\rho \rightarrow 0} P(\rho_o < \rho < \rho_o + \Delta\rho)$$

Donde $P(a < \rho < b)$ es la probabilidad de que el parámetro ρ esté confinado en el intervalo (a, b) . La función γ permite caracterizar la distribución de las partículas

del mineral inicial de acuerdo con la propiedad física ρ . El valor $\gamma(\rho)d\rho$ expresa la proporción de la fracción $[\rho, \rho+d\rho]$ con respecto al mineral inicial.

La función $\varepsilon(\rho)$ es la característica principal del separador; conociendo $\varepsilon(\rho)$ y la distribución de probabilidades $\gamma(\rho)$ se pueden predecir los resultados de la separación, las concentraciones del mineral útil en el concentrado y en las colas y otros parámetros necesarios para evaluar la efectividad del beneficio.

Además de la distribución de probabilidades $\gamma(\rho)$ se necesita conocer la distribución de componente útil en la mena inicial.

El por ciento de partículas que pasan al concentrado con respecto a la masa total es igual a:

$$\bar{\gamma}_{\text{conc}} = 100 \cdot \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \gamma(\rho) \varepsilon(\rho) d\rho \quad (2)$$

Mientras que el por ciento que pasa a las colas es

$$\bar{\gamma}_{\text{cola}} = 100 \cdot \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \gamma(\rho) (1 - \varepsilon(\rho)) d\rho \quad (3)$$

La concentración del componente útil en el mineral inicial, en las colas y en el concentrado final se obtiene a través de:

$$\bar{\beta}_{\text{inic}} = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \beta(\rho) \gamma(\rho) d\rho \quad (4)$$

$$\bar{\beta}_{\text{conc}} = \frac{100}{\bar{\gamma}_{\text{conc}}} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \beta(\rho) \varepsilon(\rho) \gamma(\rho) d\rho \quad (5)$$

$$\bar{\beta}_{\text{cola}} = \frac{100}{\bar{\gamma}_{\text{cola}}} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \beta(\rho) (1 - \varepsilon(\rho)) \gamma(\rho) d\rho \quad (6)$$

El sentido de estas ecuaciones queda claro si se toma en cuenta que el número $\gamma(\rho)d\rho$ es igual a la proporción en masa de la fracción de partículas $[\rho, \rho+d\rho]$ de la materia prima mineral en la alimentación del separador. El valor $\varepsilon(\rho)\gamma(\rho)d\rho$ es igual a la proporción de la fracción $[\rho, \rho+d\rho]$ que pasó al concentrado. La suma de estas proporciones equivale a la cantidad de todo el concentrado con respecto a la alimentación inicial, la multiplicación por 100 permite expresar este valor en por ciento.

Los valores $\beta(\rho)\gamma(\rho)d\rho$ y $\varepsilon(\rho)\gamma(\rho)\beta(\rho)d\rho$ son iguales a la masa del componente útil de la fracción $[\rho, \rho+d\rho]$ en la alimentación y en el concentrado respectivamente. La suma a través de todas las posibles fracciones expresa la masa del componente útil en todo el concentrado; la división por la salida $\bar{\gamma}_{conc}$ permite encontrar el valor medio de la concentración útil $\bar{\beta}_{conc}$.

De esta manera los parámetros de partida resultan las fracciones $\beta(\rho)$ y $\gamma(\rho)$ que caracterizan las partículas de la materia prima mineral por sus propiedades físicas y por el contenido de componente útil en ellas. Estos valores junto a $\varepsilon(\rho)$, que resulta la característica principal del equipo de beneficio, permiten calcular los índices usuales del beneficio: la salida $\bar{\gamma}_{conc}$, el contenido $\bar{\beta}_{conc}$ y la recuperación $\bar{\varepsilon}_{conc}$.

Entonces las fórmulas para calcular $\bar{\gamma}_{conc}$, $\bar{\beta}_{conc}$ y $\bar{\varepsilon}_{conc}$ se presentarán de la siguiente manera:

$$\bar{\gamma}_{conc} = 100 \int_{\xi_{min}}^{\xi_s} \gamma(\xi) d\xi ; \quad (7)$$

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\bar{\gamma}_{conc}} \int_{\xi_{min}}^{\xi_s} \beta(\xi) \gamma(\xi) d\xi ; \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\gamma}_{conc} \cdot \bar{\beta}_{conc}}{\bar{\beta}_{inic}} \quad (9)$$

Si el proceso de separación tiene en cuenta más de una propiedad física o factor, éste se expresa mediante un vector $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ de $\mathfrak{R}^n$ las fórmulas correspondientes serian entonces:

$$\bar{\gamma}_{conc} = 100 \int \dots \int \gamma(\xi_1, \dots, \xi_n) \varepsilon(\xi_1, \dots, \xi_n) d\xi_1, \dots, d\xi_n \quad (10)$$

$$\bar{\beta}_{inic} = \int \dots \int \beta(\xi_1, \dots, \xi_n) \gamma(\xi_1, \dots, \xi_n) d\xi_1, \dots, d\xi_n \quad (11)$$

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\bar{\gamma}_{conc}} \int \dots \int \beta(\xi_1, \dots, \xi_n) \varepsilon(\xi_1, \dots, \xi_n) \gamma(\xi_1, \dots, \xi_n) d\xi_1, \dots, d\xi_n \quad (12)$$

$$\bar{\beta}_{cola} = \frac{100}{\bar{\gamma}_{cola}} \int \dots \int \beta(\xi_1, \dots, \xi_n) [1 - \varepsilon(\xi_1, \dots, \xi_n)] \gamma(\xi_1, \dots, \xi_n) d\xi_1, \dots, d\xi_n \quad (13)$$

donde la región de integración es la región de valores permisibles del vector $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$

En el caso más general, o sea para el beneficio real, la característica de separación fundamental del equipo $\varepsilon_{\text{conc}}(\xi)$ queda expresado por las ecuaciones:

$$\bar{\gamma}_{\text{conc}} = 100 \int_{\xi_{\min}}^{\xi_s} \gamma(\xi) \varepsilon_{\text{conc}}(\xi) d\xi \approx 100 \sum_{i=1}^n \gamma(\xi_i) \varepsilon_{\text{conc}}(\xi_i) \Delta \xi_i ; \quad (14)$$

$$\bar{\beta}_{\text{conc}} = \frac{100}{\bar{\gamma}_{\text{conc}}} \int_{\xi_{\min}}^{\xi_s} \beta(\xi) \gamma(\xi) \varepsilon_{\text{conc}}(\xi) d\xi \approx \frac{100}{\bar{\gamma}_{\text{conc}}} \sum_{i=1}^n \gamma(\xi_i) \beta(\xi_i) \varepsilon_{\text{conc}}(\xi_i) \Delta \xi_i ; \quad (15)$$

De igual manera en estas fórmulas se considera que el número $\gamma(\xi)d\xi$ es equivalente a la porción (masa) de la fracción estrecha de las partículas $[\xi, \xi+d\xi]$ del material en la alimentación del equipo de beneficio, y el número $\gamma(\xi)\varepsilon_{\text{conc}}(\xi)d\xi$ equivale a la parte de la fracción $[\xi, \xi+d\xi]$, que pasa al concentrado, la suma de estas fracciones representa la parte de todo el concentrado en comparación con la alimentación inicial, y la multiplicación por 100 permite determinar la salida del concentrado en por ciento. Los números $\gamma(\xi)\beta(\xi)d\xi$ y $\gamma(\xi)\beta(\xi)\varepsilon_{\text{conc}}(\xi)d\xi$ equivalen a la masa del componente que interesa del metal correspondiente a la fracción estrecha $[\xi, \xi+d\xi]$ de la unidad de masa (1 kg) en la alimentación y en el concentrado.

La suma de todas las fracciones representa la masa del componente útil en el concentrado; la división por la salida del concentrado γ_{conc} permite calcular el contenido promedio del componente útil en el concentrado $\bar{\beta}_{\text{conc}}$. Para las colas, las fórmulas son análogas con una diferencia: $\varepsilon_{\text{colas}}(\xi) = 1 - \varepsilon_{\text{conc}}(\xi)$, de este modo las funciones iniciales son $\gamma(\xi)$ y $\beta(\xi)$; funciones de distribución másica y de contenido respectivamente, las que a su vez caracterizan las partículas de la materia prima mineral, y la función $\varepsilon_{\text{conc}}(\xi)$ es la característica fundamental de separación del aparato de beneficio.

Sobre los símbolos que representan los parámetros clásicos del beneficio: salida $\bar{\gamma}_{\text{conc}}$, contenido $\bar{\beta}_{\text{conc}}$ y extracción $\bar{\varepsilon}_{\text{conc}}$ se coloca un guión para diferenciarlos de las funciones de distribución.

Conclusiones parciales

1. En el tratamiento de los depósitos de arenas de playas se utiliza la combinación de técnicas gravitacionales y técnicas de separación electrostática y magnéticas de alta tensión, en algunas ocasiones en dependencia de las características mineralógicas del placer se utilizan métodos de flotación, ya sea para disminuir los contenidos de minerales radioactivos o cuando los contenidos de cromo son muy elevados, en este caso también se realizan procesos de tostación previos a la separación magnética.
2. La presencia de sectores enriquecidos potencialmente en minerales pesados; magnetita, ilmenita y cromita; y los resultados fraccionales preliminares realizados presupone la posibilidad del beneficio de estos minerales, permitiendo la obtención de concentrados multiminerales para su aprovechamiento como materias primas para la producción de ferroaleaciones y multicomponentes destinados a la soldadura.
3. La utilización del enfoque fraccional considerado dentro de la Teoría de separación propuesta por Tijonov es el método más adecuado para realizar el estudio del placer Mejías.

Capítulo 2. Métodos y materiales.

Introducción.

El desarrollo de toda investigación necesita de herramientas para poder arribar a buenos resultados. La correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos, es por eso que en esta investigación se ha sido minucioso en la toma de muestra y la aplicación de los métodos de análisis granulométrico, separación magnética y métodos de análisis químicos modernos, así como el tratamiento de los resultados experimentales.

2.1.-Toma y preparación de la muestra.

Para realizar el estudio se tomó una muestra representativa del placer de la playa Mejías. Para la selección de los puntos de muestreo se utilizó el método de puntos, aplicando el mismo a toda la parte frontal del placer, ubicando estos a una distancia de 20 m entre cada uno. El volumen de muestra tomada en cada punto fue de 1,5 a 2 litros hasta completar una muestra total de 80 kg.

Esta muestra fue sometida a un proceso de homogeneización y cuarteo riguroso, empleando el método del anillo y el cono según se muestra en la figura No. 1

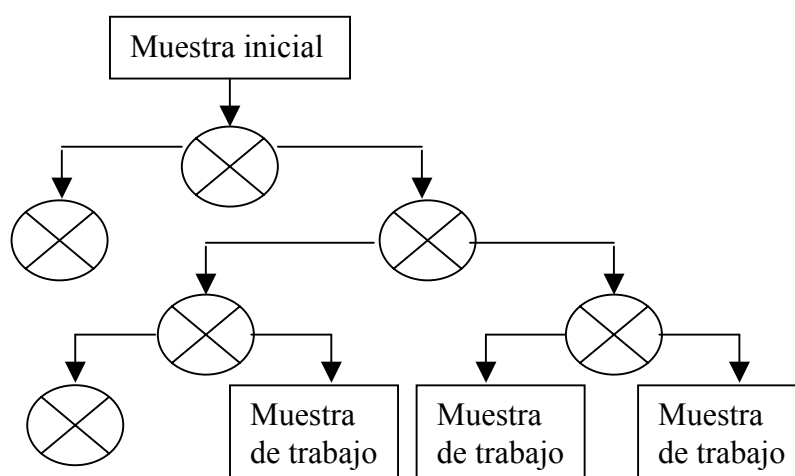


Fig No.1. Esquema de preparación de muestra.

Como resultado de este proceso se seleccionaron tres muestras de 10 000 g cada una considerando el diámetro máximo de las partículas y la reserva necesaria para el desarrollo de los experimentos.

2.2. - Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico constituye el elemento básico para la caracterización granulométrica de la mena objeto de estudio, este análisis se realizó por vía seco – húmeda, seleccionando un juego de tamices basados en la serie de Taylor $\sqrt[4]{2}$ (0.5;

0.42; 0.35; 0.30; 0.25; 0.217; 0.177; 0.15; 0.125) mm y los trabajos realizados por Coello y Díaz, utilizándose los siguientes tamices (0.5; 0.4; 0.315; 0.25; 0.21; 0.125) mm.

Las tres muestras fueron tamizadas inicialmente con un tamiz de 0,5 mm con el objetivo de eliminar fundamentalmente restos de corales, raíces y arbustos que se concentran en esta fracción que a se vez constituyen las colas. A continuación se muestra en la figura No. 2 el esquema de trabajo.

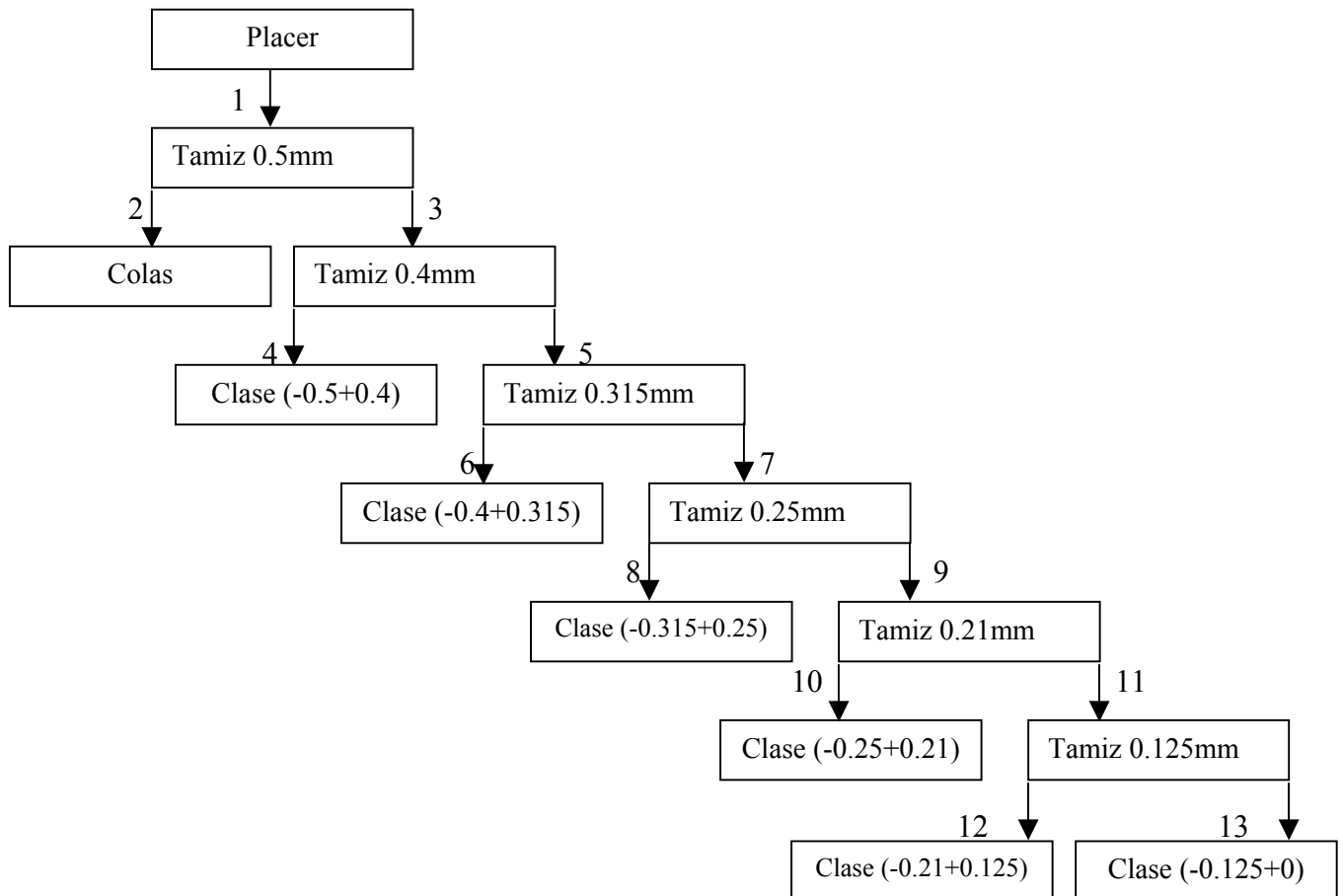


Fig No. 2. Esquema de trabajo para el análisis granulométrico.

2.3.- Separación magnética.

El proceso de separación magnética permite separar fases minerales fuertemente magnéticas tales como la magnetita y la titanomagnetita de minerales débilmente magnéticos y minerales débilmente magnéticos cuando existe una notable diferencia de las susceptibilidades magnéticas entre ellas, en algunos casos se puede realizar una tostación magnetizante con el objetivo de incrementar la susceptibilidad magnética de determinada fase mineral propiciando su separación.

En este caso la selección de las intensidades del campo magnético a utilizar en el análisis magnético estuvo fundamentada en las características de las fases minerales que componen el placer y estudios realizados por (Coello, Ramírez, 1995; Díaz, 1995, 1996). Como resultado la muestra fue sometida inicialmente a la separación con un imán permanente donde se obtuvo una fracción fuertemente magnética y una no magnética.

Luego a la fracción no magnética se le realizó un análisis magnético variando la intensidad de corriente 0.5, 1.5 y 3 A con el objetivo de realizar el estudio a diferentes intensidades de campo magnético, las muestras suministradas a cada prueba fue la fracción débilmente electromagnética obtenida en la intensidad de corriente que le antecede, como se observa en la figura No. 3.

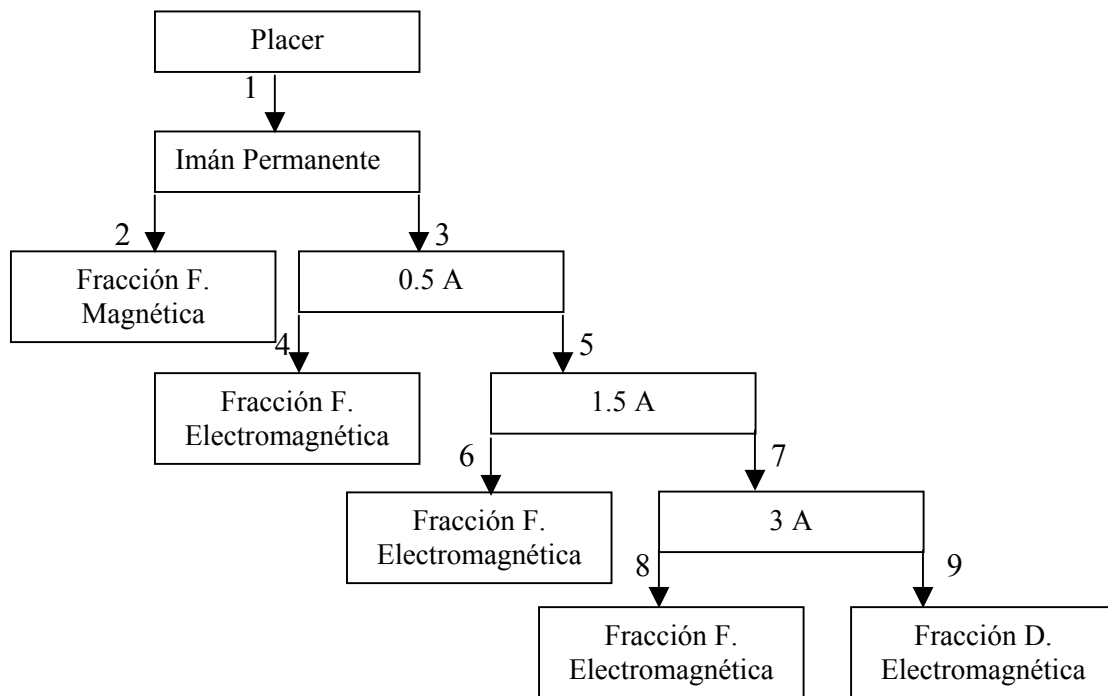


Fig No. 3. Esquema de trabajo para el análisis magnético.

La separación electromagnética se realizó en un equipo con las siguientes características:

- Separador electromagnético de rodillo por vía seca de marca ЭБС 138 Т con alimentación inferior
- Rodillo de 100mm de diámetro y 80mm de longitud
- Intensidad del campo magnético hasta 950 k A / m
- Corriente en el devanado varía hasta 4 A

- Peso del separador: 149 Kg
- Las dimensiones exteriores son las siguientes:
 1. Longitud ----- 900 mm.
 2. Ancho ----- 520 mm.
 3. Altura ----- 545 mm.

2.4.- Análisis de separación magnética por clases de tamaño.

Para el análisis de la combinación de las dos propiedades de separación estudiadas; tamaño de partícula e intensidad de corriente se realizó el análisis magnético descrito en el epígrafe anterior para las 6 clases de tamaño, obtenida durante el análisis granulométrico de la muestra inicial, según se muestra en la fig No. 4.

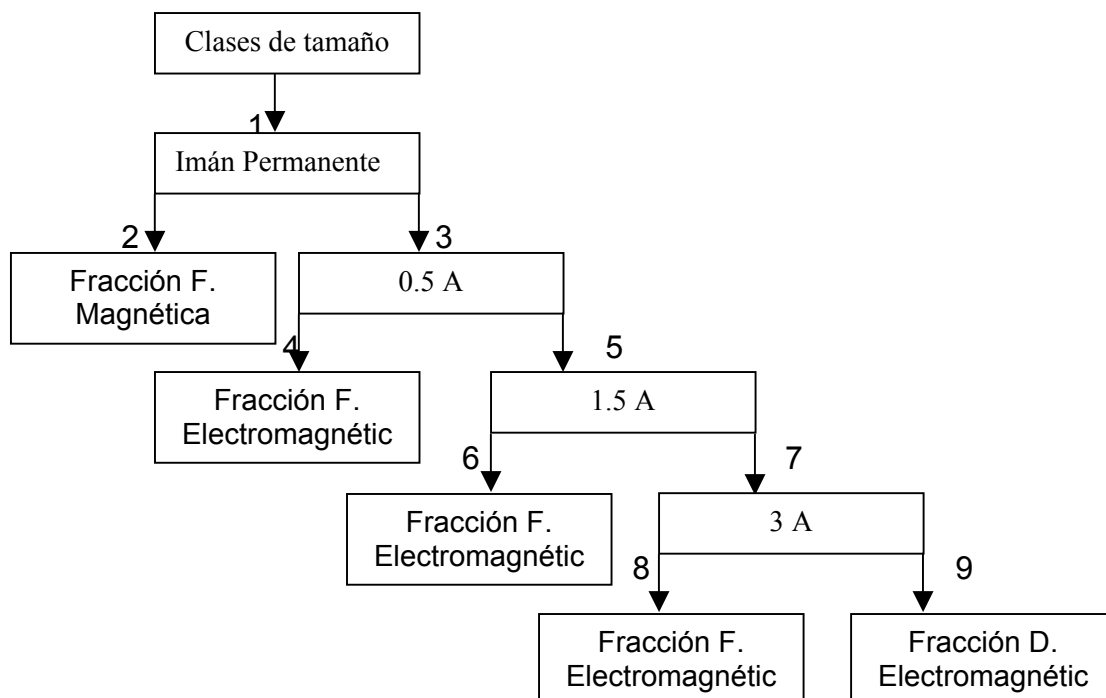


Fig No. 4. Esquema de trabajo para el análisis magnético por clases de tamaño.

2.5.- Análisis químico.

Con el objetivo de determinar el comportamiento de los diferentes elementos químicos de interés se sometió a análisis químico la muestra inicial, las fracciones de tamaño producto del análisis granulométrico y las fracciones obtenidas en la separación magnética, utilizando la técnica de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP).

Estos análisis fueron realizados en el laboratorio del Centro de Investigación de la Laterita (CIL).

Las características técnicas del equipo utilizado son las siguientes:

Firma: Jobin Yvon, Francia.

Modelo: JY 124 Secuencial.

Generador de alto voltaje: 6 kW.

Distancia focal: 700 mm

Se realizó un análisis estadístico aplicando el método de regresión a los resultados experimentales obtenidos determinándose las funciones de distribución diferencial másica y de contenido tanto por el tamaño de la partícula como por la intensidad del campo magnético, así como la combinación de estos.

2.6.- Tratamiento de los resultados.

Una vez obtenido los resultados experimentales se procedió al tratamiento de estos, luego de la limpieza de los datos.

Para el análisis granulométrico y magnético se determinó la característica sumaria o acumulativa, a partir de la cual se obtuvo el D_{80} para el caso del análisis granulométrico. En el estudio de la combinación de las propiedades; tamaño de partícula e intensidad de corriente al igual que en los análisis anteriores se realizó una valoración del comportamiento de las clases y de los óxidos objeto de estudio en el placer.

Basados en el enfoque fraccional contenido en la teoría de Tijonov, cuyo fundamento aparece en el capítulo anterior, se determinaron las funciones de distribución másica y de contenido para cada propiedad de separación de forma independiente y la combinación de ellas con ayuda de diferentes software; Microsoft Excell, Tierra 2.0 B, Origin 4.1 y Matlab 6.0. Se realizó además el análisis de regresión y el análisis de varianza para los modelos obtenidos a través de la prueba de Fisher.

Conclusiones parciales.

1. Los métodos de análisis escogidos para el estudio de las propiedades de separación están fundamentados a partir de la necesidad de la descripción y caracterización del objeto de estudio, para definir las principales regularidades del placer.
2. Los métodos experimentales de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental y equipamiento novedoso para el desarrollo de los análisis químicos.
3. A través de la utilización del enfoque fraccional se pueden obtener los modelos matemáticos que describen las funciones de distribución másica y de contenido que permiten a su vez profundizar en la caracterización de las arenas negras del placer mejías.

Capítulo 3. Análisis y discusión de los resultados.

Introducción.

El estudio de las características físicas – mineralógicas constituye una etapa imprescindible del conocimiento en la caracterización de las arenas negras del yacimiento Mejías debido a que ello aportaría la información necesaria para la obtención de concentrados de minerales útiles que tienen enmascarados elementos metálicos raros de gran valor industrial tales como el Ti, y V, a partir de los cuales podrían desarrollarse procedimientos de obtención de ferroaleaciones de multicomponentes.

3.1. Resultados del análisis químico de la muestra inicial.

En la tabla No. 1 se muestran los resultados de los análisis químicos de algunos elementos tanto en su forma metálica como óxidos de la muestra inicial.

Tabla No. 1: Composición química de la muestra inicial (β).

Contenido de los elementos, %					
Fe	V	Ti	Cr	Si	Al
28.73	0.255	6.195	7.84	6.79	4.94
Fe_3O_4	V_2O_5	TiO_2	Cr_2O_3	SiO_2	Al_2O_3
39.647	0.455	10.325	11.445	14.53	9.34

3.2. - Resultados del análisis granulométrico.

A continuación se muestran los resultados del análisis granulométrico, a través de los cuales se puede corroborar los resultados reportados por Díaz, (1995, 1996), además estos datos constituyen la base para obtener las funciones de distribución másica por el tamaño de la partícula.

3.2.1. Características sumarias del análisis granulométrico.

Como se muestra en la tabla No. 2 es evidente que existe un predominio de los granos finos, considerando que a la clase menor de 0.21 mm corresponde alrededor del 78 %.

Tabla No. 2. Resultados experimentales del análisis granulométrico.

Clases de tamaño (mm)	Masa (g)	Salida, γ (%)	Salida acumulativa, $\sum_{i=1}^n \gamma_i, \%$	Salida acumulativa, $\sum_{i=1}^n \gamma_i, \%$
-0,5 +0,4	65,85	0,66	0,66	100
-0,4 -0,315	297,03	2,98	3,64	99,34
-0,315 +0,25	795,61	7,97	11,61	96,36
-0,25 +0,21	1026,04	10,28	21,89	88,39
-0,21 +0,125	5289,17	52,99	74,88	78,11
-0,125 +0	2507,73	25,12	100	25,12

En correspondencia con lo antes planteado en estas curvas Fig No. 5 se puede apreciar que el D_{80} prácticamente coincide con el tamaño de partícula 0,21mm.

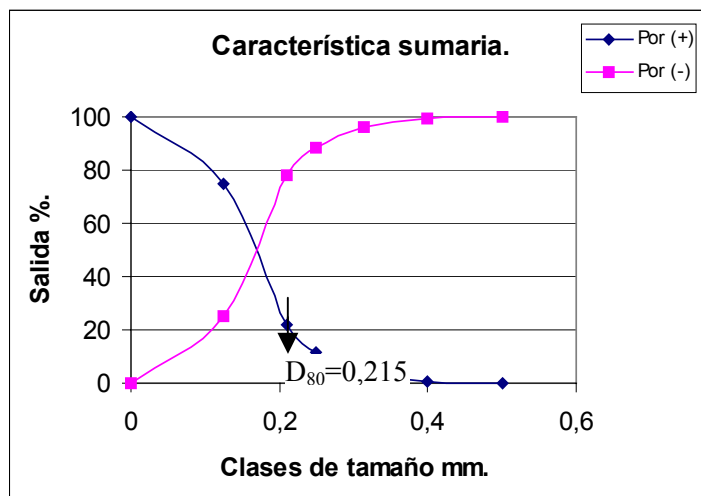


Fig. No. 5 Curvas características sumarias.

3.2.2.- Análisis fraccional másico según el tamaño de las partículas.

Los resultados del análisis granulométrico se pueden apreciar a través de la función de distribución másica $\gamma(\ell)$ en la Tabla No. 3, teniendo en cuenta en este caso como propiedad de separación el tamaño de las partículas.

Tabla No. 3. Resultados experimentales de la función de distribución másica $\gamma(\ell)$.

Clases de tamaño, mm	Tamaño de partícula, ℓ , mm	Magnitud del intervalo de clase, $\Delta\ell$, mm	$\gamma(\ell)$, 1/mm	$\gamma(\ell) \cdot \Delta\ell$
-0,5 +0,4	0.4500	0,100	0.0660	0.0066
-0.4 +0.315	0.3575	0.085	0.3506	0.0298
-0.315 +0.25	0.2825	0.065	1.2261	0.0797
-0.25 +0.21	0.2300	0.040	2.5700	0.1028
-0.21 +0.125	0.1675	0.085	6.2341	0.5299
-0.125 +0	0.0625	0.125	2.0096	0.2512

Se verifica el incremento del valor de la función con la disminución del tamaño de la clase granulométrica, aclarando que para la fracción (- 0.125 + 0) mm este disminuye bruscamente. Un aspecto de significativa importancia radica en el predominio de la fracción (-0.21 + 0.125) mm.

A continuación se expone el modelo que describe la función de distribución másica $\gamma(\ell)$ que caracteriza la mena tomando como propiedad de separación el tamaño de la partícula.

$$\bar{\gamma}_i(l) = \int_{0mm}^{0.5mm} (-0.2316 + 0.1132/4(l - 0.1541)^2 + 0.0168)dl$$

Como se aprecia en la figura No. 6 existe gran similitud en el comportamiento de la función de distribución $\bar{\gamma}_i(l)$ para todas las clases de tamaño.

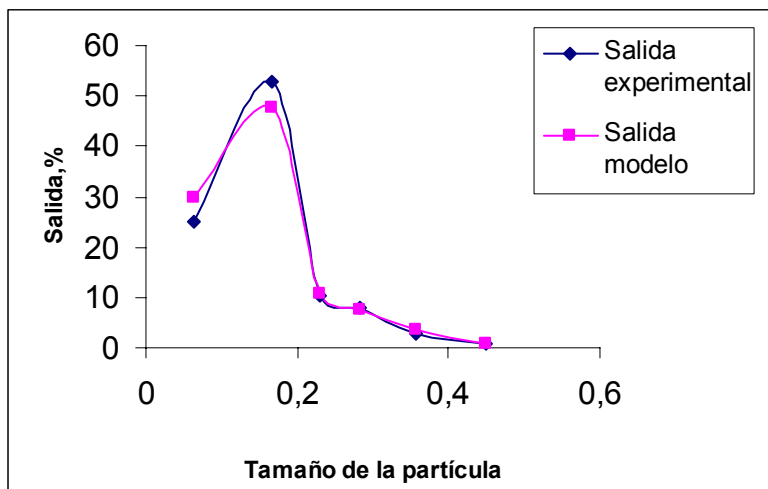


Fig No.6. Comportamiento de $\bar{\gamma}_i(l)$ en el experimento y en el modelo.

Esto puede comprobarse a través de la siguiente tabla, donde pueden observarse los valores que toma $\bar{\gamma}_i(l)$ para el modelo y experimentalmente para los diferentes intervalos de tamaño estudiados, en ella se plasma además el coeficiente de correlación múltiple que es igual a 0.9997, en cuanto al análisis de varianza para un 95 % de confianza el Fisher calculado es mucho mayor que el tabulado, lo cual evidencia la confiabilidad y reproducibilidad del modelo obtenido.

Tabla No.4. Estadísticas de la regresión para $\bar{\gamma}(l)$.

Estadísticas de la regresión		Clases de tamaño, mm	$\bar{\gamma}_i(l)$ para el modelo	$\bar{\gamma}_i(l)$ experimental
Coeficiente de correlación múltiple	0,9997	-0,5 +0,4	0,0768	0.0660
		-0.4 +0.315	0,3892	0.3506
		-0.315 +0.25	1,1361	1.2261
Análisis de varianza		-0.25 +0.21	2,6090	2.5700
F calculado	8958,1889	-0.21 +0.125	6,2297	6.2341
Valor crítico de F	7,4711E-08	-0.125 +0	2,0156	2.0096

3.2.3.- Análisis fraccional de contenido según el tamaño de las partículas

En la tabla No. 5 aparece la función de distribución de contenido de los elementos objeto de estudio, teniendo como propiedad de separación el tamaño.

Tabla No. 5. Función de distribución de contenido por el tamaño del grano. $\beta(l)$, %.

Clases de tamaño (mm)	Tamaño de partícula, ℓ , mm	Composición química, %					
		Fe ₃ O ₄	V ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
-0,5 +0,4	0.45	9.887	0.052	1.025	0.895	42.31	10.925
-0,4 -0,315	0.3575	13.024	0.100	2.590	3.132	39.841	11.985
-0,315 +0,25	0.2825	19.281	0.182	4.732	7.125	34.405	12.319
-0,25 +0,21	0.23	27.035	0.289	7.387	12.315	25.079	12.378
-0,21 +0.125	0.1675	37.964	0.402	8.625	13.719	18.708	11.287
-0,125 +0	0.0625	64.767	0.704	14.850	13.061	7.084	7.334
Total		41.180	0.437	9.540	12.596	18.351	10.531

Como se puede observar en la tabla anterior existe una tendencia similar con respecto a los óxidos de hierro, vanadio y el titanio hacia al enriquecimiento de las

fracciones más finas, alcanzando sus valores más significativos 64.767 %; 0.704 % y 14.850 % respectivamente en la fracción (-0.125 + 0) mm, el óxido de cromo aunque presenta un comportamiento similar o sea al enriquecimiento de las fracciones más finas a partir de la fracción (-0.25 + 0.21) mm tiende a mantenerse de manera bastante estable, alrededor del 2 al 14 %.

En el caso de la sílice esta se concentra en las fracciones más gruesas disminuyendo su contenido en la medida que disminuye el tamaño de la clase granulométrica desde el 42 % a un 7 % aproximadamente.

El óxido de aluminio se presenta de forma bastante homogénea en todo el espectro granulométrico aunque manifiesta una ligera tendencia a disminuir su contenido en las fracciones más finas.

Más abajo se reflejan los modelos matemáticos que describen la función de distribución de contenido $\beta(l)$, para los elementos objeto de estudio teniendo en cuenta como propiedad de separación el tamaño de la partícula.

$$\beta_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 85.816e^{-5.0268l}$$

$$\beta_{\text{V}_2\text{O}_5} = 1.2174e^{-6.8688l}$$

$$\beta_{\text{TiO}_2} = 27,755e^{-6,8113l}$$

$$\beta_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = -5.2860 + \frac{3.2986}{4}(l - 0.1310)^2 + 0.1624$$

$$\beta_{\text{SiO}_2} = 101,9l^{0,9503}$$

$$\beta_{\text{Al}_2\text{O}_3} = -87,589l^2 + 53,143l + 4,5352$$

En los anexos en la figura No. 1 pueden observarse los gráficos que describen la función de distribución de contenido utilizando como propiedad de separación el tamaño de la partícula para los diferentes elementos estudiados obtenidas experimentalmente y por el modelo respectivamente en las que se evidencia gran similitud; en la tabla No. 1 aparecen reflejados los valores de $\beta(l)$ experimentales y del modelo para las diferentes clases granulométricas; este resultado se puede corroborar además a través del análisis estadístico en los cuales se aprecia de forma general que el coeficiente de correlación múltiple es superior a 0.95, con respecto al análisis de varianza, en todos los casos el Fisher calculado es mayor que el tabulado

para un 95 % de confianza, lo que demuestra la reproducibilidad de los modelos obtenido.

3.3.- Resultado del análisis magnético.

A continuación se muestran los resultados del análisis magnético, estos datos nos permiten además obtener las funciones de distribución másica por la intensidad de corriente aplicada al separador.

3.3.1. Características sumarias del análisis magnético.

Como se muestra en la tabla No. 6 existe una tendencia a la disminución de las salidas en la medida que aumenta la intensidad del campo magnético, las fracciones obtenidas al utilizar un imán permanente e intensidades de corriente de 0.5 y 1.5 A constituyen el 91% de la muestra total.

Tabla No. 6. Resultados experimentales del análisis magnético $\gamma(\%)$.

Clases de intensidad de corriente. (A)	Salida, $\gamma(\%)$	Salida acumulativa, $\sum_{i=1}^n \gamma_i, \%$	Salida acumulativa, $\sum_{i=1}^n \gamma_i, \%$
Imán Permanente	33.05	33.05	100.00
+ 0 - 0.5	32.18	65.23	66.95
+ 0.5 - 1.5	25.77	91.00	34.77
+ 1.5 - 3	2.70	93.70	9.00
+ 3	6.30	100.00	6.30
Total	100.00		

Como se observa en la fig No. 7 existe un predominio de la fracción fuertemente magnética que se corresponde con una intensidad de campo magnético de 80 a 120 kA/m donde se concentran fundamentalmente los minerales fuertemente magnéticos, este resultado corrobora los reportes realizados por Díaz, (1996) sobre la composición mineralógica del placer donde la magnetita representa el 22,36 % se destacan además las fracciones obtenidas con intensidad de corriente de 0.5 y 1.5 A.

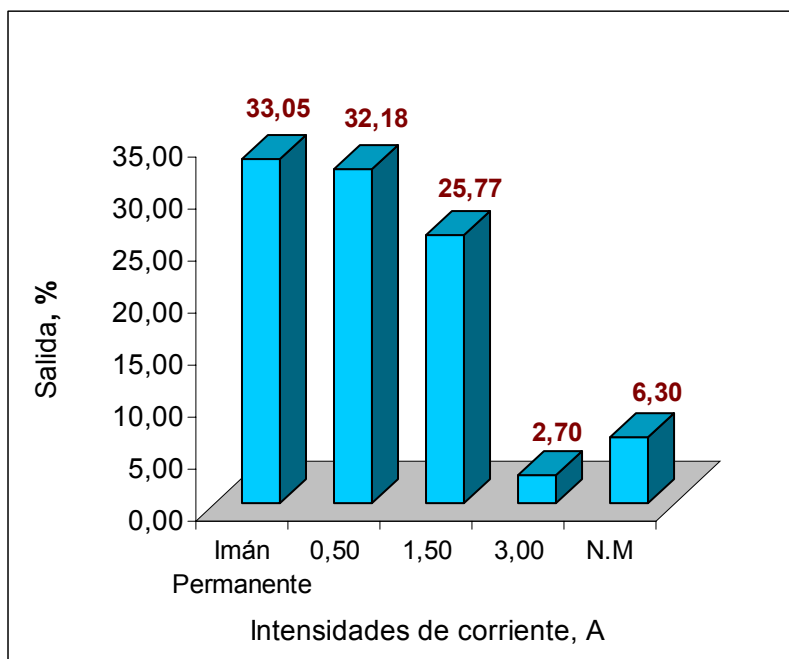


Fig No. 7. Gráfico de salida por clases de intensidad de campo magnético.

3.3.2.- Análisis fraccional másico según la intensidad del campo magnético.

En la Tabla No. 7 aparece tabulada la función de distribución másica $\gamma(I)$ utilizando como variable la intensidad de corriente.

Tabla No.7. Resultados experimentales de la función de distribución másica $\gamma(I)$.

Clase de Intensidad, A	Intensidad promedio, I, A	Magnitud del intervalo de clase, ΔI , A	$\gamma(I)$, 1/A	$\gamma(I) \cdot \Delta I$
+ 0 - 0.5	0.25	0.5	0.9614	0.4807
+ 0.5 - 1.5	1	1	0.3849	0.3849
+ 1.5 - 3	2.25	1.5	0.0269	0.0403
+3	-	-		0.0941

Como se observa la función de distribución diferencial másica $\gamma(I)$ con variable intensidad de corriente manifiesta una tendencia a disminuir con el incremento de la intensidad de corriente; se verifica el predominio de las fracciones para intensidades de corriente de 0,5 A y 1,5 A.

A continuación se expone el modelo que describe la función de distribución $\gamma(I)$ que caracteriza la mena tomando como propiedad de separación la intensidad de corriente aplicada.

$$\bar{\gamma}_i(I) = \int_{0.4}^{3.4} (-0.4243 \ln(I) + 0.3764) dI$$

Más abajo a través de la fig No. 8 se verifica la tendencia de la función de distribución con propiedad de separación de la intensidad de corriente en el experimento y en el modelo obtenido.

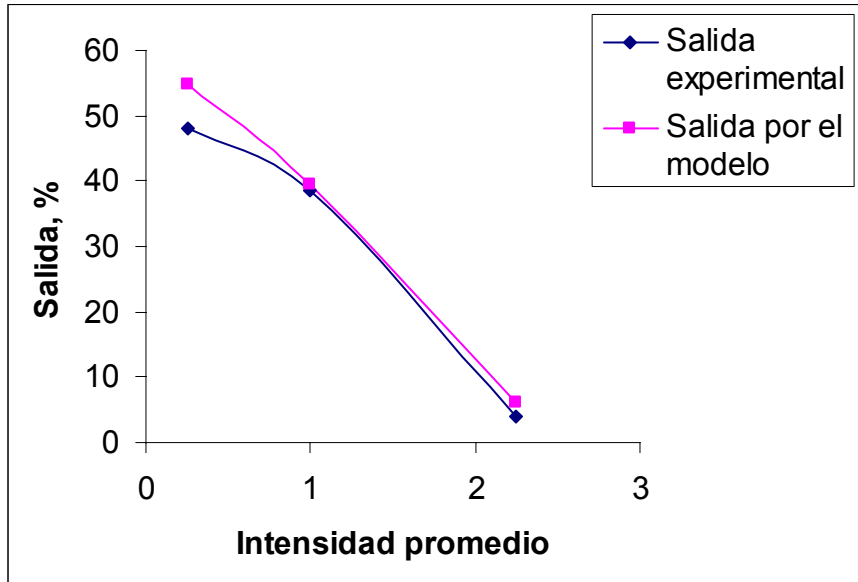


Fig No. 8. Comportamiento de $\bar{\gamma}(I)$ en el experimento y en el modelo.

De igual manera que en el caso anterior o sea tomando como propiedad de separación el tamaño de la partícula se observa que el comportamiento de $\bar{\gamma}(I)$ para las diferentes clases de intensidad tanto para el modelo como el experimental es semejante, esto puede corroborarse a través de la tabla 8.

Aquí puede observarse los valores de $\bar{\gamma}(I)$ para los diferentes intervalos de intensidad, en este caso el coeficiente de correlación múltiple es igual a 0.9997 y con relación al análisis de varianza, para un 95% de confianza el Fisher calculado es mayor que el tabulado, demostrando la reproducibilidad del modelo obtenido.

Tabla No.8. Estadísticas de la regresión para $\bar{\gamma}(I)$.

Estadísticas de la regresión		Clases de intensidad, A	$\bar{\gamma}(I)$ para el modelo	$\bar{\gamma}(I)$ experimental
Coeficiente de correlación múltiple	0,9997	0 - 0.5	0.5474	0.4807
		-0.5 + 1.5	0.3956	0.3849
		-1.5 + 3	0.0607	0.0403
Análisis de varianza				
F calculado		8958,1889		
Valor crítico de F		7,4711E-08		

3.3.3.- Análisis fraccional de contenido según la intensidad del campo magnético.

En la Tabla No. 9 aparecen tabuladas la función de distribución de contenido para los diferentes elementos utilizando la intensidad de campo magnético como propiedad de separación.

Tabla No. 9. Función de distribución de contenido $\beta(I)$.

Clases de intensidad de corriente (A)	Composición química, %					
	Fe ₃ O ₄	V ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Imán perman	79.053	0.843	11.556	6.117	5.489	4.155
+ 0 - 0.5	29.601	0.339	14.663	18.677	16.799	12.629
+ 0.5 - 1.5	20.116	0.187	3.567	16.991	27.326	15.364
+ 1.5 - 3	11.793	0.095	1.915	8.342	43.094	14.814
+3	3.275	0.027	1.285	0.445	46.033	11.601
Total	41.361	0.439	9.590	12.664	18.325	10.527

En este caso al igual que cuando se analiza la distribución por clases de tamaño, los óxidos de hierro, vanadio y titanio tienen igual comportamiento, el enriquecimiento ocurre hacia las fracciones fuertemente magnéticas obtenidas al utilizar un imán permanente y aplicando intensidades de corriente de 0,5 A, esto está en plena correspondencia con planteamientos de Díaz, (1996) pues en la fracción fuertemente magnética se concentra la titanomagnetita, en ocasiones en esta fase se sustituye el titanio por el vanadio dando lugar a la maghemita, fase que se considera debe ser la portadora de vanadio.

La fracción fuertemente magnética constituye prácticamente un concentrado de hierro.

Es preciso señalar que en el caso del óxido de titanio el enriquecimiento en la fracción de intensidad 0,5 A, es más acentuada, esto se debe a la presencia mayoritaria de la ilmenita, el óxido de cromo presenta igual regularidad que el titanio aunque sus contenidos son relativamente mayores.

El óxido de silicio se concentra hacia las fracciones débilmente magnéticas incrementándose del 5 al 46 % con respecto a la fracción fuertemente magnética.

El óxido de aluminio presenta una distribución bastante homogénea, manifestando una disminución en las fracciones fuertemente magnética.

Los modelos matemáticos que describen la función de distribución de contenido $\beta(I)$ para cada elemento teniendo en cuenta como propiedad la intensidad de corriente se relacionan a continuación.

$$\beta_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 32.629e^{-0.4568I}$$

$$\beta_{\text{V}_2\text{O}_5} = -0.1109\text{Ln}(I) + 0.1857$$

$$\beta_{\text{TiO}_2} = 3.8806I^{-0.9365}$$

$$\beta_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = 8.1809 + 16.1143e^{-2\frac{(I-0.5463)^2}{1.3477}}$$

$$\beta_{\text{SiO}_2} = 13.093I + 13.798$$

$$\beta_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 12.5151 + 5.5199e^{-2\frac{(I-1.5854)^2}{0.9224}}$$

En la figura No. 2 de los anexos pueden observarse los gráficos que describen las funciones de distribución de contenido $\beta(I)$, utilizando la intensidad de corriente como propiedad de separación de los óxidos, obtenidas experimentalmente y por el modelo, demostrando la igualdad de su comportamiento, consideramos que a pesar de que las curvas que representan los modelos obtenidos describen fielmente los resultados experimentales en todos los casos estos deben ser evaluados para un mayor número de datos.

En la tabla No. 2 de los anexos aparecen reflejados los valores de la función de distribución de contenido $\beta(I)$, experimentales y del modelo para las diferentes clases

de intensidad de corriente confirmando lo antes expuesto, este resultado se puede corroborar además a través del análisis estadístico en los cuales se aprecia de forma general que el coeficiente de correlación múltiple es superior a 0.99, en todos los casos el Fisher calculado es mayor que el tabulado para un 95 % de confianza, lo que demuestra la reproducibilidad de los modelos obtenidos.

3.4.- Resultado del análisis magnético por fracciones de tamaño.

A continuación se exponen los resultados del análisis magnético por fracciones de tamaño, la combinación de estas dos propiedades nos posibilita obtener las funciones de distribución másica por la intensidad de corriente por clases de tamaño.

3.4.1. Resultado másico del análisis magnético por fracciones de tamaño.

En la tabla No. 9 se aprecia la tendencia al incremento de las salidas con la disminución del tamaño de la clase granulométrica y la intensidad del campo magnético reportándose los valores más significativos para las fracciones fuertemente magnéticas y las obtenidas para intensidad de corriente de 0,5A con 16,98% y 16,36% respectivamente, atendiendo a la muestra total.

Tabla No. 9. Resultados experimentales del análisis magnético por fracciones de tamaño $\chi(\%)$

Intensidad, A	Salida por clases de tamaño. $\chi(\%)$					
	-0.5 +0.4	-0.4 +0.315	-0.315 +0.25	-0.25 +0.21	-0.21 +0.125	-0.125 +0
Imán P	0.59	0.09	0.62	1.45	16.98	13.72
+ 0 - 0.5		1.01	2.92	4.51	16.36	7.19
+ 0.5 - 1.5		0.97	1.65	4.04	15.92	3.04
+ 1.5 - 3		0.21	0.37	0.47	1.42	0.21
+ 3		0.45	1.00	1.22	3.25	0.34
Total	0.59	2.73	6.56	11.69	53.93	25.50
	100					

Es necesario destacar el hecho de que solo en las clases (-0.21 + 0.25) mm y (-0.125 + 0) mm la salida correspondiente a la fracción fuertemente magnética es mayor con respecto a las fracciones electromagnéticas. En las demás clases de tamaño se muestra un incremento de la salida con la disminución de la intensidad de corriente y luego una disminución brusca en la fracción fuertemente magnética.

A la fracción (-0.5 + 0.4) mm no se le realizó el análisis fraccional magnético debido a que ella representa solamente el 0.59 % de la muestra total.

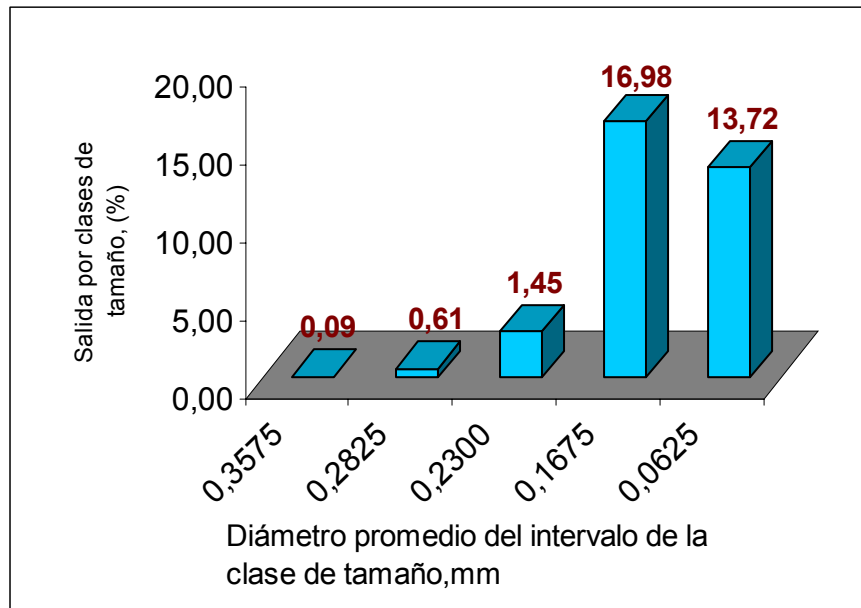


Fig No. 9. Gráfico de salida por clases de tamaño para imán permanente.

Como se puede apreciar en la fig No 9 la fracción magnética se concentra fundamentalmente en las fracciones más finas $(-0,21 + 0,125)$ y $(-0,125 + 0)$ mm con tamaño promedio de 0,1675 y 0,0625 mm con el 16,98 % y 13,72 % respectivamente.

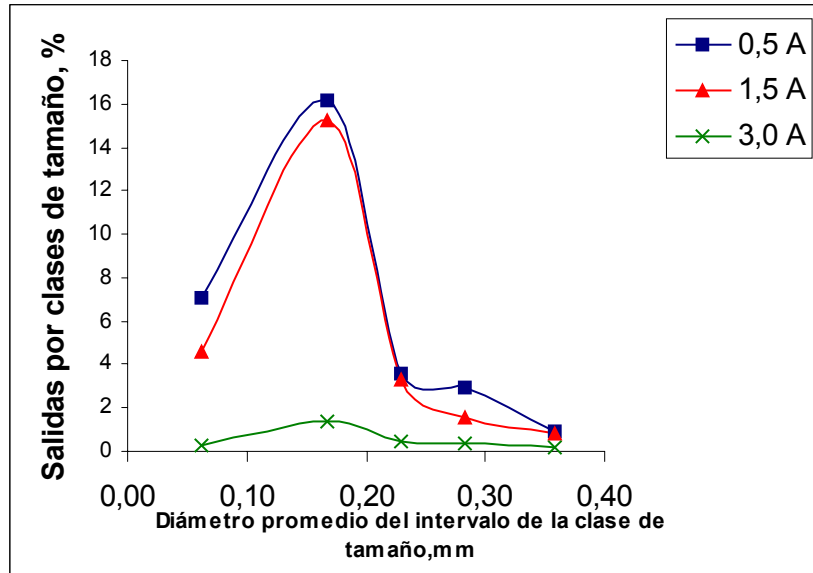


Fig No. 10. Gráfico de salida por clases de tamaño para diferentes intensidades de corriente.

En la fig No. 10 se observa el predominio de las fracciones electromagnéticas correspondientes a 0,5 y 1,5A y estas a su vez en las fracciones de tamaño más pequeñas; en la fracción $(-0,21 + 0,125)$ mm que es la más representativa están entre el 15 y el 17 % de la muestra total.

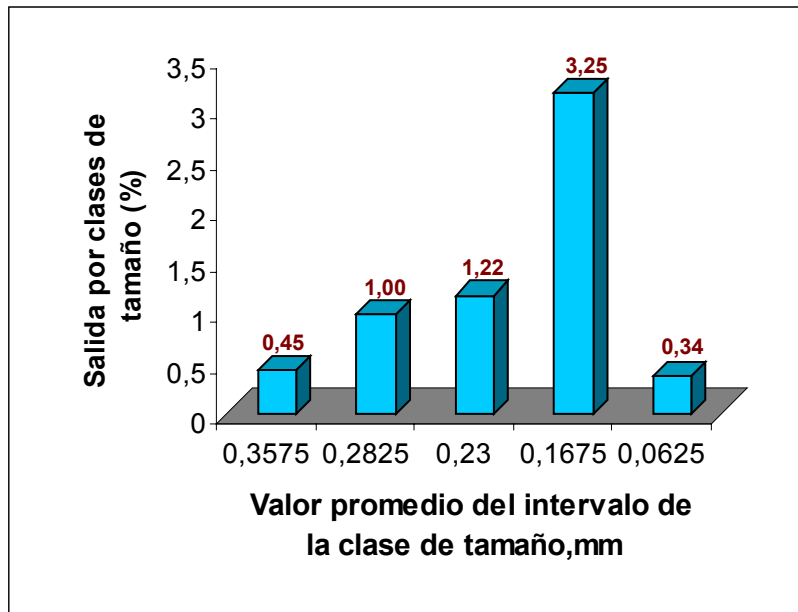


Fig No. 11. Gráfico de salida por clases de tamaño para la fracción no magnética.

En la figura No. 11 la fracción no magnética más representativa corresponde a la clase de tamaño $(-0.21 + 0,125)$ mm, es valido destacar que solo representa el 3,16 % de la muestra total.

3.4.2.- Análisis fraccional másico según la intensidad del campo magnético por clases de tamaño.

La función de distribución diferencial $\gamma(\ell, I)$ por el tamaño de partícula y la intensidad de corriente sigue una tendencia regular como se muestra en la tabla No. 10.

Tabla No. 10. Resultados experimentales de la función de distribución másica $\gamma(\ell, I)$.

Tamaño de partícula, ℓ , mm	Salida por clases Intensidad de corriente. A			
	0.25	1	2.25	>2.25
0.3575	0.1362	0.5233	0.2531	0.5407
0.2825	0.3102	0.7004	0.3523	0.9589
0.2300	0.3900	1.3947	0.3644	0.9507
0.1675	1.0290	4.0053	0.8074	1.8407
0.0625	0.1688	0.2857	0.0442	0.0714

Este comportamiento es similar a la función de distribución diferencial $\gamma(\ell)$ por una sola propiedad de separación (tamaño de la partícula), lo cual demuestra que la distribución másica de los minerales en intervalos de intensidades de corriente no es homogénea en el espectro granulométrico debido a que existe una tendencia al

incremento del valor de la función $\gamma(\ell, I)$ con la disminución del tamaño de la partícula y luego una disminución brusca para la fracción $(-0.125 + 0)$ mm.

Los resultados de la función de distribución diferencial $\gamma(\ell, I)$ son descritos por el siguiente modelo:

$$\bar{\gamma}_i(I, I) = \int_{0mm}^{0.5mm} \int_{0A}^{3A} (e^{-2.4577 + 25.3805I - 71.7171I^2 - 0.5121I^2 + 4.8228I}) dIdI$$

Tabla No.11. Estadísticas de la regresión para $\gamma(\ell, I)$.

Estadísticas de la regresión		Intensidad, A	Tamaño, mm	$\gamma(\ell, I)$ experimental	$\gamma(\ell, I)$ modelo
Coeficiente de correlación múltiple	0,838	0,2500	0,3575	0,1362	0,1164
		0,2500	0,2825	0,3102	0,4953
		0,2500	0,2300	0,3900	0,8447
		0,2500	0,1675	1,0290	0,9525
		0,2500	0,0625	0,1688	0,3301
		1,0000	0,3575	0,5233	0,2624
		1,0000	0,2825	0,7004	0,8514
		1,0000	0,2300	1,3947	1,2009
		1,0000	0,1675	4,0053	1,0801
Análisis de varianza		1,0000	0,0625	0,2857	0,2561
		2,2500	0,3575	0,2531	0,2827
F calculado	5,912	2,2500	0,2825	0,3523	0,5838
		2,2500	0,2300	0,3644	0,6000
Valor crítico de F	0,014	2,2500	0,1675	0,8074	0,3703
		2,2500	0,0625	0,0442	0,0466

Como puede observarse a diferencia que en los casos anteriores o sea al analizar una sola propiedad de separación, la combinación de estas da lugar a un modelo cuyo valor de coeficiente de correlación es mucho más bajo 0.838 aunque con respecto al análisis de varianza, el Fisher calculado es mayor que el tabulado para un 95% de confianza, demostrando la reproducibilidad y confiabilidad del modelo obtenido.

3.4.3.- Análisis fraccional de contenido según la intensidad del campo magnético y tamaño de partícula.

Más abajo en las tablas de la No. 12 a la 17 aparecen tabuladas la función de distribución de contenido $\beta(\ell, I)$ para los óxidos de los elemento estudiados, utilizando como propiedades de separación la intensidad de corriente y el tamaño de la partícula.

Como se describe en la tabla No. 12 la función $\beta(\ell, I)$ para el óxido de hierro sigue una regularidad definida, se observa una tendencia al enriquecimiento de la fracción fuertemente magnética y las obtenidas a menores intensidades de corriente y hacia las clases de tamaño más pequeñas, alcanzando valores de hasta 87 %. Nótese que este valor se corresponde con un 61 % de hierro metálico por lo tanto puede ser considerado un concentrado de hierro. El incremento de la intensidad del campo magnético da lugar a su empobrecimiento, en la fracción débilmente electromagnética su valor no excede al 5 %.

Tabla No. 12. Función de distribución de contenido de Fe_3O_4 $\beta(\ell, I)$.

Intensidad, A	Contenido por clases de tamaño. $\beta(\ell, I)$				
	-0.4 +0.315	-0.315 +0.25	-0.25 +0.21	-0.21 +0.125	-0.125 +0
Imán P	40.848	56.966	71.111	76.549	84.235
+ 0 - 0.5	16.960	21.376	28.966	24.467	46.810
+ 0.5 - 1.5	11.771	13.552	18.133	20.024	29.463
+ 1.5 - 3	9.770	9.218	10.792	12.461	16.615
+ 3	2.843	2.981	3.257	3.326	4.306

Tabla No. 13. Función de distribución de contenido de V_2O_5 $\beta(\ell, I)$.

Intensidad, A	Contenido por clases de tamaño. $\beta(\ell, I)$				
	-0.4 +0.315	-0.315 +0.25	-0.25 +0.21	-0.21 +0.125	-0.125 +0
Imán P	0.298	0.666	0.804	0.809	0.902
+ 0 - 0.5	0.146	0.209	0.330	0.286	0.545
+ 0.5 - 1.5	0.078	0.107	0.164	0.186	0.304
+ 1.5 - 3	0.055	0.053	0.082	0.107	0.161
+ 3	0.019	0.018	0.021	0.034	0.018

En la tabla No. 13 se observa que en el caso del óxido de vanadio la función $\beta(\ell, I)$ manifiesta una regularidad similar al óxido de hierro, su valor máximo es de 0.902 % en la fracción fuertemente magnética para la clase $(-0.125 + 0)$ mm.

Tabla No. 14. Función de distribución de contenido de TiO_2 $\beta(\ell, I)$.

Intensidad, A	Contenido por clases de tamaño. $\beta(\ell, I)$				
	-0.4 +0.315	-0.315 +0.25	-0.25 +0.21	-0.21 +0.125	-0.125 +0
Imán P	5.005	8.675	11.155	11.475	11.870
+ 0 - 0.5	4.835	7.410	12.890	12.750	24.465
+ 0.5 - 1.5	1.310	1.660	2.515	3.425	7.465
+ 1.5 - 3	1.005	1.120	1.450	1.630	7.295
+ 3	0.565	0.870	0.985	1.500	2.490

El comportamiento del óxido de titanio reflejado en la tabla No. 14 nos indica que este se enriquece con la disminución del tamaño de las clases granulométricas y hacia las fracciones de pequeña intensidad de corriente, fundamentalmente para 0.5 A y fracciones fuertemente magnéticas, su valor más significativo es 24.465 % en la fracción obtenida a 0,5 A para la clase $(-0.125 + 0)$ mm alcanzando el doble de su valor con respecto a la muestra inicial.

Más abajo en la tabla No. 15 la función de distribución del óxido de cromo describe un comportamiento similar al titanio, de forma general este alcanza valores mayores que para el caso del titanio. Tanto el óxido de cromo como el de titanio alcanzan sus valores máximos en la clase $(-0.125 + 0)$ mm para todas las fracciones de intensidad de corriente e imán permanente y manifiestan sus valores mínimos para todas las clases de tamaño a intensidad de corriente de 3 A. Este aspecto tiene gran importancia para el estudio de la beneficiabilidad del placer pues nos indica la imposibilidad de obtener concentrados de uno u otro elemento sin la presencia del otro al menos utilizando como propiedad de separación las variables estudiadas, tamaño de la partícula e intensidad de corriente y su combinación.

Tabla No. 15. Función de distribución de contenido de Cr_2O_3 $\beta(\ell, I)$.

Intensidad, A	Contenido por clases de tamaño. $\beta(\ell, I)$				
	-0.4 +0.315	-0.315 +0.25	-0.25 +0.21	-0.21 +0.125	-0.125 +0
Imán P	7.050	8.185	7.170	5.985	6.070
+ 0 - 0.5	5.535	10.635	17.680	20.420	20.460
+ 0.5 - 1.5	2.165	5.985	12.780	17.960	28.225
+ 1.5 - 3	0.785	1.560	3.760	11.670	15.835
+ 3	0.135	0.160	0.355	0.510	1.395

Contrario a los elementos analizados como se observa en la tabla No. 16 la función de distribución de contenido $\beta(\ell, I)$ la sílice presenta una tendencia al enriquecimiento con el aumento de la intensidad de corriente aplicada y con el incremento del tamaño de la clase granulométrica, sus valores mínimos se encuentran para todas las clases de tamaño en la fracción fuertemente magnética obtenida al utilizar el imán permanente es necesario aclarar que esta disminución se acentúa en la medida que disminuye el tamaño de la clase.

Tabla No. 16. Función de distribución de contenido de SiO_2 $\beta(\ell, I)$.

Intensidad, A	Contenido por clases de tamaño. $\beta(\ell, I)$				
	-0.4 +0.315	-0.315 +0.25	-0.25 +0.21	-0.21 +0.125	-0.125 +0
Imán P	18.535	12.365	8.295	5.160	5.205
+ 0 - 0.5	33.790	29.320	17.405	18.340	5.425
+ 0.5 - 1.5	44.575	40.660	33.530	25.940	13.585
+ 1.5 - 3	48.665	49.880	47.470	40.875	32.940
+ 3	43.360	46.870	46.370	46.240	43.875

Como se observa, la función de distribución de contenido $\beta(\ell, I)$ para el óxido de aluminio en la tabla No. 17 este se distribuye de forma homogénea en todo el espectro granulométrico para todas las clases de intensidad de corriente.

Es necesario aclarar que para la fracción fuertemente magnética se verifica una disminución.

Tabla No. 17. Función de distribución de contenido de Al_2O_3 $\beta(\ell, I)$.

Intensidad, A	Contenido por clases de tamaño. $\beta(\ell, I)$				
	-0.4 +0.315	-0.315 +0.25	-0.25 +0.21	-0.21 +0.125	-0.125 +0
Imán P	5.290	5.510	4.755	4.085	4.110
+ 0 - 0.5	14.330	12.480	12.280	14.030	9.480
+ 0.5 - 1.5	10.370	14.750	15.245	15.685	15.775
+ 1.5 - 3	13.365	13.835	14.280	15.380	16.035
+ 3	10.900	11.500	11.575	11.780	11.210

A continuación se relacionan los modelos estadísticos que describen las funciones de distribución de contenido $\beta(\ell, I)$ para los óxidos objeto de estudio.

$$\beta(\ell, I)_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 50.0555 - 98.6169I - 15.1189I + 33.6526I$$

$$\beta(\ell, I)_{\text{V}_2\text{O}_5} = 0.5812 - 0.1619I - 1.1495I + 0.4024I^2$$

$$\beta(\ell, I)_{\text{TiO}_2} = 29.8855 - 58.6161I - 23.9581I + 20.1049I + 5.82I^2$$

$$\beta(\ell, I)_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = 31.3814 - 66.9928I - 4.2394I$$

$$\beta(\ell, I)_{\text{SiO}_2} = 7.4742 + 195.031I^2 + 11.3801I$$

$$\beta(\ell, I)_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 3.3521 + 69.4698I + 13.4734I - 43.5587I - 119.9514I^2 - 3.0003I^2 + 31.7269I^2$$

En la tabla No. 3 de los anexos se relacionan los valores de la función de distribución de contenido $\beta(\ell, I)$ obtenidos experimentalmente y a través del modelo, la reproducibilidad de los modelos se corrobora a través del análisis estadístico en los cuales se aprecia de forma general que el coeficiente de correlación múltiple es superior a 0.94 con excepción del óxido de aluminio para el cual este valor es de 0.87, con respecto al análisis de varianza, en todos los casos el Fisher calculado es mayor que el tabulado para un 95 % de confianza.

Conclusiones parciales

- 1.- En el placer de la playa mejías predomina la fracción menor de 0.21 mm, en la que se concentran los óxidos de hierro, vanadio, cromo y titanio.
- 2.- En cuanto al análisis magnético el 33 % corresponde a la fracción fuertemente magnética, esta se enriquece en hierro y vanadio lo que coincide con las consideraciones realizadas Díaz, (1996) sobre la presencia en ella de titanomagnetita o maghemita ulvita portadora de vanadio, el 32 % corresponde a la clase obtenida al aplicar una intensidad de corriente de 0.5 A donde se concentran el titanio y el cromo representados por la ilmenita y las espinelas cromíferas, esto se debe a que ambas fases son débilmente electromagnéticas, estas fracciones son las más representativas.
- 3.- Al combinar las dos propiedades de separación estudiadas la salida que se obtiene para el análisis magnético por clases de tamaño está en correspondencia con los resultados obtenidos al realizar el estudio con las variables de forma independiente o sea se manifiesta un incremento de esta con la disminución del tamaño de la clase granulométrica y para las fracciones fuertemente magnética y para intensidad de corriente 0.5 A, la fracción débilmente electromagnética no supera el 3.5 %.
- 4.- Como resultado del análisis antes mencionado la fracción obtenida al utilizar el imán permanente para la clase (-0.125 + 0) mm constituye un concentrado de hierro enriquecido en vanadio, en la fracción de 0.5 A correspondiente a las clases (-0.21 + 0.125) y (-0.125 + 0) mm se concentran el titanio y el cromo, el silicio se enriquece hacia las mayores clases granulométricas y fracciones débilmente electromagnéticas mientras que el aluminio se distribuye de forma homogénea en todo el espectro granulométrico para todos los valores de intensidad de corriente.
- 5.- Se obtuvieron los modelos de las funciones de distribución diferencial másica $\bar{\gamma}(\ell)$, $\bar{\gamma}(I)$ y $\bar{\gamma}_i(\ell, I)$; las ecuaciones matemáticas que describen la función de distribución de contenido $\beta(\ell)$, $\beta(I)$ y $\beta(\ell, I)$ para cada uno de los óxidos estudiados, utilizando como propiedad de separación el tamaño de la partícula, la intensidad de corriente y la combinación de estas propiedades.

Conclusiones finales.

1. En el placer Playa de Mejías los óxidos de hierro, vanadio, cromo y titanio se concentran en las fracciones menores de 0.21 mm que constituye el 78 % con respecto a la muestra inicial y en las fracciones fuertemente magnética y para intensidad de corriente de 0.5 A que representan el 33 % y 32 % respectivamente.
2. Al combinar las propiedades de separación, tamaño de la partícula e intensidad de corriente se obtuvo un concentrado de hierro enriquecido en vanadio en la clase de tamaño $(-0.125 + 0)$ mm al utilizar el imán permanente. El titanio y el cromo representados por la ilmenita y las espinelas cromíferas, ambas débilmente electromagnéticas, se concentran en las clases $(-0.21 + 0.125)$ y $(-0.125 + 0)$ mm para intensidad de corriente de 0.5 A.
3. Los modelos de las funciones de distribución diferencial másica ($\bar{\gamma}(l)$, $\bar{\gamma}(I)$ y $\bar{\gamma}_i(l, I)$) y de contenido ($\beta(l)$, $\beta(I)$ y $\beta(l, I)$) tomando como propiedades el tamaño de la partícula, la intensidad de corriente y la combinación de estas, reflejan el comportamiento de los óxidos de hierro, cromo, titanio, vanadio, aluminio y silicio de las arenas negras del placer aluvial de la Playa Mejías.

Recomendaciones.

1. Ampliar el estudio utilizando otras propiedades de separación como la flotabilidad o la tensión de campo eléctrico de manera que posibilite la separación de las fases de ilmenita y las espínelas cromíferas.
2. Realizar nuevos experimentos utilizando la propiedad de separación intensidad de corriente para un mayor número de valores en el intervalo estudiado.
3. Realizar el análisis mineralógico de la muestra de cabeza y las obtenidas durante el análisis fraccional que permita el estudio de la distribución de las fases mineralógicas presentes en el placer.

Bibliografía

1. Allen N and Aral H. Application of rotating magnetic field (RMF) to separate chrome spinels from ilmenite. Ausimm Proceedings. Vol 306. No 1. 2001.
2. Almaguer T, R. Presente y futuro de las rocas y minerales industriales. Memoria. Encuentro Hispano Mexicano sobre Geología y Minería. México. Editorial Ingeniería. Pp 57-68. 1992
3. Anon. Economic Minerals In Sand Dunes. Egypt. 2000. www.egsma.gov.eg/economic_minerals_in_sand_dunes.
4. Ariosa I, J. Curso de yacimiento de minerales metálicos. Tipos genéticos. Edit Pueblo y educación. Habana 1982.
5. Austpac Resources N. L. c) Earms and Ears Technologies. Annual Report 2000. <http://www.austpacresources.com/pdfs/brokers/>.
6. Austpac Resources N.L. b) Annual Report. Murray Basin. 2000. <http://www.austpacresources.com>
7. Austpac Resources N.L. d). Chairman's Review 2 Directors' Report on Technology and Mineral Sands. 2000. <http://www.austpacresources.com/pdfs/brokers/annuals/2000/narra.pdf>
8. Austpac Resources N.L. e) Intersuisse Report (July 00). 2000. [http://www.austpacresources.com/pdfs/brokers/intersuisse%20Report%20\(July%2000\).pdf](http://www.austpacresources.com/pdfs/brokers/intersuisse%20Report%20(July%2000).pdf)
9. Austpac Resources N.L. f) Intersuisse Report (Aug 00). 2000. [http://www.austpacresources.com/pdfs/brokers/intersuisse%20Report%20\(Aug%2000\).pdf](http://www.austpacresources.com/pdfs/brokers/intersuisse%20Report%20(Aug%2000).pdf)
10. Austpac Resources N_L. a) - Projects - Titanium Dioxide Pigment Production. 2001. <http://www.austpacresources.com/pdfs/brokers/>.
11. Availability, processing, and specifications of titanium ore and titanium tetrachloride. Chapter 4. http://www.ulib.org/webRoot/Books/National_Academy_Press_Books/titanium/titan041.htm
12. Bemax Resources NI. Independent Technical Assessment And Fair Market Valuation Of The Mining And Exploration Assets Of Resource Equity Consultants Pty Ltd. Australia. 2000.

-
13. Bergen, J. Reports Radar Acquisitions Corp. Calgary. 2001
<http://www.radar.ab.ca>
 14. Blachburn S and Veasey T.J. Effect of treatment in air at 820-960° C on magnetic properties of Wolframite. Mineral processing and extractive metallurgy. Transactions Section C.Vol 93. 1984.
 15. Bruckard, W. J, Heyes, G. W and Guy, P. J. Flotation and screening recovery of titanium minerals from a monazite mineral sands circuit. . The Ausimm Proceedings, Vol 306.No1.2001.
 16. Cabezas J.L, Mato F Sastre H. Recuperación de circón y rutilo mediante flotación de una cuarcita uranífera. Rev de Metalurgia. Vol 22 No 2. 1996.
 17. Coello V, A. Generalidades sobre el beneficio de placeres. Apuntes para un libro. Departamento de metalurgia.
 18. Coello V. A, Beyris M. P, Hernández F. A, Ramírez S. B. Distribución fraccional de los valores metálicos en el escombro laterítico. Revista minería y geología. Vol. XV, No.1, 1998.
 19. Coello V. A, Ramirez S. B. Informe técnico sobre el estudio de la beneficiabilidad de las arenas del placer Mejías. Departamento de Metalurgia. ISMM 1996.
 20. Coello V. A, Ramírez S. B. Informe técnico sobre el estudio de la beneficiabilidad de las arenas del río cañete. Departamento de Metalurgia. ISMM 1996.
 21. Csiro Research. Csiro Research in Mineral Processing and Metal Production Process. Issue 2. 2000. <http://www.scirominerals.com>
 22. Dance A.D and Morrison R.D. Quantifying a black art: the electrostatic separation of minerals sands. Minerals Engineering. Vol 5. No 7. pp751- 765. 1992.
 23. Dercach B, Kopichev. Métodos especiales de beneficio. Moscú. 1966.
 24. Díaz M, R, Batista R, J, Blanco M, J, Gonzalez C, R. Caracterización geológica del placer Mejías mediante el estudio fotogeológico y la interpretación de anomalías magnéticas. Revista Minería y Geología, Vol XIV, No. 1, 1997.

25. Díaz M, R, Proenza, J.A, Comas, O, Fernández- Bellon, Fabra, J.M, Guinart, O y Melgarejo, J.C. El placer lateral de la playa Mejías (Noreste de Cuba oriental): Un ejemplo de interacción de procesos aluviales y marinos en la concentración de minerales preciosos. *Acta geológica Hispánica*. Vol 33. No 1-4. 1998. 351-371pp.
26. Díaz R, et al. Sobre la existencia de placeres laterales en el noreste de Cuba oriental. *Revista Minería y Geología*, Vol XII, No. 3, 1995.
27. Díaz R. Caracterización geoquímica y mineralógica de los concentrados pesados de la cuenca hidrográfica del río Yamanigüey. Primer taller Internacional de la geología de Cuba, el golfo de México y el Caribe Noroccidental. Universidad de Pinar del Río. 1995.
28. Díaz R. Particularidades de distribución de oro, platinoides y otros minerales pesados en los placeres laterales del noreste de Cuba Oriental y su evaluación perspectiva. . Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en Ciencias Geológicas. Departamento de Geología. ISMM. 1996.
29. Eppinger R,G, Briggs H, P, Brown Z, A , Crock,J.G, Meier A , Theodorakos, P. M and Wilson, S.A. Baseline geochemical data for stream sediment and surface water samples from Panther Creek, the Middle Fork of the Salmon River, and the Main Salmon River from North Fork to Corn Creek, collected prior to the severe wildfires of 2000 in central Idaho. 2000 http://www.access.gpo.gov/su_docs/locators/net/net_archive/net081301.html
30. Fan X, Froth flotation of ilmenite. Abstract Ph.D Thesis University of Birmingham. 1999.
31. Fan, X., Kelly R.M and Rowson, N.A. Effect of Microwave Radiation on Ilmenite Flotation. *Canadian metallurgical quaterly*. Vol 39. No 3. pp 247 -254. 2000.
32. Finlay, W. L and Comisión on engeneering and technical systems national. Titanium: past, present and future. Report of the Panel on Assessment of Titanium Availability: Current and Future Needs of the Committee on Technical Aspects of Critical and Strategic Materials. Publication NMAB-392 National Academy Press. Washington, D.C. 1983.
33. Foster. F.J. Australian mineral sands. Problems but confidence.The internacional minino magazine. Vol195. No 1. pp 56-64. 1994.

34. Gambogi, J. Titanium.1999.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/670499.pdf>
35. Iluka resources Ltd. Annual report 1999: 2000. <http://www.iluka.com.au>.
36. Kingman, S.W. and Rowson, N.A. The Effect of Microwave Radiation On The Magnetic Properties of Minerals. 144 Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy Vol. 35 No. 3. 2000. © International Microwave Power Institute.
37. Kulachkov L, Díaz R. Y Rodríguez A. Reconocimiento y evaluación pronóstico sobre la concentración de minerales pesados de los placeres laterales en las cercanías del macizo ofiolítico Mayarí – Baracoa. Revista científica técnica Saints Petersburgo.T137:90-97. 1989.
38. Luke, P. Filler and Extender Minerals in Nova Scotia. Nova Scotia Department of Natural Resources Minerals and Energy Branch .Economic Geology. Series ME 1990. 2001. <http://www.gov.ns.ca/natr/meb/90eg2.htm>.
39. McKnight,K, Stouffer N, Domenicoy, Mankosa M. Recovery of Zircon and other economics minerals from Wet gravity Ttailings using the floatex density separator. <http://www.carpco.com.au>
40. Merrit R,R and Cranswick L,M.D.The origin of magnetic susceptibility in roasted ilmenite. 6th AusIMM Extractive Metallurgy conference. Pp.171-180.1994
41. Mitrofánov S.I, Barski L.A, Samygin V.M. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de minerales. Edit Mir. Moscú. 1982.
42. Morales A,R, Rodríguez R. Caracterización de la fracción pesada en la región Moa-Baracoa y su vinculación con la mineralización endógena. Trabajo presentado en el primer congreso de Geología. Octubre, 1988.
43. Olofiniski N.F. Métodos eléctricos de enriquecimiento. Edit. Mir. Moscú. 1980. pp356.
44. Panov, S. P, Metson, J. B and Batchelor. J J Benefication of New Zealand ilmeno-magnetites.The Ausimm proccesing. No. 1. 2000.
45. Parsonage P, Warren S. Selective magnetic coating fot mineral separation. Mineral processing and extractive metallurgy. Transactions Section C.Vol 93. 1984.

46. Potvin, J.C. Tiomin Resource Inc. Titanium Mineral Sands Project, Kwale. Deposit, Kenya. 1999. <http://www.tiomin.com/i/pdf/1999ThirdQuarter.pdf>.
47. Puchols Q, R et al. Las arenas negras de Mejías: Nueva fuente para la obtención de consumibles para la soldadura por arco eléctrico. *Revista Minería y Geología*. Vol XVIII. No. 2. 2001. pp 72-84.
48. Ramayo L. Mineralogía y geoquímica de los flujos mecánicos de dispersión en la región de Moa. Tesis presentada en opción al título de Master en Ciencias Geológicas. Departamento de Geología. ISMM 1996.
49. Randall. A. The oxidation of ilmenite and its relationship to the FeO-Fe₂O₃-TiO₂ phase diagram at 1073 and 1140K. *Metallurgical Transactions A*. 24A. pp 1257-1264. 1993.
50. Rasumov K.A. enriquecimiento de minerales por flotación. Edit V/O Vneshtorgizdat. Moscú. 1981.
51. Rodríguez F.R, Estudio petrológico de las rocas ofiolíticas de la zona de cayo grande en el macizo Moa- Baracoa. Tesis presentada en opción al título de Master en Ciencias Geológicas. Departamento de Geología. ISMM 2000.
52. Rodríguez V, A. Aplicación del método geoquímico de los concentrados pesados en el análisis metalogénico y la prospección geoquímica. Resumen de tesis en opción al grado científico de doctor en Ciencias Geológicas. ISMM. 1995.
53. Rogers, M. STARKE MINES. 2000. <http://www.dupont.com/corp/What-s-new/releases/970411.html>
54. Sparrow.G. Upgrading Murray Basin ilmenites. *Process Magazine* –Issue 2. 2000. <http://www.minerals.csiro.au/main/pg2.asp>
55. Stewart, G.N. Australia: Review of Australia's mineral mining industry in 1990. *Mining Magazine*, Annual 1991 v165 nANN p69.
56. Tijonov, O.N. Zakonomiernosti effektivno razdelenia mineralov v protsessaj obogashenia polieznij oskopaemij. Nedra. Moskva. 1984.
57. Tiomin Resources Inc. Annual Report a resource for the future titanium. 1999. <http://www.tiomin.com/i/pdf/tio-ar99.pdf>

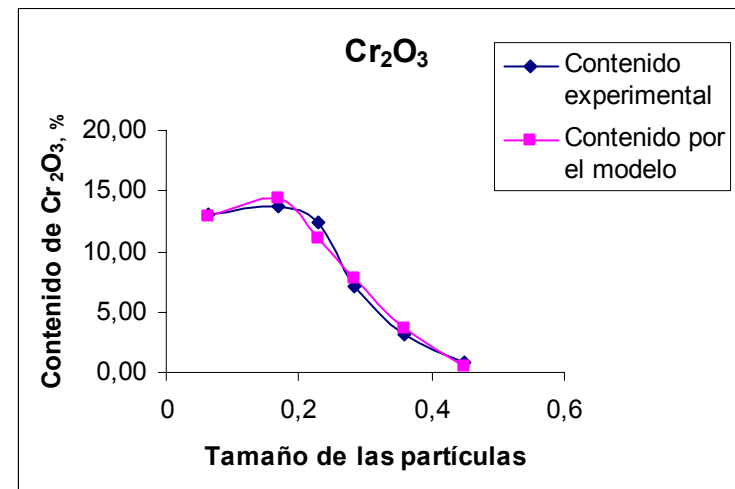
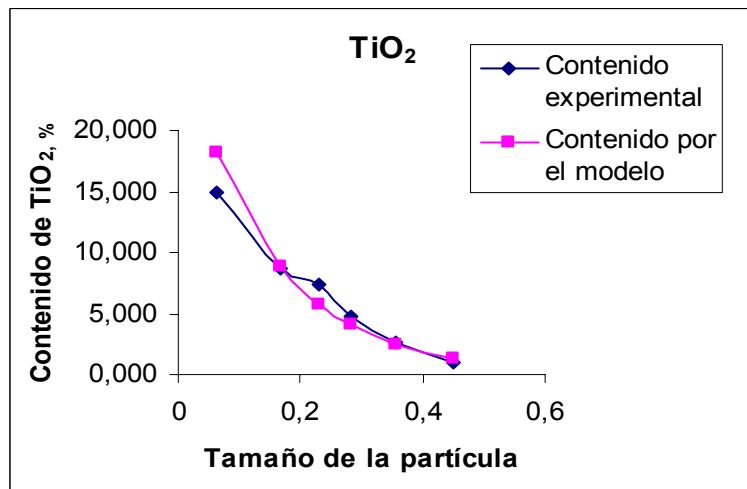
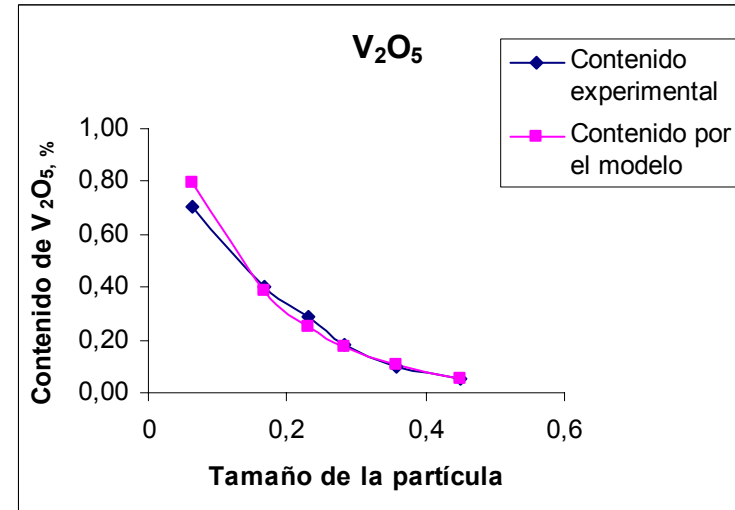
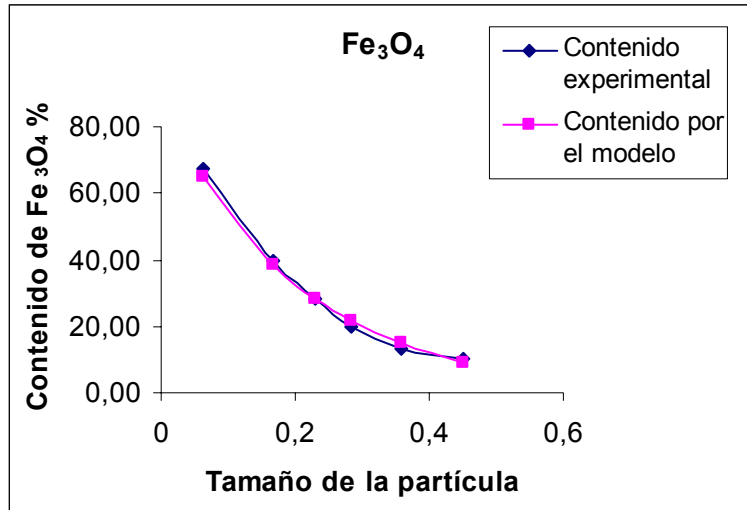
58. Veldhuizen, J. APG/TOR joint venture agreement reached to commercialise ERMS technology. BNP Report. July 2000.
[http://www.austpacresources.com/pdfs/brokers/BNP \(July%2000\).pdf](http://www.austpacresources.com/pdfs/brokers/BNP%2000.pdf)
59. Vila S,R. Principales rasgos de distribución de oro en los depósitos exógenos de la región Sagua – Moa Tesis presentada en opción al título de Master en Ciencias Geológicas. Departamento de Geología. ISMM 2000.
60. Wescott, M.F and Parry,L.G. Magnetic properties of some beach sand ilmenite particles. Journal of Geophysical research, vol 73. No 4. pp1269-1277.
61. Wills, B. Minerals processing technology. 5ta edition. Pergamon Press. Oxford. N.Y. Seonl. Tokio. 1992.
62. Winter, J. D. ERMS Roasting Process: The technology for the Separation of High grade Ilmenite from Murray Basin Heavy Mineral Concentrates. The Murray Basin. Mineral Sands Conference, April 21-23 1999, Mildura, Victoria, Australia. Bulletin of AIG Any 26.
63. Zhong K and Cui L. Influence of irons of ilmenite on its flotability. Internacional Journal of mineral processing. No 20. pp253-265. 1996.

Anexos

Tabla No.1. Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales atendiendo a clases de tamaño.

Tamaño, mm	Fe ₃ O ₄		V ₂ O ₅		TiO ₂		Cr ₂ O ₃		SiO ₂		Al ₂ O ₃	
	β(ℓ)	β(ℓ)	β(ℓ)	β(ℓ)	β(ℓ)	β(ℓ)	β(ℓ)	β(ℓ)	β(ℓ)	β(ℓ)	β(ℓ)	β(ℓ)
	exp.	modelo	exp.	modelo	exp.	modelo	exp.	modelo	exp.	modelo	exp.	modelo
-0,5 +0,4	9,887	8,937	0.052	0.055	1.025	1.295	0.895	0.507	42.310	47.711	10.925	10.713
-0.4 +0.315	13,024	14,227	0.100	0.104	2.590	2.431	3.132	3.687	39.841	38.34	11.985	12.339
-0.315 +0.25	19,281	20,741	0.182	0.175	4.732	4.052	7.125	7.689	34.405	30.653	12.319	12.558
-0.25 +0.21	27,035	27,006	0.289	0.251	7.387	5.794	12.315	11.073	25.079	25.213	12.378	12.125
-0.21 +0.125	37,964	36,974	0.402	0.385	8.625	8.869	13.719	14.376	18.708	18.653	11.287	10.979
-0.125 +0	64,767	62,679	0.704	0.792	14.850	18.133	13.061	12.916	7.084	7.310	7.334	7.514
Estadística de la regresión												
Coeficiente de correlación múltiple	0,9948		0,9951		0,9798		0,9539		0,9932		0,9883	
Análisis de varianza												
F calculado	380,4325		412,0280		96,2473		40,4222		294,8502		63,36126	
Valor crítico de F	4,074E-05		3,4778E-05		0,0006		0,0031		6,7483E-05		0,0035	

Fig. No 1. Gráficos comparativos de la función de distribución de contenido $\beta(\ell)$ para los diferentes óxidos entre los valores experimentales y los obtenidos por el modelo.



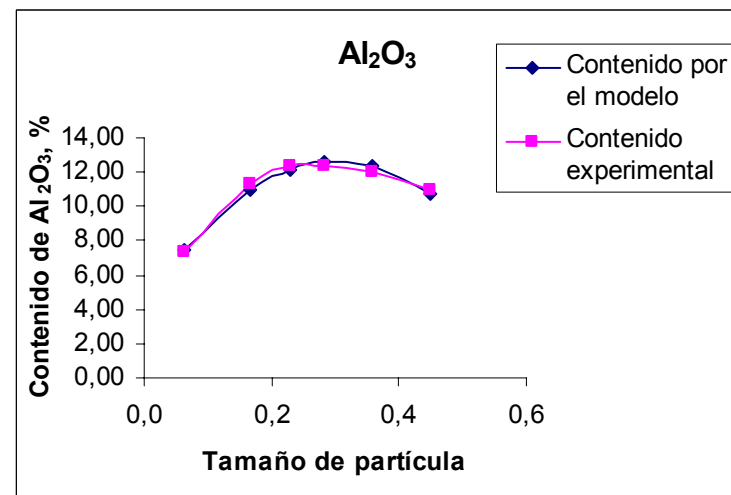
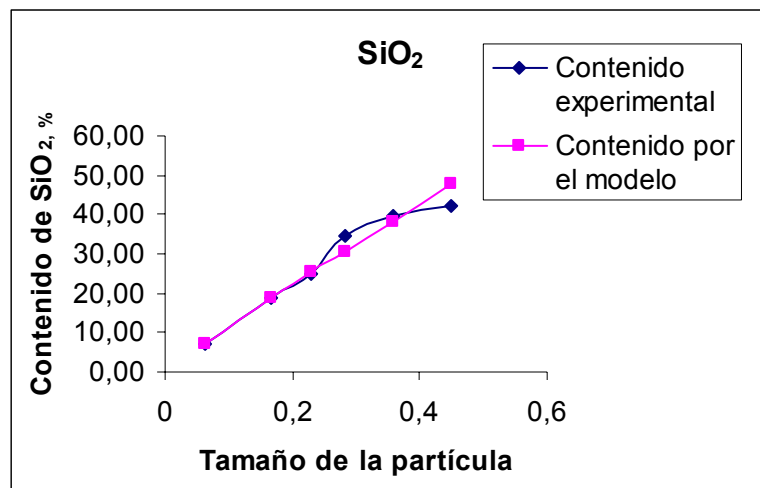
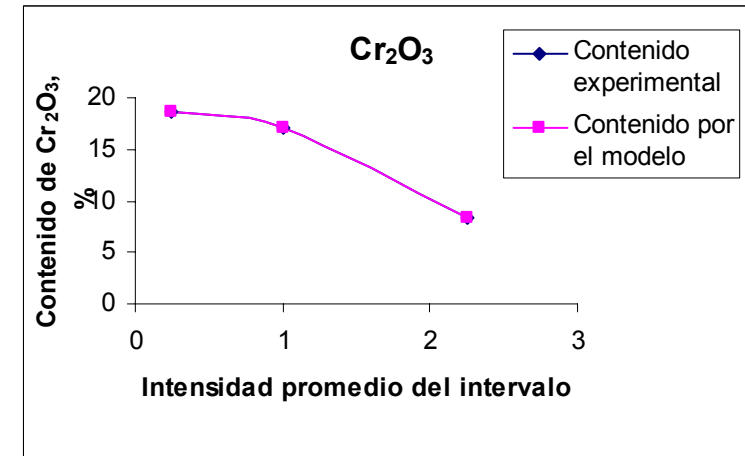
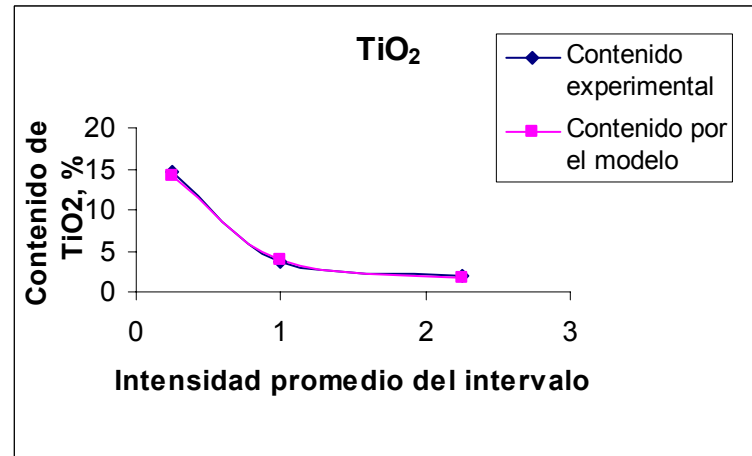
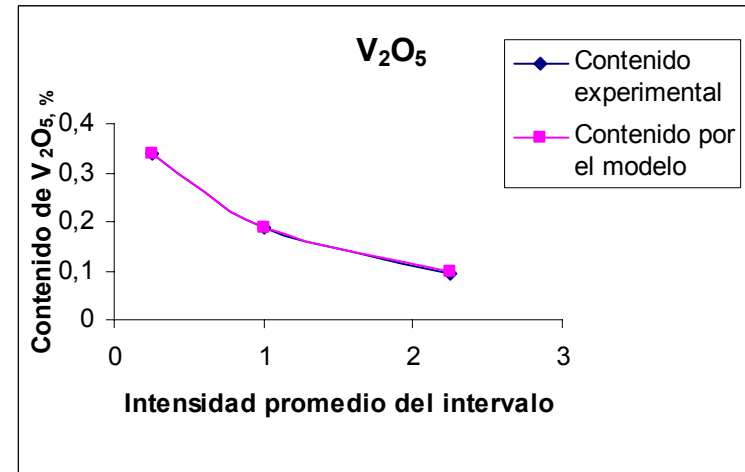
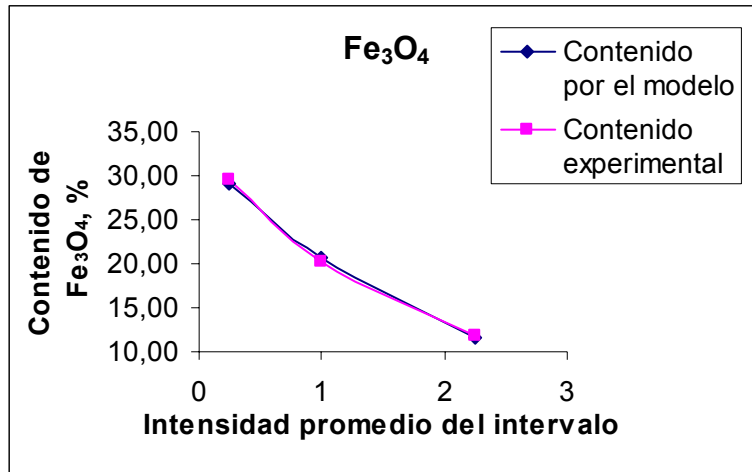


Tabla No. 2. Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales atendiendo a intensidad de corriente aplicada.

Intensidad, A	Fe ₃ O ₄		V ₂ O ₅		TiO ₂		Cr ₂ O ₃		SiO ₂		Al ₂ O ₃	
	β(I)	β(I)	β(I)	β(I)	β(I)	β(I)	β(I)	β(I)	β(I)	β(I)	β(I)	
	exp.	modelo	exp.	modelo	exp.	modelo	exp.	modelo	exp.	modelo	exp.	modelo
0 - 0.5	29,601	29,108	0.339	0.339	14.663	14.214	18,677	18,677	16.799	17.071	12.629	12.627
-0.5 + 1.5	20,116	20,664	0.187	0.186	3.567	3.881	16,991	16,991	27.326	26.891	15.364	15.356
-1.5 + 3	11,793	11,675	0.095	0.096	1.915	1.816	8,342	8,342	43.094	43.257	14.814	14.823
Estadística de la regresión												
Coeficiente de correlación múltiple	0,9987		0,9999		0,9974		1		0,9995		0,9999	
Análisis de varianza												
F calculado	384,6835		12291,859		198,7971		208396158		1206,92047		27849,1988	
Valor crítico de F	0,0324		0,0057		0,0450		4,41E-05		0,01831981		0,00381477	

Fig. No. 2. Gráficos comparativos de la función de distribución de contenido $\beta(I)$ para los diferentes óxidos entre los valores experimentales y los obtenidos por el modelo.



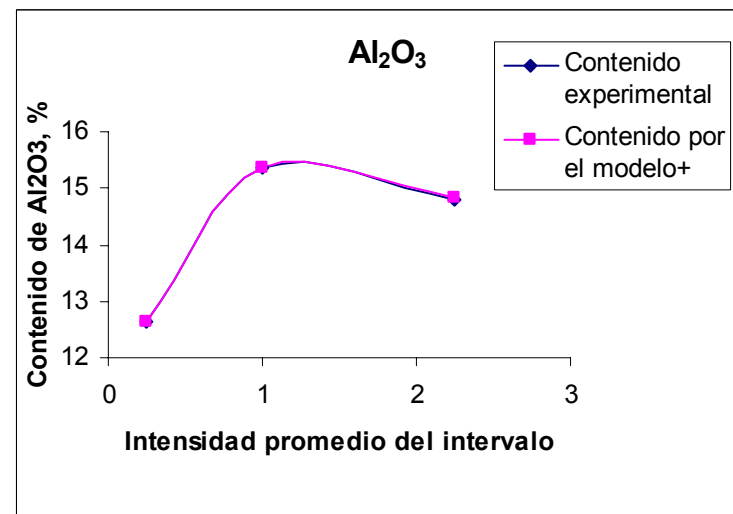
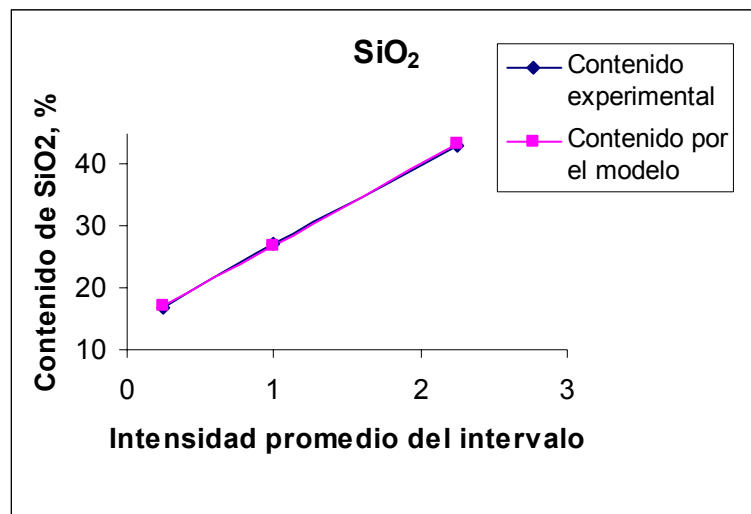


Tabla No.3 Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales atendiendo al tamaño promedio de partícula y la intensidad.

Intensidad A	Tamaño, mm	Fe ₃ O ₄		V ₂ O ₅		TiO ₂		Cr ₂ O ₃		SiO ₂		Al ₂ O ₃	
		β(ℓ,I) exp.	β(ℓ,I) modelo	β(ℓ,I) exp.	β(ℓ,I) modelo	β(ℓ,I) exp.	β(ℓ,I) modelo	β(ℓ,I) exp.	β(ℓ,I) modelo	β(ℓ,I) exp.	β(ℓ,I) modelo	β(ℓ,I) exp.	β(ℓ,I) modelo
0,250	0,3575	16,960	14,028	0,146	0,133	4,835	5,101	5,535	6,372	33,790	35,246	14,330	12,398
0,250	0,2825	21,376	20,793	0,209	0,218	7,410	9,121	10,635	11,396	29,320	25,884	12,480	13,667
0,250	0,2300	28,966	25,529	0,33	0,278	12,890	11,934	17,680	14,913	17,405	20,637	12,280	13,766
0,250	0,1675	24,467	31,167	0,286	0,349	12,750	15,283	20,420	19,100	18,340	15,791	14,030	13,035
0,250	0,0625	46,810	40,638	0,545	0,469	24,465	20,910	20,460	26,135	5,425	11,081	9,480	9,733
1,000	0,3575	11,771	11,712	0,078	0,060	1,310	-2,020	2,165	3,192	44,575	43,781	10,370	11,813
1,000	0,2825	13,552	16,584	0,107	0,127	1,660	0,868	5,985	8,217	40,660	34,420	14,750	14,104
1,000	0,2300	18,133	19,995	0,164	0,176	2,515	2,890	12,780	11,734	33,530	29,172	15,245	15,118
1,000	0,1675	20,024	24,055	0,186	0,238	3,425	5,297	17,960	15,921	25,940	24,327	15,685	15,690
1,000	0,0625	29,463	30,876	0,304	0,349	7,465	9,341	28,225	22,955	13,585	19,617	15,775	15,100
2,250	0,3575	9,770	7,852	0,055	0,066	1,005	0,660	0,785	-2,107	48,665	58,007	13,365	13,474
2,250	0,2825	9,218	9,569	0,053	0,055	1,120	1,664	1,560	2,917	49,880	48,645	13,835	13,662
2,250	0,2300	10,792	10,771	0,082	0,060	1,450	2,366	3,760	6,434	47,470	43,398	14,280	14,066
2,250	0,1675	12,461	12,202	0,107	0,082	1,630	3,202	11,670	10,621	40,875	38,553	15,380	14,839
2,250	0,0625	16,615	14,607	0,161	0,153	7,295	4,607	15,835	17,656	32,940	33,843	16,035	16,854
Análisis de regresión													
Coeficiente de correlación múltiple		0,9477		0,9593		0,9541		0,9448		0,9471		0,8754	
Análisis de varianza													
F Calculado		32,3561		42,3605		25,4021		49,9312		52,3150		4,3726	
Valor crítico de F		9.4041E-06		2,4678E-06		3,206E-05		1,524E-06		1,1864E-06		0,0296	

