

**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

**DISTRIBUCIÓN FRACCIONAL DE LAS ESPECIES METÁLICAS Y
MINERALÓGICAS DE LA MENA NIQUELIFERA DE UN PERFIL DEL
YACIMIENTO PUNTA GORDA, MOA, HOLGUÍN, CUBA.**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas.

ING. GEORGE AGYEI

**MOA
2006**

AGRADECIMIENTO

A la amistad entre la Revolución Cubana y la República de Ghana que me ha permitido realizarme como hombre e investigador;

A todos los compañeros que con su apoyo, sugerencias y críticas constructivas hicieron posible esta obra, en particular a: Dr. Alberto Hernández Flores; Dr.C. Arturo Rojas Purón, Dr.C Pedro Beyris Mazar; Dr.C. Alfredo Coello Velázquez; Dr.C. Aristides Legrá; Dr.C. José Pons Herrera; Dr. C. Amaury Palacios Rodríguez y Dr.C. Eulicer Fernández Marisma Agradecemos la colaboración del Ing. Arturo Arderi, de la Empresa de Níquel “Comandante Che Guevara” por los trabajos de muestreo.

Agradecimiento a Lic. Juan Driggs de Moa Nickel S.A; Ing. Dismendis Rodríguez Gainza de de la empresa “Comandante Che Guevara”; Lic. Juan Serrano; Ing. Seidu Amadu Joeboy; Ing. Samy Abdul Raman; Ing. Miguel Loes Moreira; Dr.C. Gerardo Orozco Mazar, Dr.C. Roberto Díaz Martínez y los demás trabajadores de Laboratorio de Rayos-X de ISMM; Pachi y sus compañeros de la Brigada de Mantenimiento de ISMM; compañeros de la Residencia Estudiantil; Comedor; Sr. Jespere Gbetonon de Benin; Sr. Kasire de Togo y todos los hermanos de África, América Latina y Asia que cursan estudios aquí por su apoyo.

A los compañeros del Departamento de Metalurgia;

A mi novia, Yanielys por tanto apoyo y paciencia.

A todos los que de una forma u otra han contribuido a la realización de este sueño.

DEDICATORIA

A mis padres, abuelos y toda la familia por haberme educado y encaminado para hacer realidad este sueño.

SINTESIS

Con el objetivo de determinar la distribución másica y de contenido de la mena laterítica suministrada al proceso Caron en Moa, Holguín, Cuba, para la predicción de las regularidades de distribución másica y de contenido; en este trabajo se realiza la caracterización de las propiedades físicas más contrastantes: tamaño, susceptibilidad magnética y densidad mediante el análisis fraccional, con el empleo de las características de separación de Tizonov.

En el mismo se utilizó método histórico-lógico, hipotético deductivo con los métodos particulares en el área de conocimiento en cuestión, tales como análisis fraccionales por tamaño, densométrico y magnético junto a las técnicas de análisis de la Difracción de Rayos X, Florescencia de Rayos-X, Absorción Atómica, Análisis Térmico Diferencial y Termogravimetría. También son empleados las técnicas estadísticas y elementos de muestreo.

Como resultado de la investigación se establecen las regularidades de la distribución másica y del contenido de los elementos siguientes: Ni, Co, Fe, Al, Mg, SiO₂, Mn y Cr en los intervalos de tamaño, intensidad de corriente y densidad, herramientas, que aportan nuevos conocimientos sobre las potencialidades de preconcentración de los componentes cuyo efecto, contribuiría a regular la calidad de la laterita de balance suministrada al proceso extractivo para su aprovechamiento más integral y sostenible. Además se determinan las funciones que permiten describir la distribución másica y del contenido del mismo a partir de los contrastes ya mencionados, aspecto que permitirá predecir la posibilidad de identificar las partículas de acuerdo a las propiedades físicas mencionadas.

Por último, se complementan los resultados con una valoración mineralógica entre los productos de separación y las propiedades físicas, donde se confirma, en los materiales lateríticos cubanos, la presencia de una fase de Mn: litioforita, detectada por difracción de rayos - x según los reflejos 4,72 y 9,49 Å; presentándose según granos coniformes de color negro y no magnético, concentrado principalmente en las fracciones de 2,0 a 0,071mm y productos pesados del análisis densométrico.

INDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I MARCO CONCEPTUAL.....	3
Introducción.....	3
1.1 Aspectos geológicos sobre las cortezas ferroniquelíferas.....	8
1.2 Antecedentes y estado actual del beneficio de minerales lateríticos cubanos.....	9
1.3 Fundamento del método de análisis fraccional.....	3
1.4 Tendencias de inversión, consumo y desarrollo de tecnologías para el procesamiento de las lateritas niquelíferas.....	28
1.5 Beneficio de las lateritas.....	34
Conclusiones parciales.....	36
CAPITULO II METODOS Y MATERIALES.....	37
Introducción.....	37
2.1 Toma y preparación de la muestra.....	37
2.2 Metodología para el análisis granulométrico.....	37
2.3 Metodología para análisis fraccional magnético.....	38
2.4 Metodología para análisis fraccional densométrico.....	37
2.5 Método de determinación de la composición química de los productos.....	38
2.6 Método de la determinación de la composición mineralógica.....	39
CAPITULO III DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION FRACCIONAL.....	40
Introducción.....	40
3.1 Distribución másica del análisis granulométrico.....	40
3.1.1.-Distribución de los elementos químicos de las clases granulométricas de la mena laterítica.....	41
3.1.2. Mineralogía por granulometría de la laterítica de balance.....	41
3.1.3.-Densidad de las fracciones granulométricas.....	42
3.2 Resultados del análisis fraccional magnético.....	42
3.2.1-Caracterización másica de las fracciones granulométricas a distintas intensidades de corriente.....	46
3.2.2 Variación de los componentes químicos de las fracciones granulométricas.....	44

distintas intensidades de corriente eléctrica.....	58
3.2.3. -Mineralogía del análisis fraccional magnético.....	67
3.3. El análisis fraccional de la laterita de balance en líquido orgánico denso.....	67
3.3.1 Composición química de los productos de análisis en los medios densos.....	68
3.3.2 Caracterización mineralógica del análisis en los medios densos.....	69
3.3. Análisis de la distribución másica según tamaño de las partículas.....	69
3.3.1 Función de distribución de contenido según tamaño de las partículas.....	70
3.4 Distribución másica según análisis magnético.....	73
3.4.1 Distribución másica según el tamaño de la partícula y el análisis magnético.....	74
3.4.2.- Análisis de distribución de contenido según tamaño y análisis magnético.....	77
3.5.- Distribución másica de los productos no magnéticos.....	79
3.6-Distribución másica de los productos en medios densos.....	82
3.6.1-Distribución de contenido según densidad del medio de análisis.....	85
3.7- La aplicabilidad de los resultados de la investigación.....	87
Conclusiones Parciales.....	88
CONCLUSIONES FINALES.....	89
RECOMENDACIONES.....	90
SIMBOLOGIAS	
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	
ANEXOS	

INTRODUCCION

El encarecimiento de los procesos tecnológicos actuales producto del alto costo energético y la caída progresiva o a veces fluctuaciones del precio de los metales en el mercado, en el contexto de la actual crisis financiera mundial, ha generado diversos cuestionamientos de los investigadores, tecnólogos y en general la sociedad minera, sobre la búsqueda de procesos tecnológicos alternativos, lo cual puede lograrse, entre otros, el beneficio del mineral laterítico. Por esto, se hace necesario revisar y profundizar en los contrastes de las propiedades físicas como la susceptibilidad magnética, densidad y diámetro de la partícula mineral para la posible preconcentración de los componentes útiles.

La mena níquelífera formada a partir de la meteorización de las rocas básicas y ultrabásicas serpentinizadas del nordeste de Cuba oriental, constituye la materia prima mineral principal obtenida de los perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín, denominada industrialmente *laterita de balance* que se suministra al proceso Caron para la extracción de níquel y cobalto. La laterita de balance para el proceso Caron exige un contenido mayor de 35 % Fe, y mayor del 1% para el Ni (Vera, 1979), pero actualmente ya se empieza a tener en cuenta la presencia de otros metales como el Al, Cr, Co, Mn, que pueden ser extraídos con una visión más integral para su aprovechamiento, de ahí la necesidad de conocer con más detalle los aspectos mineralógicos de esta mena laterítica.

Los yacimientos lateríticos cubanos se caracterizan por ser menas oxidadas con potentes espesores de los horizontes de oceras que alcanzan valores de algunas decenas de metros, (Vera, 2001; Pérez-Mello, 2003). Su granulometría, quimismo y mineralogía son esenciales para la selección de su tratamiento metalúrgico.

Ponce y Carrillo (1984) valoran la composición sustancial, la granulometría y el carácter magnético de la mena ferroníquelífera en el yacimiento "La Delta". Más tarde, sobre la base de una muestra patrón de laterita, Ponce y Carrillo (1988) determinan la composición mineralógica por fracciones granulométricas y electromagnéticas en un rango de tamaño bastante amplio. Reportan que la clase predominante de la muestra es la (0,05-0,01) mm y como fases principales: goethita-hidrogoethita, minerales arcillosos, magnetitas, cromoespinelas, minerales de grupo de serpentina y minerales de manganeso. Las

investigaciones de (Rodríguez, 1990; Almaguer, 1993,1996; Beyris, 1997; Rojas, 1995) indican algunos contrastes en la concentración de los diferentes elementos en las zonas y partículas de diferentes granulometrias, por ejemplo, en la medida que disminuyen los contenidos de sílice y magnesio aumentan los contenidos de hierro y níquel. El níquel y el hierro tienden a concentrarse en las partículas más pequeñas (44 micrones) mientras que los minerales que contienen cobalto, cromo y manganeso se concentran en partículas intermedias entre 200 y 20 micrones y por su mayor densidad pueden ser separados de otros silicatos y óxidos acompañantes(Almaguer 1989, 1993, 1995; Rojas, 1995).

Beyris (1997) evaluando la influencia de la composición mineralógica de la pulpa cruda en la sedimentación demuestra que las fases silicatadas se concentran en las fracciones gruesas, mientras que las fases de óxidos de hierro se enriquecen en las fracciones granulométricas finas, lo que corrobora resultados previos para Beyris y Rojas (1994) para diferentes frentes de explotación.

Carthy y Falcón (1985); Leyva et al., (1995) reportan la obtención de concentrados de cromita a partir de un esquema combinado de clasificación-separación magnética- beneficio gravitacional de las colas de la planta "Comandante René Ramos Latour" de Nicaro. Para las lateritas de balance, Hernández, et al (1994) aplicando un minucioso esquema de lavado, demuestran que en el reboso de la clasificación, se incrementan los contenidos de hierro y níquel, y disminuyen los contenidos de aluminio y magnesio.

A finales de los años 80 y principios de los 90, investigadores del Departamento de Metalurgia del ISMM realizaron un grupo importante de trabajos encaminados al beneficio de las lateritas y sus escombros con varios enfoques, que han quedado resumidos en (Hernández et al., 1994,1997, 2000; Beyris, 1997; Coello et al., 1998; Ramírez, 2002).

(Hernández, 1997; Hernández et al., 2000) realizan un análisis teórico sobre la posibilidad de la concentración de los componentes principales del mineral laterítico, aplicando los elementos metodológicos aportados por Tijonov (1978,1984). De acuerdo con sus resultados es posible el incremento de níquel en 0,08 % y una disminución de contenido de aluminio y magnesio en 8,56 % y 6,58 % respectivamente en los rebozos de la clasificación.

Las curvas de beneficiabilidad constituyen una vía eficiente para la evaluación de la separación de menas cuyos minerales se diferencian en una sola propiedad física (densidad, susceptibilidad magnética y otras).

El índice de contraste según Tijonov (1984) se puede expresar como:

$$I_{c o n t r a s t e} = \frac{\gamma - 1}{\beta_{m i n}} \int_{z_{m i n}}^{z_{m a x}} \left| \beta \left(\frac{z}{z} \right) - \beta_{i n i c} \right| \gamma \left(\frac{z}{z} \right) d z \quad (1)$$

donde:

$\gamma(z)$ - distribución diferencial másica;

$\beta(z)$ - distribución diferencial de contenido.

Coello et al (1998) plantean que de la fórmula (1) se puede apreciar que menas con distintos grados de beneficiabilidad $\gamma(z)$ y $\beta(z)$ pueden tener igual índice de contraste, de manera que no es aconsejable el uso de este criterio para menas complejas (multicomponentes), como es el caso de las lateritas: como medida de beneficiabilidad puede conducir a errores impredecibles. Por otra parte, 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 tecnológicos en el tratamiento de menas complejas. Coello et al (1998) después de un riguroso análisis de los trabajos precedentes fundamentaron la inconveniencia de usar las curvas de beneficiabilidad para el estudio de los minerales lateríticos y sus escombros, y proponen el uso del enfoque fraccional por las siguientes razones:

- Las partículas minerales se diferencian no por una propiedad física, sino por varias, lo cual implica el uso de diferentes propiedades de separación.
- Las partículas minerales son portadoras no solo de un mineral útil, sino de varios.
- La utilización del enfoque fraccional por más de una propiedad de separación permite acotar los límites de separación de las fases mineralógicas presentes en el escombros laterítico.

Las funciones $\gamma(z)$ y $\beta(z)$ son un medio sencillo, necesario y suficiente para la caracterización de cualquier materia prima mineral o producto.

Cualquier otro método es insuficiente o excesivamente complicado como es el caso de las curvas de beneficiabilidad, cuando los componentes se diferencian por más de dos

propiedades físicas. Estas funciones de distribución no sólo permiten el cálculo de los indicadores clásicos del beneficio, sino también el pronóstico de los índices tecnológicos de cualquier esquema de beneficio, independientemente de la propiedad de separación (Coello et al., 1998).

El estudio y conocimiento sobre las potencialidades de preconcentración de los componentes de la laterita de balance es aún insuficiente: cualquier estudio orientado a la inclusión de operaciones de beneficio en calidad de preconcentración en el proceso Caron, es preciso valorar la distribución fraccional de elementos químicos y las fases minerales en la mena laterítica, comprendiendo partículas con rango de tamaño desde 8,0 a 0,044mm.

Se sostiene que ante la necesidad de resolver el problema práctico de la industria extractiva relacionado con el insuficiente aprovechamiento de las potencialidades de beneficio de la laterita de balance con el uso de contrastes: tamaño de las partículas, susceptibilidad magnética y densidad para el incremento de la eficiencia de los procesos metalúrgicos, es imprescindible previamente establecer la distribución fraccional de las especies metálicas y las fases mineralógicas.

El objeto del presente trabajo lo constituye la mena laterítica del níquel de un perfil del yacimiento Punta Gorda alimentada al proceso Caron de la Planta "Comandante Ernesto Che Guevara". **El campo de acción** es la distribución fraccional másica y del contenido de las fases mineralógicas y los principales elementos químicos de la mena de la laterita de balance.

El problema científico a resolver es la complejidad y las serias limitaciones metodológicas de la aplicabilidad de las curvas de beneficiabilidad al estudio de la mena niquelífera para la búsqueda de alternativas de la preconcentración que satisfagan las necesidades industriales de lograr mayor eficiencia tecnológica en el proceso Caron.

Objetivo general:

Determinar la distribución fraccional de la composición substancial de la laterita de balance considerando como propiedades de análisis: el tamaño de las partículas, la densidad, susceptibilidad magnética y sus combinaciones, para la predicción de las regularidades de distribución másica y de contenido de la mena niquelífera alimentada al proceso extractivo de la tecnología Caron.

Objetivos específicos:

- Determinar la distribución diferencial másica y de contenido de las principales fases mineralógicas y especies metálicas presentes en la laterita de balance considerando el tamaño de las partículas minerales, su densidad, susceptibilidad magnética y sus combinaciones como propiedades de análisis.
- Establecer las ecuaciones integro-diferenciales que describan la distribución másica y de contenido de la composición substancial de las lateritas de balance considerando las propiedades de separación anteriormente declaradas.

La hipótesis científica que se sostiene es que, la aplicación del enfoque fraccional en la determinación de la distribución de la composición substancial de la laterita de balance de un perfil del yacimiento Punta Gorda permitirá establecer las regularidades de la distribución másica $\gamma(L,D)$, $\gamma(L,r)$ y de contenido $\beta(L,D)$, $\beta(L,r)$ de las especies metálicas y las fases mineralógicas de acuerdo a las propiedades de análisis: tamaño de partícula, densidad y susceptibilidad magnética y sus combinaciones; a partir de la cual se pueden obtener expresiones matemáticas para la predicción y pronóstico de las regularidades de la distribución, la que potenciarán a resolver el problema relacionado con la complejidad y las serias limitaciones metodológicas de la aplicabilidad de las curvas de beneficiabilidad al estudio de la mena níquelífera para la búsqueda de alternativas de la preconcentración.

Para el cumplimiento de los objetivos específicos se realizarán las siguientes tareas:

- Caracterización del comportamiento de la composición másica, mineralógica, y química de la mena de acuerdo a la susceptibilidad magnética, densidad y tamaño de las partículas minerales.
- Determinación de la distribución de la composición substancial de acuerdo al tamaño de las partículas minerales, su densidad, susceptibilidad magnética y sus combinaciones como propiedades de separación.
- Validación de las ecuaciones de la distribución másica y de contenido de la composición substancial de las lateritas de balance.

En el trabajo, como **métodos de investigación**, fueron empleados tanto los métodos teóricos como los empíricos. Dentro de los métodos teóricos, para el desarrollo de la investigación se utilizó el método histórico-lógico el cual permitió el diagnóstico del objeto de estudio

mediante la evaluación de su tendencia, historia y evolución para la precisión en la formulación del problema científico y la fundamentación de la investigación.

También se hizo uso del método hipotético-deductivo, así como los procedimientos de análisis y síntesis, y la inducción y deducción en la valoración y discusión de los resultados. Dentro de los métodos empíricos se emplearon diferentes procedimientos propios de la disciplina del beneficio de minerales tales como los análisis fraccionales, así como diferentes técnicas de la caracterización de materiales, las técnicas estadísticas y otras herramientas matemáticas para la modelación.

Los aportes científicos:

- Las regularidades de la distribución másica y de contenido de las principales fases mineralógicas y especies químicas contenidas en la laterita de balance.
- Las ecuaciones íntegro-diferenciales que describen la distribución de la composición substancial de las lateritas de balance de acuerdo al tamaño de las partículas minerales, su densidad, susceptibilidad magnética y sus combinaciones como propiedades de análisis.

Los resultados de este trabajo han sido presentados en los siguientes eventos científicos:

- IV Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales CINAREM'2004, Moa, Holguín, Cuba, mayo del 2004.
- I Jornada Científica de la Sociedad Cubana de Geología, Filial Moa, Moa, Holguín, octubre del 2004.
- I Congreso de Minería (Minería 2005), II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas MIN2-P51, Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias 2005, Palacio de Convenciones, La Habana, 5-8 de abril del 2005.
- IX Simposio de Geología del Amazonía- Belém, Pará, Brasil, Marzo del 2006.

Las publicaciones sobre este tema por el autor son las siguientes:

- Agyei, G., Rojas, A. L., P., Hernández, A. F., 2005. Caracterización mineralógica de la mena niquelífera en un perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, Holguín, Cuba. I Congreso de Minería (Minería 2005). II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas MiN2-P51, Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias 2005, Palacio de Convenciones, La Habana, 5-8 de abril del 2005. Memorias en CD-ROM editado por Centro Nacional de Información Geológica y Instituto Nacional de Paleontología de Cuba. ISBN 959-7171-03-7. Sociedad Cubana de Geología.
- Agyei, G., Rojas, A. L., P., Hernández, A. F., Coello, A., Beyris, P.M., Caracterización mineralógica de la mena niquelífera en un perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín, Revista Minería y Geología, No.1 del Vol. XXII al año 2006.
- Agyei, G., Hernández, A. F., Beyris, P., Coello, A., Rojas, A. L., P. Modelación de la distribución fraccional de la mena niquelífera en un perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín, Revista Minería y Geología, No.1 del Vol. XXII al año 2006.

CAPITULO I

Marco Conceptual

CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL.

Introducción

La laterita ferroniquelífera juega un papel importante en la industria global de níquel y cuenta con alrededor de 40 % del total de la producción de níquel y alrededor de 70 % de los depósitos de níquel mundial se encuentran en las lateritas (Anthony y Flett, 1997; Elías, 2002; Ashok et al., 2004). Cerca de 45 % del níquel para la producción de acero proviene del reciclaje y reprocesamiento de chatarras (Moskalyk y Alkintazi, 2002).

A continuación se exponen apuntes de aspectos geológicos de la laterita, los antecedentes y estado actual del beneficio de los minerales lateríticos cubanos. También se hace una valoración sobre las tendencias de las inversiones y desarrollo, nuevos usos del níquel, fundamentos teóricos sobre análisis fraccional así como el papel que jugarán los métodos de beneficio como vías para el perfeccionamiento de los eslabones productivos.

1.1- Aspectos geológicos sobre las cortezas ferroniquelíferas

Las cortezas ferroniquelíferas se forman a partir del proceso de *lateritización*, la meteorización química que ocurre en climas tropicales húmedos, en un período de tiempo largo en condiciones de relativa estabilidad tectónica, como resultado de la formación de rególito con características distintivas. El proceso de lateritización incluye la descomposición de minerales primarios y la salida de algunos componentes químicos hacia aguas subterráneas, la lixiviación de componentes móviles, concentración residual del componente inmóvil e insoluble, y la formación de nuevos minerales que son estables en el ambiente de meteorización (Giolightly, 1979, 1981; Smirnov, 1982; Brand et al., 1998; Butt y Zeegers, 1992; Elías, 2002). El efecto neto de las transformaciones y la movilidad diferenciada de los elementos producen la estratificación o las capas del manto del material meteorizado sobreyacente de la roca madre que lo produjo, y es referido generalmente como el perfil laterítico (Fig. 1).

En el fondo del perfil, la meteorización ocurre entre minerales y fronteras fracturadas. En esta zona existen abundantes rocas frescas y productos pocos alterados. Por encima de este perfil, la proporción de minerales primarios sobrevivientes disminuye. Es una zona fuertemente

fracturada y completamente alterada dejando partes sueltas de la roca madre, flotando en una mezcla de minerales primarios y alterados donde la estructura de la roca primaria es preservada.

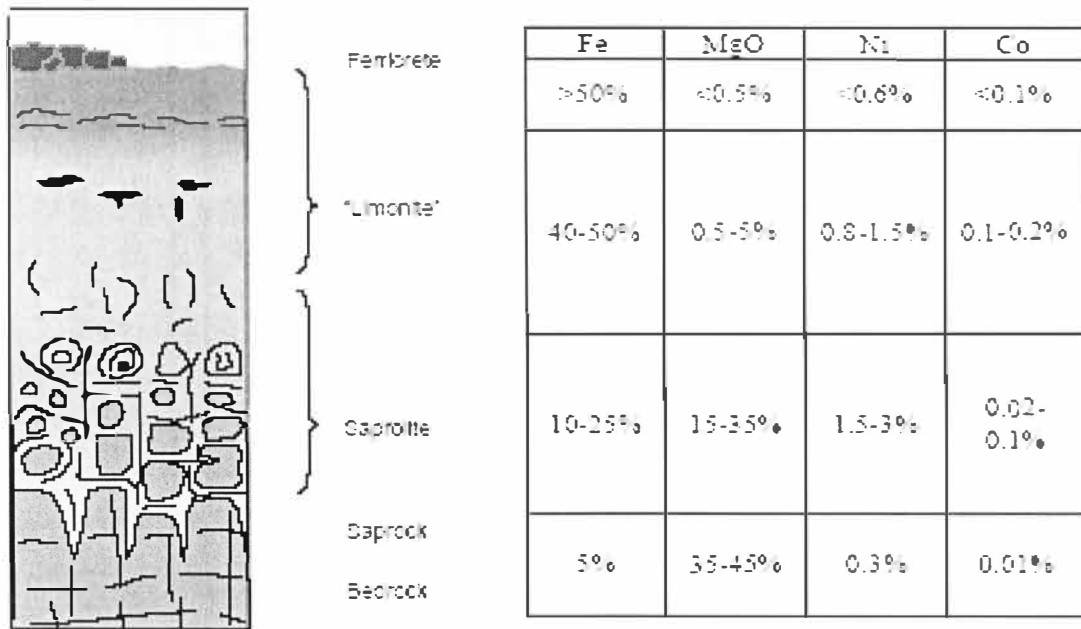


Figura 1: Perfil esquemático de laterita desarrollado sobre roca ultramáfica en un clima tropical mostrando composición química orientativa en % en peso. (Elias, 2002)

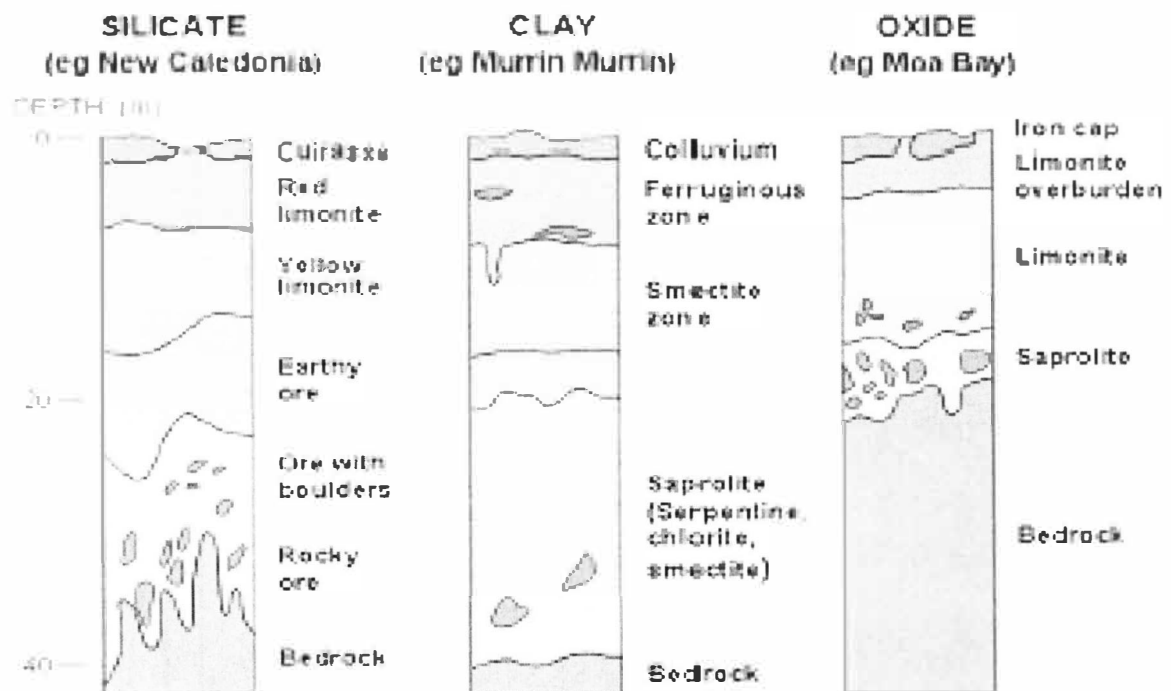


Figura. 2 Comparación entre las principales tipos de perfiles lateríticos (Elias, 2002)

Existen varios criterios (Golightly, 1979; Elias et al., 1981; Smirnov, 1982; Evans, 1993; Lavaut, 1998; Brand et al., 1996, 1998; Ariosa et al 2003) sobre la clasificación de la zonalidad vertical de la corteza de intemperismo: los criterios litológicos y mineralógicos. Sobre la base de la mineralogía predominante del perfil es posible clasificar los tipos de lateritas formadas en rocas ultramáficas en tres categorías (Fig. 2):

- Laterita silicatada: Compuesta fundamentalmente por silicatos de magnesio y níquel hidratado;
- Laterita arcillosa: Compuesto fundamentalmente por esmectitas en la capa superior del perfil;
- Laterita oxidada: compuesta fundamentalmente por óxidos e hidróxidos de hierro en la capa superior superpuesta en la roca madre alterada o fresca.

Las lateritas oxidadas son los productos finales más frecuentes de la lateritización de las rocas ultramáficas. En presencia de agua, las rocas primarias formadoras de minerales, principalmente olivino y/o serpentina, piroxenos, etc., se descomponen por hidrólisis expulsando sus componentes como iones en soluciones acuosas. El olivino es el mineral menos estable y es el primero en ser meteorizado en un ambiente tropical húmedo. El hierro es expulsado pero oxidado y precipitado en forma de hidróxido férrico, inicialmente amorfo o pobremente cristalino, pero progresivamente precrystalizado a goethita. La serpentina se hidroliza aportando magnesio y sílice los cuales son lixiviados en gran medida, y su lugar es tomada por goethita pseudomórfica. El níquel y el cobalto se comportan distintos a los elementos principales. A medida que estos minerales se destruyen, los iones de níquel y cobalto que salen tienen afinidad química al nuevo hidróxido de hierro y se concentran en su estructura por combinación de adsorción y sustitución de Fe^{3+} (Cierth, 1990). El níquel y el cobalto también son incorporados fuertemente en la estructura de óxidos de manganeso (casbolanas).

Las tendencias mineralógicas de la zona ocrea refleja la transformación gradual de goethita a hematita. La cristalinidad mejora con el tiempo para la formación de una goethita bien formada y estructurada con color amarillo marrón que es progresivamente sustituido por rojo-marrón a medida que la goethita se deshidrolisa. La transformación de goethita a hematita significa la pérdida de níquel, ya que la hematita no puede acomodar el níquel que había adquirido en la fase goethita en sus intersticios o estructura. En la cima del perfil una formación nodular se desarrolla en la limonita roja que se transforma a una corteza compacta cuando los bloques se unen y endurecen. Esta formación se llama ferricreta, coraza, o *cutasse*.

Los factores que influyen en la meteorización y desarrollo de perfil laterítico son el clima, la topografía, hidrogeología, factores tectónicos, el tipo de la roca madre y su estructura. Muchos de estos factores están íntimamente relacionados y las características de un perfil pueden ser descritas como resultado del efecto combinado de los factores individuales actuando en el tiempo. Las condiciones climáticas incidieron en las transformaciones de los minerales primarios existentes en las ultramafitas serpentinizadas, en particular las registradas en las zonas tropicales y subtropicales del planeta, donde se registran variaciones de temperaturas que favorecen la destrucción de la celda elemental de los minerales

ferromagnesianes. Las condiciones climáticas predominantes en las latitudes tropicales y subtropicales, situadas a la latitud de 22° Norte y 22° Sur, constituyen las zonas más favorables para el desarrollo del proceso de transformación de los minerales primarios en la corteza de meteorización, sobre todo, porque en estas áreas del planeta es donde se presentan períodos de seca y de precipitaciones de forma alterna y no se manifiestan las estaciones como en las regiones templadas del planeta.

La geomorfología y el relieve de los complejos ultramáficos tienen amplia incidencia en la intensidad del proceso de laterización y en muchos casos determina la potencia de los horizontes meníferos e incluso la no existencia del desarrollo de menas lateríticas. Se ha podido comprobar que en un relieve de altas pendientes, no existen cortezas de intemperismo; así mismo, las grandes áreas con vastas llanuras no son favorables para el desarrollo de cortezas de intemperismo con todos sus horizontes.

Desde el punto de vista de los valores de los ángulos de las pendientes, los valores óptimos están entre aproximadamente 3-5 grados hasta valores de 12 - 15 grados. Estas pendientes se localizan en los relieves de colinas suaves y no en las condiciones de altas montañas donde los valores de los ángulos de las pendientes no permiten su desarrollo.

Las condiciones hidrogeológicas de los complejos ultramáficos serpentinizados inciden en el proceso de laterización y de hecho en la formación de los yacimientos de menas lateríticas, debe tenerse presente que todas las transformaciones de los minerales primarios en minerales lateríticos se producen en reacciones acuosas, donde se combinan los elementos químicos, los que originan compuestos solubles que migran de la corteza de intemperismo, otros por el contrario, se forman compuestos estables que vienen a constituir los minerales existentes en los horizontes lateríticos.

Además, las aguas, constituyen el agente principal de la meteorización de las rocas primarias al favorecer el desarrollo de las reacciones de transformación de los minerales primarios, regula el potencial de oxidación del medio y forma las fases mineralógicas de los minerales hidratados, como es el caso del grupo de la serpentina.

La acción de los agentes de meteorización sobre las litologías máficas y ultramáficas van produciendo la destrucción de los minerales primarios, en particular los minerales ferromagnesianes, olivino y piroxenos. Las transformaciones que se llevan a cabo en la corteza de meteorización se realizan a través de reacciones químicas:

- Oxidación
- Hidratación
- Hidrólisis
- Diálisis.

La oxidación es la más frecuente de las transformaciones que tienen lugar durante el proceso de lateritización de las rocas ultramáficas serpentinizadas, la oxidación está condicionada por la acción del oxígeno de la atmósfera sobre los elementos químicos que se liberan durante el proceso de transformación de los minerales primarios, en particular, del hierro, aluminio y manganeso.

El resultado de las reacciones de oxidación es la formación de óxidos e hidróxidos en la corteza de meteorización, formándose en unos casos, compuestos solubles que migran de la corteza; en cambio, otros elementos forman minerales estables los que vienen a constituir la composición fundamental de las cortezas ferro-niquelíferas cubanas y en otras regiones del planeta. Un ejemplo, está dado en la composición de los horizontes del perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, en los que existe un predominio de minerales oxidados (Muñoz, 2004, Geología y mineralogía de yacimientos residuales de menas lateríticas de Fe-Ni-Co, Material didáctico no editado, Departamento de Geología – ISMIMMo).

La hidratación está relacionada con las transformaciones de los minerales primarios, desde el mismo inicio del proceso de lateritización de las rocas ultramáficas serpentinizadas, la hidratación se pone de manifiesto en los procesos de adsorción de moléculas de agua en la superficie de los minerales en formación en la corteza de intemperismo, y por otra parte, se produce la incorporación de moléculas de agua a la red de los nuevos minerales que se van formando, ejemplo de lo anterior lo constituyen, la existencia de hidróxidos de hierro en las menas lateríticas.

La hidrólisis incluye las reacciones que se desarrollan entre los minerales primarios de las rocas ultrabásicas serpentinizadas con el H⁺ del agua disociada; la intensidad del proceso de hidrólisis está condicionada por el valor del potencial de oxidación del medio acuoso y la existencia de otros ácidos como el carbónico y el incremento de la temperatura del sistema. Durante la hidrólisis, los silicatos de los minerales primarios son destruidos y en su lugar surgen minerales arcillosos del grupo de las esmécticas niquelíferas.

La diálisis incluye las reacciones que conllevan la limpieza de los minerales arcillosos al favorecer la migración de los cationes metálicos presentes en la estructura cristalina de estos minerales. Las reacciones de oxidación, hidratación, hidrólisis y diálisis se desarrollan casi simultáneamente en el proceso de lateritización de las ultramafitas serpentinizadas.

El yacimiento Punta Gorda es un típico depósito residual de níquel, cobalto e hierro, asociado a una corteza de meteorización desarrollada en forma de un potente manto, esencialmente laterítico casi continuo, sobre un macizo de rocas ultrabásicas serpentinizadas, el cual se puede caracterizar por una serie de aspectos entre los cuales se destacan los geológicos y geoquímicos, cuyos principales parámetros se expresan en la tabla 1. El área ocupada, que cubre una superficie aproximadamente de 6,5 km² por el yacimiento, posee características que han permitido el desarrollo y conservación de una potente corteza de meteorización, donde ha tenido un papel fundamental la altura, la pendiente y la rugosidad del relieve.

La mineralogía de las menas lateríticas del yacimiento Punta Gorda es sumamente compleja y está constituida por óxidos, esmectitas, minerales del grupo de la serpentina y minerales primarios de las ultramafitas serpentinizadas; no menos de 30 minerales entran al proceso metalúrgico de la planta “Comandante Ernesto Che Guevara” (Muñoz et al., 2005).

Tabla 1. Características generales del yacimiento Punta Gorda. (Vera, 2001)

Geológicas				
VARIABLES	Mínimo	Máximo	Media	Coeff. De variación (%)
Potencia total de la corteza (m)	0,00	56,19	16,86	37,5
Potencia útil de la corteza (m)	0,00	34,29	8,92	52,24
Potencia de escombro (m)	0,00	28,26	5,20	69,67
Geoquímicas				
Cont. de Fe en la corteza (%)	5,00	50,37	37,28	14,63
Cont. de Fe en la Capa útil (%)	5,00	51,62	36,15	20,92
Cont. de Ni en la corteza (%)	0,2	2,14	0,994	23,38
Cont. de Ni en la Capa útil (%)	0,2	3,23	1,294	21,55
Cont. de Co en la corteza (%)	0,01	0,32	0,08	31,63
Cont. de Co en la Capa útil (%)	0,01	0,49	0,092	34,49

Varios trabajos (Oliveira et al., 2001); (Vera, 2001); (Muñoz et al., 2005); (Rojas, 1995); (Rojas et al., 2005) han demostrado que el mineral predominante en las menas lateríticas de níquel y cobalto, en el horizonte limonítico, donde proviene la muestra bajo análisis, en el yacimiento Punta Gorda es la goethita, y representa alrededor del 70 % de la mena níquelífera del horizonte. El principal portador de cobalto en las menas lateríticas de níquel y cobalto, en el horizonte limonítico en el yacimiento Punta Gorda es la asbolana - $m(\text{Co}, \text{NiO}, \text{MnO}_2) \cdot n\text{H}_2\text{O}$, el que se distribuye en todo el corte del perfil, además de otros minerales de manganeso como la pirolusita y el psilomelano.

1.2. Antecedentes y estado actual del beneficio de minerales lateríticos cubanos

Los minerales lateríticos han sido objeto de estudio por diferentes investigadores, la mayoría encaminados a la recuperación del níquel y su incorporación a las plantas metalúrgicas. De forma general, los principales resultados de las investigaciones realizadas hasta el momento, han estado dirigidas a:

- La caracterización desde el punto de vista geológico, físico, químico y mineralógico, de los minerales lateríticos y de sus escombros, con el objetivo de lograr un mayor aprovechamiento de estas materias primas;
- La preparación y beneficio de minerales lateríticos, para garantizar los índices metalúrgicos, principalmente de los procesos de sedimentación y lixiviación en la tecnología ácida a presión: la obtención de concentrados de cromo y hierro, fundamentalmente para la industria ferrosa;
- El desarrollo de tecnologías para la recuperación u obtención de determinados elementos presentes en los minerales lateríticos.

Sobre la mineralogía de la laterita cubana, (Kudaselek et al., 1967; Vera, 1979; Formel, 1979; Formel y Oro, 1980; Vershinin et al., 1984; Quintana Puchol, 1985; Oustroumov et al., 1985, 86, 87; Cordeiro et al., 1987a, 87b.; Rojas-Purrón et al., 1993a; Rojas-Purrón y Carballo, 1993b; Carpote et al., 1993; Almaguer y Zamazny, 1993; Rojas Purón y Beyris, 1994; Rojas Purón y Orozco, 1995; Almaguer, 1995, 1996, 1996b; Lavaut, 1998; Da Silva et al., 2001;

(Oliveira et al., 2001; Rojas Purrón y Turro, 2003 ; Proenza et al., 2003; Rojas, et al., 2005) coinciden que es un material esencialmente de granulometría fina; el principal mineral es la goethita, portador fundamental del níquel.

Ponce (1984) en la mineralogía y composición sustancial de la mena del yacimiento "Delta", Moa, trata sobre las principales características mineralógicas del mismo, y realiza un análisis granulométrico de los diferentes tipos de menas, análisis químico y valora mineralógicamente y electromagnéticamente las muestras. El análisis granulométrico lo realizó con los siguientes tamices: 1.0 mm; 0.5 mm; 0.25 mm; 0.1 mm; 0.05 mm, 0.005 mm. La clase predominante es 0.05 mm con contenidos de 75-86 %. Del análisis químico, el óxido predominante es el férrico (36-68 %). Haciendo una caracterización, desde el punto de vista químico y mineralógico de las lateritas del norte oriental, Vershinin et al. (1984) plantean que en la composición mineral de estas y de los oceres inestructurales predominan la goethita, la aluminogoethita, la maghemita, la hematita, y la hidragilita, lo que coincide con el trabajo realizado por Rojas (1995). En esencia, los autores caracterizan a estas lateritas como una mena de hierro con impurezas de níquel, cobalto y cromo. Muñoz et al (2005) partiendo de los resultados analíticos de alta precisión a través de Microscopio Electrónico de Barrido, establecen la composición mineralógica básica para cada horizonte del perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, identificándose goethita, hematita, gibbsita, y cromita. El níquel se asocia principalmente a la goethita y el cobalto a los minerales de manganeso, coincidiendo con (Rojas, 1995; Oliveira et al., 2001; Da Silva et al., 2001).

Puchol (1984, 1985) realiza estudio granulométrico de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa mediante uso de tamices y el método de levigación, llegando a la conclusión de que el contenido másico de la fracción 0,037mm es de 82 a 87 %.

Ostroumov et al (1985) estudian la composición mineralógica de los perfiles de los yacimientos Moa, Atlántico y Yamanigüey, demostrando que mineralógicamente, en los escombros lateríticos, predominan las fracciones mayores que 80 µm y las fases goethita, hematita, magnetita, maghemita gibbsita. Carthy y Falcón (1985) realizan un estudio preliminar sobre el beneficio de las colas de Nicaro. Se presentan resultados de análisis granulométrico, químico y beneficio del mismo. Ellos plantean en su trabajo que más de 70% de la cola tiene partículas menores de 0,074 mm, se hace una valoración sobre el contenido de

Fe y Cr_2O_3 . El hierro tiene contenido uniforme en casi todo el espectro granulométrico y el cromo se concentra en el rango de $(-0,2 + 0,1)$ mm y $(0,02 + 0,01)$ mm.

Oustroumov et al (1987) hacen una valoración general sobre los minerales presentes en la mina Moa utilizando Difracción de Rayos X, ensayos térmicos, análisis granulométrico y químico, indicando que la granulometría de horizonte de oceres es tendente a la fracción $-0,020$ mm con transición de la parte superior de dicho horizonte hacia la fracción $+0,080$ mm. Mineralógicamente plantean que la lizardita, antigorita, nepouita se concentran en la fracción $+0,080$ mm y en la fracción no magnética. Cordeiro y colaboradores (1987a, 1987b) realizan análisis químico de fases de las lateritas cubanas describiendo la distribución de níquel en microfases de oceres provenientes de Camariocas Este, Norte y Levisa. Reportan que el níquel no estructural oscila entre $0,3 - 1,4$ %, el níquel asociado a la serpentina ($6,5 - 22,8$ %) y el níquel asociado a la goethita ($73 - 96,30$ %) coincidiendo con los resultados de Capote et al (1993) que agregan que el hierro amorfo contiene aproximadamente 12 % del níquel.

Peña y Rubio (1990) hacen un estudio de beneficio de escombros, sometiendo el mineral primeramente a operaciones de trituración y cribado en ciclo cerrado con el objetivo de obtener un producto con una granulometría menor de 5 mm, el que luego fue alimentado a una criba pulsante hidráulica donde se obtuvieron tres productos, de los cuales, dos presentan contenido de hierro entre 40 y 50 %, siendo el contenido de este elemento para el tercer producto entre el 20 y 30 %. La fracción fina fue sometida a esquemas combinados de beneficio como la tostación magnetizante con separación magnética a bajas intensidades y con flotación aniónica inversa. La separación magnética no arrojó resultados satisfactorios; además con los reactivos utilizados en el proceso de flotación no se logró el beneficio del mineral. Vázquez (1992) estudia dos esquemas para la obtención de concentrados de cromo a partir de cortezas de intemperismo de Pinares de Mayarí obteniéndose los mejores resultados en uno de estos esquemas. Las cromoespinelas se concentran en las clases intermedias lo que posibilita su separación.

Almaguer y Zamarsky (1993) determinan la distribución del Ni, Fe y Co en los tamaños de los granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo. Abordan sobre la mineralogía, granulometría para posible beneficio por tamaño para el aprovechamiento integral de las lateritas; se realiza la caracterización granulométrica desde $1,6$ mm hasta $0,05$ mm, ofreciendo análisis estadístico del contenido de Fe, Ni, Co. El níquel está distribuido uniformemente

coincidiendo con los resultados de Agyei et al. (2005). Paleón y Hernández (1993) realizan ensayos continuos utilizando esquemas de reducción de tamaño, lavado, separación magnética y beneficio gravitacional de muestras de espesadores de pulpa así como los de escombros de los yacimientos suministrados a la Moa Nickel S.A., obteniendo resultados de que la cromita se concentra en el producto magnético y la fracción pesada del producto gravitacional. El níquel se concentra en las clases finas y los productos ligeros del beneficio gravitacional. El hierro se concentra en la clase más fina fundamentalmente, aunque aparece una cantidad con alta susceptibilidad magnética, en el caso del escombros, los perdigones también lo concentran. Rojas et al. (1993a) hacen una caracterización mineralógica económica del material de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa del yacimiento Moa. Se valora mineralógicamente el material que constituye el rechazo actual de la planta de preparación de pulpa de Moa Níquel S.A. En el mismo se hacen los análisis granulométricos, químicos y mineralógicos. El análisis granulométrico con tamices 1,4 mm; 0,1mm; 0,08 mm; 0,056 mm revela que el 60 % de la masa del producto de rechazo está por debajo de 0,83 mm lo que evidencia la ineficiencia del proceso de preparación de la pulpa. También los investigadores reportan que la química del material de rechazo y el material de alimentación es similar. El níquel de 1,18 % para el material alimentado y 1,08 % para rechazo respectivamente lo cual constituye una pérdida de enormes recursos. Ambos materiales tienen altos contenidos de Fe, Co, y Mn. El níquel muestra un significativo aumento hacia las fracciones más finas (menores de 56 μ m), el Fe, en la fina; el Mg, en las gruesas; y el cobalto presenta un comportamiento irregular. Señalan los autores que el 12 % del material alimentado se pierde por insuficiencia tecnológica.

Durán y Angulo (1994) caracterizan el escombros laterítico a través de un análisis fraccional magnético, analizando clases de tamaño (-0,4 + 0,074) mm; (- 0,074 mm + 0,044) m.m y - 0,044 mm; y, las intensidades de corriente que oscilan entre: 0-1; 1-3; 3-5; 5-7 A y mayores que 7 A. Se comprueba que el cobalto y manganeso se encuentra en la fracción -0,4 +0,074 mm lo cual sugiere la presencia de asbolanas en esta fracción.

Rojas et al (1993b) realizan la valoración mineralógica del material procesado en la empresa de níquel "Che Guevara". Se revelan también que las fases minerales presentes en el material alimentado a los hornos de tostación son fundamentalmente óxidos e hidróxidos de Fe: goethita e hidrogóethita, hematita, magnetita que alcanzan hasta el 70 % del peso de la muestra. Las fases minerales cristalinas presentes tanto en el material reducido como en el

producto lixiviado y sedimentado son principalmente magnetita, forsterita, cuarzo y clorita. Entre las fases de magnetita y forsterita están los responsables de la retención de Ni en su estructura que no permiten su recuperación.

Leyva (1995) en su estudio estructural de los minerales componentes de las colas de Niaro beneficia el material en un clasificador mecánico (espiral), separación magnética húmeda y concentración en mesa de sacudida. Obtiene resultados sobre la composición elemental cualitativa y cuantitativa, así como, la morfología de algunas partículas minerales presentes en la cola de la "Empresa Comandante Rene Ramos Latour". La cola tiene alto contenido de SiO₂, Al, y significativo contenido de Fe. La cromita se enriquece en el producto pesado de la mesa de concentración (de 2.46 % en la cabeza a 42.0 % en el producto pesado de la mesa). Más de 80 % del material de cola es inferior a 10 µm.

Hernández et al (1995) realizan un estudio para la obtención de cromitas a partir de la corteza de intemperismo "Casimba", Pinares de Mayarí, en él se hace una valoración de las posibilidades de concentración de las cromitas por lavado y beneficio en separadores espirales. Los autores afirman que los mejores indicadores de beneficio se obtienen para la clase (+0.85 # 0.16) mm para un 47.61 %. Los métodos estadísticos y de diseño experimental para describir la influencia del lavado revelan que hay que disminuir el tiempo de lavado para disminuir el consumo específico de agua y para evitar que pase mucha arcilla y por lo tanto el porcentaje de cromita disminuye. Almaguer (1995) en su estudio sobre las partículas finas de la corteza de intemperismo con el uso de avanzados métodos de Absorción Atómica y Microsonda, análisis granulométrico, Difracción de rayos X, Análisis Térmico Diferencial, Espectroscopia Infrarroja y Microscopio Electrónico, expresa que en el perfil de esta corteza las partículas predominantes corresponden a los de tamaño de partículas menores de 50 µm y que componen el 85 % de las zonas oerosas que están compuestas generalmente, por fases monominerales de goethita. Las esmécticas supeditan a las goethitas en la base del corte. La fracción menor de 50µ está formada por una sola fase: la goethita. Estas goethitas consolidan su cristalinidad hacia la zona de oxidación. El níquel está asociado a la goethita en la zona de oeros y con las esmécticas en la base del corte. También existe distribución de cobalto en psilomelano. Además reporta que el 60 % del volumen de la partícula finas están comprendidos entre 5 µm y 45 µm. Concluye que las características finas de los depósitos oerosos favorecen el beneficio, desde el punto de vista granulométrico para el

aprovechamiento integral de las lateritas. El uso de medios densos a los escombros lateríticos por Pando y Sosa (1995), caracterizándose las fracciones mayores de 0,83 mm reportan la distribución Fe, Ni, Al y Si en el material.

El estudio realizado por Almaguer (1996a) de la mineralogía de los oceres determinan que las fases principales son goethita (60 %-85 %), los minerales arcillosos (6,0 -13 %), las espínelas cromíferas no sobrepasan el 6 % y los minerales de Mn alcanzan (1,0 -2,0 %). En la fracción magnética, Fe_2O_3 aumenta desde la parte inferior de los oceres hacia su nivel superior variando, desde 40,16 % en oceres estructurales hasta 71,01 % en oceres con concreciones. La composición química de las principales fases secundarios son SiO_2 (5,01 -24,08 %), Al_2O_3 (0,85 -8,35 %) según la sección de oceres. El porcentaje en peso las fracciones magnéticas del material oceroso no sobrepasa 10 % y están constituidas por magnetita o minerales acompañantes. Este estudio también agrega que la fracción magnética es la más enriquecida en cobalto. También Almaguer (1996b) en su investigación sobre la composición química de la pulpa limonítica durante un periodo de crisis de sedimentación de la planta de Moa Níquel S.A., mediante análisis granulométrico desde 0,83 mm hasta 20 μm con métodos analíticos cuantitativos y cualitativos observa que para todos los grupos de la pulpa, el componente amorfo es mayoritario en los minerales de Mn muy enriquecida en Co y se localiza en la clases intermedias hacia las finas, desde los tamaño mayores de 150 μm . El cromo se encuentra en las clases gruesas.

Falcón et al. (1997a) ofrecen resultados sobre estudio de la sedimentación de la pulpa cruda del mineral laterítico de Moa Nickel S.A. con el objetivo de aumentar el porcentaje de sólido en el producto espesado. Se hace análisis granulométrico, análisis químico por Absorción Atómica, Florescencia de Rayos-X, Microscopía Electrónica. Se realizan ensayos de sedimentación utilizando agua de mar, de reboso y agua destilada. El análisis de Difracción de Rayos-X también pone de manifiesto que la principal fase de todas las capas analizadas es la goethita y como fases acompañantes: la ferrihidrita, hidrargilita, hematita y el cuarzo. En el trabajo se comprueba que las fracciones mayores que 20 μm aportan porcentajes mayores de sólidos. Mas tarde, Falcón et al. (1997b) hacen análisis de la preparación mecánica de la empresa "Che Guevara" con trituradores de mandíbula, molino de bola, tamices, tubos de Davis, analizadores por vía seca, canales cónicas y sluices, distribuyendo el estudio en bloques. El primer bloque de experimentos incluye cribado, trituración, molienda, lavado y

tamizado. Se utilizan las clases siguientes: $+0,85$ mm; $(- 0,85 + 0,16)$ mm; $(- 0,16 + 0,074)$ mm y $(- 0,074 + 0,00)$ mm. Para el primer bloque se concluye que la limonita requiere de menos tiempo de lavado y tamaño de trituración que la serpentina. También el aumento de tiempo de lavado aumenta el contenido de Mg y disminuye el contenido de Ni. Los ensayos utilizando los separadores espirales demuestran la necesidad de su uso para el enriquecimiento de níquel del producto ligero en un solo pase. El cobalto se enriquece en la fracción $(-0,85 + 0,074)$ mm, el Fe lo hace en $-0,074$ mm. La concentración de cromo y cobalto en el producto pesado se duplica con respecto a la muestra inicial. En el producto ligero se incrementa el contenido de Ni y Fe y decrece apreciablemente el Mg. Finalizan que la trituración de mineral hasta 10 y 5,0 mm permite mejorar la operación de lavado.

Lago (1998) en su trabajo sobre la disminución en la pulpa de los principales consumidores de ácido en la lixiviación, utilizando métodos de separación granulométrica y magnética, concluye que el cribado por sí solo permite disminuir la concentración de los absorbentes de ácido hasta 0,59 % de Mg y 3,87 de aluminio con pérdidas de 5,60 % de níquel. Coello et al (1998) realizan un análisis fraccional de los escombros lateríticos utilizando como propiedades físicas para la separación de componentes, el diámetro y la susceptibilidad magnética de las partículas. En el mismo se caracteriza el escombro laterítico para preconcentración mecánica mediante funciones de distribución, planteándose que, de acuerdo a las regularidades que siguen las funciones de distribución considerando una sola propiedad, solo es posible separar las fracciones enriquecidas en níquel e hierro por el tamaño; y níquel, cobalto, hierro, y magnesio tomando como propiedad de separación la susceptibilidad magnética. sin embargo, ninguno de los casos responde a las exigencias tecnológicas del preconcentrado. Reportan que la utilización del enfoque fraccional por más de una propiedad de separación, pronostica la posibilidad de su procesamiento mecánico para la obtención de un preconcentrado de hierro y cobalto; las funciones de distribución $\alpha(L)$ y $\beta(L)$ por el tamaño y la susceptibilidad magnética así lo demuestran.

De los minerales lateríticos Bruguera et al (1999) en su estudio sobre la lixiviación de la serpentina niquelífera con ácidos orgánicos de Punta Gorda, analizan la influencia de la concentración de los diferentes ácidos, la densidad de la pulpa y la granulometría sobre la recuperación de los metales. El análisis de la granulometría plantea que el incremento de tamaño de partículas en intervalo $(-0,045+0,00)$ mm hasta $(- 0,25 + 0,2)$ mm favorece la

recuperación de metales. Las clases utilizadas fueron (-0,3 -0,25) mm; (-0,25 -0,2) mm; (-0,2 -0,15) mm; (-0,15 -0,09) mm; (-0,09 -0,045) mm; (0,045 -0,00) mm.

Hernández et al (2000) realizan un análisis teórico del beneficio de la mena laterítica, tomando como propiedades contrastantes, el diámetro y la susceptibilidad magnética de las partículas, estableciéndose los principales índices tecnológicos de la separación cuyos resultados muestran que es posible un incremento de níquel hacia el producto fino de separación en 0,01 % y una disminución del contenido de aluminio y magnesio de 8,56 % y 6,58 % respectivamente, lo que es muy beneficioso para el proceso de lixiviación ácida. Además el producto magnético se caracteriza por un alto contenido de cobalto.

Ramírez (2002) también realiza una caracterización de los escombros lateríticos, desde el punto de vista físico, químico y mineralógico para una mejor beneficiabilidad, y así lograr un mejor aprovechamiento de esta materia prima.

Los métodos clásicos para el estudio de la beneficiabilidad de la laterita no permiten obtener información real de sus características para su posible tratamiento dada la complejidad mineralógica del material. La separación de la laterita en varios componentes considerando una sola propiedad es imposible (Hernández, 1997; Coello et al, 1998; Hernández et al., 2000).

A pesar de los avances que se han logrado, existe un problema en la distribución fraccional de la mena níquelífera, que hasta este momento está latente. Muchos de los factores analizados no están estudiados con suficiente certeza y la explicación de efecto obtenido se hace difícil, debido a que la caracterización ha sido generalmente mediante métodos clásicos, y carece de un enfoque sistémico e integral; resulta también insuficiente, el conocimiento que se tiene, en cuanto a las propiedades físicas contrastantes, lo que impide establecer las regularidades para el estudio de la capacidad de enriquecimiento que permite el aprovechamiento más integral del mismo. Por las razones mencionadas, se necesita caracterizar la materia prima utilizando, el tamaño, susceptibilidad magnética y la densidad de una manera integral.

1.3.- Fundamento del método de análisis fraccional.

El objetivo del proceso de beneficio es separar, por propiedades físicas o físico-químicas contrastantes, los minerales útiles de la materia prima. Esta separación ocurre de acuerdo con las propiedades físicas de las partículas que integran el material inicial. Las partículas con

determinadas características (por ejemplo con una densidad dada) pasan al concentrado mientras que las otras quedan en la cola. El esquema de beneficio puede tener en cuenta sólo una propiedad física (densidad, tamaño, susceptibilidad magnética, etc.) o actuar sobre varias de ellas. Es obvio que la efectividad puede medirse analizando la distribución inicial del componente útil en la materia prima y su distribución en el concentrado final.

En una primera aproximación al problema, la propiedad física se puede expresar a través de una variable real ρ . La variable se puede considerar como una variable aleatoria, al tomar muestras de partículas de forma casual y medir ρ para cada una de ellas, los resultados serán diferentes y aleatorios expresando con ello la heterogeneidad del mineral inicial con respecto a ρ . Si se denota mediante γ la distribución de probabilidades de la variable ρ se tendrá que:

$$\int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \gamma(\rho) d\rho = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \gamma(\rho) d\rho = 1 \quad (2)$$

$$\gamma(\rho_0) = \frac{1}{\Delta\rho} \lim_{\Delta\rho \rightarrow 0} P(\rho_0 < \rho < \rho_0 + \Delta\rho)$$

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 a 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 (Tijonov, 1984; King, 2001).

Un separador ideal permitiría clasificar las partículas del mineral inicial en dos grupos de acuerdo a: si el valor de ρ es mayor que un umbral dado ρ_c , ó no. Al representar mediante $z(\rho)$ la probabilidad de que las partículas con propiedad física ρ pasan al concentrado, el gráfico de la función $z(\rho)$ para el separador será marcado sería parecido a la figura 4.

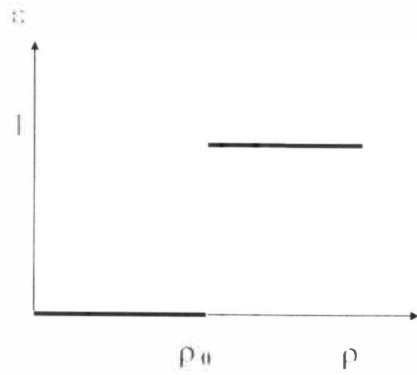


Figura 3. Gráfico de Separación ideal

En la práctica los separadores ideales no existen pues inevitablemente ocurren errores de clasificación cuando partículas que debían pasar al concentrado pasan a la cola y viceversa, es por ello que la función ε para los separadores reales no presenta discontinuidades tan marcadas y su gráfico es semejante a lo ilustrado en la figura 4.

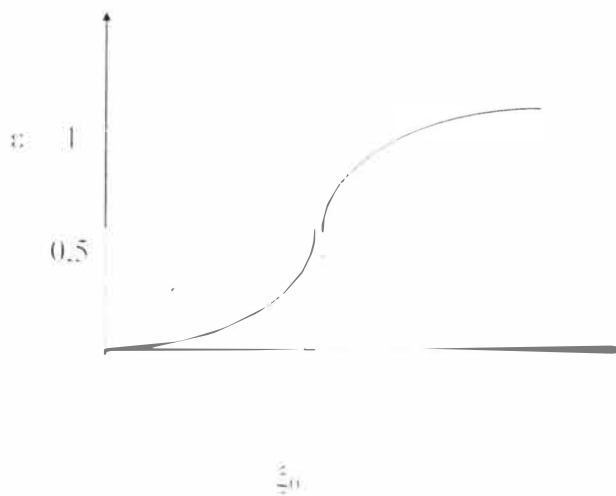


Figura 4. Gráfico de separación real.

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 $\gamma(\rho)$ se necesita conocer la distribución de componente útil en la mena inicial. Se puede asumir que el contenido de componente útil β es una función de ρ , es decir depende de esta propiedad física. Realmente si el contenido no dependiera de ρ no tendría sentido el proceso de beneficio basado en ρ , ya que al clasificar las partículas de acuerdo al valor de ρ no se garantizaría la obtención de poblaciones con concentraciones diferentes del componente útil.

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

$$\gamma_{\text{conc}} = 100 \cdot \int_{\rho_{\text{min}}}^{\rho_{\text{max}}} \gamma(\rho) \varepsilon(\rho) d\rho \quad (3)$$

mientras que el por ciento que pasan a las colas es

$$\gamma_{\text{cola}} = 100 \cdot \int_{\rho_{\text{min}}}^{\rho_{\text{max}}} \gamma(\rho) (1 - \varepsilon(\rho)) d\rho \quad (4)$$

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

$$\beta_{\text{min}} = \int_{\rho_{\text{min}}}^{\rho_{\text{max}}} \beta(\rho) \gamma(\rho) d\rho \quad (5)$$

$$\beta_{\text{conc}} = \frac{100}{\gamma_{\text{conc}}} \int_{\rho_{\text{min}}}^{\rho_{\text{max}}} \beta(\rho) \varepsilon(\rho) \gamma(\rho) d\rho \quad (6)$$

$$\beta_{\text{cola}} = \frac{100}{\gamma_{\text{cola}}} \int_{\rho_{\text{min}}}^{\rho_{\text{max}}} \beta(\rho) (1 - \varepsilon(\rho)) \gamma(\rho) d\rho \quad (7)$$

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 γ_{conc} permite encontrar el valor medio de la concentración útil β_{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 γ_{conc} , el contenido β_{conc} y la recuperación ε_{conc} .

En la práctica comúnmente se divide el mineral inicial en un número finito de fracciones o clases por lo que las funciones $\varepsilon(\rho)$, $\beta(\rho)$ y $\gamma(\rho)$ tienen un carácter escalonado y las integrales que aparecen en las ecuaciones para el cálculo de γ_{conc} , β_{conc} , β_{col} y β_{col} se pueden sustituir por sumatorias tomadas a través del número de clases o fracciones.

En la práctica del beneficio, las partículas del material inicial se separan no solamente por la densidad sino también por otras propiedades físicas: susceptibilidad magnética (Z_m) por su carga eléctrica específica (q), por su grosor (l), flotabilidad (k) y por su capacidad fluorescente. Las fundamentales afirmaciones de la teoría de separación, (presentados en forma de unos u otros análisis, fórmulas matemáticas, etc.) deben ser generales, comunes y precisas para cualquier proceso de beneficio. Por eso las propiedades físicas (ρ, l, Z, q, k) se señalarán como un símbolo común (ξ) entonces las fórmulas para calcular γ_{conc} , β_{conc} y ε_{conc} se presentaran de la siguiente manera:

$$\gamma_{conc} = 100 \int_{\xi_{min}}^{\xi_{max}} \gamma(\xi) d\xi \quad (8)$$

$$\beta_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} \int_{\xi_{min}}^{\xi_{max}} \beta(\xi) \gamma(\xi) d\xi \quad (9)$$

$$\beta_{col} = \frac{\beta_{conc} \cdot \beta_{col}}{\beta_{min}}$$

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 \mathbb{R}^n las fórmulas correspondientes serían entonces:

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

$$\beta_{mic} = \int \dots \int \beta(\xi_1, \dots, \xi_n) \gamma(\xi_1, \dots, \xi_n) d\xi_1 \dots d\xi_n \quad (11)$$

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

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

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

Para el beneficio real la característica de separación fundamental del equipo $\varepsilon_{conc}(\xi)$ se diferencia de la escalonada según se muestra por una línea discontinua en el esquema en este caso que es mas general las ecuaciones se expresan:

$$\gamma_{conc} = 100 \int_{\xi_{min}}^{\xi_{max}} \gamma(\xi) \varepsilon_{conc}(\xi) d\xi \approx 100 \sum_{i=1}^n \gamma(\xi_i) \varepsilon_{conc}(\xi_i) \Delta \xi_i \quad (14)$$

$$\beta_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} \int_{\xi_{min}}^{\xi_{max}} \beta(\xi) \gamma(\xi) \varepsilon_{conc}(\xi) d\xi \approx \frac{100}{\gamma_{conc}} \sum_{i=1}^n \gamma(\xi_i) \beta(\xi_i) \varepsilon_{conc}(\xi_i) \Delta \xi_i \quad (15)$$

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 $\gamma(\xi)\varepsilon_{conc}(\xi)d\xi$ - 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 en 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 $\gamma(\xi)\beta(\xi)\varepsilon_{conc}(\xi)d\xi$ 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 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 β_{conc} . Para las colas las fórmulas son análogas con una diferencia: $\alpha_{colas}(\xi) = 1 - \alpha_{conc}(\xi)$, de este modo las funciones iniciales son $\gamma(\xi)$ y $\beta(\xi)$ la que a su vez caracterizan las partículas de la materia prima mineral, y la función $\alpha_{conc}(\xi)$ es la característica fundamental de separación del aparato de beneficio (Tijonov, 1978, 1984).

Los parámetros típicos del beneficio: salida γ_{conc} , contenido β_{conc} y extracción α_{conc} , sobre estos números se coloca un guión para diferenciarlos de las funciones.

Los trabajos de Hernández (1997, 2000); Coello (1998); Ramírez (2002) demuestran la factibilidad de este método para la mena laterítica por la diversidad de minerales presentes cuyas partículas son portadoras de diferentes elementos y se diferencia por varias propiedades físicas.

Las funciones de distribuciones diferencial másica y de contenido $\gamma(\xi)$ y $\beta(\xi)$ son un medio sencillo y suficiente para la caracterización de cualquier materia prima o producto. Estas funciones no sólo permiten el cálculo de los indicadores clásicos del beneficio, sino que contribuyen a realizar el pronóstico de los índices tecnológicos de cualquier esquema de beneficio, independiente de la propiedad de separación.

1.4.- Tendencias de inversión, consumo y desarrollo de tecnologías para el procesamiento de las lateritas níquelíferas.

La producción de níquel se ha fortalecido por los altos precios de níquel y cobalto provocado por el aumento de la demanda de acero y níquel por la robusta economía china. Muchos fabricantes de automóviles están utilizando la batería (NiMH) Níquel Metal Hidrico para los motores híbridos gasolinas eléctricos y automóviles puramente eléctricos para los modelos de 2004 y 2005. También el consumo de níquel será influenciado por el transporte porque en la primera mitad de 2002 había más de 41 300 vehículos en las carreteras de EE.UU. utilizando metal hidrico de níquel como fuente de energía. Una firma fabricante de automóviles Japonés está preparando operaciones para producir 300,000 vehículos híbridos por año a partir de 2007. Un proyecto multimillonario para la producción de baterías fue inaugurado en 2003 en Spingboro, OH, EE.UU. (USGS, 2003).

La explotación de nódulos marinos en forma de óxidos y oxihidróxidos que contiene Cu, Ni, y Co particularmente en el Océano Pacífico ha sido obstaculizada por la situación geo-política

mundial, preocupaciones ambientales y lo más significativo, la abundancia de fuentes terrestres de níquel (Kumar et al., 1990; Kyle y Turlaro, 1997; Engineering and Mining Journal, 1999). En el presente, 14 productores del níquel son miembros del Nickel Development Institute (NiDi, 2002). Mercados globales consumen por encima de las 1000 000 toneladas del níquel. La perspectiva futura es el aumento vertiginoso de la producción de níquel a partir de las lateritas (McGurn J., Comunicación privada, NiDi, 2002).

Dos tercios del níquel producido en el mundo son por vía de fundición. Los fundidores tienen capacidades de 60 000 a 70 000 t/año (Soroako, Doniambo). Muchos fundidores consumen menas provenientes de minas cercanas (a menudo más de una mina) en operaciones integradas. Los tres fundidores japoneses importan menas desde Nueva Caledonia, Indonesia y Filipinas. En el caso de Sumitomo y Pamco los dueños tienen acciones en las minas que les suministran materia prima. La refinería Yabulu en Townsville, Australia que utiliza el proceso Caron fue construido para tratar menas de Greenvale en Queensland, pero ahora utiliza solo mena proveniente de Nueva Caledonia, Filipinas e Indonesia después que se agotaron las reservas de Greenvale. El proceso Caron de Moa utiliza menas provenientes de yacimientos locales.

El avènement de nuevos proyectos de lixiviación ácida a alta presión han sido los factores que afectan la industria del níquel en las últimas décadas. Por muchas décadas la planta de Moa era el único productor. Durante mucho tiempo se conocía muy poco sobre la viabilidad económica del proceso de la lixiviación ácida de Moa por parte de muchos expertos del mundo. Solo después del derrumbe del campo socialista y la URSS que el resto del mundo se dio cuenta de que la planta era rentable. Esta observación y otros factores como la caída del precio del azufre y de ácido sulfúrico, avances técnicos en la extracción por solventes, y reactivos mejorados para la extracción selectiva de Ni y Co de soluciones lixiviadas, mejoras importantes en la preparación de la pulpa, avances en el diseño y modificación de equipos básicos (autoclaves), experiencias proveniente de las tecnologías de autoclaves horizontales en la industria de explotación de oro, conllevaron al interés global en las potencialidades del proceso de lixiviación ácida a alta presión. (Comunicación personal, McGurn, NiDi, 2002).

Muchos investigadores se han esforzados en mejorar o cambiar las propiedades de la pulpa (Falcón, 1993, 1997; Beyris, 1997; Hernández, 1997; CIPIMM, 2004); han reportado éxitos en la preparación de pulpa cruda de diferentes calidades de mineral:

- Uso de aditivos en la preparación directa de pulpas limoníticas, logrando incrementar el porcentaje de sólidos;
- Uso de aditivos para la preparación de pulpa de minerales arcillosos como los de San Felipe y Murrin Murrin, con un incremento del por ciento de sólidos entre 3-8%;
- Disminución de la viscosidad de la pulpa cruda en un 50% cuando se usa aditivo en el proceso de preparación;
- Mejora del espesamiento de la pulpa limonítica en sedimentadores convencionales con el uso de aditivos;
- Índice de sedimentación: relación metal ligero metal pesado que con valores de 0,22 se utiliza para efectuar la homogenización de los materiales de la "Pedro Soto Alba" y mejorara la condición de sedimentación logrando por cientos de sólidos superiores a 46,1;
- El uso de esquemas en la preparación de la pulpa que contempla la clasificación, separación magnética y beneficio gravimétrico.

Todas estas mejoras en la preparación de la pulpa se han introducido en los proyectos en operación o se están evaluando para su aplicación inmediata.

Detrás del interés renovado en la tecnología de lixiviación ácida a presión, unos 15-20 proyectos fueron propuestos globalmente sujetos a una forma de estudio desde el rango de estudios de factibilidad (Elias, 2002.), tabla 2. Tres nuevas plantas fueron construidas en Australia Occidental. Bulong y Cawse son actualmente grandes plantas de 9 000t/año y Murrin Murrin, 45 000t/año de Ni (Anaconda, 1999a; Anaconda, 1999b; Western Australia Development Resources, 1999; Kuek 1999). Las tres operaciones entraron en el caudal de producción en 1999; han presentado serias dificultades en su funcionamiento como fallos ingeniérficos, alto costo de producción y demoras en operaciones y hasta 2002 estaban funcionando por debajo de la capacidad de diseño, encontrándose en serias condiciones económicas. Como consecuencia de estos problemas muchos proyectos están parados para observar. Una excepción de estos problemas es la planta Inco Goro en Nueva Caledonia cuya producción se puso en marcha en 2004-2005 con capacidad de 54 000 t/año de Ni. La economía de las lateritas varía ampliamente. Las operaciones más rentables (Soroako y Cerro

Matoso) son de referencia en cuanto al tamaño y también tienen las fuentes energéticas más baratas y seguras. Soroako tiene apoyo de una fuente hidroeléctrica de importancia. Los índices económicos de SLN en Nueva Caledonia es mejorado por altos contenidos de níquel (más de 2.6 %) y abundante energía hidroeléctrica pero tiene algo de uso de energía proveniente de combustible fósil en su proceso.

Tabla 2. Selección de algunos proyectos de Ni²⁺ propuestos para la lixiviación ácida (Elias, 2002)

Proyecto	País	Etapa	Proceso propuesto
Goro	Nueva Caledonia	Factibilidad	HPAL
Sampala	Indonesia	Exploración	HPAL
Sipilou	Costa de Marfil	Factibilidad	HPAL
Gag Island	Indonesia	Factibilidad	HPAL
Weda Bay	Indonesia	Exploración	HPAL
Pinares de Mayari	Cuba	Exploración	HPAL
Camaguey	Cuba	Exploración	HPAL
Musangati	Burundi	Exploración	HPAL
Moramanga	Madagascar	Factibilidad	HPAL
Prony	Nueva Caledonia	Exploración	HPAL

El fundidor de Falconbridge Dominicana depende exclusivamente de la energía de hidrocarburos y ha sido cerrada varias veces cuando altos precios de combustible coinciden con bajos precios del níquel (tres veces en 2001).

Las operaciones de Eximal en Guatemala funcionó por solo tres años desde 1977 antes de ser cerrado. Llegó a penas a la mitad de su capacidad de diseño y fue penalizado precisamente por su pequeña capacidad de producción, bajo contenido de componentes útiles y dependencia en la energía proveniente de combustible fósil.

Por el contrario un gran número de operaciones de lateritas son marginales o no rentables y depende de apoyo del gobierno para mantenerse en operación y por lo tanto protegiendo la dependencia de suministrador estratégico para proteger la economía nacional o manteniendo

altas tasas de empleo son usualmente referidos como "productores sociales". La experiencia de los proyectos de las lateritas demuestra que muchos han sufrido altos costos de construcción, imprevistas dificultades técnicas operacionales y la imposibilidad de llegar a la capacidad de diseño. Las dificultades encontradas por las tres nuevas plantas de lixiviación ácida en Australia indican que los proyectos de las lateritas requieren de altos niveles de excelencias ingenieriles. Sin embargo existen atributos naturales de las lateritas que si son aplicados a nuevos proyectos, mejorarian las posibilidades de éxito. Estos atributos se pueden dividir en cuatro categorías: la calidad de la mena, la escala industrial, ubicación geográfica y infraestructura (Dalvi y Poetschke, 2000; Elias, 2002).

La calidad de la mena laterítica depende de parámetros como contenido del componente útil, consistencia, potencia del yacimiento y grosor de destape, mineralogía, presencia de componentes nocivos entre otros.

El contenido de componente útil: El alto grado posible del níquel y subproductos principalmente el Co, mejora la eficiencia de la utilización de la planta y disminuye el efecto de otras pérdidas internas que se producen en el proceso. Ver tabla 3. La posibilidad de beneficiar puede ser una ventaja, sin embargo hay que comparar el costo de extraer mas mena que lo que se necesite para la planta.

La consistencia: La continuidad y consistencia del grado de mineralización y otras propiedades físicas y químicas, poca variabilidad de la composición del material que se envía a la planta. La eficiencia de la planta depende en gran medida del control máximo y la variabilidad mínima de la composición del producto alimentado.

La potencia del yacimiento y el grosor del destape: menores coeficientes de destape mejoran los índices económicos de la extracción.

Mineralogía: en la lixiviación con ácido a alta presión y temperatura, la mineralogía de la mena oxidada es preferible al de mena arcillosa, aunque la recuperación de níquel en ambos es similar. En la laterita de tipo arcillosa la presencia de sílice coloidal en la pulpa y la solución liberada por la descomposición de arcilla causa problemas de bombeo a alta presión y la separación líquido sólido. Altas densidades se puede lograr con lateritas de menas oxidadas y así aumentando la utilización eficiente de las instalaciones. En la fundición la relación Si: Mg es muy importante para controlar las temperaturas de fusión y propiedades de la escoria

Esta razón es fuertemente influenciada por la mineralogía, particularmente la ocurrencia de la serpentina.

Elementos nocivos: en la lixiviación ácida a presión, Mg y Al son altos consumidores de ácido, y altos niveles de aluminio forman mallas que dificulta la sedimentación. La sílice libre se forma en las venas y bolsones en todos tipos de lateritas. Elevado contenido de Si en el producto alimentado del fundidor, puede causar variaciones de la razón Si: Mg, por lo tanto hay que luchar contra ello.

La dirección de los proyectos y los trabajos de I+D se ha dirigido hacia la preparación de la pulpa cruda y su espesamiento, basado en criterios científicos de modificar la composición iónica de la pulpa, buscando sobre todo un incremento del por ciento de sólidos, menor viscosidad de la pulpa y mayor fluidez, todo ello constituye un factor decisivo para el bombeo y calentamiento directo de la pulpa que provoca una alta dilución de la misma, pero que como resultado neto permitirá operar las autoclaves con una pulpa con mayor por ciento de sólidos y una productividad superior, con una disminución de los costos de operación. (Castellanos y Picayo, 2005) No se esperan cambios significativos en el proceso de tratamiento posterior del licor preñado (licor producto), como la separación de Ni y Co (ya sea precipitación de sulfuro mixto o hidróxidos, el empleo combinado resina de intercambio). Con el agotamiento de la limonita, o bajo el principio de un aprovechamiento integral, a menor costo del depósito de laterita, se prevé comenzar a procesar la serpentina usando la tecnología P.M.I. o combinada con lixiviación a presión. En el primer caso, se han desarrollado nuevas tecnologías, que contemplan el pretratamiento de la serpentina, lixiviación del 50 % del magnesio con CO_2 y obtención de un coke con 60 % de sólidos de residuos de la serpentina tratada, que unido a la pulpa espesada de la laterita puede producir una alimentación de pulpa a los autoclaves con un por ciento de sólidos incrementado en comparación con el proceso convencional (CIPIMM, 2002 en Castellano y Picayo, 2005).

Nuevos desarrollos se han realizados para el procesamiento de la serpentina por el proceso ácido o combinado y por lixiviación en pila. El proceso P.M.I. (lixiviación a presión mejorada), contempla que la pulpa laterítica lixiviada se descarga de la autoclave y pasa a reactores agitados, donde se alimenta la pulpa de serpentina y ácido. Se reivindica por los autores, que se puede lograr un mayor aprovechamiento del ácido y una recuperación de níquel de 85-90 %. BHP Billiton incorporó esta tecnología en Ravensthorpe, Australia.

proyecto que iniciaba su operación en el 2004. Los estudios realizados de la lixiviación en pila de la serpentina (comunicación BHP Billiton, 2003; CIPIMM, 2003 en Castellanos y Picayo, 2005) reportaron índices moderados de consumo de ácido y una recuperación de níquel entre 70 y 80 %. En el año 1997 en la planta cubana de níquel de Punta Gorda se introdujo el Proceso Nileach, de lixiviación en un reactor tubular. Aunque la concentración de amoníaco del licor lixivante en la planta industrial era, 50-55 g/l. (contra 70 g/l. NH₃ por diseño) se elevó la producción de níquel de 17 000 t/a a 29 000 t/a y la eficiencia de lixiviación de níquel subió en 6-10 %, alcanzando 79-80 % de níquel lixiviado (similar al de diseño) y 40 % del cobalto. El proceso operó durante aproximadamente 3 años (Castellano y Picayo 2005).

Tabla 3. Composición química típica del mineral de planta de algunas operaciones (Ashok et al., 2004; Castellanos y Picayo, 2004)

Contenido en peso % del elemento	Moa Bay	San Felipe (Cuba)	Murrin Murrin	SLN (Nueva Caledonia)	Cerro Matoso	P1 Inco (Indonesia)
Ni	1,3	1,33	1,3	2,7	2,9	1,8
Co	0,15	0,054	0,09	0,07	0,07	0,07
Fe	48	19,6	22	14	14	18
Al	4,5	2,0	2,5			
Mg	1,0	3,4	4,0	15	9	10
SiO ₂	3,7	21,0	42	37	46	34
Mn	0,75	0,45	0,4			

1.5.- Beneficio de las lateritas

Con el objetivo de lograr los parámetros de calidad, para el proceso extractivo, se recurren a la explotación selectiva y homogenización o proceso de beneficio, separar por métodos mecánicos y físico-químicos, los minerales útiles de la ganga para obtener un producto de poco volumen con alto contenido de los componentes útiles. Este proceso es muy aplicable en las menas sulfurosas del níquel donde el factor de concentración es mucho más alto que las menas oxidadas. Durante el proceso de beneficio algunos componentes útiles se pierden hacia el rechazo pero esta pérdida es compensada por el mejoramiento económico que resulta en

alimentar menas con altos contenidos del componente útil al proceso extractivo. La práctica del beneficio ha sido aplicado hace varios años a menas silicatadas donde grandes fragmentos de rocas duras, pocos alterados que contienen pocos contenidos del níquel son separado de la matriz del material blando rico en níquel mediante trituración y lavado. La optimización de este tipo del beneficio integral hasta viabilidad económica se ha puesto de práctica en Soroako (Indonesia) y Kopeto (Nueva Caledonia), sin embargo la práctica de separación de los fragmentos gruesos se lleva a cabo en todas las minas del mundo.

En Kopeto, el aumento del contenido por 25 % se logra entre la mena proveniente de las canteras y el producto enviado a la fundición. El beneficio fundamentalmente da buenos resultados en menas oxidadas-silicatadas. En estas, el componente silicatado que esencialmente es pobre en níquel y son separadas fácilmente de la goethita asociado mediante tamizado después de trituración. Cawse, en Australia Occidental, tamizando una mena triturada de laterita de contenido inicial de 1.04 % en 212 micrones produce una fracción fina de 53 % de la masa original conteniendo 81 % del níquel original y con contenido de 1.44 % de Ni (Elias, 2002).

El yacimiento laterítico Malborough, costa central de Queensland, Australia con reserva explotable actual de 52Mt tiene un contenido promedio de 0.88 % de Ni y 0.06 % de Co y el proceso de beneficio por tamaño lo elevará a 1.50 % y 0.13 % de Co (Preston Resources Ltd., 1999). Los yacimientos Halleys, Hale-Bopp y Shoemaker-Levy, también en Australia Occidental, con un recurso combinado de 152 Mt con contenidos de 0.9 % de Ni y 0.04 % de Co será beneficiada para elevar el contenido hasta 2.0 % de Ni. (Comets Resources Ltd, 1999 Australia). El yacimiento laterítico en la Isla de Mindoro, cerca de 120 Km., al sur de Manila, Filipinas que tiene un recurso de 72Mt con contenido de 0.94 % de Ni y 0.6 % de Co también elevará su calidad por beneficio mediante trituración y lavado (Crew Development Cooperation, 2000). (Narasimhan et al., 1989) realizaron estudio sobre escombros laterítico para preconcentrar el Ni, Co y Cr, en la India. (Agatzini y Zafiratos, 2004a, 2004b) beneficiaron mineral serpentinitico de Kastoria, norte de Grecia mediante separación magnética con la disminución de calcita por 37 % y pérdida de níquel a los productos no magnéticos por 5 %, obtuvieron recuperación de níquel y cobalto en material serpentinitico por 60 % y 45 % respectivamente mediante lixiviación en pila, sin embargo la efectividad del

proceso estaba mermada por el contenido de calcita que afecta negativamente a la permeabilidad de la pila de lixiviación.

Conclusiones parciales.

1. La gran demanda de níquel en estos momentos ha provocado el aumento de las capacidades productivas a escala global mediante el proceso de lixiviación ácida cada vez más renovada en sus eslabones, entre ellos, los métodos mejorados de beneficio.
2. Para mayor aprovechamiento de las instalaciones productivas, un factor importante para la disminución de costo de producción en la industria extractiva, los proyectos de I+D actuales están dirigidos hacia investigación de la beneficiabilidad, mejoras en las propiedades de la pulpa, así como avanzados métodos de extracción.
3. Los procesos de beneficio jugarán un papel importante para la recuperación de materiales reciclables y en los procesos tecnológicos alternativos en el procesamiento de la laterita ferroniquelífera, a medida que se escaseen los recursos no renovables.
4. Los métodos del enfoque fraccional, a diferencia de los clásicos, coadyuvan a obtener información multidimensional sobre la laterita de balance, puesto que este objeto es multicomponente y complejo.

CAPITULO II

Metodos y Materiales

CAPÍTULO II MÉTODOS Y MATERIALES

Introducción.

Para toda investigación científica es imprescindible la correcta selección de métodos y materiales para obtener resultados satisfactorios. De manera general, en el desarrollo de la investigación se emplearon tanto métodos teóricos como los empíricos. La justa integración del método histórico- lógico, hipotético deductivo con los métodos particulares en el área de conocimiento en cuestión, tales como análisis fraccionales por tamaño, densométrico y magnético junto a las técnicas de análisis de la Difracción de Rayos X, Florescencia de Rayos-X, Absorción Atómica, Análisis Térmico Diferencial y Termogravimetría constituye el principal elemento de este capítulo. También son empleados las técnicas estadísticas y elementos de muestreo.

2.1-Toma y preparación de la muestra.

Los materiales utilizados son provenientes de muestras seleccionadas de los pozos 45 y 44 del bloque M-49 del yacimiento Punta Gorda. Se preparó una muestra tecnológica compósito de mena niquelífera oxidada. (Ver Anexo I).

La toma de la muestra tecnológica se realizó en el frente de explotación, desde el fondo hasta el techo, que abarca los pozos 44 y 45, los cuales poseen potencia de 35,1 y 24 m respectivamente. La muestra con una masa de alrededor de 1 400 Kg. fue sometida a homogenización y cuarteo.

Químicamente la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda es esencialmente ferrosa, con un contenido de hierro de la mena inicial aproximadamente de 47 %. (Ver tabla 4).

Tabla 4. Composición química promedio de la muestra inicial de Punta Gorda.

Contenido (%)										
	Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Cr	Al	SiO ₂	Cu	Zn
Ponderal	1,36	0,146	45,83	0,72	3,4	3,96	2,02	1,08	0,018	0,046
Experimental	1,34	0,134	46,928	0,42	3,69	3,18	2,00	0,92	0,019	0,037

2.2-Metodología para análisis granulométrico.

El análisis granulométrico constituye una de las etapas fundamentales para la caracterización de la mena objeto de estudio. En su caracterización se empleó un tamizado por vía húmeda: según la serie de Tyler en los diámetros de partículas entre 8 y 0,044 mm, teniendo en cuenta investigaciones similares (Dalcón, 1993, 1998; Ramírez, 2002; Coello et al., 1998; Hernández, 1997; Mitrofanov et al., 1982).

2.3-Metodología del análisis fraccional magnético.

La separación magnética por vía seca fue realizada en el Laboratorio de Beneficio de Minerales del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Las intensidades de corriente estudiadas fueron: 0,5; 1; 2; 4 y 6 A, aplicadas a las fracciones granulométricas: (-10+8) mm; (-8+4) mm; (-4+2) mm; (-2+1) mm, utilizando un separador de rodillos marca 13b-C7, el cual sirve para el enriquecimiento en seco de pequeñas muestras de minerales y materiales débilmente magnéticos. El separador empleado tiene un rodillo de 100 mm de diámetro y 80 mm de longitud; la intensidad del campo alcanzó 950 k A m; el peso del separador es de 149 Kg. Las dimensiones exteriores son las siguientes:

Longitud-----900 mm

Ancho-----520 mm

Altura-----545 mm

Las fracciones finas: (-1,0+0,4) mm; (-0,4+0,2) mm; (-0,2+0,071) mm; (-0,071+0,044) mm y -0,044 mm fueron separadas magnéticamente por vía húmeda en un analizador tubular (analizador Davis) en el Centro de Investigaciones del Níquel y en el ISMM de Cuba. Este separador presenta un núcleo magnético de hierro blando que está asegurado al banco del equipo. La bobina es alimentada por corriente y ésta es regulada a través de un reóstato. Entre los polos magnéticos del núcleo se coloca el tubo de vidrio montado sobre carriles tensores, en posición vertical. El motor eléctrico, mediante la transmisión correspondiente, pone en movimiento alternativo los carriles tensores. El producto obtenido de la separación

granulométrica es sometido a la separación magnética de las partículas a diferentes clases de intensidades de corriente: 0,5; 1; 2; 4 y 6 A, obteniéndose varios productos magnéticos y no magnéticos.

Es conocido que la propiedad física que se tiene en cuenta en el proceso de separación magnética es la susceptibilidad magnética, en nuestro caso no fue posible determinar esta propiedad a las distintas fracciones magnéticas; no obstante las experiencias en este campo han dado que en el analizador magnético tubular para intensidades de corriente de 0,5; 1 y 2 Amperes, pasan al producto magnético partículas minerales con susceptibilidades magnéticas altas de 380, 240 y 86 $\text{cm}^3 / \text{g} \cdot 10^{-6}$ respectivamente (Dereach, 1980) Las curvas de trabajo del separador de rodillos marca 13b-C7, según el fabricante, muestran que para intensidades de corriente eléctrica de 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 y 6 A en la primera etapa que corresponden a la inducción magnética de 0,23 ; 0,42 ; 0,58 ; 0,69 ; 0,74 ; 0,78 Tesla respectivamente, y para la segunda etapa, las intensidades de corriente de 7 ; 8 ; 8,5 y 9 A son equivalentes a 1,10 ; 1,24 ; 1,29 ; 1,28 Tesla respectivamente, figura 5; es decir, para pequeñas intensidades de corriente pasan los minerales de mayor susceptibilidad (χ_i) y viceversa; por esta razón en lo adelante entiéndase χ_i por χ_j .

CURVA DE TRABAJO DE SEPARADOR MEGNETICO 138T-CEM

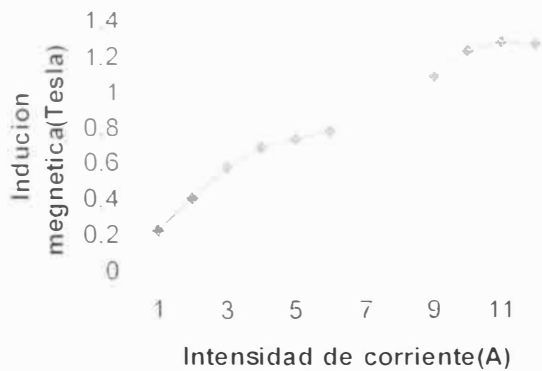


Figura 5. Las curvas de trabajo del separador 13b-C7

Al establecer la intensidad de corriente deseada el equipo es alimentado a través de un embudo, por donde se regula la salida del mineral hacia el canal vibratorio, al pasar las partículas por los rodillos ocurre la separación, obteniéndose los productos magnéticos y no magnéticos. El producto magnético es recirculado tanta veces sea necesario hasta lograr la limpieza total de este y el producto no magnético es pasado por el proceso inicial a las diferentes intensidades deseadas.

Para separar las fracciones más finas menores de 1.0 mm por vía húmeda mediante analizador de Davis, el tubo de vidrio se llena de agua, el flujo de este debe ser constante, luego se regula la intensidad de corriente deseada, primeramente 0,5 A. La muestra mineral es alimentada por la parte superior del tubo, durante las vibraciones de este, las partículas magnéticas bajo la acción del campo magnético quedan retenidas en las paredes del tubo en el espacio interpolar, mientras las no magnéticas se desplazan hacia la parte inferior, las cuales salen junto con el agua. Para recoger el producto magnético se detiene el equipo y se apaga la fuente de corriente que alimenta al electroimán, luego se adiciona agua y las partículas magnéticas salen junto con esta y son recogidas.

El material no magnético es pasado nuevamente por el separador, pero a las intensidades de 1; 2; 4; y 6 A, obteniéndose productos magnéticos para cada caso.

Una vez obtenidos todos los productos se sometieron al análisis químico, para determinar el contenido de los elementos presentes en ellos.

2.4- Metodología del análisis fraccional densométrico.

La densidad de la muestra, la relación que existe entre el peso y el volumen que ocupan sus partes sólidas, se determinó por el método de los picnómetros. A continuación se muestra el procedimiento analítico para la determinación de esta propiedad.

El picnómetro se lava primero, se seca y se pesa con precisión de hasta 0,01 g para obtener peso G1.

Seguidamente el mismo se llena de agua destilada hasta el enrase mediante una bureta y nuevamente se pesa el picnómetro con el agua con precisión de hasta 0,01 g obteniendo el peso G2.

Luego el picnómetro otra vez se seca y se le echa la muestra de 10 g en estado seco triturada en un mortero de porcelana y cernido a través de un tamiz 0,2 mm secada en horno a la temperatura de 100-110 °C y se pesa el picnómetro con la muestra con precisión de hasta 0,01g obteniendo el peso G3.

Para eliminar el aire de la muestra al picnómetro se le echa agua destilada (aproximadamente un tercio de su volumen) mediante goteo y sacudido. Después de la ebullición, se enfría el picnómetro en un baño de agua, se le echa hasta la marca que tenía, el agua destilada, se mide la temperatura de agua que debe ser igual al primer paso de 18-22 °C. El nivel del picnómetro se establece de un modo rígido por el límite superior del menisco la cual se utiliza un micropipeta con la cual se añade o sustrae según sea el caso. Después de esto el picnómetro se pesa con exactitud de hasta 0,01 g y se obtiene el peso G4.

Para cada caso es necesario realizar tres determinaciones paralelas y después calcular el valor promedio con una exactitud hasta 0,01 g. La diferencia entre los resultados de las tres determinaciones se permite hasta 0,02 g cm⁻³. Determinamos el peso específico ρ , por la fórmula siguiente,

$$\rho = \frac{G3 - G1}{G2 - (G4 - G3 - G1)} ; g/cm^3 \quad (16)$$

Donde:

G1- masa del pienómetro vacío: g

G2- masa del pienómetro con el agua: g

G3- masa del pienómetro con la muestra: g

G4- masa del pienómetro con el agua y la muestra: g

Para profundizar el estudio sobre los componentes pesados y ligeros de los productos no magnéticos de las distintas fracciones se sometió el mineral a separación en medios densos.

Este proceso se fundamenta en la separación de los componentes minerales de la mena según la densidad. Si una mezcla de partículas minerales se introduce en un medio cuya densidad ocupa una porción intermedia entre los minerales ligeros y los pesados, sucede la separación de dicha mezcla en sus componentes, las partículas minerales cuya densidad es mayor que la del medio se hundirán mientras los ligeros emergen a la superficie.

Materiales:

Un soporte universal

Un embudo separador de 6 mm

Tres elenmeyers

Tres embudos

Un agitador

Un frasco lavador

Alcohol etílico de 96 g/L

Agua

Papeles de filtro

Hidrómetro de Baumer

Una probeta de 100 mm.

Para la realización del beneficio en medios densos se utilizó el líquido orgánico denso, inerte, el tetrabromoetano, $\text{C}_2\text{H}_2\text{Br}_4$, PRS, densidad de $2,935\text{g cm}^{-3}$ en $20 \pm 4^\circ\text{C}$, contenido de agua de 0,05 %, buena filtración y poco volátil fabricado por firma Panreac Chemicals, S.A., España. Para disminuir su densidad para el siguiente análisis del producto ligero de la separación, el tetrabromoetano se disolvió en alcohol etílico de 96 g/L. La densidad

necesaria se obtuvo mezclando soluciones ligeras con las pesadas. El volumen del diluyente se calcula por la fórmula (Mitrofanov, 1982) siguiente:

$$V_d = V_f \left(\frac{D_f - D}{D - D_d} \right); \text{cm}^3 \quad (17)$$

Donde, V_d es el volumen de la solución débil: cm^3

V_f el volumen de la solución fuerte: cm^3

D_f la densidad de la solución fuerte: g/cm^3

D , la densidad de la solución necesaria: g/cm^3

D_d , la densidad de la solución débil: g/cm^3

La densidad de la solución preparada se comprobó mediante el método de Baume para líquidos más densos que el agua. Un hidrómetro es un tubo de vidrio fino que opera bajo los principios de Arquímedes para sólidos sumergidos en líquidos: es herméticamente cerrado en ambos lados y tiene una graduación o escala calibrada a la densidad específica. Un lado extremo que tiene forma de un bombillo incandescente está llenado con fundido de plomo o mercurio que lo hace flotar. Un segundo vidrio, probeta de hidrómetro, es llenado con el líquido a medir. El hidrómetro es inmerso en la probeta que contiene la muestra. Después de la lectura, la densidad (sp.gr) se calcula con la expresión siguiente:

$$\text{sp.gr} = \frac{m}{m - Be}; \text{g/cm}^3 \quad (18)$$

Be- grado Baume

Donde $m = 145$

Se realizaron tres experimentos para las fracciones (-4,0 + 2,0) mm: (-2,0 + 1,0) mm: (-0,4 + 0,2) mm: (-0,2 + 0,071) mm para garantizar mayor fiabilidad. Consideramos que el análisis de las clases más finas de 0,071 mm es muy difícil e inexacto ya que los terrones dificultan la ejecución del proceso.

Al hacer pasar el mineral a través del medio separador presente en el embudo separador montado en el soporte universal para la regulación de la salida del reactivo y los productos, se observó que por las diferencias de densidades ocurre una separación, o sea las partículas de mineral cuya densidad es mayor que la del líquido denso, se fueron depositando en el fondo

del embudo separador mientras las de menor densidad se quedaron en la superficie obteniendo dos productos: ligero y pesado.

Luego de terminado la separación cuya duración fue de 30 minutos se procedió al lavado de los productos obtenidos con el alcohol, es decir eliminar el reactivo de la superficie del mineral. Luego se tomó en un embudo separador el reactivo con alcohol obtenido del lavado para su regeneración con utilización de agua en una misma proporción en un tiempo de reposo de 24 horas.

2.5- Método de la determinación de la composición química de los productos.

Con el objetivo de determinar el contenido de los elementos químicos presentes en la muestra inicial, en los productos del análisis granulométrico, de la separación magnética y productos del medio denso, fueron realizados los análisis en el Laboratorio Central de la empresa Moa Nickel S.A., y Centro de Investigaciones del Níquel, Moa, Cuba, utilizando la técnica de Fluorescencia de Rayos X y Absorción Atómica que permitieron determinar con una alta confiabilidad, los contenidos de los elementos analizados.

Las características técnicas y condiciones de trabajo del equipo son los siguientes: espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos-X, Phillips PW 1480 utilizando un tubo de Rayos-X con Rh tipo PW2182/00, con un régimen de 3000 w y 100 Kv al vacío con colimador fino.

2.6 -Método de la determinación de la composición mineralógica.

Para la valoración mineralógica inicial cualitativa de las muestras se empleó el microscopio óptico modelo AXIOLAB POL de la CARL ZEISS, con luz reflejada, con un ocular 10X, con aumento de 0.8X, 1X, 1.25X, 1.8X, 2X, 2.5X, 3.2X, 4X, 5X. Con lo cual se pudieron valorar las características físicas más sobresalientes de las muestras. Este equipo pertenece al Laboratorio de de Roentgenometría del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Con el objetivo de determinar las principales fases mineralógicas presentes en cada una de los productos obtenidos, se realizó el análisis mineralógico a través de la técnica de difracción por Rayos X y como fuentes complementarias, Análisis Térmico Diferencial y Termogravimetría.

Los análisis de difracción de Rayos-X se realizaron en el Laboratorio de Roentgenometría del Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", bajo las siguientes condiciones de trabajo:

Difracción de Rayos - X, según método el policristalino, utilizando un difractómetro alemán del tipo HZG - 4 con radiación de $\text{CoK}\alpha$, régimen de procesamiento de 30 Kv, 20 mA, 20: 5 a 80° y generador de voltaje TUR M-62. Para el registro y tratamiento de los datos roentgenométricos se emplearon el software ANALIZE, para las determinaciones cualitativas de minerales y AUTOQUAN, para las determinaciones cuantitativas de la SEIFERT X - Ray Technology (Versión 2.26), de procedencia alemana. También se empleó durante el procesamiento el equipamiento pertenece al Laboratorio de Difracción de Rayos - X del Centro de Geociencia de la Universidad Federal de Pará (UFPA), Brasil. El difractómetro de la marca PHILIPS, modelo PW 3710 BASED, equipado con ánodo de cobre ($Cu\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$), con monocromador y generador de tensión y corriente ajustado para 45 Kv y 35 mA, respectivamente. Los registros fueron realizados con un intervalo de exposición de 5° a 80°. En el proceso de lectura e interpretación de los difractogramas obtenidos se emplearon los software APD (PHILIPS) y además se pudo utilizar el Xpert High Score 1b, 2002, con la base de datos de la ICDD (Internacional Center for Diffraction Data) de 1998.

Se empleó el equipamiento conjugado TG y ATD según modelo PL - STA Thermal Science con analizador térmico simultáneo STA 1000/1500, de la Stanton Rederoff Ltd, que tiene un horno cilíndrico vertical, con conversor digital acoplado a un micro computador. Crisol de platino, peso de la muestra de 12 a 14 mg, con registros normalizados para 10 mg, lo que facilita la comparación con diversos análisis. Velocidad de calentamiento de 20 °C/minuto, temperatura inicial y final variando de 25 °C a 1100 °C, respectivamente, con corrección de la línea de base por el software Termoplot, del Dr. Thomas Scheller. Este equipamiento pertenece al Centro de Geociencia de la Universidad Federal de Pará (UFPA), Brasil.

CAPITULO III DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION FRACCIONAL

Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la composición granulométrica, análisis magnético y densométrico así como la composición mineralógica y química de la mena níquelífera estudiada. Se analizan las funciones de distribución másica y del contenido utilizando las propiedades citadas. Granulométricamente la mena níquelífera ocosa está compuesta por partículas menores de 0.071mm, alcanzando el 76.58 % en peso de la muestra. La goethita constituye la fase mineral predominante, y de forma secundaria hematites, gibbsita, cromita y minerales del grupo de la serpiente.

Por el estudio de Difracción de Rayos X, se pudo detectar más de un tipo de goethita, al parecer con diferente grado de cristalinidad, evidenciando que existe un proceso de alteración de los óxidos de Fe en el perfil laterítico, reflejado en la paragénesis de goethita-hematita. Todo esto permite suponer un proceso de intemperismo continuado que da lugar a fases de Fe, y Mn, las cuales pueden ser contenedoras de Ni y Co. Se observó, en esta mena laterítica de níquel, una tendencia marcada hacia una clase granulométrica determinada por lo menos para el SiO₂ Al, Mg, el Fe.

Se pudo establecer, entre los tipos mineralógicos plenamente detectados por Difracción de Rayos X: según separaciones granulométricas y magnéticas, las fases de óxidos de Fe, magnetita, maghemita, magnesiochromita, goethita y hematita; las densométricas, las fases de los minerales de grupo de óxidos de hierro de serpiente y fases minerales como las asbolanas y la litioforita.

3.1.- Distribución másica del análisis granulométrico.

La laterita de balance procedente del yacimiento Punta Gorda está compuesta principalmente por partículas menores de 0.2 mm, los cuales representan el 87 % en peso de la muestra, alcanzando los granos menores de 0.044 mm casi el 70 % del peso de la muestra, lo que concuerda con los resultados obtenidos por (Oustroumov et al., 1987; Almaguer y Zamarsky 1993; Almaguer, 1995; Rojas Purrón 1995; Quintana Puchol y González 1984), para este tipo de material de perfiles lateríticos cubanos.(tabla 5).

Tabla 5. Resultados experimentales de análisis granulométrico de la mena niquelífera de Punta Gorda

Clase de tamaño (mm)	Salida %	Salida acumulativa (+)	Salida acumulativa (-)
-10+8	0,1	0,1	99,9
-8+4	0,63	0,73	99,27
-4+2	0,36	1,09	98,91
-2+1	2,28	3,37	96,63
-1.+0.4	5,53	8,9	91,11
-0.4+0.2	4,28	13,18	86,82
-0.2+0.071	10,12	23,3	76,7
0.071+0.044	7,9	31,2	68,8
-0.044			

Granulométricamente se distinguen tres grupos, respecto a la composición de estos materiales. Por una parte, una granulometría gruesa, mayor de 2 mm, que representan sólo alrededor de 1.0 % en peso de la muestra.

Un segundo grupo granulométrico intermedio, constituido por las fracciones menores de 2.0 y mayores de 0.2 mm, las cuales representan alrededor del 13 % en peso de la muestra.

El tercer grupo de granulometría más fina, menor de 0.2 mm, es la mayoritaria, representa el 87 % en peso de la muestra, puede significar el grupo granulométrico que decide el comportamiento de la laterita de balance, lo cual se estudiará química y mineralógicamente más adelante.

Resulta significativo que en la composición granulométrica de la mena laterítica de níquel las fracciones menores de 1.0 mm, representan prácticamente el 99 % en peso de la muestra, de ahí es explicable que en el proceso de lixiviación ácida se tome como material asimilable para esta tecnología las partículas menores de 0.83 mm.

3.1.1.-Distribución de los elementos químicos de las clases granulométricas de la mena laterítica.

Químicamente la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda es esencialmente férrica, tabla 6, donde el hierro se encuentra entre un 20 a un 49.7 % según las diferentes fracciones granulométricas. Se encuentran además como elementos mayoritarios en esta mena el Mg, Al, SiO₂, Cr, y Mn. El Ni y el Co son microelementos de mucho interés, además fueron reportados el Cu y el Zn, de interés secundarios para el presente estudio.

La efectividad del proceso de beneficio con vista a la concentración de los principales metales de la mena laterítica se evidencia mejor cuando se analiza la composición química de las diferentes fracciones granulométricas. Se observa, como a partir de un material inicial (tabla 4) compuesto principalmente por Fe (casi un 47 %), con ciertas cantidades de Mg (3.7 %) y Cr (3.2 %), con algo de Al (2 %), SiO₂ (1.0 %) y Mn (0.4 %), sin descontar el Ni que llega a un 1.33 % y Co (0.13 %), se pueden obtener fracciones granulométricas enriquecidas para estos metales presentes en la mena laterítica de níquel de estos yacimientos.

Tabla 6. Composición química promedio de la laterita de balance, por fracciones granulométricas de Punta Gorda.

Clases de Tamaño(mm)	Contenido (% en peso)									
	Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Cr	Al	SiO ₂	Cu	Zn
-10 + 8,0	1.80	0.365	20.69	3.08	5.67	0.27	12.76	20.16	0.043	0.037
- 8,0 + 4,0	1.56	0.229	21.85	2.18	5.54	0.23	9.83	22.16	0.028	0.034
-4,0 + 2,0	1.60	0.323	22.18	2.72	5.92	0.27	9.62	19.38	0.033	0.045
-2,0 + 1,0	1.08	0.225	34.63	1.71	1.87	1.30	5.32	6.71	0.022	0.057
-1,0 + 0,4	1.20	0.264	39.20	1.84	1.08	2.11	4.15	4.43	0.020	0.058
- 0,4 + 0,2	1.42	0.404	36.50	2.98	0.79	2.09	4.10	3.94	0.022	0.058
-0,2 + 0,071	1.50	0.349	38.91	2.57	0.70	2.37	3.65	4.01	0.019	0.046
-0,071+ 0,044	1.40	0.192	43.90	1.40	0.57	2.68	3.44	3.75	0.017	0.042
- 0,044)	1.38	0.092	49.66	0.63	0.43	1.96	3.51	3.41	0.018	0.048

El hierro tiende a concentrarse en las fracciones granulométricas menores de 1,0 mm, en particular en la fracción más fina (- 0,044 mm) como se observa en la figura 6 y anexo 12a, Fig. II, detectándose una marcada diferencia en los contenidos de Fe, a partir de las fracciones menores de 2 mm, donde el hierro incrementa su contenido en las fracciones más fina, llegando

alcanzar hasta un 49.7 %, en tanto en las fracciones gruesas sus contenidos son del orden del 20 %. En el caso del aluminio, este metal incrementa su contenido en las fracciones granulométricas mayores de 2.0 mm, en las cuales su contenido es del orden de 10 %, en tanto en las clases más finas disminuye por debajo de 3.6 % como se ilustra en el anexo 12a. Fig. V

Es significativo para el dióxido de silicio y el magnesio su incremento en las fracciones mayores de 2.0 mm, en las cuales alcanza valores de hasta 22.16 % para el SiO_2 y 5.67 % para el Mg, tabla 6. En tanto disminuyen significativamente su contenido en las fracciones menores de 2.0 mm, donde el SiO_2 posee valores alrededor de un 7 a un 3.5 %, y el Mg de 1.9 a un 0.5 %. De manera general, el tamaño de grano de 1.0 mm constituye una "barrera" significativa para concentrar Mg, Al y SiO_2 , teniéndose en cuenta su alta representatividad en la composición granulométrica de esta mena. El cromo tiende a concentrarse en las partículas menores de 1.0 mm y mayores de 0.044 mm describiendo una función potencial, alcanzando su máximo contenido en la clase granulométrica (- 0.071 + 0.044 mm) como se manifiesta en el anexo 12a. Fig. IV Al manganeso se le observa una tendencia de concentración muy peculiar en este material laterítico de balance, Figura 7, posee dos grupos granulométricos notables: por una parte se concentra en las fracciones gruesas mayores de 2.0 mm, en particular en los granos mayores de 8.0 mm donde alcanza un 2.9 % de Mn., y por otra parte en las fracciones medianamente finas, menores de 0.4 mm y mayores de 0.07 mm, donde alcanza valores de hasta 2.84 %.

Respecto a los metales de máximo interés, Ni y Co, vale decir que material laterítico de balance posee contenidos apreciables de, cumpliendo los parámetros industriales requeridos para esta materia prima mineral (tabla 6). Son significativos los altos contenidos de Co que posee, las partículas menores de 0.071 mm.

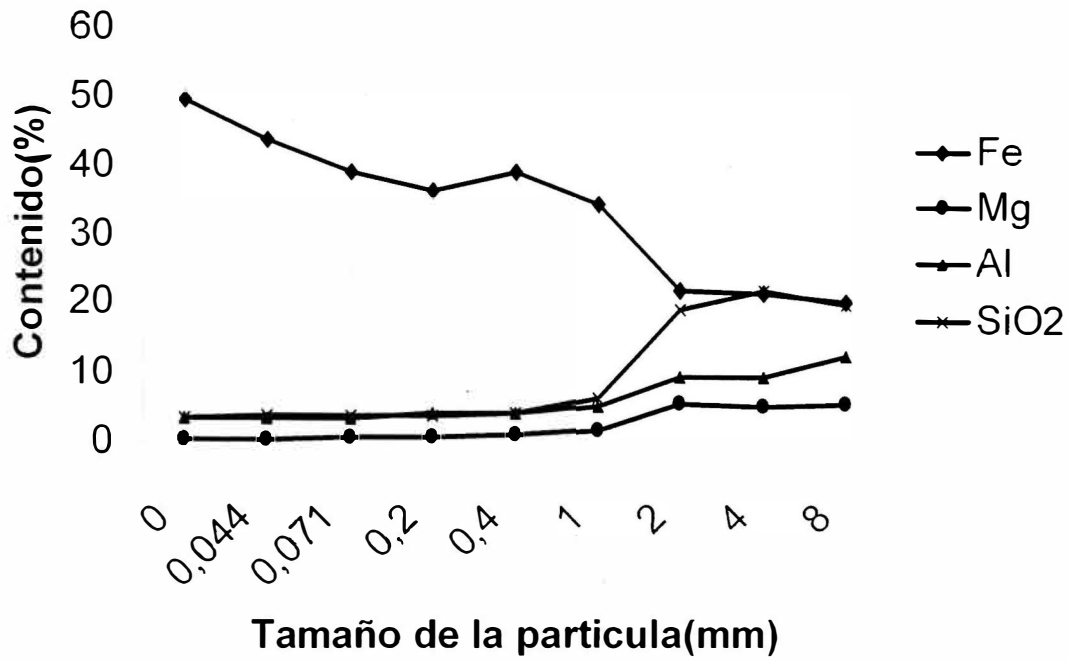


Figura 6. Variación de contenido de los componentes mayoritarios, Fe-Al-Mg-Si en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda.

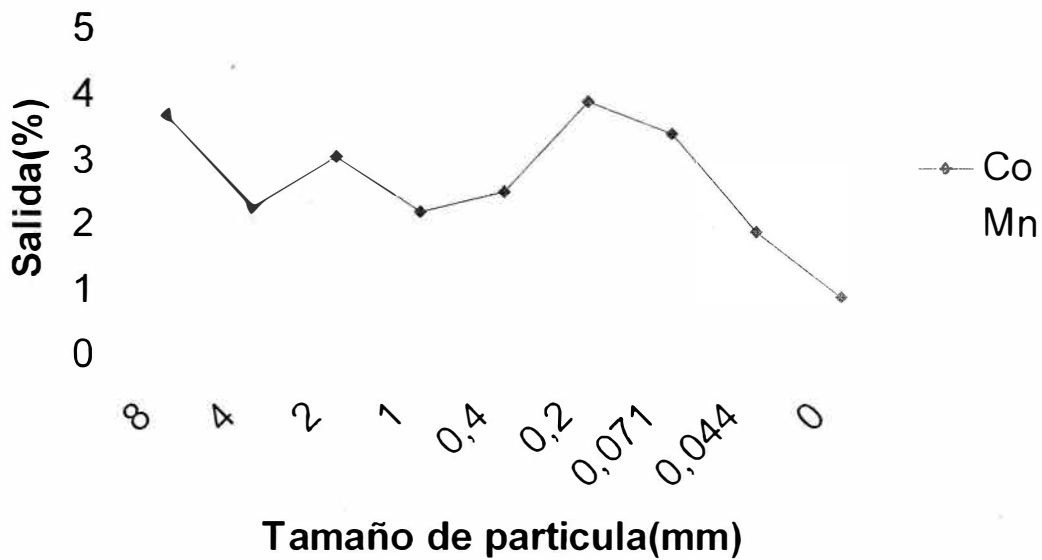


Figura 7. Variación de contenido del Mn y Co, en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda. * El valor de cobalto es multiplicado por x10.

De las nueve fracciones analizadas, ocho poseen contenidos de Co por encima de 0,15 %. Se detecta que su concentración en las lateritas es a partir de granos con tamaño mayor de 0,071 mm (tabla 6) donde sus contenidos son superiores al 0,2 % de Co, alcanzando los valores máximos en las fracciones -0,4 + 0,2 mm; -0,2 + 0,071 mm; -10 + 8,0 mm.

El cobalto y el manganeso tienen una tendencia muy parecida en su concentración (figura 7). Resulta interesante que en estos metales se evidencia una nítida tendencia de decrecimiento en su contenido desde la fracción -0,4 + 0,2 mm hasta la más fina, -0,044 mm, cosa que no ocurre así para fracciones mayores a 0,4 mm.

Para el níquel se observa una tendencia de enriquecimiento desde 1,0 mm hacia 0,044 mm de forma polinómica según las clases granulométricas (anexo 2a.Fig. I) Otros investigadores (Almaguer y Zamarsky, 1993; Rojas 1995, Coello et al., 1998) habían detectado para este metal una concentración hacia las fracciones mas finas. Se establece para el material ocroso niquelífero de perfiles lateríticos de Moa que el Ni tiende a concentrarse hacia las fracciones más finas menores de 45 micrones. Los altos valores de níquel reportados en las fracciones mayores de 1,0 mm podrían estar asociados además de la goethita y la hematita, con la antigorita, lizardita, y las cloritas que predominan en estas fracciones gruesas como obtenido en la Tabla 7.

3.1.2.-Mineralogía por granulometría de la laterítica de balance.

La composición mineralógica de las diferentes fracciones granulométricas (anexo 2) evidencia que las fases minerales predominantes son los óxidos de Fe, fundamentalmente goethita. Es significativa la gibbsita, sobre todo en las cinco fracciones más gruesas, y en un tercer orden de abundancia están los silicatos de Mg: una fase de serpentina y clorita, concentrándose en las fracciones más gruesas. Se detectan bien las fases de hematita, maghemita y magnesioferrita, aunque en contenidos por debajo del 10 %, corroborando con (Oustromov y Blanco, 1987; Fernández, 1992; Almaguer, 1993,1995; Oliveira et al., 2001).

También en algunas muestras existe cuarzo, que se concentra en la fracción más gruesa (-10 + 8,0 mm) donde llega alcanzar valores próximos al 10 %. La magnetita sólo se detecta en dos muestras y en poca cantidad. Resulta interesante la presencia de una fase de Mn: litioforita, detectada por difracción de rayos – X según los reflejos 4,72 y 9,49 Å; presentándose según

granos conformes de color negro y no magnético, concentrado principalmente en las fracciones de 2,0 a 0,071 mm, observándose asociada a la gibbsita y goethita, paragénesis mineral ya reportada por Tokashiki (2000); Manceau et al., (2002). Esta fase mineral requiere de un estudio más detallado.

Tabla 7. Composición mineralógica cuantitativa en peso % por Difracción de Rayos – X de la mena niquelífera de Punta Gorda, por fracciones granulométricas (%)*.

Minerales	10+8	-8+4	-4+2	-2+1	-1+0.4	-0,4+0.2	0,2+0,07	0,071+0,044	0,044
Clorita lib-2	13,4	7,3	9,2	5,4	3,36	2,43	2,21	7,3	3,09
Gibbsita	43,99	25,41	27,22	22,9	15,7	8,9	7,6	0,4	1,67
Goethita	16	43,3	35,2	53,5	67,3	70,34	68,42	78,7	83,1
Hematita	2,7	0	3,71	1,3	1,93	2,77	3,89	0,91	4,53
Litioforita	4,3	3,94	4,98	4,68	3,29	3,66	6,21	1,67	0
Lizardita1T	8,66	12,96	9,89	7,82	1,41	1,43	1,22	3,88	0,58
Maghemita	1,15	0	0,84	0	5,87	6,34	2,45	0	7
Magnesiocromita	0,97	4,66	6,42	2,77	0,75	3	6,77	7,07	0,03
Magnetita	0	0,25	0,79	0	0	0	0	0	0
Cuarzo	8,83	2,18	1,75	1,63	0,39	1,13	1,23	0,07	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

*: En el cálculo cuantitativo se empleó el software AUTOQUAN

Los termogramas, figura 3a hasta 3d del anexo 3, integradas en gráfico comparativo en la figura 3j, tienen comportamientos térmicos similares explicados por altos contenidos de silicatos de magnesio, gibbsita y óxidos de hierro que caracterizan estas fracciones; por la otra parte, las fracciones menores de 1,0mm reflejan la reacción de la goethita (desde figura 3e hasta 3i comparados en 3k y 3l).

Aparece un intenso efecto endotérmico, entre 58 y 71 °C atribuible al proceso de pérdida de agua no estructural. La deshidroxilación de la goethita se verifica, entre 299 a 312 en los picos de tipo 2, y 458 a 467, picos de tipo 3, mientras picos de tipo 4, entre 627 a 630 endotérmicos, atribuibles a la presencia de óxidos de manganeso. Se observan picos (5) exotérmicos entre 827- 830 °C en las fracciones mayores de 1,0 mm que podría ser provocado por la formación de los silicatos de magnesio de la serie olivino o estatita. La pérdida de peso en todas las clases, entre 50 hasta 1000 °C es aproximadamente 15 %.

El pico de deshidroxilación de goethita es normalmente observado en curvas ATD en rangos entre 250-400 °C, la temperatura aumenta con el aumento de tamaño y el orden de cristal (Schwertman, 1984) Este valor es relativamente alto, indicio de buena cristalinidad de goethita en esta muestra, que podría ser explicable por la sustitución isomorfa de Fe por Al. Información cristalográfica de la mena proveniente de Punta Gorda indica que la sustitución de Fe por Al en la goethita oscila entre 8,5-20,3 % (Oliveira et al., 2001. Los resultados obtenidos en este análisis son similares a (Quintana 1985; Outroumov et al., 1987; Almaguer 1993; Oliveira et al., 2001) para este tipo de material laterítico.

3. I.3.-Densidad de las fracciones granulométricas

Al valorar la densidad de la laterita de balance (tabla 9) se puede apreciar una íntima relación entre la granulometría y esta propiedad, pudiéndose distinguir respecto a esto, tres grupos principales: un primer grupo que se relaciona con las fracciones más gruesas (mayores de 2,0 mm), las cuales poseen los valores más bajos de densidad, entre 2,52 a 2,59 g/cm³, explicable por los más bajos contenidos de Fe, entre 20 y 22 %, y los más altos contenidos de SiO₂ (entre 17 y 20 %) y Mg (6,3 %), además del Al con un contenido alrededor del 10 %. Un segundo grupo que se relaciona con las fracciones medianamente gruesas (-2,0 + 0,071mm), las cuales poseen una densidad de 2,82 hasta 3,01 g/cm³, en las que disminuye los contenidos de Mg, SiO₂, Al y aumenta el Fe. Luego un tercer grupo, relacionado con las fracciones más finas, menores de 0,071mm, que es el material más denso, donde la densidad oscila entre 2,94 y 3,48 g/cm³, aquí es donde se observan los más altos contenidos de Fe (entre 43 a un 48 %), en tanto se aprecian los más bajos contenidos de Mg (0,6 %), SiO₂ (3,6 a 3,8 %) y Al que llega hasta 3,16 %.

Los resultados de la densidad concuerdan con la caracterización mineralógica que presentan los diferentes grupos granulométricos para esta mena laterítica de níquel. Ver Anexo 4. Así tenemos que para las fracciones gruesas (mayores de 2,0 mm), de más baja densidad, es característico la presencia de los minerales silicatados: serpentina y clorita, con cuarzo, que alcanzan sus mayores contenidos en estas fracciones gruesas, tabla 9, además de gibbsita y con poca cantidad de minerales de hierro: principalmente goethita, hematita y maghemita. La goethita, el mineral predominante en este material laterítico alcanza los valores mínimos en

estas fracciones gruesas, en tanto el predominio de los minerales silicatados de Mg y de aluminio explica los bajos valores de densidad para estas fracciones. En las fracciones intermedias, con mediana densidad, se observa que la goethita aumenta su contenido, llegando hasta un 70 %, en tanto los silicatos disminuyen su presencia, lo mismo que la gibbsita. Mientras que en las fracciones más finas (menores que 0,071 mm) se concentran los minerales de hierro: goethita, que alcanza hasta más de un 80 %, la maghemita que llega casi al 7 %, y hematita, entre un 4 y 5 %, en tanto las fases silicatadas disminuyen su presencia en estas fracciones, llegando a representar hasta un 3 % para las cloritas, tabla 7, y un pobre contenido de serpentina, 0,6 %, al igual que la gibbsita que está en muy bajo contenido también.

Beyris y Rojas (1994) valorando la mena laterítica (tipo LB) en Moa detectan diferencias en las densidades de lateritas pertenecientes a frentes de explotación con distintos grado de madurez. También Rojas Purrón (1995), tabla 8, caracterizando distintos perfiles de la corteza de intemperismo define diferencias en cuanto a la densidad de muestras representativas para los distintos horizontes de la corteza de meteorización, lo que está relacionado con la composición química y mineralógica que caracteriza cada uno de estos horizontes. Valorando la pulpa limonítica de la mena níquelífera Georgiou y Papangelakis (1998) exponen una densidad absoluta de 3,73 g/cm³, acorde con los resultados anteriormente mencionado.

Tabla 8. Resultados de la densidad por horizontes de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa según Rojas Purrón (1995)*

Horizonte	Intervalo de densidad g./cm ³	Valores promedios g./cm ³
Coraza Ferruginosa.	3,80-4,10	3,95
Ocres	3,0-3,80	3,40
Serpentinita Alterada.	2,51-2,97	2,74
Serpentinita Inalterada	2,51-2,66	2,585

Tabla 9. Densidad de las fracciones granulométricas de Punta Gorda.

Clases de Tamaño (mm)	Densidad (g/cm ³)
10+8,0	2,52
- 8,0 + 4,0	2,54
-4,0 + 2,0	2,59
-2,0 + 1,0	2,82
-1,0 + 0,4	3,01
- 0,4 + 0,2	2,92
-0,2 + 0,071	2,94
- 0,071 + 0,044	3,48
- 0,044	3,40

3.2 Resultados del análisis fraccional magnético.

Las susceptibilidades magnéticas de los minerales son difíciles de medir porque sus valores son influenciados por entrecrecimiento e impurezas. Una tabulación integral y única de susceptibilidades magnéticas no existe porque de cualquier manera, el mismo mineral de diferentes procedencia puede mostrar variaciones significativas de esta propiedad. Las susceptibilidades magnéticas de muchos minerales son bajas (típicamente menores de 10^{-7} m³/Kg. y se requiere altos campos y gradientes magnéticos para efectuar una efectiva separación (King, 2001).

Es conocido por los estudios químico-mineralógicos (Oustroumov et al, 1985, 1986,1987, Rojas Purrón *et al.*; 1995.), el contenido estimado de las fases en las menas lateríticas presente en forma natural en el yacimiento se encuentra relacionada a continuación:

- 1.- Goethita α FeO OH \Rightarrow [70 - 85 %]
- 2.- Gibbsita Al (OH)₃ \Rightarrow [5 -15 %]
- 3.- Hematitas α Fe₂O₃ \Rightarrow [3 - 10 %]
- 4.- Ferrocromitas FeCr₂O₃ \Rightarrow [1 - 8 %]

5.- Maghemita $\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3 \Rightarrow [0 - 20 \%$

6.- Magnetita $\text{Fe}_3\text{O}_4 \Rightarrow [0 - 3\%$

7.- Cuarzo $\text{SiO}_2 \Rightarrow [1 - 4 \%$

Es necesario comentar que en la separación magnética que se realizó por vía húmeda, a las clases menores de 1,0 mm, no hubo retención magnética de las partículas a la intensidad de 0,5 A y en el caso de la fracción menos 0,044 mm y 0,4 mm se obtiene el producto magnético a partir la intensidad de 2 A.

3.2.1- Caracterización másica de las fracciones granulométricas a distintas intensidades de corriente eléctrica.

La distribución másica (anexo 8, tablas 10-18) de los productos magnéticos según las intensidades de corriente eléctrica por clases de tamaño es un indicador indispensable para la selección del rango de intensidad de corriente, así como la fijación de un tamaño óptimo para la separación de elementos químicos de interés. A partir de los resultados obtenidos de la separación magnética de las distintas fracciones granulométricas se analizó la variación de los elementos químicos de los mismos así como la salida.

Es importante plantear que para una intensidad de corriente baja hasta 0,5 A la salida de todas las fracciones es nula. Para la separación magnética las mejores intensidades de corriente son de 2 a 4 Amperes. En este intervalo de intensidad de corriente, el material retenido tiene un color oscuro intenso. Al aplicar 6 A se disminuye el peso del material retenido. El material retenido por 6 A es negro-rojizo. Como era de esperar el material débilmente magnético, mayores de 6 A es la más predominante en esta laterita de balance con salida promedio entre 52 y 94 % según la fracción granulométrica.

A continuación se realiza un análisis pormenorizado de los productos de las distintas fracciones granulométricas:

Para la fracción (-0,044 + 0,00) mm, la salida de los productos fuertemente electromagnéticos se comportó de la siguiente manera: a bajas intensidades de corriente casi no se retuvo el producto por el analizador magnético; la salida promedio de la intensidad 0,5 y 1 A no

rebasaban el 1 %. Solo a partir de 2 A se observó retención significativa de la laterita de balance llegando promedios de 3,1 % a la intensidad de 4 A disminuyendo progresivamente después de este valor. El producto débilmente magnético de esta clase era la más abundante mostrando cifras promedios de 94 %.

Las siguientes fracciones granulométricas: (0,071+ 0,044) mm;(- 0,2+ 0,071) mm; (-0,4+0,2) mm;(-1,0+ 0,4) mm tuvieron comportamiento similar en cuanto las tendencias de las salidas de los productos; los picos de salidas para estas clases granulométricas eran 2,0 A seguido por 4,0 A como segunda intensidad con retención apreciable como se evidencia en la figura 8.

Para las clases mayores de 1,0mm ocurrió una distribución distinta con respecto a la variable bajo análisis; la intensidad 0,5 captó la mayor masa, 10-19 %; después empezó una disminución gradual hacia las intensidades mayores, registrando entre 5-7 % de promedio en la intensidad de 6,0 A ((figura 9).

Los productos magnéticos por peso en el material con tamaños mayores de 1,0 mm fue aproximadamente 35 %; y para partículas menores de 1,0 mm, 6-16 % según las fracciones granulométricas y estuvo constituido por maghemita magnetita y minerales acompañantes, corroborando resultados de (Almaguer 1996a ; Hernández et al., 2000).

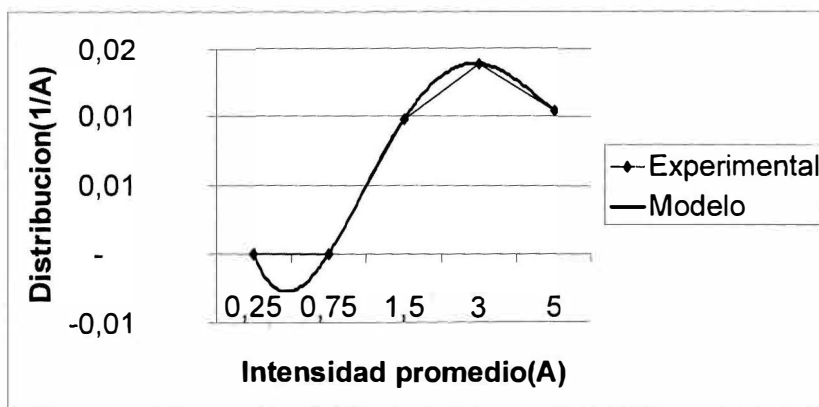


Figura 8. El Comportamiento de la distribución másica de los productos magnéticos de Punta Gorda ($l < 1,0$ mm)

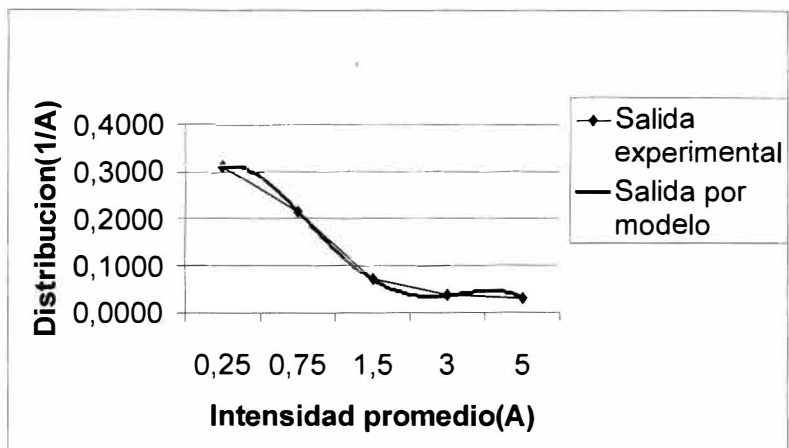


Figura 9. El Comportamiento de la distribución másica de los productos magnéticos de Punta Gorda ($I > 1,0$ mm)

3.2.2 Variación de los componentes químicos de las fracciones granulométricas a distintas intensidades de corriente eléctrica.

A partir de los resultados (desde las tablas 10 hasta 18), se muestran los contenidos de los elementos químicos estudiados cuando fueron aplicadas las diferentes intensidades de corriente. Se analizó la variación que experimentan los elementos: níquel, cobalto, hierro, cromo, aluminio, dióxido de sílice, magnesio y manganeso.

El níquel está contenido generalmente, tanto en los productos magnéticos, como en los no magnéticos corroborando con los resultados de Stamboliadis (2003). Según los análisis mineralógicos, el níquel está asociado con fases minerales con fuertes características magnéticas como maghemita y hematita. Además el níquel está asociado con la goethita que constituye la fase principal de la fracción no magnética donde se enriquece el níquel en valores altos. (Difractograma 5f, 5k de anexo 5).

En el caso del hierro en todas las fracciones, existe una clara tendencia de aumentarse hacia las fracciones de intensidades bajas, el 1-2 A. El hierro en las fracciones magnéticas está representado fundamentalmente por la maghemita y hematita en primer plano y de forma secundaria la goethita, según los difractogramas (Vea anexo 5).

El cobalto, aunque con un comportamiento un poco complejo, tiende a concentrarse hacia los productos magnéticos generalmente. El comportamiento de manganeso es similar al cobalto en cuanto su tendencia de concentración. La similitud de concentración entre el manganeso y el cobalto evidencia que estos elementos están asociados a las mismas fases minerales, las asbolanas y lithioforitas (Rojas et al., 2005). La concentración de cobalto y manganeso en los productos magnéticos de las distintas clases granulométrica es heterogénea.

El aluminio se distribuye en las fracciones no magnéticas. La Difracción de Rayos X no detecta el mineral principal de aluminio, gibbsita en esta muestra, pero no se descarta su presencia. El dióxido de silicio tiende a concentrarse en los productos débilmente electromagnéticos. Como se evidencia en los análisis mineralógicos de las fracciones granulométricas gruesas, el alto contenido de este elemento está vinculado con los minerales del grupo de serpentina como la antigorita, cloritas lizarditas y también con cuarzo.

El cromo se distribuye en las distintas intensidades de corriente eléctrica aumentando significativamente en los productos magnéticos, coincidiendo con Hristos (2002). Existe empobrecimiento general de cromo en los productos de granulometría gruesa mayores que 1,0 mm. Su principal portador según análisis mineralógico podría ser magnesiocromita.

A continuación se realiza un análisis mas detallado de los resultados obtenidos a partir de la composición química de los elementos por fracciones cuando son aplicadas diferentes intensidades de corriente.

Análisis fraccional magnético de la fracción (-10 + 8) mm.

A partir de los resultados granulométricos obtenidos, esta fracción representa el 0,1 % de la masa de masa mineral total, y químicamente posee elevadas concentraciones de aluminio y dióxido de sílice. En la tabla 10, se observa que los contenidos de níquel se concentran en productos fuertemente electromagnéticos. Con relación al cobalto, aumenta hacia el producto magnético de forma exponencial (anexo 12b.Fig. II) su mayor contenido 0,413 % se alcanza a la intensidad de corriente de 0,5A, representando 9,8 % de la salida en esta fracción.

En el caso del hierro, se observa que su concentración varía muy poco a las diferentes intensidades del campo magnético, incrementándose a las intensidades de 0,5 A, 2 A. El

magnesio posee variabilidad en su contenido a las diferentes intensidades pero típicamente se incrementa exponencialmente hacia el producto magnético como se ilustra en el anexo 12b. Fig. IV. Como se muestra, el cromo es homogéneo en todos los productos de esta clase. El aluminio varía de manera tal que sus mayores concentraciones se encuentran a la intensidad mayor de 1 A. El aluminio muestra una tendencia de concentración hacia el producto no magnético también con comportamiento exponencial (anexo 12b. Fig. VI). Los elevados contenidos de aluminio podrían estar asociados a la presencia de gibbsita y minerales arcillosos.

Tabla 10. Composición química de la fracción (-10 + 8) mm de Punta Gorda a diferentes intensidades de corriente.

Clase (mm)	I(A)	γ (%)	Contenido de elementos (%)							
			Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-10+8.0	0.5	9,80	2,01	0,413	25,00	5,12	6,29	16,64	0,040	4,98
	1	7,47	2,14	0,412	22,40	5,20	7,57	21,21	0,040	3,62
	2	6,67	1,98	0,266	20,57	5,26	7,29	21,99	0,040	1,84
	4	5,90	2,24	0,354	20,50	5,64	7,61	25,21	0,040	3,43
	6	4,93	1,80	0,356	20,43	7,20	7,78	25,50	0,040	2,58
	NM	64,93	1,84	0,300	19,97	7,82	8,64	23,61	0,040	3,00
	Total	99,70	1,90	0,303	21,30	5,33	8,07	21,83	0,039	3,15

Análisis fraccional magnético de la fracción (-8 + 4) mm.

Esta fracción solo representa el 0,63 % de la masa total de los minerales, y posee cantidades significativas de aluminio, dióxido de sílice y magnesio. El níquel tiende a aumentar linealmente en los productos magnéticos como se alude en el anexo 12b. Fig. I. La concentración de cobalto también es similar a la de la fracción anterior. El hierro en esta fracción también se comporta como era de esperar como de la fracción -10+8,0 mm, tiende a disminuir en las partículas no magnéticas. El magnesio manifiesta una concentración compleja en esta fracción igual que la anterior, pero en este caso sus mayores valores se ubican en las altas intensidades, este comportamiento está relacionado con las fases minerales portadoras de dicho elemento; silicatos de magnesio y magnesiocromita. El aluminio está distribuido hacia

las altas intensidades campo. El máximo contenido de dióxido de sílice, 25,69 %, en la fracción no magnética, describiendo una función exponencial Pero en todas las intensidades del campo sus concentraciones tienen valores significativos, este elemento está relacionado con la antigorita, la clorita, y el cuarzo, que son minerales portadores de este elemento.

Tabla 11. Composición química de la fracción (-8 + 4) mm de Punta Gorda a diferentes intensidades de corriente.

Clase (mm)	I(A)	γ(%)	Contenido de elementos (%)							
			Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-8+4	0.5	9,80	1,52	0,413	27,11	6,52	7,96	15,42	0,30	4,04
	1	7,60	1,98	0,412	21,80	6,53	6,41	20,48	0,21	2,64
	2	6,67	2,15	0,266	20,73	6,54	7,41	20,78	0,05	3,95
	4	5,90	2,35	0,354	20,67	7,22	7,79	22,83	0,05	3,91
	6	5,13	2,22	0,356	22,30	7,34	9,06	24,44	0,04	3,23
	NM	63,77	1,78	0,312	20,81	5,63	10,09	25,69	0,02	2,77
	Total	98,87	1,84	0,307	21,37	5,53	9,06	23,75	0,05	3,04

Análisis fraccional magnético de la fracción (-4 + 2) mm.

Esta clase granulométrica representa el 0,36 % de la muestra total, al igual que las fracciones anteriores presenta elevados contenidos de magnesio, aluminio y dióxido de sílice. El níquel presente en esta fracción (tabla 12), varía desde 1,58 hasta 2,81 % con tendencia general de enriquecimiento hacia 1,0 a 6,0 A. Por otra parte, el cobalto se liberó ligeramente hacia los productos magnéticos similar a las experiencias anteriores.

Tabla 12. Composición química de la fracción (-4,0 + 2,0) mm de Punta Gorda a diferentes intensidades de corriente.

Clase (mm)	I(A)	γ (%)	Contenido de elementos (%)							
			Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-4+2	0,5	15,47	1,58	0,422	26,41	6,30	7,00	14,98	0,70	3,77
	1	10,80	2,10	0,425	21,74	5,62	8,14	17,24	0,52	3,88
	2	6,93	2,34	0,400	21,10	6,57	9,03	18,20	0,45	5,37
	4	7,13	2,42	0,354	21,37	7,42	9,73	18,64	0,40	7,09
	6	6,17	2,81	0,312	20,11	7,83	10,98	19,24	0,36	8,48
	NM	52,77	1,41	0,159	20,63	3,84	12,11	24,47	0,01	2,07
	Total	99,27	1,72	0,336	21,56	5,07	10,36	20,60	0,11	3,49

El hierro se encuentra enriquecido a la intensidad de 0,5 A, con una concentración de 26,41 %. El manganeso tiende a liberarse hacia los productos magnéticos. El comportamiento de magnesio en esta fracción según las intensidades del campo magnético es irregular. El aluminio y el dióxido de silicio tienen un comportamiento similar, ambos tienden a incrementarse hacia las intensidades mayores, concentrándose significativamente en el producto no magnético (24,47 % para la sílice y 12,11 % para el aluminio).

Análisis fraccional magnético de la fracción (2 + 1) mm.

Esta fracción representa el 2,28 % de la muestra inicial, y según el análisis mineralógico las fases minerales principales son antigorita, goethita y gibbsita. El hierro se libera hacia las intensidades menores siendo maghemita como en las experiencias, su principal portador.

Tabla 13. Composición química de la fracción (-2 + 1) mm de Punta Gorda a distintas intensidades de corriente.

Clase (mm)	I(A)	γ (%)	Contenido de elementos (%)							
			Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-2+1	0.5	19,14	1,15	0,369	35,26	5,18	4,94	12,81	1,87	3,12
	1	13,93	1,80	0,554	24,78	5,91	7,44	13,69	0,56	4,83
	2	12,90	2,22	0,811	22,37	6,42	9,02	14,85	0,31	6,86
	4	11,01	2,07	0,663	21,39	5,61	10,65	16,63	0,28	6,52
	6	7,20	1,69	0,348	21,91	6,46	11,67	17,09	0,03	3,57
	NM	34,50	1,44	0,275	23,05	2,37	9,52	13,09	0,29	3,33
	Total	98,68	1,60	0,444	24,94	4,08	8,45	11,58	0,56	4,28

En la tabla 13, la distribución del níquel, cobalto, magnesio mantuvieron sus tendencias de concentración como en la experiencia anterior. Estas concentraciones de magnesio están relacionadas con la antigorita. Las concentraciones de aluminio y dióxido de sílice son similares a la trayectoria que tienen en la fracción (-4,0 + 2,0) mm., sus contenidos se enriquecen con el incremento de la intensidad de corriente.

Análisis fraccional magnético de la fracción (1,0 + 0.4) mm.

Esta clase representa el 5,53 % de la muestra total. En relación con las concentraciones de hierro, manganeso, cromo, aluminio y dióxido de sílice se comportan de manera similar a las fracciones analizadas anteriormente.

Tabla 14. Composición química de la fracción (-1,0 + 0.4) mm de Punta Gorda a diferentes intensidades de corriente.

Clase (mm)	I(A)	γ (%)	Contenido de elementos (%)							
			Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-1,0+0,4	0.5	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	5,35	1,39	0,589	40,61	2,96	5,41	3,35	1,50	3,87
	4	3,79	1,60	0,767	28,80	3,63	6,43	4,21	1,43	5,01
	6	1,42	1,38	0,583	25,58	2,42	6,97	5,84	0,56	5,15
	NM	89,33	1,56	0,335	22,60	2,59	8,96	14,23	0,28	2,27
	Total	99,89	1,54	0,368	23,79	2,64	8,64	13,12	0,59	2,49

Análisis fraccional magnético de la fracción (-0.4 + 0.2) mm.

Esta fracción representa el 4,28 % de la masa de la muestra total. Es conveniente destacar que a partir de esta clase de tamaño (tabla 15), el contenido de hierro está por encima del 35 %, tal como requiere su contenido en la laterita de balance. El hierro se concentra a las intensidades del campo magnético a 1,0 A y 2,0 A, con valores de 47,70 % y 44,85 % respectivamente. En las partículas no magnéticas se encuentra su menor contenido, 30,98 %. La distribución del níquel, el cobalto y el manganeso es uniforme en todas las fracciones. El aluminio se comporta de forma similar el dióxido de silicio, sus contenidos se incrementan con el aumento de la intensidad del campo magnético como en todos los casos anteriores.

Tabla 15. Composición química de la fracción (-0,4 + 0,2) mm de Punta Gorda a diferentes intensidades de corriente.

Clase (mm)	I(A)	γ (%)	Contenido de elementos (%)							
			Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-0,4+0,2	0.5	0.0	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,73	1,34	0,416	47,70	0,62	3,30	3,06	1,83	2,62
	2	5,99	1,49	0,423	44,85	0,72	3,56	3,10	1,63	2,57
	4	5,11	1,64	0,440	42,30	0,63	3,79	3,08	1,46	3,00
	6	4,08	1,53	0,330	42,37	0,54	3,78	3,44	1,20	2,14
	NM	84,00	1,77	0,491	30,98	1,04	5,29	5,54	1,65	4,38
	Total	99,90	1,73	0,476	32,97	0,97	5,02	5,15	1,63	4,09

Análisis fraccional magnético de la fracción (-0.2 + 0.071) mm.

Esta clase granulométrica representa el 10,12 % de la muestra total. Las tendencias de concentración del níquel y cobalto en esta fracción (tabla 16) son similares al resto de las fracciones menores de 1,0 mm.

Tabla 16. Composición química de la fracción (-0,2 + 0,071) mm de Punta Gorda a diferentes intensidades de corriente.

Clase (mm)	I(A)	γ (%)	Contenido de elementos (%)							
			Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-0.2+0.071	0.5	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,21	1,02	0,229	53,23	0,76	2,89	2,31	3,96	1,98
	2	7,94	1,06	0,298	49,72	0,88	3,27	2,60	3,80	2,07
	4	5,42	1,03	0,318	45,32	0,94	3,43	2,66	3,74	2,39
	6	2,35	1,25	0,356	40,93	0,76	3,67	3,25	3,22	2,62
	NM	84,08	1,71	0,362	37,58	0,69	3,91	5,01	1,83	2,66
	Total	100,00	1,61	0,354	39,08	0,72	3,82	4,65	2,06	2,59

El hierro se concentra en las intensidades de 1,0 A y 2,0 A. El manganeso se enriquece con el incremento de las intensidades del campo magnético, siendo los valores más representativos 2,62 % y 2,66 % a la intensidad de 6 A y en las partículas no magnética. Como se observa, los contenidos de cromo disminuyen al incrementar la intensidad de corriente. El aluminio y el dióxido de silicio se incrementan sus contenidos hacia las intensidades mayores por sus relativas bajas susceptibilidades magnéticas.

Análisis fraccional magnético de la fracción (-0.071+0.044) mm

Esta fracción representa el 7,9 % de toda la muestra del perfil. En la tabla 17, se exponen los resultados de esta fracción. El níquel se concentra en la clase no magnética con 1,40 %, lo que representa el 85,48 % en peso de la fracción. El comportamiento del cobalto es similar al del níquel.

Tabla 17. Composición química de la fracción (-0,071+0,044) mm de Punta Gorda a diferentes intensidades de corriente.

Clase (mm)	I(A)	γ (%)	Contenido de elementos (%)							
			Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-0.071+0.044	0.5	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	1,05	0,84	0,151	55,93	0,72	2,47	2,36	3,52	1,04
	2	6,57	0,93	0,168	56,53	0,74	2,82	2,48	3,00	1,21
	4	4,86	0,96	0,173	54,10	0,77	2,99	2,62	2,89	1,16
	6	1,79	1,16	0,182	43,28	0,66	3,71	3,51	2,56	1,47
	NM	85,48	1,40	0,138	44,58	0,57	3,89	3,95	2,22	1,02
	Total	99,75	1,34	0,142	45,80	0,59	3,75	3,75	2,30	1,04

El magnesio está distribuido uniformemente en todas las intensidades del campo magnético y demuestra su complejidad de separación. Las concentraciones de aluminio y de dióxido de sílice están fundamentalmente en la clase no magnética.

Análisis fraccional magnético de la fracción (-0,044 + 0,00) mm.

La mena niquelífera se representa fundamentalmente por esta fracción, la cual constituye el 68,79 %. Las altas concentraciones de hierro (tabla 18) están relacionadas con la presencia de goethita fundamentalmente.

Tabla 18. Composición química de la fracción (-0,044 + 0,00) mm de Punta Gorda a diferentes intensidades de corriente.

Clase (mm)	I(A)	γ (%)	Contenido de elementos (%)							
			Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-0.044+0.00	0.5	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,10	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,98	0,85	0,074	57,20	0,49	2,43	2,34	1,52	0,63
	4	2,77	1,02	0,086	59,85	0,50	2,56	2,39	1,30	0,53
	6	2,08	1,27	0,087	54,48	0,40	3,45	3,01	1,27	0,65
	NM	94,07	1,45	0,083	49,80	0,44	3,86	3,62	1,68	0,59
	Total	100	1,42	0,083	50,21	0,44	3,79	3,56	1,82	0,59

3.2.3. -Mineralogía del análisis fraccional magnético

En los productos magnéticos de las clases menores que 1,0 mm se detectan la maghemita y magnesiocromita, fases minerales principales, y como las fases secundarias; la goethita. Lo contrario, predomina la goethita en los productos no magnéticos con trazas de maghemita y magnesiocromita (Anexo 5).

3.3. El análisis fraccional de la laterita de balance en líquido orgánico denso.

Para la clase, (-0,4 + 0,2) mm el material dejó el líquido turbio. Una parte considerable se retuvo en el seno del líquido, quedando escasas partículas sumergidas. El análisis macroscópico y microscópico del producto pesado de la clase (-2,0+1,0) mm muestra granos negros, negro mate que son óxidos de manganeso y abundante piroxenos alterados finos. Las características microscópicas de los productos pesados de esta clase son similares a los productos pesados de la fracción (-1,0+0,4) mm. Para la fracción (-0,2+0,071) mm, al interactuar con el medio separador, se observó una fase. La separación al parecer no es

eficiente por la homogeneidad de la fase líquida para esta clase. A continuación se exponen los resultados de la salida de los productos de la separación densométrica de los productos no magnéticos de las distintas clases de tamaño de la mena niquelífera.

La distribución de los productos ligeros se incrementa hacia las fracciones gruesas. Las fracciones menores que 1,0 mm se caracterizan por tener más productos pesados y suspensiones, manifestando poca efectividad para este tipo de análisis (tabla 26).

Para el análisis de los productos ligeros obtenidos de la primera separación en medios densos, de densidad entre 2,92 y 2,50 g/cm³, prácticamente no ocurrió separación, todo lo que se experimenta es equisidimentación, excepto las fracciones más finas, (-0,4 + 0,2) mm y (-0,2 + 0,071) mm donde se hundieron más partículas (tabla 26). Cuando fueron sometidos a un baño con densidad de 1,80 g/cm³ todas las partículas se sedimentaron. Las partículas minerales flotaron o se hundieron según la densidad del medio separador, por lo tanto, se puede generalizar que al someter a la masa mineral friable previamente clasificada (de una misma clase granulométrica) a un operación de análisis en medios densos, las partículas emergidas adquieren propiedades densométricos similares, o sea tamaños y pesos muy parecidos, convirtiéndose en un producto homogéneo, y los análisis subsiguientes no producen segregación significativa aunque cambie la densidad del medio.

3.3.1 Composición química de los productos de análisis los medios densos.

Los resultados de la caracterización química del producto débilmente magnético sometido al análisis fraccional densométrico están en el Anexo 6.

El análisis fraccional mediante el tamaño y la densidad de la mena laterítica del níquel permite concentrar notablemente el dióxido de sílice, el magnesio y aluminio en las fracciones ligeras (menores de 2,70 g/cm³), para SiO₂; llegando valores entre 17-26 %, para Al; entre un 12 al 19 % en los productos emergidos de los tamaños mayores de 0,4 mm. El Cr y Co se concentran en las fracciones pesadas, mayores de 2,90 g/cm³; las intermedias, 2,70 a 2,90 g/cm³, ricas en níquel y las menos densas, (menores de 2,70g/cm³), tienden a empobrecerse en níquel.

3.3.2 Caracterización mineralógica del análisis en los medios densos.

El análisis mineralógico, anexo 7, muestra que los productos ligeros están compuestos por fases de silicatos de magnesio e hidróxidos de aluminio, destacando entre ellos el cuarzo (SiO_2), clinocrisotilo, $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ y gibbsita, $\text{Al}(\text{OH})_3$, y en menor cuantía las asbolanas, $\text{NiMn}_2\text{O}_3(\text{OH})_4\text{H}_2\text{O}$, bernesita $(\text{Na}_7\text{Ca}_3)\text{Mn}_7\text{O}_{14} \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ y cuarzo. Se obtuvo un producto pesado con densidad mayor que $2,935 \text{ g/cm}^3$, enriquecido en Co de 0,5 a 0,8 % en la fracción (-1+0,4) mm representado por asbolanas y la litioforita, $(\text{Al,Li})\text{Mn}^{+4} \text{O}_2(\text{O H})_2$.

3.3. –Análisis de la distribución másica según tamaño de las partículas.

La función de distribución diferencial $\gamma(\xi)$ de las partículas de cualquier mezcla con una propiedad física determinada (ξ), es aquella para la cual el producto $\gamma(\xi) d\xi$ es igual a la fracción másica de cualquier intervalo elemental y su incremento $d\xi$; la función $\gamma(\xi)$ no es otra cosa que la función de distribución diferencial de la densidad de distribución de sólido, en las fracciones elementales (O. N Tijonov, 1984). La función de distribución de la laterita de balance, tabla 19, según el tamaño se conoce mediante análisis granulométrico.

Tabla 19. Resultados experimentales de la función de distribución másica $\gamma(l)$ de Punta Gorda.

Clases de tamaño (mm)	Tamaño promedio de la partícula (mm)	Magnitud de intervalo de clase Δl	Función de distribución, $\gamma(l)$, l/mm	$\gamma(l) \cdot \Delta l$
-10+8	9,0	2,0	0,0005	0,001
-8+4	6,0	4,0	0,0016	0,0063
-4+2	3,0	2,0	0,0018	0,0036
-2+1	1,5	1,0	0,0228	0,02275
-1.+0.4	0,7	0,6	0,0922	0,0553
-0.4+0.2	0,3	0,2	0,2140	0,0428
-0.2+0.071	0,1355	0,129	0,7845	0,1012
0.071+0.044	0,0575	0,027	2,9259	0,079
-0.044+0	0,022	0,044	15,6341	0,6879

En la Figura 10, se puede apreciar que, el d_{80} prácticamente coincide con el tamaño de las partículas, 0,071 mm. Se aprecia el incremento del valor de la función de distribución γ (l) hacia las fracciones mas finas como se muestra en la tabla 19, corroborando los resultados de Falcón et al. (1993); Coello et al. (1998); Hernández et al. (1997,2000) para estos tipos de materiales lateríticos.

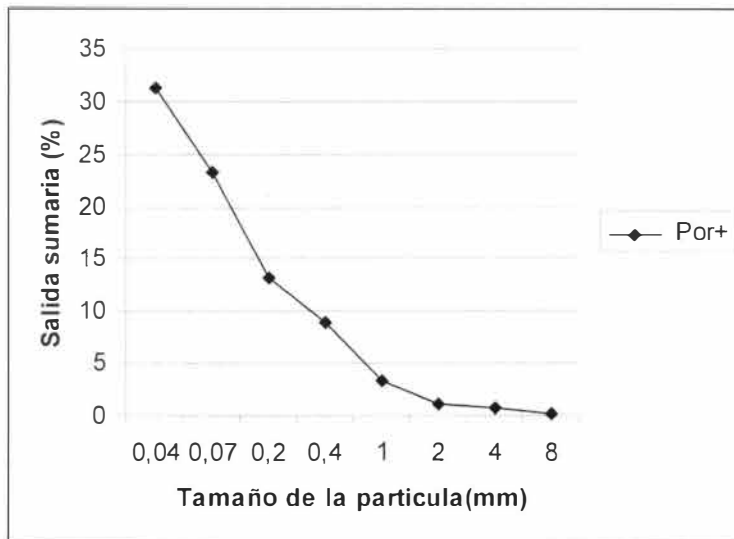


Figura. 10. Curvas Características sumarias de análisis granulométrico de Punta Gorda.

A continuación se expone la ecuación que describe la función de distribución másica que caracteriza la mena, tomando como propiedad de análisis, el tamaño de la partícula cuyos valores numéricos se hallan en tabla 19.

$$\gamma(l) = \int_{l/\text{mm}}^{l/\text{max}} (15,0351e^{-1,30631}) dl \quad (19)$$

$$R^2 = 0,9864$$

3.3.1.- Función de distribución de contenido según tamaño de las partículas.

Los componentes como el Al, SiO₂, Mg, existe una tendencia de enriquecerse hacia las fracciones gruesas. El níquel aumenta hacia fracciones finas desde 1,0 mm hasta 0,044 mm.

Tabla 20. Función experimental del contenido β (l) de Punta Gorda.

Clases de Tamaño (mm)	Tamaño promedio de partícula (mm)	Composición química, %							
		Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Cr	Al	SiO ₂
-10+8	9,0	1,80	0,365	20,69	3,08	5,67	0,27	12,76	20,16
-8+4	6,0	1,56	0,229	21,85	2,18	5,54	0,23	9,83	22,16
-4+2	3,0	1,60	0,323	22,18	2,72	5,92	0,27	9,62	19,38
-2+1	1,5	1,08	0,225	34,63	1,71	1,87	1,30	5,32	6,71
-1.+0.4	0,7	1,20	0,264	39,20	1,84	1,08	2,11	4,15	4,43
-0.4+0.2	0,3	1,42	0,404	36,50	2,98	0,79	2,09	4,10	3,94
-0.2+0.071	0,1355	1,50	0,349	38,91	2,57	0,70	2,37	3,65	4,01
0.071+0.044	0,0575	1,40	0,192	43,90	1,40	0,57	2,68	3,44	3,75
-0.044+0	0,022	1,38	0,092	49,66	0,63	0,43	1,96	3,51	3,41

A continuación se muestran las expresiones matemáticas que describen la función de distribución de contenido utilizando como propiedad, el tamaño de la partícula (tabla 20). El análisis de la distribución de los componentes en el material inicial se muestra en la tabla 21.

$$\beta^{Ni}(l) = \int_{l_{min}}^{l_{max}} (-0,0342l^2 + 0,177l + 1,229) dl \leq 1,0\text{mm} \quad (20)$$

$$R^2=0,92$$

$$\beta^{Fe}(l) = \int_{l_{min}}^{l_{max}} (-3,6227l + 50) dl \quad (21)$$

$$R^2=0,91$$

$$\beta(l)^{Mg} = \int_{l_{min}}^{l_{max}} [(0,8 \div 2)e^{0,1116l}] dl \quad (22)$$

$$R^2=0,92$$

$$\beta(l)^{Cr} = \int_{l_{min}}^{l_{max}} (0,1616l^{-1,296}) dl \quad (23)$$

$$R^2=0,90$$

$$\beta(l)^{Al} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} (3,275e^{0,1752l}) dl \quad (24)$$

$$R^2=0,95$$

$$\beta(l)^{SiO_2} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} (4,54e^{0,2687l}) dl \quad (25)$$

$$R^2=0,85$$

Tabla 21. Distribución de los componentes en el material inicial de Punta Gorda.

Clases de Tamaño (mm)	Tamaño promedio de la partícula (mm)	Función de distribución, %/mm							
		Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Cr	Al	SiO ₂
-10+8	9,0	0,002	0,0004	0,021	0,003	0,006	0,000	0,013	0,020
-8+4	6,0	0,010	0,0014	0,138	0,014	0,035	0,001	0,062	0,140
-4+2	3,0	0,006	0,0012	0,080	0,010	0,021	0,001	0,035	0,070
-2+1	1,5	0,025	0,0051	0,788	0,039	0,042	0,030	0,121	0,153
-1.+0.4	0,7	0,066	0,0146	2,168	0,102	0,060	0,116	0,229	0,245
-0.4+0.2	0,3	0,061	0,0173	1,562	0,128	0,034	0,089	0,175	0,169
-0.2+0.071	0,1355	0,151	0,0354	3,938	0,260	0,071	0,240	0,369	0,405
0.071+0.044	0,0575	0,111	0,0152	3,468	0,111	0,045	0,212	0,271	0,297
-0.044+0	0,022	0,952	0,0631	34,163	0,433	0,296	1,348	2,417	2,346

En el anexo 12a, pueden observarse los gráficos que describen la función de distribución de contenido utilizando como propiedad de análisis, el tamaño de la partícula, para los diferentes componentes estudiados experimentalmente, y por el modelo respectivamente en las que se evidencia la gran similitud; en la tabla del mismo anexo aparecen reflejados los valores $\beta(l)$ experimentales y del modelo para las diferentes clases granulométricas. Estos resultados se pueden corroborar además a través del coeficiente de correlaciones calculadas, con respecto al análisis de varianza, y en todos los casos, el Fisher calculado es menor que el Fisher crítico con probabilidad mayor que 0,05, lo que demuestra la reproducibilidad de los ecuaciones obtenidas.

3.4- Distribución másica según el análisis magnético.

En el anexo 8, aparecen los valores numéricos de las funciones de distribución másica utilizando como variable la intensidad de corriente aplicado al analizador magnético. Las funciones aumentan desde 1 A hasta 2 A, donde alcanzan puntos máximos, y después desminuyen. Para las fracciones mayores de 1,0mm, la función de distribución aumenta desde 0,5 y después desminuyen

A continuación se exponen las funciones de distribución másica de la mena tomando como propiedad, susceptibilidad magnética, cuyos valores experimentales se hallan en el anexo 8.

$$\gamma^{-0.044mm}(I) = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} (0,0003I^4 - 0,004I^3 + 0,0216I^2 - 0,0375I + 0,0198)dI \quad (26)$$

$$R^2=0,99$$

$$\gamma^{+0.044mm}(I) = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} (0,0093I^4 - 0,1109I^3 + 0,4458I^2 - 0,6792I + 0,335)dI \quad (27)$$

$$R^2=0,99$$

$$\gamma^{+0.071mm}(I) = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} (0,0151I^4 - 0,1845I^3 + 0,7641I^2 - 1,2239I + 0,6291)dI \quad (28)$$

$$R^2=0,99$$

$$\gamma^{+0.2mm}(I) = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} (0,0091I^4 - 0,1096I^3 + 0,445I^2 - 0,6898I + 0,3453)dI \quad (29)$$

$$R^2=0,99$$

$$\gamma^{+0.4mm}(I) = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} (0,0105I^4 - 0,1289I^3 + 0,5368I^2 - 0,8663I + 0,4478)dI \quad (30)$$

$$R^2=0,99$$

$$\gamma^{+1.0mm}(\bar{I}) = \int_{\text{Imín}}^{\text{Imáx}} (-0,0059I^4 + 0,0794I^3 - 0,3514I^2 + 0,4828I + 0,1778) dI \quad (31)$$

$$R^2=0,99$$

$$\gamma^{+2.0mm}(\bar{I}) = \int_{\text{Imín}}^{\text{Imáx}} (-0,0104I^4 + 0,1321I^3 - 0,5583I^2 + 0,8135I - 0,0675) dI \quad (32)$$

$$R^2=0,99$$

$$\gamma^{+4.0mm}(\bar{I}) = \int_{\text{mín}}^{\text{Imáx}} (-0,0043I^4 + 0,0584I^3 - 0,2623I^2 + 0,3994I + 0,0048) dI \quad (33)$$

$$R^2=0,99$$

$$\gamma^{+8.0mm}(\bar{I}) = \int_{\text{mín}}^{\text{máx}} (-0,0039I^4 + 0,0531I^3 - 0,2376I^2 + 0,354I + 0,0305) dI \quad (34)$$

$$R^2=0,99$$

3.4.1- Distribución másica según el tamaño de la partícula y análisis magnético.

Para la determinación de la función $\gamma(l, I)$, tabla 22, era necesario encontrar primeramente la fracción en peso de las partículas dentro de los diapasones correspondientes Δl y ΔI dividirla por la amplitud del diapason Δl y ΔI como señala la siguiente expresión:

$$\gamma(l, I) = \frac{\gamma(l)(I)}{\Delta l * \Delta I} \quad (35)$$

Tabla 22. Resultados experimentales de la función de distribución másica $\gamma(I, I)$ de Punta Gorda.

Clases de tamaño (mm)	Valores de la función de distribución, mm. A				
	(I), A				
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,00010	0,00008	0,00003	0,00002	0,00001
-8.0+4	0,00031	0,00024	0,00011	0,00005	0,00004
-4.0+2.0	0,00055	0,00039	0,00012	0,00006	0,00006
-2.0+1.0	0,00871	0,00634	0,00294	0,00125	0,00082
-1.0+0.2	0,00000	0,00000	0,00494	0,00175	0,00065
-0.4+0.2	0,00000	0,00312	0,01280	0,00546	0,00436
-0.2+0.071	0,00000	0,00324	0,06233	0,02128	0,00921
-0.071+0.044	0,00000	0,06119	0,19225	0,07119	0,02625
-0.044+0.00	0,00000	0,00000	0,15304	0,21659	0,16271

Como se puede apreciar esta distribución es similar a la función de distribuciones por separado, existe aumento de la función en el sentido de la disminución del tamaño de la partícula, por otra parte aumenta en el sentido de la disminución de la intensidad de corriente en el analizador.

Con los resultados de la función de distribución másica y la función experimental del contenido, se calcula el contenido de los componentes en el material inicial de la tabla 23.

Tabla 23. Función de la salida de las fracciones en el material inicial $\gamma(I, I)$ de Punta Gorda.

Tamaño Mm	Valores de la función de distribución, mm.A				
	(I), A				
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,000098	0,000075	0,000067	0,000059	0,000049
-8.0+4	0,000617	0,000479	0,000420	0,000372	0,000323
-4.0+2.0	0,000557	0,000389	0,000250	0,000257	0,000222
-2.0+1.0	0,004354	0,003170	0,002935	0,002505	0,001639
-1.0+0.2	0,000000	0,000000	0,002961	0,002095	0,000783
-0.4+0.2	0,000000	0,000312	0,002562	0,002185	0,001747
-0.2+0.071	0,000000	0,000000	0,008037	0,005489	0,002375
-0.071+0.044	0,000000	0,000826	0,005188	0,003842	0,001417
-0.044+0.00	0,000000	0,000000	0,006733	0,019059	0,014318

Las ecuaciones de las funciones de distribución másica tomando como propiedad el tamaño y la susceptibilidad magnética se relacionan a continuación:

$$\gamma^{-0.044}(I, I) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{l \min}^{l \max} \left[(15,035e^{-1.3063l}) (0,0003I^4 - 0,0003I^3 + 0,0216I^2 - 0,0375I + 0,0198) \right] dldI \quad (36)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+0.044}(I, I) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{l \min}^{l \max} \left[(15,035e^{-1.3063l}) (0,0093I^4 - 0,1109I^3 + 0,4458I^2 - 0,6792I + 0,335) \right] dldI \quad (37)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+0.071}(I, I) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{l \min}^{l \max} \left[(15,035e^{-1.3063l}) (0,0151I^4 - 0,1845I^3 + 0,7641I^2 - 1,2239I + 0,6291) \right] dldI \quad (38)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+0.2}(I, I) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{l \min}^{l \max} \left[(15,035e^{-1.3063l}) (0,0091I^4 - 0,1096I^3 + 0,445I^2 - 0,6898I + 0,3453) \right] dldI \quad (39)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+0.4}(I, I) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{l \min}^{l \max} \left[(15,035e^{-1.3063l}) (0,0105I^4 - 0,1289I^3 + 0,5368I^2 - 0,8663I + 0,4478) \right] dldI \quad (40)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+1.0}(I, I) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{l \min}^{l \max} \left[(15,035e^{-1.3063l}) (-0,0059I^4 + 0,0794I^3 - 0,3514I^2 + 0,4828I + 0,1778) \right] dldI \quad (41)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+2.0}(I, I) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{l \min}^{l \max} \left[(15,035e^{-1.3063l}) (-0,0104I^4 + 0,1321I^3 - 0,5583I^2 + 0,8135I - 0,0675) \right] dldI \quad (42)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{8.0}(l, I) \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \left[(15,035e^{-1,3063l}) (-0.0039I^4 + 0.053I^3 - 0.2376I^2 + 03541I + 0.0305) \right] dIdl \quad (43)$$

$$R^2_L = 0,99 ; R^2_I = 0,98$$

3.4.2.- Análisis de la distribución del contenido según el tamaño y análisis magnético.

Los resultados de la función experimental de contenido según el tamaño y la intensidad de la corriente $\beta(l, I)$, y salida de las fracciones en el inicial de esta combinación se hallan en los anexos 9 y 10 respectivamente. La función de contenido, $\beta(l, I)$ para el níquel sigue una tendencia homogénea para todas las intensidades de corriente y el tamaño de las partículas. Nótese que el níquel alcanza valores de hasta 2,0 % en varios productos magnéticos de las fracciones granulométricas. El incremento de las intensidades de corriente no produce el empobrecimiento del níquel.

El cobalto al igual que el níquel y el manganeso se distribuye en todo el espectro de intensidades de corriente mostrando valores más altos en los productos fuertemente magnéticos. El comportamiento de la función $\beta(l, I)$ para el hierro en el anexo 9 muestra una tendencia de crecimiento hacia las fracciones fuertemente magnéticas y las fracciones finas alcanzando valores de hasta 57,20 % de intensidad 2,0 A para la fracción -0.044 mm.

La función de distribución $\beta(l, I)$ para el dióxido de silicio presenta una tendencia de enriquecimiento hacia el aumento de la intensidad de corriente en el analizador y con el incremento de tamaño. Sus valores relativamente bajos se encuentran para todas las clases de tamaño en la fracción fuertemente magnética.

El aluminio se distribuye de forma homogénea en todo el espectro de intensidad de corriente, y para las partículas gruesas. Sin embargo, sus valores mínimos se hallan en todas las clases de tamaño para las intensidades bajas.

La función del cromo muestra una concentración en las fracciones granulométricas intermedias con distribución homogénea en los productos magnéticos.

A partir de las ecuaciones 44 hasta 50 se muestran las expresiones matemáticas correlacionales que describen las funciones de contenido $\beta(l, I)$ basándose en las propiedades como el tamaño y la susceptibilidad magnética cuyos valores numéricos se hallan en la tabla 20 y el anexo 9 respectivamente.

$$\beta(l, I)^{Ni} = \int_{l_{min}^{Im in}}^{l_{max}^{Im ax}} \int [(-0,0342l^2 + 0,177l + 1,229)(0,2797l + 0,9288)] dl dI ; l, I \leq 1 \quad (44)$$

$$R^2_L = 0,92; R^2_I = 0,94$$

$$\beta^{Co}(l, I) = \int_{l_{min}^{Im in}}^{l_{max}^{Im ax}} \int (0,6351e^{-0,2654}) dl dI \quad (45)$$

$$R^2 = 0,89$$

$$\beta^{Fe}(l, I) = \int_{l_{min}^{Im in}}^{l_{max}^{Im ax}} \int [(-3,6227l + 50)(30 - 50)e^{-0,1099l}] dl dI \quad (46)$$

$$R^2_L = 0,91; R^2_I = 0,80$$

$$\beta(l, I)^{Mg} = \int_{l_{min}^{Im in}}^{l_{max}^{Im ax}} \int [(0,8 - 2)e^{0,3716l}](2 - 5,41)e^{0,0712l}] dl dI \quad (47)$$

$$R^2_L = 0,92; R^2_I = 0,89$$

$$\beta(l, I)^{Cr} = \int_{l_{min}^{Im in}}^{l_{max}^{Im ax}} \int [(0,1616l^{-1,296})(6,38 - 9,25)e^{-0,712l}] dl dI \quad (48)$$

$$R^2_L = 0,90; R^2_I = 0,80$$

$$\beta(l, I)^{Al} = \int_{l_{min}^{Im in}}^{l_{max}^{Im ax}} \int [(3,275e^{0,1752l})(1,2 - 6,42)e^{0,1079l}] dl dI \quad (49)$$

$$R^2_L = 0,95; R^2_I = 0,98$$

$$\beta(l, I)^{SiO_2} = \int_{l_{min}^{Im in}}^{l_{max}^{Im ax}} \int [(4,5e^{0,2687l})(1,2 - 15)e^{0,1248l}] dl dI \quad (50)$$

$$R^2_L = 0,85; \quad R^2_I = 0,86$$

En el anexo 12b, aparecen reflejados los valores de las funciones de distribución de contenido $\beta(l, I)$, experimentales y del teóricos para distintas clases granulométricas y diferentes clases de intensidad de corriente confirmando lo antes expuesto, este resultado se puede corroborar además a través del análisis estadísticos, lo cual se aprecia de forma general que tienen coeficientes de correlaciones superiores a 0,80 en todos los casos, además el valor Fisher calculado es menor que el Fisher crítico lo que demuestra la reproducibilidad de los modelos obtenidos.

3.5.- Distribución másica de los productos no magnéticos.

La distribución de los productos no magnéticos aumenta a partir de 2,0 mm hasta 0,044 mm (tabla 25 y figura 11). La distribución de los productos no magnéticos igual que el análisis granulométrico tiene un comportamiento exponencial, esta similitud en sus propiedades justifica que la característica de la laterita de balance está gobernada por las propiedades de los productos débilmente magnéticos, que constituyen los productos mayoritarios en la gran mayoría de las fracciones granulométricas. En la ecuación 51 se muestra el modelo de la función (cuyos valores numéricos están en la tabla 24) que describe el comportamiento del mismo.

$$\gamma(l_{nm}) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} 18,237e^{-0.6923l} dl \quad (51)$$

$$R^2 = 0.90$$

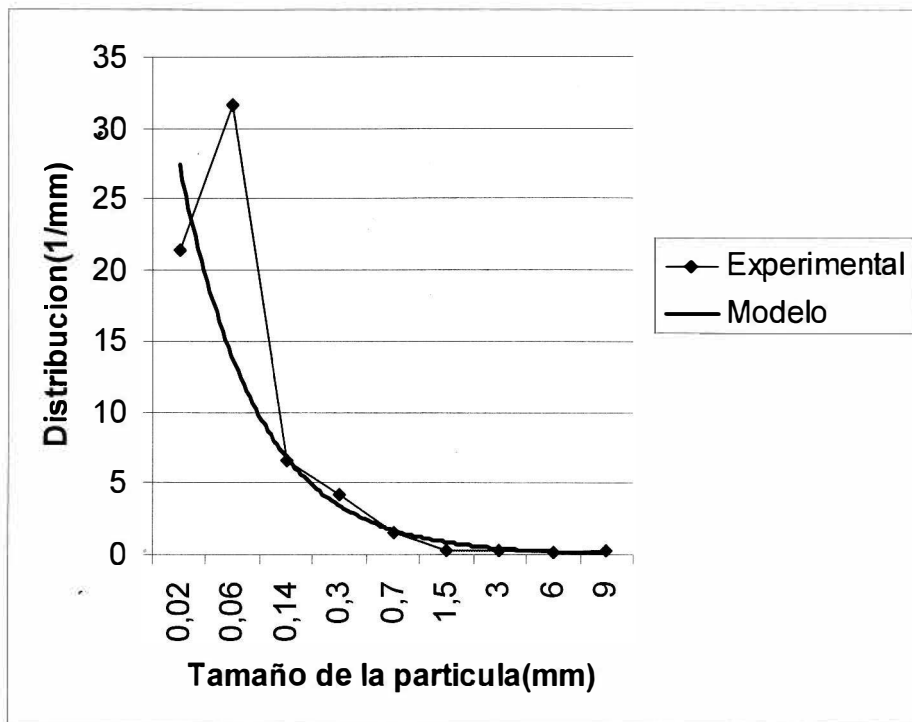


Figura.11 Comportamiento de los productos no magnéticos de análisis magnético de Punta Gorda.

Tabla 24. Función de distribución másica de los productos **no magnéticos** de las clases granulométricas de Punta Gorda.

Clases de tamaño (mm)	Tamaño promedio de la partícula (mm)	Magnitud de intervalo de clase Δl	Función distribución, $\gamma(l)$, 1/mm	$\gamma(l) \cdot \Delta l$
-10+8	9	2	0,3247	0,6493
-8+4	6	4	0,1594	0,6377
-4+2	3	2	0,2639	0,5277
-2+1	1,5	1	0,3450	0,3450
-1.+0.4	0,7	0,6	1,4888	0,8933
-0.4+0.2	0,3	0,2	4,2000	0,8400
-0.2+0.071	0,1355	0,129	6,5147	0,8404
0.071+0.044	0,0575	0,027	31,6593	0,8548
-0.044+0	0,022	0,044	21,3795	0,9407

Tabla 25. Función $\beta(l_{mm})$ de los productos **no magnéticos** de Punta Gorda.

Clases de tamaño (mm)	Tamaño promedio de la partícula (mm)	Composición química, %							
		Ni	Co	Fe	Mg	Al	SiO ₂	Cr	Mn
-10+8	9	1,84	0,300	19,97	5,82	14,60	23,61	0,04	3,00
-8+4	6	1,78	0,312	20,81	5,63	10,09	25,69	0,02	2,77
-4+2	3	1,41	0,159	20,63	3,84	12,11	24,47	0,01	2,07
-2+1	1,5	1,44	0,275	23,05	2,37	9,52	13,09	0,29	3,33
-1.+0.4	0,7	1,56	0,335	22,60	2,59	8,96	14,23	0,28	2,27
-0.4+0.2	0,3	1,77	0,491	30,98	1,04	5,29	5,54	1,65	4,38
-0.2+0.071	0,1355	1,71	0,362	37,58	0,69	3,91	5,01	1,83	2,66
0.071+0.044	0,0575	1,40	0,138	44,58	0,57	3,89	3,95	2,22	1,02
-0.044+0	0,022	1,45	0,083	49,80	0,44	3,86	3,62	1,68	0,59

Existe un empobrecimiento relativo de cromo, en el producto no magnético con respecto a los productos de análisis granulométrico de la muestra inicial. Existe una disminución de hierro en las fracciones a partir de 2,0 mm hacia las finas. Sin embargo, los elementos principales, Si, Mg, Al se enriquecieron significativamente en este producto no magnético.

3.6-Distribución másica por la densidad del medio de análisis.

Se observa que las mayores por ciento en peso se hallan en los productos ligeros. Los resultados de la función de distribución másica de la separación muestran que los productos de separación mayoritariamente se hallan en el producto ligero. Los productos pesados disminuyen a medida que se someten a los análisis siguientes ya que el material cada vez se hace homogéneo. Los valores de distribución másica aumentan hacia los granos gruesos en los productos ligeros fundamentalmente. El análisis de la distribución de las fracciones menores que 0,4 mm complejo, ya que no se manifiestan tendencias regulares (tabla 26).

Para el análisis de los productos ligeros obtenidos de la primera separación, con densidad de 2,92 hasta 2,50 g/cm³, prácticamente no ocurrió separación, todo lo que se experimenta es equisedimentación excepto las fracciones más finas, (-0,4 +0,2) mm y (-0,2+0,071) mm donde se separaron más partículas. Las partículas minerales flotan o se hunden según la densidad del medio separador. La función de distribución en una misma clase muestra aumento hacia las densidades mayores, mostrando baja separación entre las partículas de la masa mineral. Se puede generalizar que al someter a la masa mineral friable clasificada (de una misma clase granulométrica) a una operación de análisis en medios densos, las partículas emergidas adquieren propiedades densométricas similares, o sea tamaños y pesos casi equiparados, convirtiéndose en un producto homogéneo, y los análisis subsiguientes no producen segregación significativa aunque se varíe la densidad del medio.

Los modelos de la función de distribución másica tomando como propiedad la densidad del medio separador $\gamma(\rho)$ cuyos valores se muestran en la tabla 26 son las ecuaciones 52 a 55.

Tabla 26. Función de distribución másica del análisis densométrico de Punta Gorda.

Tamaño (mm)	Densidad (g/cm ³)	Salida (%)		Magnitud de intervalo (g/cm ³)	Distribución 1/(g/cm ³)	1/(g/cm ³)* g/cm ³
		emergido	Sumergido			
2	2,935		16,8			
	2,92		3,72	0,015	2,4800	0,0372
	2,9		0	0,02	0,0000	0,0000
	2,7		0	0,2	0,0000	0,0000
	2,5		0	0,2	0,0000	0,0000
	-2,5	79,58		2,5	0,3183	0,7958
1	2,935		12,62			
	2,92		7,36	0,015	4,9067	0,0736
	2,9		3,58	0,02	1,7900	0,0358
	2,7		2,9	0,2	0,1450	0,0290
	2,5		0	0,2	0,0000	0,0000
	-2,5	73,54		2,5	0,2942	0,7354
0.4	2,935		44,26			
	2,92		22,02	0,015	14,6800	0,2202
	2,9		2,396	0,02	1,1980	0,0240
	2,7		1,1	0,2	0,0550	0,0110
	2,5		0,5248	0,2	0,0262	0,0052
	-2,5	29,70		2,5	0,1188	0,2970
0.2	2,935		56			
	2,92		18	0,015	12,0000	0,1800
	2,9		3,98	0,02	1,9900	0,0398
	2,7		3,7	0,2	0,1850	0,0370
	2,5		3,62	0,2	0,1810	0,0362
	-2,5	14,7		2,5	0,0588	0,1470
0.071	2,935		69,78			
	2,92		8,5	0,015	5,6667	0,0850
	2,9		6,3344	0,02	3,1672	0,0633
	2,7		6,12	0,2	0,306	0,0612
	2,5		2,6	0,2	0,13	0,0260
	-2,5	6,67		2,5	0,0266	0,0667

$$\gamma^{1.0mm}(\rho) = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} (0,59\rho^2 - 2,47\rho + 2,28) d\rho \quad (52)$$

$$R^2=0,99$$

$$\gamma^{+0.4mm}(\rho) = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} (2,02\rho^2 - 9,08\rho + 8,26) d\rho \quad (53)$$

$$R^2=0,90$$

$$\gamma^{+0,2mm}(\rho) = \int_{\rho \min}^{\rho \max} (1,54\rho^2 - 6,68\rho + 5,96) d\rho \quad (54)$$

$$R^2=0,93$$

$$\gamma^{0,071}(\rho) = \int_{\rho \min}^{\rho \max} (0,53\rho^2 - 1,77\rho + 1,30) d\rho \quad (55)$$

$$R^2=0,98$$

Tabla 27. Función de distribución $\gamma(l, \rho)$ de Punta Gorda.

Densidad g/cm ³	Función de distribución. cm ³ /mm.g				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,01963	0,02539	0,19670	0,15120	0,07143
-2,92+2,90	0,00000	0,01235	0,02140	0,03343	0,05323
-2,90+2,70	0,00000	0,01001	0,00983	0,03108	0,05143
-2,70+2,50	0,00000	0,00000	0,00469	0,03041	0,02185
-2,50+0,0	0,41994	0,25371	0,26530	0,12348	0,05602

De la tabla 27 se puede decir que existe predominio de las fracciones ligeras al combinar el tamaño y la densidad. En las ecuaciones (56 a 59) se exponen las expresiones de la distribución másica tomando como propiedad el tamaño y la densidad, cuyos valores numéricos se muestran en la tabla 27.

$$\gamma^{+1.0}(l, \rho) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} [(18,42e^{-0,6923l}) (0,59\rho^2 - 2,47\rho + 2,28)] d\rho dl \quad (56)$$

$$R^2_L = 0,90; R^2_\rho = 0,99$$

$$\gamma^{+0,3}(l, \rho) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} [(18,24e^{-0,6923l}) (2,02\rho^2 - 9,08\rho + 8,24)] d\rho dl \quad (57)$$

$$0,90; R^2_\rho = 0,90$$

$$R^2_L =$$

$$\gamma^{+0.2}(l, \rho) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} \left[(18,24e^{-0.6923l}) (1,54\rho^2 - 6,67\rho + 5,96) \right] dl d\rho \quad (58)$$

$R^2_L = 0,90; R^2_\rho = 0,93$

$$\gamma^{0.071}(l, \rho) = \int_{l \min}^{l \max} \int_{\rho \min}^{\rho \max} \left[(18,24e^{-0.6923l}) (0,53\rho^2 - 1,77\rho + 1,30) \right] dl d\rho \quad (59)$$

$R^2_L = 0,90; R^2_\rho = 0,98$

3.6.1-Distribución de los componentes principales según densidad del medio de análisis.

La función de distribución $\beta(l, \rho)$ de los componentes principales (anexo 6) evidencia que el dióxido de silicio, aluminio e hierro muestran una concentración bien definida. El dióxido de silicio y el aluminio tienden a concentrarse en los productos ligeros y tamaños gruesos en los productos de separación mientras el hierro se concentra en los productos pesados; la sílice alcanzando hasta 26,45 % para la fracción (-4,0+2,0) mm mientras el aluminio oscila entre 13 y 18 % para la fracción mayores de 1,0 mm. Los elementos que poseen valores intermedios como Mg, Cr, y Mn también exhiben regularidades en su modo de concentración: El Mg se enriquece en los productos ligeros mientras el Cr lo hace en los productos pesados mayores de 2,90 g/cm³. El níquel se enriquece en las densidades intermedias entre 2,50-2,70 g/cm³ en todo el espectro granulométrico, mientras que el cobalto se enriquece en las densidades pesadas mayores de 2,70 g/cm³ en todo el espectro granulométrico.

A partir de las ecuaciones (desde 60 hasta 66), se relacionan las expresiones matemáticas que describen las funciones de distribución de contenido $\beta(l, \rho)$, cuyos valores numéricos están en la tabla 25 y el anexo 6 mientras los resultados de la distribución inicial por $\beta(l, \rho)$ de los componentes se hallan en el anexo 11.

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Ni} = \int_{l_{\min} \rho_{\min}}^{l_{\max} \rho_{\max}} \int [(-0,0434l^2 - 0,2894l + 1,90)(-0,186\rho + 1,28)] dld\rho \quad (60)$$

$R^2_L = 0,80; R^2_\rho = 0,96$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Co} = \int_{l_{\min} \rho_{\min}}^{l_{\max} \rho_{\max}} \int (0,1131\rho + 0,767) dld\rho \quad (61)$$

$R^2_\rho = 0,87$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Fe} = \int_{l_{\min} \rho_{\min}}^{l_{\max} \rho_{\max}} \int [(-3,8743l + 50)(1,8145\rho + 28)] dld\rho \quad (62)$$

$R^2_L = 0,91; R^2_\rho = 0,88$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Mg} = \int_{l_{\min} \rho_{\min}}^{l_{\max} \rho_{\max}} \int [(0,9e^{0,3573l})(-0,531\rho + 2,96)] dld\rho \quad (63)$$

$R^2_L = 0,96; R^2_\rho = 0,97$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Al} = \int_{l_{\min} \rho_{\min}}^{l_{\max} \rho_{\max}} \int [(4e^{0,184l})(-0,315\rho + 8,153)] dld\rho \quad (64)$$

$R^2_L = 0,90; R^2_\rho = 0,83$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{SiO_2} = \int_{l_{\min} \rho_{\min}}^{l_{\max} \rho_{\max}} \int [(2,2e^{0,3858l})(-0,404\rho + 4,0)] dld\rho \quad (65)$$

$R^2_L = 0,91; R^2_\rho = 0,90$

$$\beta(l_{nm}, \rho)^{Cr} = \int_{l_{\min} \rho_{\min}}^{l_{\max} \rho_{\max}} \int [(0,0078e^{-0,7014l})(0,3465\rho + 0,5)] dld\rho \quad (66)$$

$R^2_L = 0,80; R^2_\rho = 0,93$

En el anexo 12c, se relacionan los valores de la distribución de contenido $\beta(l, \rho)$ obtenidos experimentalmente y a través del modelo, la reproducibilidad del modelo se corrobora a través del análisis estadístico donde se aprecia de formas general que el coeficiente de correlación es superior a 0,80, con respecto al análisis de varianza, en todos los casos el Fisher calculado es menor que Fisher crítico con probabilidad mayor que 0,05.

3.7- La aplicabilidad de los resultados de la investigación.

Los resultados de este trabajo pueden ser aplicados en el estudio de la capacidad de enriquecimiento de la mena ferroniquelífera para la obtención de una materia prima de alta calidad para el proceso extractivo.

Las funciones que describen de las regularidades químicas, mineralógicas y másicas potencia el diseño de un esquema más racional para preparación de mineral, aumentando la eficiencia industrial.

Esta investigación aporta nuevos conocimientos sobre las propiedades físicas de Fe, Ni, Al, Cr, SiO₂, Mg, entre otros, los que pueden ser estudiados en investigaciones posteriores.

Los modelos integro-diferenciales describen la distribución de la composición substancial de las lateritas de balance de acuerdo al tamaño de las partículas minerales, su densidad, susceptibilidad magnética y sus combinaciones como propiedades de separación, aporta conocimientos, las cuales pueden ser utilizadas en cualquier análisis en que se encuentre involucrada la mena ferroniquelífera, como por ejemplo, la sedimentación de la pulpa atendiendo al índice de sedimentación de (Beyris,1997) y análisis de molienda.

La función de distribución másica describe que la laterita de balance procedente del yacimiento Punta Gorda está compuesta principalmente por partículas menores de 0,2 mm, los cuales representan el 87 % en peso de la muestra, alcanzando las partículas menores de 0,04 mm casi el 70 % del peso de la muestra; es esencialmente no magnético, donde generalmente esta fracción constituye de 60 a 90 % en peso de las clases granulométricas. Químicamente es una mena esencialmente ferrosa, donde el hierro se encuentra entre un 20 a un 48 % según las diferentes fracciones granulométricas, siendo la goethita, la fase predominante, y en un segundo orden en abundancia la gibbsita, además existen en cantidades

las fases de silicatos de Magnesio: serpentina y clorita con contenidos significativos en esta materia prima mineral.

El cobalto aumenta linealmente con el aumento de la densidad de medio separador, se obtuvo un producto pesado con densidad mayor que $2,935 \text{ g/cm}^3$, enriquecido en este metal hasta $0,8 \%$ en la fracción $(-1+0,4) \text{ mm}$ representado por asbolanas y la litioforita $(\text{Al, Li}) \text{Mn}^{+4} \text{O}_2 (\text{O H})_2$. La mena laterítica de Ni posee una densidad entre $2,52$ y $3,48 \text{ g/cm}^3$, destacándose una tendencia de aumento de sus valores hacia las fracciones más finas.

Las expresiones propuestas del análisis fraccional según el tamaño y la densidad de la mena laterítica del níquel permite concentrar notablemente el dióxido de sílice, el magnesio y aluminio en las fracciones ligeras (menores de $2,70 \text{ g/cm}^3$), para SiO_2 , entre $17-26 \%$, para Al, entre un 12 al 19% en los productos flotados de los tamaños mayores de $0,4 \text{ mm}$. En la laterita niquelífera el Cr y Co se concentran en las fracciones pesadas, mayores de $2,90 \text{ g/cm}^3$, las intermedias, $2,70$ a $2,90 \text{ g/cm}^3$, ricas en níquel y las menos densas (menores de $2,70 \text{ g/cm}^3$), tienden a empobrecerse en níquel. El análisis fraccional magnético permitió obtener fracciones entre 2 a 4 A , los cuales están enriquecidas en óxidos de Fe: maghemita, y en el producto no magnético, la goethita y la gibbsita son los predominantes.

Conclusiones Parciales

1. Se determinaron las funciones de distribuciones másica y de contenido de la laterita de balance utilizando el tamaño de la partícula, intensidad de corriente en el analizador y la densidad de los componentes de los productos no magnéticos de las clases de tamaño. Se obtuvieron las funciones $\gamma(l), \gamma(I)$ y sus combinaciones bidimensionales: $\gamma(l, I)\gamma(l, \rho)$.
2. Mineralógicamente la goethita es la fase predominante, y en un segundo orden en abundancia está la gibbsita. Existen en cantidades las fases de silicatos de Mg: serpentina y clorita con contenidos significativos en esta materia prima mineral.

3. El estudio sobre las propiedades magnéticas de la mena niquelífera, incorporando modernas técnicas analíticas y efectivos métodos, muestra que existen diferencias en las propiedades magnéticas de los minerales componentes del mismo: el análisis fraccional permitió obtener fracciones entre 2 a 4 A enriquecidas en óxidos de Fe; maghemita, magnesiocromita y en el producto no magnético, la goethita y la gibbsita son los predominantes.

CONCLUSIONES

1. Se determinaron las ecuaciones integro-diferenciales $\gamma(l)$, $\gamma(I)$, $\gamma(\rho)$ y sus combinaciones bidimensionales $\gamma(l, I)$, $\gamma(l, \rho)$ másica y contenido $\beta(l)$, $\beta(l, I)$, $\beta(l, \rho)$ para la mena niquelífera del proceso Caron, tomando como propiedades de análisis, el tamaño, densidad, y susceptibilidad magnética que describen la distribución de Ni, Fe, SiO₂, Al, Mg, y Cr.
2. Se obtuvieron las regularidades de la distribución diferencial másica y de contenido de las principales fases mineralógicas y especies metálicas presentes en la laterita de balance considerando el tamaño de las partículas minerales, su densidad, susceptibilidad magnética y sus combinaciones como propiedades de análisis
3. Se obtuvo un producto pesado con densidad mayor que 2,935 g/cm³, enriquecido en Co de 0,5 hasta 0,8 % en la fracción (-1+0,4) mm representado por asbolanas y la litioforita. (Al,Li) Mn⁺⁴O₂(OH)₂. La mena laterítica de Ni posee una densidad entre 2,52 y 3,48 g/cm³ destacándose una tendencia de aumento de sus valores hacia las fracciones más finas.
4. El análisis fraccional según el tamaño y la densidad de la mena laterítica del níquel permite concentrar notablemente el dióxido de silicio, el magnesio y aluminio en las

fracciones ligeras (menores de $2,70 \text{ g/cm}^3$); para SiO_2 , entre 17-26 %; para Al, entre un 12 al 19 % en los productos flotados de los tamaños mayores de 0,4 mm. En la laterita niquelífera el Cr y Co se concentran en las fracciones pesadas, mayores de $2,90 \text{ g/cm}^3$ las intermedias, $2,70$ a $2,90 \text{ g/cm}^3$, ricas en níquel y las menos densas (menores de $2,70 \text{ g/cm}^3$), tienden a empobrecerse en níquel. El análisis fraccional magnético permitió obtener productos entre 2 a 4 A, los cuales están enriquecidas en óxidos de Fe: maghemita, y en el producto no magnético, la goethita y la gibbsita son los predominantes.

5. La laterita de balance procedente del yacimiento Punta Gorda está compuesta principalmente por partículas menores de 0,2 mm; representan el 87 % en peso de la muestra, alcanzando los granos menores de 0,04 mm casi el 70 % del peso de la muestra. Es esencialmente no magnético, donde en general esta fracción constituye de 60 a 90 % en peso de las clases granulométricas. Químicamente es una mena esencialmente ferrosa, donde el hierro se encuentra entre un 20 a un 48 % según las diferentes fracciones granulométricas

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudio, empleando otras técnicas instrumentales de análisis magnético, densométrico, mineralógico para definir con más precisión la distribución de Ni, Co, Al, Mg, SiO_2 , Fe, Cr dentro de los portadores.
2. Realizar estudios de capacidad de enriquecimiento mas integral implementando como parámetros a medir en la mena niquelífera, las características físicas de densidad (particularmente, sobre la distribución de Co en la fracción (-1 +0,4) mm durante el análisis en medios densos), tamaño de la partícula y susceptibilidad magnética, pues influyen en el comportamiento de los componentes, y por ende para el control de la calidad de la materia prima.
3. Realizar repeticiones de la valoración realizada con otros perfiles para una valoración estadística de resultados.

Simbología utilizada en el texto de la tesis.

ρ - Densidad

l - Tamaño de partícula

χ -susceptibilidad magnética

γ - Salida en peso

β - Contenido del componente útil

l_{nm} -tamaño de producto no magnético

I - Intensidad de corriente

R_l -Coeficiente de correlación de el tamaño

R_I - Coeficiente de correlación de intensidad de corriente

R_ρ - Coeficiente de correlación de densidad

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Agatzini, S.L., Safiratos, I.G., Spathis, D., 2004a. Beneficiation of a Greek serpentinitic nickeliferous ore Part I. Mineral Processing, Hydrometallurgy. Volume 74, 3-4 , October 2004: 259-265.
2. Agatzini,S.L, Safiratos, I.Z.,2004b. Beneficiation of a Greek serpentinitic nickeliferous ore. Part II. Sulphuric acid heap and agitation leaching, Hydrometallurgy Volume 74, 3-4 , October 2004: 267-275.
3. Agyei, G., Rojas, A. L. P., Hernández, A. F., 2005. Caracterización mineralógica de la mena níquelífera en un perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, Holguín, Cuba. I Congreso de Minería (Minería '2005). II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Níquelíferas MiN2-P51. Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias '2005.Memorias en CD-ROM editado por Centro Nacional de Información Geológica y Instituto de Geología y Paleontología .ISBN 959-7171-03-7. Sociedad Cubana de Geología.
4. Almaguer A., V. Zamarsky, 1993. Estudio de la distribución del Fe, Ni y Co en los tamaños de granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralógica. Revista Minería y Geología (Cuba), No2/93 : 17-24.
5. Almaguer, A F., 1996a. Petrología y Corteza de intemperismo del yacimiento "Vega Grande", Nicaro, Cuba. Revista Minería y Geología. Vol. XIII No1:9-12.
6. Almaguer, A. F., 1996b. Composición de las pulpas limonititas de la planta "Pedro Sotto Alba".Parte II. Periodo de crisis de sedimentación. Revista Minería y Geología. Vol. XIII. No.1:27-30.
7. Almaguer, A., 1995. Cortezas de intemperismo: algunas características de sus partículas finas. Revista Minería y Geología (Cuba),No. 1/95:9-19.

8. Almaguer, F. A., 1989. Mineralogía y geoquímica de las cortezas de intemperismo lateríticas de las rocas ultramafitas de la provincia Holguín”. Tesis doctoral, Ostrava.
9. Anaconda Nickel Ltd., 1999a. Historic first nickel production at Murrin Murrin:Perth Western Australia. Anaconda Nickel Ltd. press release, Mayo 7, 1p.
10. Anaconda Nickel Ltd., 1999b, Quarterly report, March 31,1999, Perth, Western Australia:10p.
11. Anthony, M.T., Flett, D.S., 1997.Nickel Processing Technology: A review. Nickel: 1996 commodity meeting. Minerals Industry International: 26-42.
12. Ariosa, I.J., Lavaut, W.C., Siboney, P.B., Diaz, R.M.,2003. Modelo descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en la faja ofiolítica Mayari Baracoa de Cuba. Geología y Minería. Vol XIX. Nos-1-2: 19-36.
13. Ashok D., Dalvi, W., Gordon, B., Robert, C., 20004.The Past and the Future of Nickel Laterites PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors Exchange March 7-10, 2004 . Osborne Inco Limited, 2060 Flavelle Boulevard, Sheridan Park, Mississauga, Ontario, L5K 1Z9 Canada: 33p.
14. Beyris, P., 1997. Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa del mineral laterítico de la empresa Pedro Sotto Alba, Moa Nickel S.A. Tesis Doctoral del ISMM, Moa, Cuba: 118 p.
15. Brand, N.W., Butt, C.R.M., Elias, M., 1998. Nickel laterites: classification and features. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(4): 81-88.
16. Brand, N.W., Butt, C.R.M., Hellsten, K.J., 1996. Structural and lithological controls in the formation of the Cawse nickel laterite deposits, Western Australia - Implications for supergene ore formation and exploration in deeply weathered terrains. In: E.J. Grimsey and I. Neuss (Editors), Nickel '96. Conference proceedings Kalgoorlie, 27-29 November 1996, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series No. 6/96: 185-190.
17. Bruguera, N. A., Rodríguez, J. G, Coto, O. P., Capote, N. F., Bassas, P. R. N, 1999. Estudio de la lixiviación de la serpentina niquelifera con ácidos orgánicos. *Minería y Geología*, Vol. XVI, No 3: 27-31.

18. Butt, C.R.M., Zeegers, H., 1992, Regolith Exploration Geochemistry in Tropical and Subtropical Terrains. Handbook of Exploration Geochemistry, Volume 4, (G.J.S Govett, Editor).Elsevier, Amsterdam, 605pp.
19. Capote, N. F Rojas, A. L. P., Bassas, P. R. N., 1993. Determinación de la distribución de níquel en las microbases del material laterítico. Revista Minería y Geología. Vol1. No 1: 37-39.
20. Carthy, G. C., Falcon, J. H., 1985. Consideraciones preliminares sobre el beneficio de las colas de Nicaro. Minería y Geología. 2(85): 124-131.
21. Castellanos, J. S., Picayo, A. F., 2005. Nuevos avances y tendencias en el desarrollo de tecnologías para el procesamiento de minerales de Ni y Co. Primera Convención Cubana de Ciencias de Tierra, Geociencias 2005.Memorias en CD-ROM, La Habana, 5-8 de Abril.
22. CIPIMM, 2002. Reporte de Investigación. Tecnología para el procesamiento de la serpentina por el proceso ácido.
23. CIPIMM, 2003. Reporte de Investigación. Lixiviación en pilas de la Serpentina empleando aditivo.
24. Coello Velásquez, A. L., Beyris, P., Hernández, A. F., Ramírez, B., 1998. Distribución fraccional de los valores metálicos en el escombro laterítico. Revista Minería y Geología (Cuba), XV (1): 37-42.
25. Cordeiro, C., Collazo, N. G., Voskrenskaya, N., 1987b.Análisis químico de las fases de las lateritas cubanas. Minería y Geología. Vol. 5 No 3: 53-62.
26. Cordeiro, C., Cordeiro, A., Ponce, N. S., Collazo, J., 1987a. Determinación experimental de la distribución de las fases del mineral laterítico cubano. Geología y Minería. Vol. 5 No2:57-64.
27. Crew Development Corporation 2000. Mindoro nickel/ cobalt project: Vancouver, British Columbia, Crew Development cooperation: 4p.
28. Da Silva, E. F., Oliveira, S.M.B de.,Patinha, C., Fonseca, E. C.,2001.Estracion química selectiva secuencial no estudo da distribuição do cobalto, cromo, zinco e níquel em amostras da yacida de Punta Gorda, Cuba. Geochim. Brasil14 (1): 041-050.

29. Dalvi, A.D., Poetschke, G.M., 2000. Technical and economic factors related to base metal projects. Paper presented at The 39th Annual Conference of The Metallurgical Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM), Ottawa, August 20-23, 2000.
30. Dercach, V. G., 1981. Métodos Especiales de enriquecimiento de minerales, Nedra, Moscú: 419p.
31. Duran, E., Angulo, L., 1994. Análisis fraccional magnético de los escombros latríticos. Infome Tecnico, ISMM, Moa, Cuba: 12p.
32. Elias, M., 2002, Nickel laterite deposits- geological overview, resources and exploration: Giant Ore Deposits: Characteristics, genesis and exploration, eds, Dr. Cook eds J. Pongratz. CODES Special Publication 4, Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania; 205-220.
33. Engineering and Mining Journal, 1999. Deep –Sea mining by China.200 (9) ;9p.
34. Evans, A.M., 1993. Ore Geology and Industrial Minerals. Blackwell Scientific Publications: 390p.
35. Falcón, J. H., Beyris, P. E. M., Ferrer, E. A. C., Montero, M., 1997a. Sedimentación de la pulpa cruda en la empresa Moa Níquel S.A. Revista Minería y Geología. Vol. XIV (1):31-36.
36. Falcón, J. H., Hernández, A. F., Coello, A. L. V., 1997b. Preparación mecánica de los minerales lateríticos. Revista Tecnológica. Vol. 1. No 1: 9-17.
37. Falcón, J., Hernández, A., 1993. Preparación y beneficio de minerales lateríticos en el proceso ácido a presión”. Revista. Minería y Geologia. Vol. II, No.2: 51- 58.
38. Formel, F., Oro, J., 1980. Sobre los procesos de redeposición en el yacimiento Punta Gorda. Ciencias de la Tierra y del Espacio 2: 53- 66.
39. Formell, F. 1979 Clasificación morfogenética de las cortezas de intemperismo sobre las rocas ultrabásicas de Cuba. Ciencias de la Tierra y del Espacio 1: 33-49.
40. Georgiou, V.G., D. Papangelakis, 1998. Sulphuric acid pressure leaching of a limonitic laterite: chemistry and kinetics. Hydrometallurgy, Vol. 49: 123-46.

41. Gerth, J., 1990. Unit-cell dimensions of pure and trace metal-associated goethite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: pp. 363-371.
42. Golightly, J.P., 1979. Niqueliferous laterites: En Evans, D.J.I., Shoemaker, R.S., Velman, H. (Eds). *International Laterites Symposium (New Orleans USA)*. American Institute of Mining and Metallurgy and Petroleum Engineers and the Society of Mining Engineers, New York, USA:3-27. LA, Feb. 19 to 21.
43. Havanajournal, 2006. Sherrit eyes Cuban nickel expansion as prices rise. [http:// www.havanajournal.com /business_comments/A529_0_4_em.html](http://www.havanajournal.com/business_comments/A529_0_4_em.html) 24/1/2006.
44. Hernández A., J. Falcón, R. Trujillo, M. Toirac, 2000. Análisis teórico del beneficio de la laterita. *Revista Minería y Geología (Cuba)* ,XVII (3-4) : 73-78.
45. Hernández, A. F., Toirac, M., Coello, A.L., 1995. Estudio preliminar para la obtención de concentrados de cromo a partir del yacimiento de cortezas de intemperismo "Casimba" Pinares de Mayari. *Minería y Geología*, Vol. 12, No 2: 23- 26.
46. Hernandez, A., 1997. Determinación de esquemas racionales para la preparación y beneficio integral de minerales lateríticos. Tesis doctoral, ISMM, Moa, Cuba:94p.
47. Hristos, K.G., 2002. Magnetic properties of chromium containing laterites. *Annual of the University Mining and Geology, "St Ivan Rilski"*. Vol 44- 45 Part II. Mining and Minerals Processing, Sofia: 55-60.
48. King, R.P., 2001. Modelling and simulation of mineral processing systems. Butterworth Heinemann, 402p
49. Kuck,P., 2000. Nickel. www.minerals.usgs.gov/minerals pubs/ commodity/ nickel. (12/05/04)
50. Kuck,P., 2003. Nickel. www.minerals.usgs.gov/minerals pubs/ commodity/ nickel. (12/05/04)
51. Kuck,P.,1999. Nickel. www.minerals.usgs.gov/minerals pubs/ commodity/ nickel. (12/05/04)

52. Kudaselek, V., Zamazry., I., Maxova,1967. La mineralogía de las cortezas de intemperismo de las rocas ultramáficas de la costa norte de la provincia de Oriente, Nicaro, Moa. Revista de Geologia: 50-76.
53. Kumar, V.Pandey, B.D, Akerkar, D.D, 1990. Electrowinning of nickel in the processing of polymetallic sea nodules. Elsevier Science publishers B. V., Amsterdam, Hydrometallurgy 24, 189-201.
54. Kyle, J.H., Furfaro,D.,1997. The Cawse nickel/cobalt laterite project metallurgical development. Proceedings of the Nickel Cobalt 97 Symposium- Volume III August 17-20.The Metallurgical Society of CIM, Sudbury, Canada: 379-389.
55. Lago, L. P., 1998. Disminución en la pulpa de los principales consumidores de ácido. Revista Tecnológica, II (1):14-16.
56. Lavaut, W., 1998. Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental. Minería y Geología 15: 9-16.
57. Leyva, E. R., Rodríguez, J. E. G., Jesús, Ortiz, J. B., 1995. Contribución al estudio estructural de los minerales componentes de las colas de Nicaro. Minería y Geología. Vol. XII No.2:9-15.
58. Manceau A, Llorca S, Calas G. 2002. Crystal chemistry of Co and Ni in lithiophorite and asbolana from New Caledonia. Geochimica and Cosmochimica Acta, London, 51 (1). Pp: 105-113.
59. Mitrofanov, L.A, Barski, V.D., Samygin, 1982 L.A. et al. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Ed. Mir, Moscú: 439p.
60. Moskalyk, R.R., Alfantazi, A.M., 2002. Nickel laterite processing and electrowinnig practise. Minerals Engineering 15(2002):593-605.
61. Muñoz, J. N. G Gómez, Orozco, G. M., , Arturo Rojas, A. L. P.,Cruz, I. O.,2005 .Mineralogía de las menas lateríticas del yacimiento Punta Gorda: implicaciones técnica – operativas durante la explotación. Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias´2005. Memorias en CD-ROM, La Habana, 5-8 de abril del 2005, MN2-6.

62. Narasimhan, K.S., Bhima, R.R., Das.B., 1989. Characterisation and concentration of laterites, Technical Notes, Minerals Engineering Volume 2, No 3 :425-429.
63. Oliveira, S. M. B., C. S., de Moya Partiti, J. Enzweiler, 2001. Ocherous laterite: a nickel ore from Punta Gorda, Cuba. Journal of South American Earth Sciences, 14: 307-317.
64. Ostroumov, M. N., J. Blanco, 1987. Caracterización mineralógica de las lateritas del sector Atlantic de la mina Moa. Revista Minería y Geología (Cuba). 5(1No.): 3-20.
65. Oustroumov, M. M., Rodríguez, R. M., Chirini, A. E., Lozano, R. P., 1986. Características de la composición química de las cromoespínelas cubanas por el método de rayos-x. Minería y Geología. 1(1986): 31-42.
66. Oustroumov, M. M., Rojas, A. L .P. Sanchez, C. D., 1985. Estudio de la composición mineralógica de las lateritas de Moa por el método de difracción de rayos-x. Minería y Geología 1 (85):23-31.
67. Pando, Y. V .C., Sosa, Y .B. H, 1995. Caracterización de las fracciones +0,83mm de los escombros lateríticos. Trabajo de Diploma. ISMM, Cuba: 27p.
68. Peña, I., Rubio, S., 1990. Beneficio de los escombros lateríticos. Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, Cuba: 35p.
69. Pérez, L. L., 1998. Disminución en la pulpa de los principales consumidores de ácido en la lixiviación. Revista Tecnológica. Vol. II No1: 14-16.
70. Pérez-Mello, N. C., 2003. Comparación de métodos de estimación y simulación para el cálculo de los recursos tomando como ejemplo el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda. Tesis en opción al Grado Académico de Master en Ciencias Técnicas., ISMM, Moa, Cuba: 80p.
71. Ponce, N., D. Carrillo, 1984. Mineralogía y composición sustancial de las menas ferro níquelífera del yacimiento Delta, Moa. Serie Geológica No.3:3-16.

72. Ponce, N., D. Carrillo, 1988. Mineralogía y composición sustancial de las muestras patrones de lateritas. Serie Geológica No.1: 75-82.
73. Proenza, J. A., Melgrejo J.C., Gervilla F., 2003. Comments on the paper "Ocherous laterite: a nickel ore from Punta Gorda, Cuba." By Oleveira et al. (Discussions). Journal of South American Sciences 16(2003):199-202.
74. Quintana, R., González R., 1984. Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa: Análisis granulométrico, Revista Minería y Geología (Cuba) No 3/84:135-146.
75. Rafael Quintana Puchol, 1985. Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa. Análisis físico mineralógico. Minería y Geología Buscar Volumen y número: 94-104.
76. Ramírez, B. S., 1994. Análisis granulométrico y composición química de los escombros lateríticos. Trabajo de Diploma, ISMM, Moa: 23p.
77. Ramírez, M., 2002. Estudio de beneficiabilidad de los escombros lateríticos de la región Moa". Tesis de Maestría. ISMM, Moa, Cuba: 54p.
78. Rodríguez C, A. Prospección y exploración de las cortezas de intemperismo sobre ultramafitas en Nicaro y Pinares de Mayarí. Tesis doctoral, CICT, ISMMM, 1990.
79. Rojas Purón, A. L., Orozco, G. M y Vera, O. S, 2005. Caracterización mineralógica y geoquímica de las fases minerales de Mn portadoras de Co en perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda. Geociencias'2005. Memorias en CD-ROM, La Habana, 5-8 de abril del 2005.
80. Rojas Purón, A. L, Carballo, A. P., 1993a. Valoración mineralógica económica del material de rechazo de la planta de preparación de pulpa del yacimiento Moa. Minería y Geología. Vol. 2 No2:69-73.
81. Rojas Purón, A. L., Fernández, M., Lapin, A., 1993b. Valoración mineralógica del material alimentado al proceso de la empresa "Ernesto Che Guevara". Minería y Geología. Vol. 2 No 2:55-59.

82. Rojas, A. L., P. Beyris, 1994. Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Soto Alba". *Revista Minería y Geología* No. 1/94: 13-17.
83. Rojas, A. L., G. Orozco, 1994. Iniciación al estudio de las fases minerales portadoras de Ni en el horizonte limonítico del yacimiento Moa, *Revista Minería y Geología (Cuba)* 1/94: 11-15.
84. Rojas, A. L. P., Beyris P.L.M., 1994. Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Soto Alba". *Revista Minería y Geología* No. 1/94. pp. 13-17.
85. Rojas, A. L., 1995. Principales fases minerales portadores de níquel en los horizontes lateríticos. Tesis doctoral, ISMM, Moa, Cuba: 75p.
86. Rojas, A. L., Turro, A. B., 2003. Composición mineralógica de las colas del proceso Caron en Moa. *Minería y Geología*, Nos. 3-4.
87. Schwertmann, U., 1984. The double dehydroxylation peak of goethite. *Termochimica Acta* 78, 39-46.
88. Smirnov, V. I., 1982. *Geología de yacimientos minerales*, Mir, Moscú, 430p.
89. Stamboliadis, E., Alevizos, G., Zafiratos, J., 2003. Leaching residue of niqueliferous laterite as a source of iron concentrate. *Minerals Engineering* xxx (2003) xxx xxx (uncorrected proof) www.elsevier.com/locate/mineng. (1 Diciembre 2003).
90. Tjonov, O.N., 1984. *Beneficio de minerales útiles en Asia, África y América Latina*, Edición Nedra, San Petersburgo, Rusia: 294p.
91. Tjonov, O.N., 1978. *Fundamentos teóricos de procesos de separación en la concentración de minerales*. Edición Nedra, San Petersburgo, Rusia.
92. Tokashiki, Y., T. Hentona, M. Shimo, L. P. Arachchi, 2003. Improvement of the successive selective dissolution procedure for the separation of birnessite,

lithiophorite, and goethite in soil manganese nodules. Soil Science Society American Journal. Division S-5- Petrology 67. 837-843.

93. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2003.
94. Vázquez, D., 1992. Obtención de concentrados de cromo a partir de las cortezas de Intemperismo de Pinares de Mayari. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Cuba: 30p.
95. Vera, A, Y., 1979. Introducción a los yacimientos de níquel cubanos. La Habana, Editorial Orbe: 213p.
96. Vera, O., 2001. Procedimiento para la determinación de las redes racionales de explotación de los yacimientos de níquel y cobalto en la región Moa. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, ISMM, Moa. Cuba: 111p.
97. Vershinin, S.A., Bravo, F., Rodríguez., 1984. Vías para la utilización óptima de las lateritas níquelíferas. Minería y Geología 1: 107-138.
98. Voskrenskaya, N. T., Cecilia Cordeiro, C., Cordeiro, A., Sauders, E., 1986. Hallazgo de Elizabetinskita en la forma ocrosa del intemperismo del yacimiento Levisa. Minería y Geología 1(86):45-54.

Anexo1. Distribución de Ni, Fe, Co del bloque M-49 pozo 45 del yacimiento Punta Gorda.

Z desde	Z hasta	Ni	Fe	Co
160,08	159,08	0,91	46,7	0,185
159,08	158,08	0,68	35	0,09
158,08	157,08	1,25	48,5	0,13
157,08	156,08	1,35	49,7	0,135
156,08	155,08	1,21	49,2	0,1
155,08	154,08	1,18	50,3	0,087
154,08	153,08	1,12	49,6	0,092
153,08	152,08	1,07	49,8	0,122
152,08	151,08	1	50,9	0,065
151,08	150,08	0,45	26,3	0,084
150,08	149,08	0,66	48,8	0,088
149,08	148,08	0,82	50,8	0,079
148,08	147,08	0,89	48,2	0,108
147,08	146,08	1,25	47,8	0,095
146,08	145,08	1,51	48	0,1
145,08	144,08	1,35	48,3	0,08
144,08	143,08	1,46	46,8	0,082
143,08	142,08	1,5	48,3	0,126
142,08	141,08	1,45	47,5	0,138
141,08	140,08	1,65	44,2	0,117
140,08	139,08	1,77	47,7	0,129
139,08	138,08	1,85	44,8	0,2
138,08	137,08	1,71	30,1	0,08
137,08	136,08	1,14	6,5	0,008

Anexo 1b Distribución de Ni, Fe, Co del bloque M-49 pozo 44 del yacimiento Punta Gorda.

Z desde	Z hasta	Ni	Fe	Co
161,53	160,53	0,78	49,1	0,025
160,53	159,53	0,84	51,3	0,019
159,53	158,53	0,61	40,2	0,041
158,53	157,53	1,22	48,4	0,065
157,53	156,53	1,02	46,2	0,084
156,53	155,53	1,01	46,7	0,06
155,53	154,53	0,71	48,8	0,062
154,53	153,53	0,73	48,5	0,072
153,53	152,53	0,81	49,4	0,046
152,53	151,53	1,46	49	0,055
151,53	150,53	1,67	51	0,074
150,53	149,53	1,39	51,5	0,081
149,53	148,53	1,4	50	0,101
148,53	147,53	1,5	48	0,216
147,53	146,53	1,42	47	0,167
146,53	145,53	1,41	49,4	0,141
145,53	144,53	1,3	36,4	0,43
144,53	143,53	1,78	47,8	0,117
143,53	142,53	1,5	40	0,165
142,53	141,53	1,66	21,8	0,06
141,53	140,53	2,05	24,3	0,057
140,53	139,53	1,73	33,4	0,101
139,53	138,53	1,98	29,6	0,063
138,53	137,53	1,81	18	0,0035
137,53	136,53	1,82	21	0,043
136,53	135,53	1,32	10,8	0,017
135,53	134,73	0,78	6,7	0,017
134,73	134,13	1,37	23,1	0,050
134,13	132,83	0,27	6,8	0,009
132,83	132,53	0,26	6,2	0,009
132,53	130,53	0,24	5,6	0,009
130,53	129,03	0,28	10	0,009
129,03	127,73	0,35	6,4	0,009
127,73	126,43	0,79	7,6	0,012

Anexo2: Mineralogía de las fracciones granulométricas de la mena niquelífera de Punta Gorda.

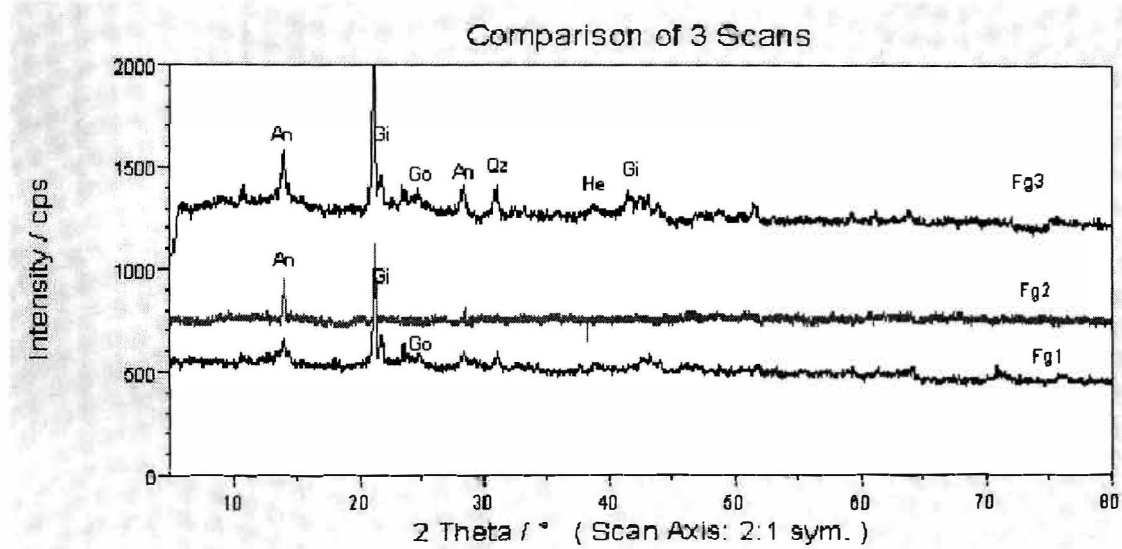


Figura 1. Contenido de los minerales en las fracciones gruesas de la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda. Gi = Gibbsita, H = Hematita, An= Antigorita, Qz =Cuarzo Fracciones: Fg1(-10+8)mm; Fg2 (-8+4)mm; Fg3 (-4+2)mm.

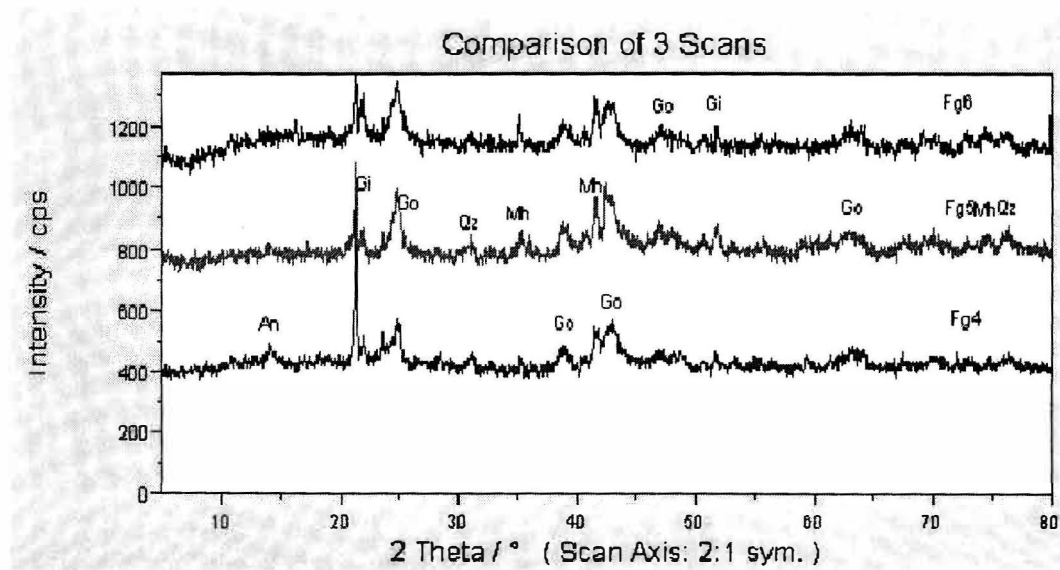


Figura 2. Contenido de los minerales en las fracciones intermedias de la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda. Gi = Gibbsita, H = Hematita, An= Antigorita, Qz =Cuarzo Fracciones: Fg4(-2+1)mm; Fg5 (-1+0,4)mm; Fg3 (-0,4+0,2)mm.

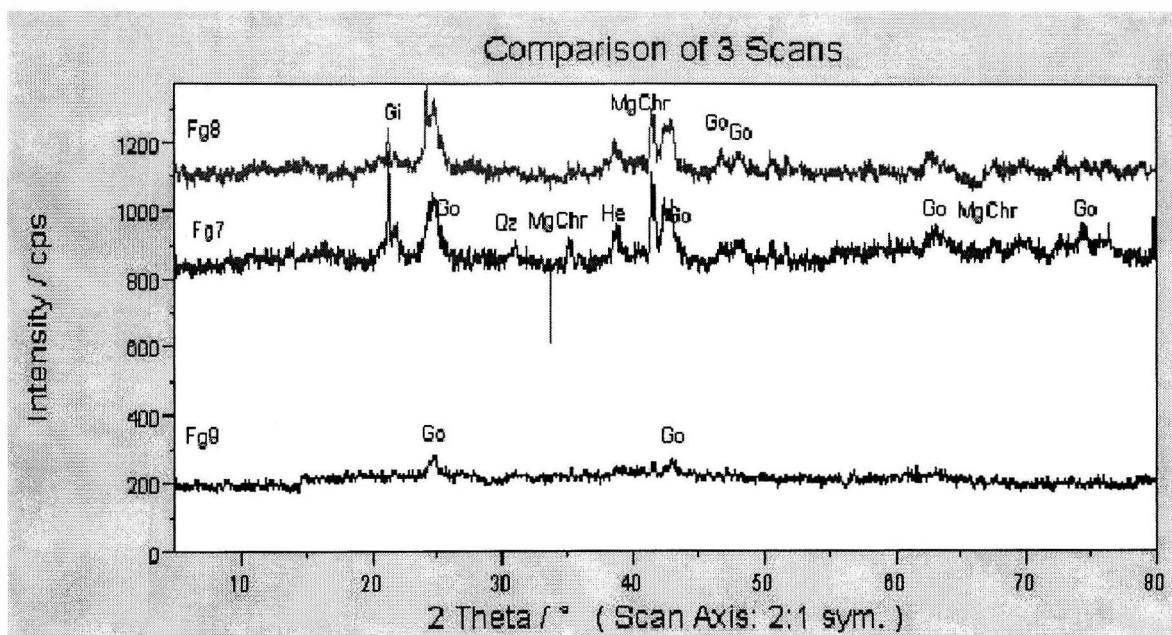


Figura 3. Contenido de los minerales en las fracciones finas de la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda. Go = goethita, Gi = gibbsita, MgChr = Magnesiochromita, He = hematita, Qz= cuarzo. Fracciones: Fg7 (-0.2+0.071) mm; Fg8(-0.071+0.44) mm; Fg9- (-0.44+0.0)mm.

Determinación mineralógica cualitativa de la clase -10+8mm de Punta Gorda.

PDF-No	Nombre Min.	Formula
33- 1837	Gibbsita, syn	$Al(OH)_3$
44-1447	Antigorita	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
43- 662	Clinocrisotilo-2M#c#1	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
3- 25112	Goethita	$FeO(OH)$
41-1378	Litioforita	$(Al, Li)MnO_2(OH)_2$
13- 534	Hematita, syn	Fe_2O_3
5-490	Cuarzo	(SiO_2)

Predomina la fase de gibbsita, con un intenso pico 4, 85 Å, y completo cuadro difractométrico, es rica en gibbsita. Además silicatos de Mg del grupo de la serpentina Clinocrisotilo-2M. Existe además fase de Mn: Litioforita de forma sobresaliente.

Mineral	Contenido en %	error en %
Clorita IIb-2	14.30	5.10
Gibbsita	46.80	6.90
Goethita	17.20	6.00
Hematita	1.26	1.86

Litioforita	5.30	1.80
Lizardita 1T	10.53	2.52
Maghemita	0.00	0.00
Magnesiocromita	0.96	0.90
Magnetita	0.00	0.00
Cuarzo3.61		1.92

Determinación mineralógica cualitativa de la clase -8+4mm de Punta Gorda.

PDF-No	Nombre Min.	Formula
33- 1837	Gibbsita, syn	Al (O H) ₃
44-1447	Antigorita	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (O H) ₄

Predomina la fase de gibbsita, con un intenso pico 4, 85 Å, y completo cuadro difractométrico. Además silicatos de Mg del grupo de la serpentina. Difractograma un poco imperfecto.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Clorita Iib-2	26.10	9.30
Gibbsita	41.20	9.90
Goethita	0.00	0.00
Hematite	3.21	2.97
Litioforita	4.30	4.20
Lizardita 1T	17.10	7.20
Maghemita	0.69	2.76
Magnesiocromita	2.70	3.60
Magnetita	2.57	2.10
Cuarzo2.10	6.00	

Determinación mineralógica cualitativa de la clase -4+2 de Punta Gorda.

PDF-No	Nombre Min.	Formula
44-1447	Antigorita	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (O H) ₄
29- 4137	Gibbsita	Al (O H) ₃
39-1346	Maghemita-C, syn	Fe ₂ O ₃
17- 536	Goethita	Fe O (O H)
41-1378	Litioforita	(Al , Li) Mn O ₂ (O H) ₂
13- 534	Hematita, syn	Fe ₂ O ₃

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Chlorite Iib-2	12.40	4.80
Gibbsita	29.10	4.50
Goethita	34.50	6.90
Hematita	3.14	1.47
Litioforita	4.36	1.77
Lizardita 1T	9.15	2.16
Maghemita	0.00	0.00
Magnesiocromita	5.73	2.01

Magnetita	0.46	0.57
Cuarzo	1.21	1.11

Determinación mineralógica cualitativa de la clase -2+1 de Punta Gorda.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Clorita IIb-2	5.44	2.91
Gibbsita	26.30	4.20
Goethita	52.00	5.10
Hematita	1.13	1.11
Litioforita	3.81	1.20
Lizardita 1T	7.41	1.71
Maghemita	0.00	0.00
Magnesiocromita	2.42	0.99
Magnetita	0.00	0.00
Cuarzo	1.52	0.81

Determinación mineralógica cualitativa de la clase -1+0.4 de Punta Gorda.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Clorita IIb-2	2.70	1.65
Gibbsita	17.50	3.30
Goethita	66.90	4.80
Hematita	2.00	2.25
Litioforita	2.74	1.47
Lizardita 1T	1.22	1.65
Maghemita	5.88	2.49
Magnesiocromita	0.81	1.53
Magnetita	0.00	0.00
Cuarzo	0.26	0.45

Determinación mineralógica cualitativa de la clase -0.4+0.2 de Punta Gorda

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Clorita IIb-2	1.87	2.01
Gibbsita	13.10	4.50
Goethita	68.70	5.40
Hematita	2.86	1.80
Litioforita	3.29	2.28
Lizardita 1T	1.01	1.02
Maghemita	5.03	2.85
Magnesiocromita	3.52	2.37
Magnetita	0.00	0.00
Cuarzo	0.56	0.51

Determinación mineralógica cualitativa de la clase -0.2+0.071 de Punta Gorda

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Clorita IIb-2	0.82	1.98
Gibbsita	9.90	4.20
Goethita	68.40	5.10
Hematita	3.68	1.68
Litioforita	5.47	1.44
Lizardita 1T	1.11	0.99
Maghemita	2.97	2.73
Magnesiocromita	6.25	2.52
Magnetita	0.00	0.00
Cuarzo	1.40	1.35

Determinación mineralógica cualitativa de la clase -0.071+0.044 de Punta Gorda

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Clorita IIb-2	7.00	4.50
Gibbsita	2.02	2.31
Goethita	78.30	5.70
Hematita	1.14	1.62
Litioforita	1.29	1.32
Lizardita 1T	3.25	1.98
Maghemita	0.00	0.00
Magnesiocromita	6.97	1.44
Magnetita	0.00	0.00
Cuarzo	0.04	0.99

Determinación mineralógica cualitativa de la clase -0.044+0.00mm de Punta Gorda

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Clorita IIb-2	0.00	0.00
Gibbsita	0.00	0.00
Goethita	85.80	7.50
Hematita	6.40	4.50
Litioforita	2.10	3.00
Lizardita 1T	0.00	0.00
Maghemita	2.90	3.30
Magnesiocromita	1.35	2.28
Magnetita	0.00	0.00
Cuarzo	1.50	3.30

Anexo 3. Termogramas del análisis térmico diferencial de las clases granulométricas de Punta Gorda.

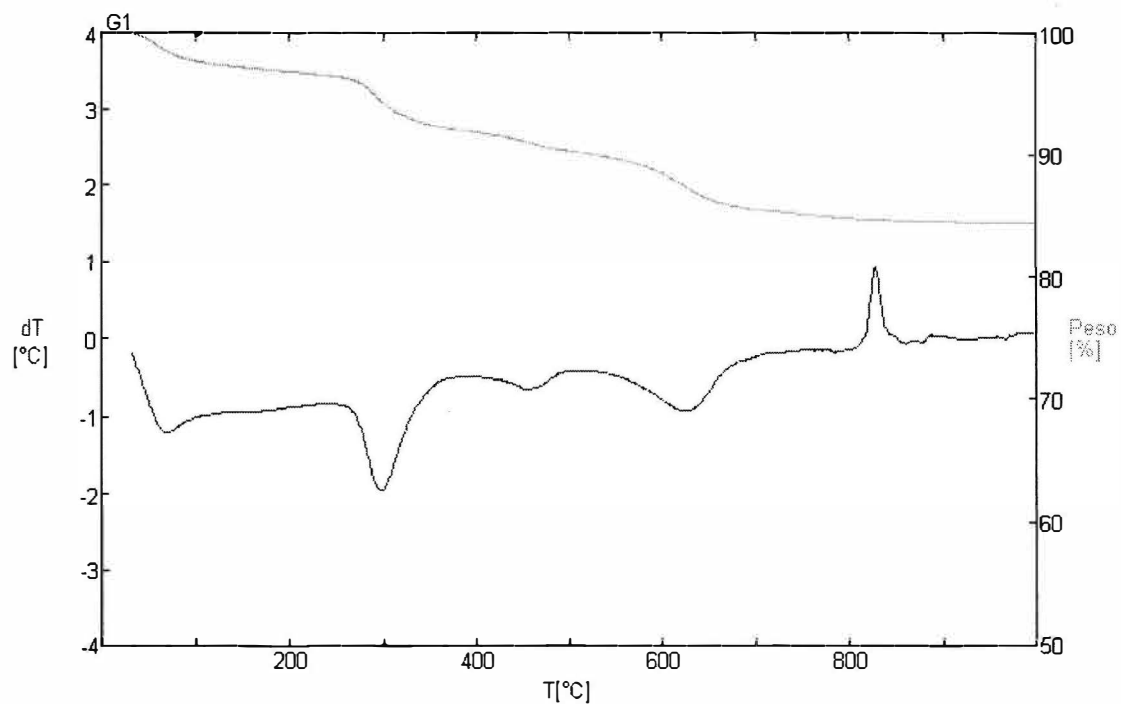


Fig.3a. Termograma de la clase 10+8.0mm de Punta Gorda.

-	Pico	Intervalo	
	T °C	T °C	T °C
Pico 1 (endotérmico) ----	71		
Pico 2 (endotérmico) ----	299	253	370
Pico 3 (endotérmico) ----	460	411	497
Pico 4 (endotérmico) ----	628	540	694
Pico 5 (exotérmico) ----	828	802	857

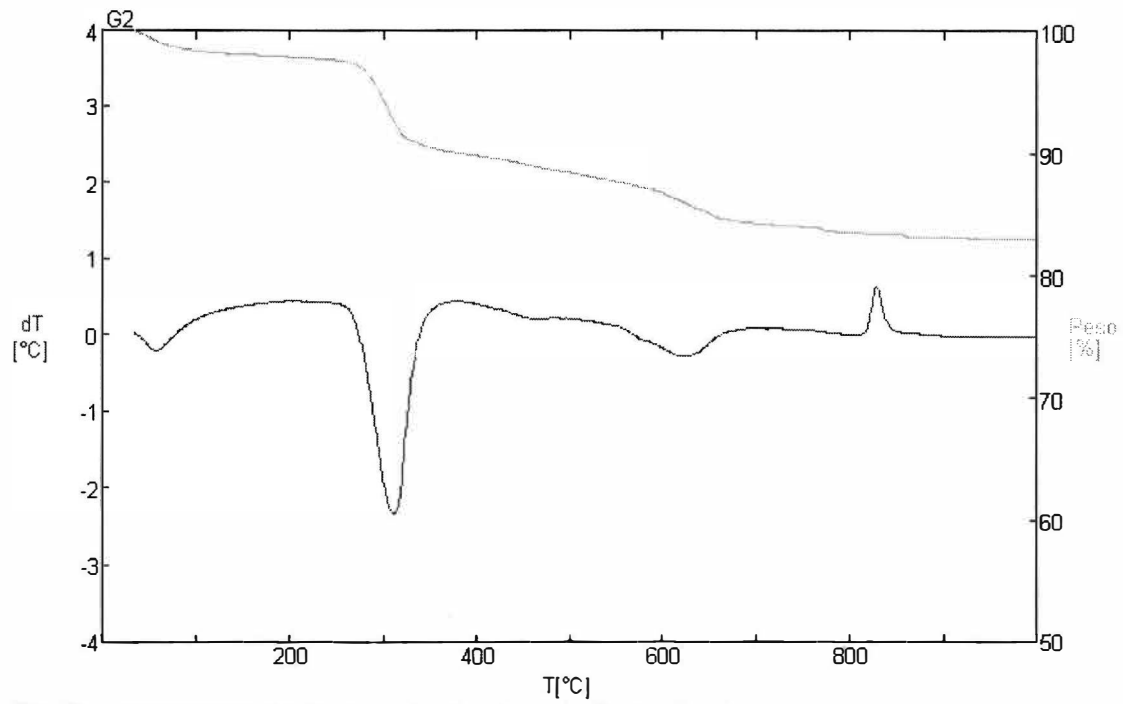


Fig.3b. Termograma de la clase -8,0+4.0mm de Punta Gorda.

	Pico		Intervalo	
	T °C	T °C	T °C	T °C
Pico 1 (endotérmico) ----	58			
Pico 2 (endotérmico) ----	312	246	370	
Pico 3 (endotérmico) ----	467	396	496	
Pico 4 (endotérmico) ----	627	552	687	
Pico 5 (exotérmico) ----	830	814	855	

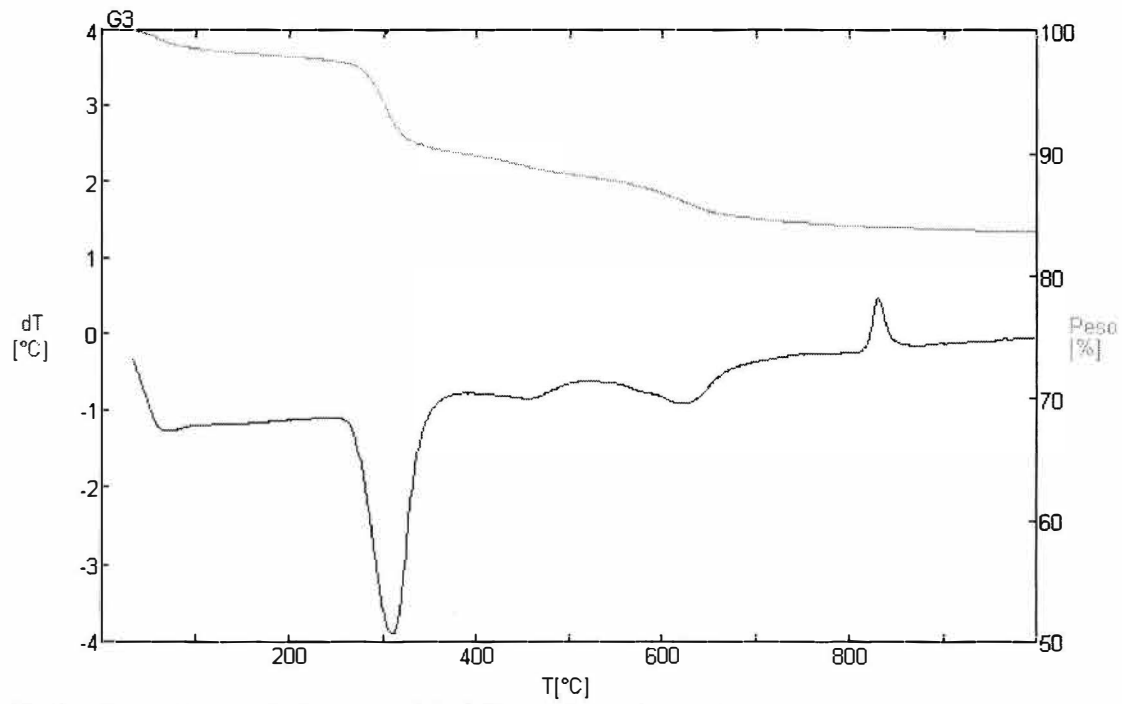


Fig.3c. Termograma de la clase -4,0+2,0mm de Punta Gorda.

	Pico	Intervalo	
	T °C	T °C	T °C
Pico 1 (endotérmico) ----	65		
Pico 2 (endotérmico) ----	310	255	377
Pico 3 (endotérmico) ----	458	405	517
Pico 4 (endotérmico) ----	628	535	699
Pico 5 (exotérmico) ----	830	812	869

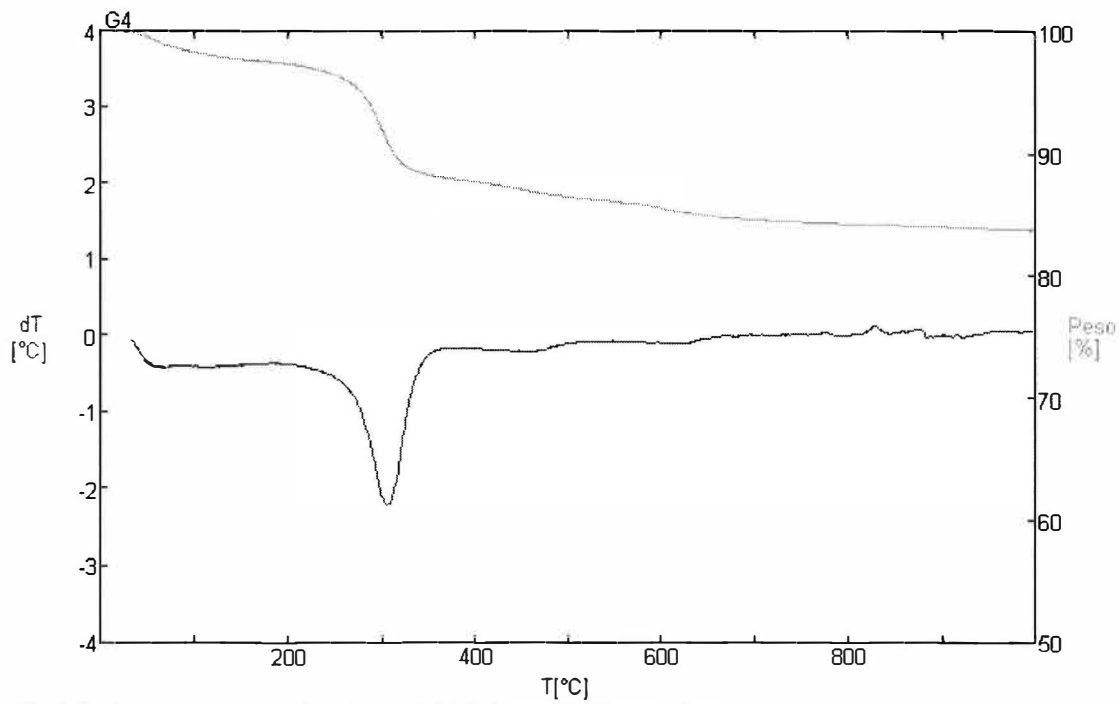


Fig.3d. Termograma de la clase -2,0+1,0mm de Punta Gorda.

	Pico		Intervalo	
	T °C	T °C	T °C	T °C
Pico 1 (endotérmico) ----	58			
Pico 2 (endotérmico) ----	306	205	365	
Pico 3 (endotérmico) ----	469		débil	
Pico 4 (endotérmico) ----	630		débil	
Pico 5 (exotérmico) ----	828		débil	

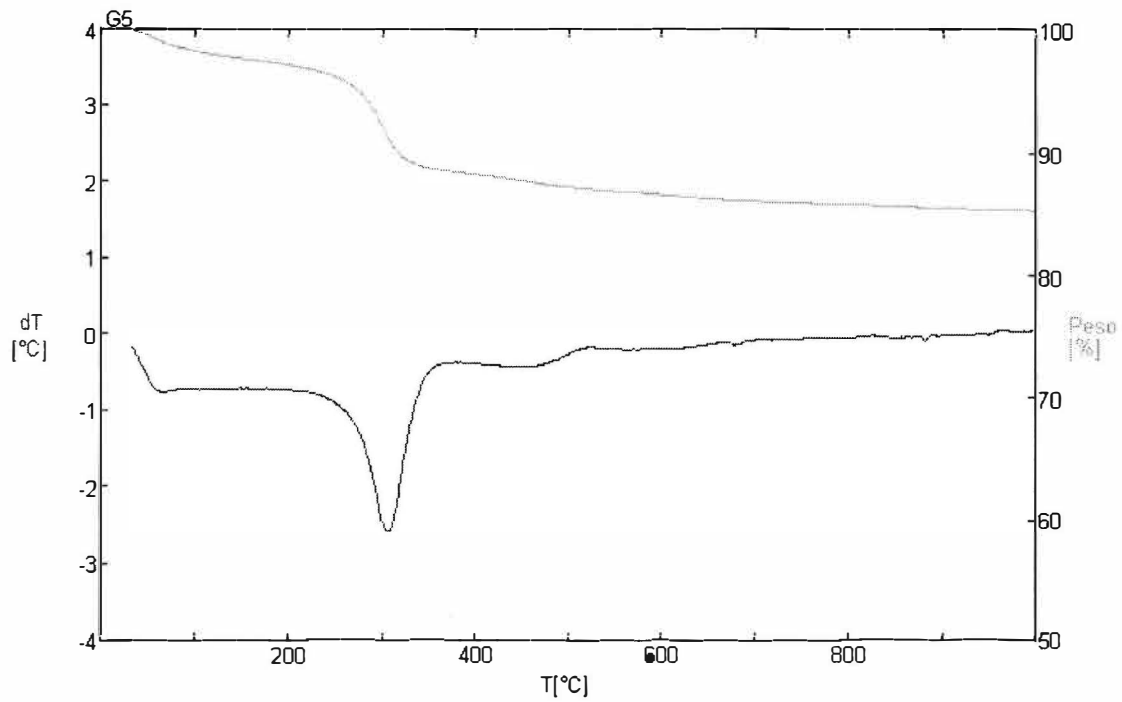


Fig.3e. Termograma de la clase -1,0+0,4 mm de Punta Gorda.

	Pico T °C	Intervalo T °C T °C
:		
Pico 1 (endotérmico) ----	62	
Pico 2 (endotérmico) ----	308	219 368
Pico 3 (endotérmico) ----	465	débil

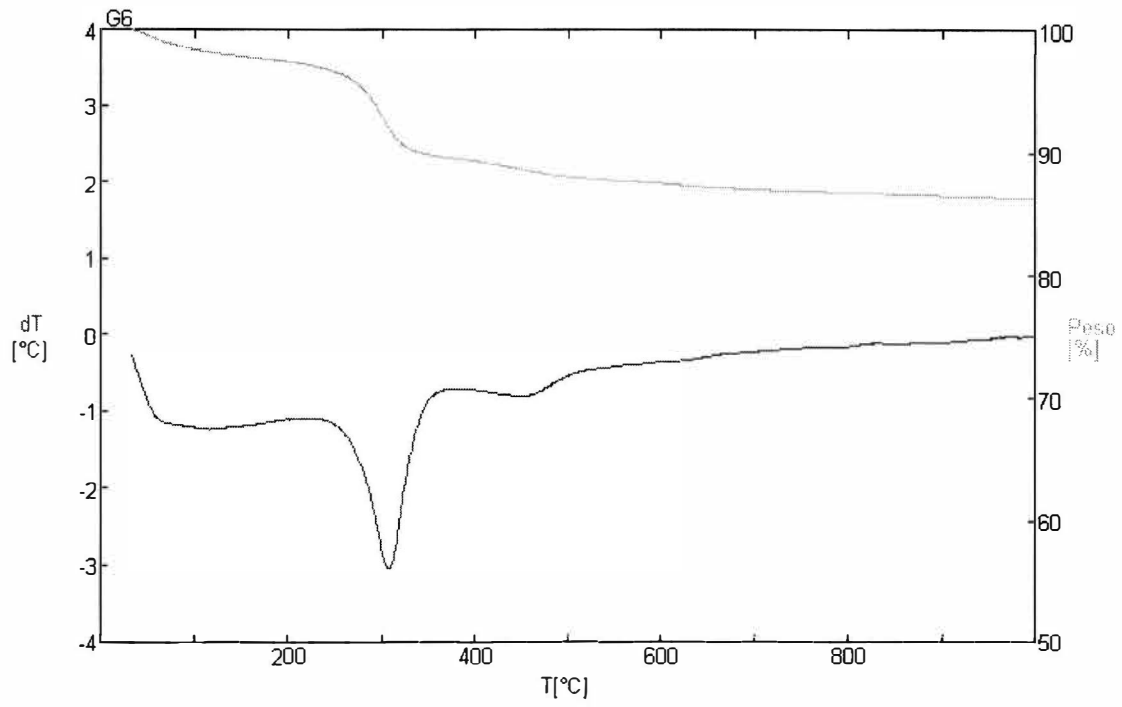


Fig.3f. Termograma de la clase **-0.4+0.2** mm de Punta Gorda.

	Pico T $^{\circ}\text{C}$	Intervalo T $^{\circ}\text{C}$ T $^{\circ}\text{C}$	
Pico 1 (endotérmico) ----	65		
Pico 2 (endotérmico) ----	308	235	370
Pico 3 (endotérmico) ----	460	402	526

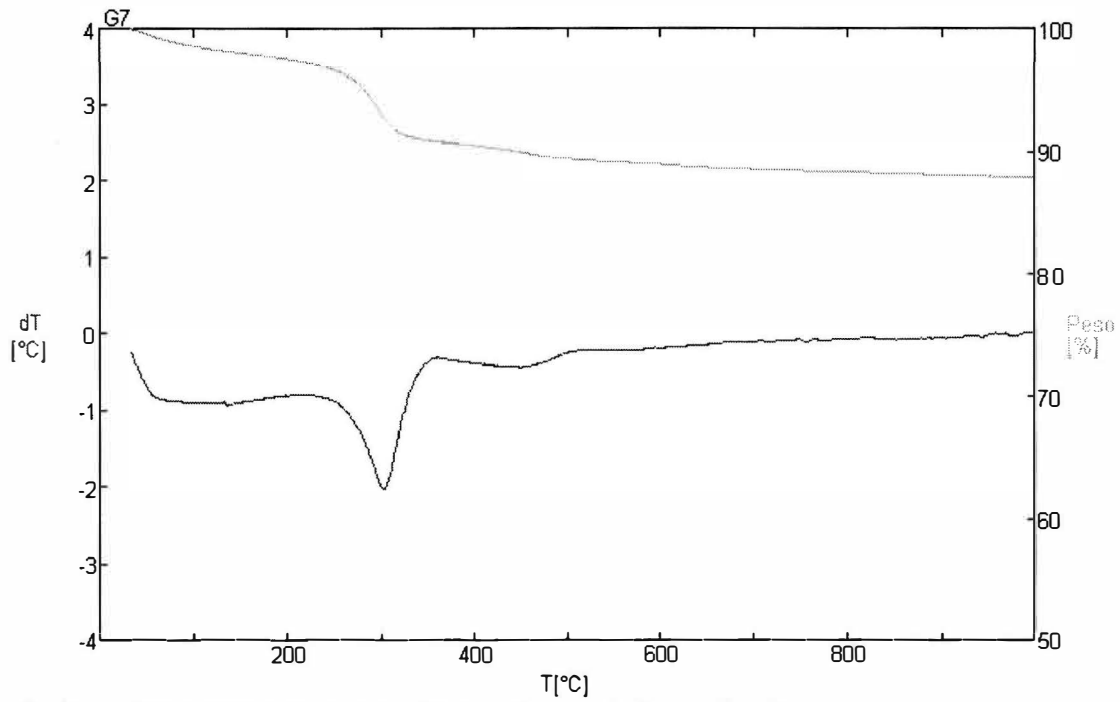


Fig.3g. . Termograma de la clase-0,2+0,071 mm de Punta Gorda.

	Pico Intervalo		
	T °C	T °C	T °C
Pico 1 (endotérmico) ----	58		
Pico 2 (endotérmico) ----	304	225	358
Pico 3 (endotérmico) ----	455	361	515

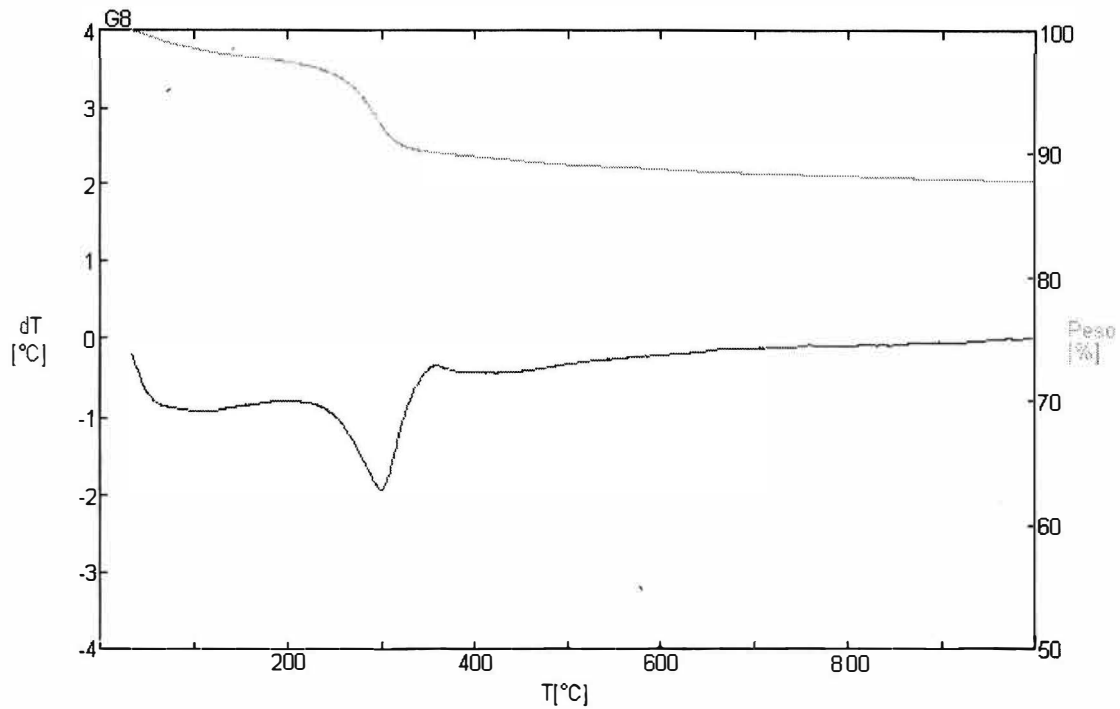


Fig.3h. Termograma de la clase -0,071+0,044 mm de Punta Gorda.

T °C	T °C	T °C	Pico	Intervalo
Pico 1 (endotérmico) ----	62			
Pico 2 (endotérmico) ----	301	221	358	

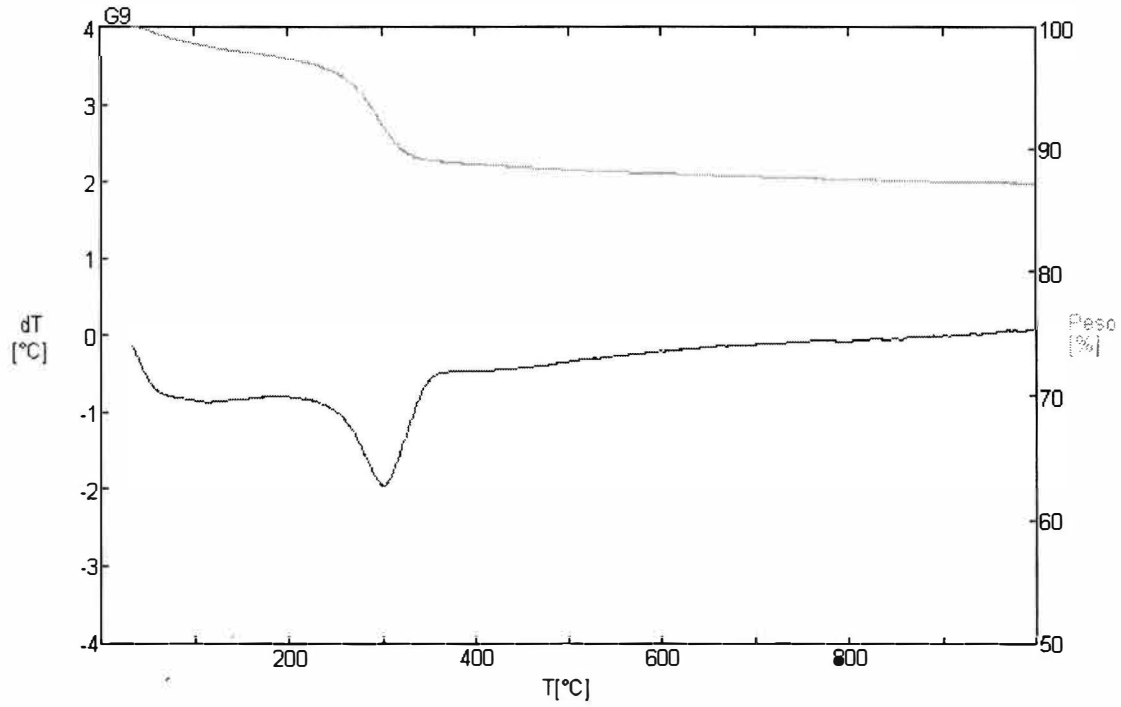


Fig.3i. Termograma de la clase -0,044mm de Punta Gorda.

Pico	Intervalo
T °C	T °C T °C
Pico 1 (endotérmico) ----	64
Pico 2 (endotérmico) ----	303 211 366

Comparación de termogramas

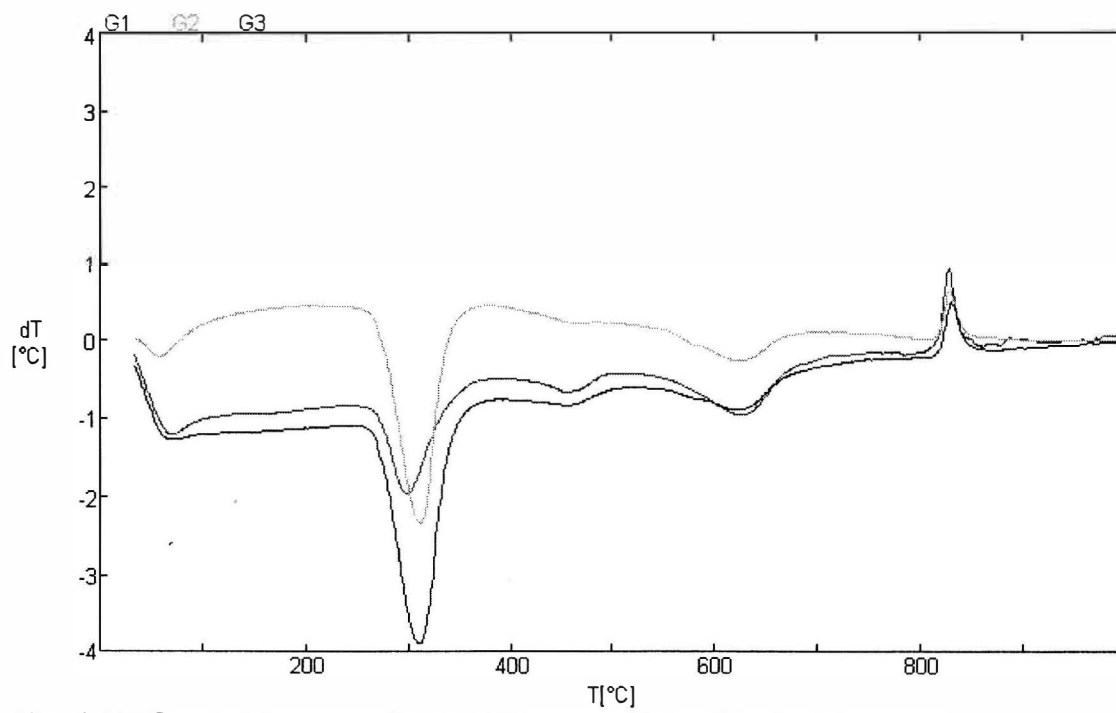


Fig. 3j. Gráficos comparativos de los termogramas de las fracciones gruesas: -10+8 mm; -8.0+4.0mm; 2.0+1.0mm de Punta Gorda.

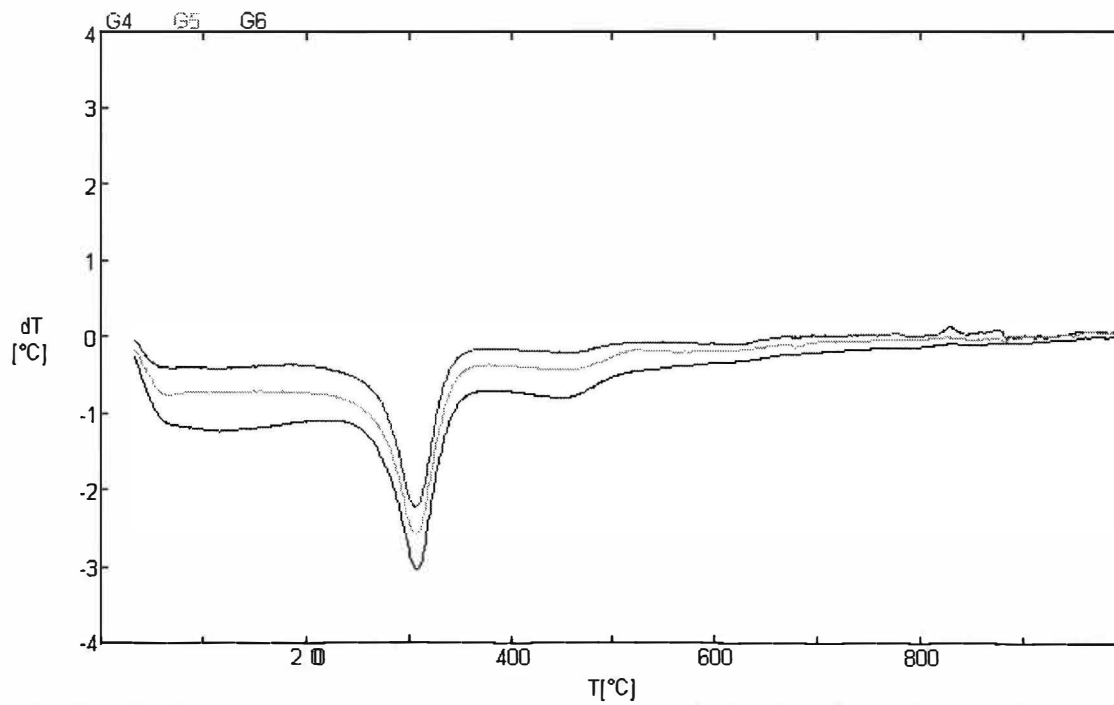


Fig. 3k. Gráficos comparativos de los termogramas de las fracciones intermedias a finas:
 -1+0,4 mm ; -0,4+0,2mm ; -0,2.0+0,071.0mm de Punta Gorda.

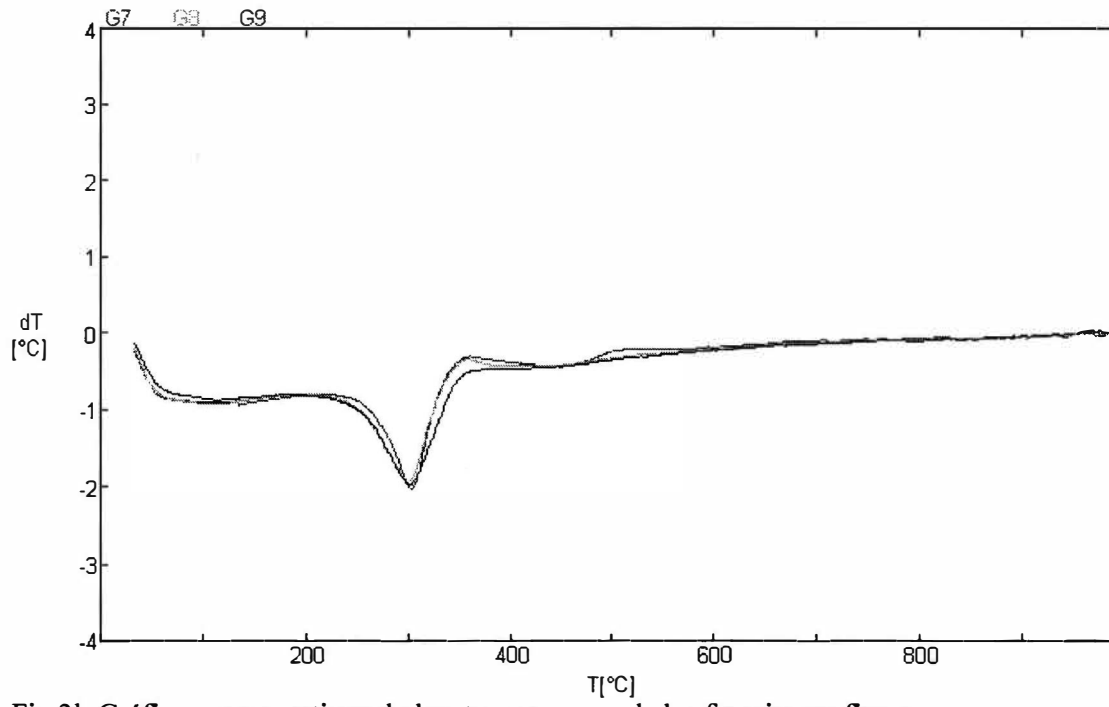


Fig.31. Gráficos comparativos de los termogramas de las fracciones finas: $-0,071+0,0444$ mm ; $-0,044+0,00$ mm de Punta Gorda.

Anexo 4. : Posibles formas minerales de presentarse los principales componentes en la corteza de intemperismo ferroniquelíferas.

(Según Rojas Purón, 1994).

Componente principal.	Mineral.	Fórmula química.	Contenido del componente (%).	Peso específico.(g/cm ³)
Fe ₂ O ₃ (1) FeO (2)	goethita magnetita maghemita hematites lepidocrosita akaganeíta ferrihydrita fayalita	FeOOH FeFe ₂ O ₄ Fe ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ FeOOH FeOOH Fe ₂ O ₃ .2FeOOH.6H ₂ O Fe ₂ (SiO ₄)	(1)89,9 (8)10,1 (1)69 (2)31 (1)100 (1)100 (1)89,9 (8)10,1 (1)89,9 (8)10,1 (2)76 (9)24	4,0 - 4,4 4,9 - 5,2 5,0 - 5,2 4,0 - 4,4 4,0 - 4,35
Cr ₂ O ₃ (3)	espinelas cromíferas.	(Mg,Fe)(Cr, Al, Fe) ₂ O ₄	(1)2-3 (2)0-18 (3)18-62 (5)0-33 (6)6-16	4,8-5,2
MnO ₄ (4) MnO ₂ (5)	psilomelano braunita pirolusita hausmanita elizabethskita. todorskita.	mMnO.MnO ₂ .nH ₂ O Mn ₂ O ₃ MnO ₂ MnMn ₂ O ₄	(inconstante) (4)44,8 (5)55,2 (4)100 (4)62 (5)38	4,4 - 4,7 4,7 - 5,0 4,7 - 5,0 4,7 - 4,9
Al ₂ O ₃ (6)	gibbsita boehmita caolinita halloysita	Al(OH) ₃ Al(OOH) Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	(6)65,4 (8)34,6 (6)85 (8)15 (6)39,5 (9)46,5 (8)14	2,43 3,01 - 3,06 2,58 - 2,60
MgO (7)	antigorita crisotilo-	Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈ Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	(7)43 (8)12,8 (9)44,1	2,5-2,7

	asbestos	$(\text{Mg,Ni})_6 (\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	(7)43 (8)12,8	
	lizardita	$\text{Mg}_2 (\text{Si}_2\text{O}_6)$	(9)44,1	
	enstatita	$(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	(7)57,1 (9)42,9	2,5-2,7
	forsterita	$(\text{Mg}_2 (\text{Si}_2\text{O}_6)$	mineral	3,27-4,37
	olivino	$\text{Mg}_2 (\text{SiO}_4)$	isomórfico	3,27-4,37
	magnesita	$(\text{Mg ,Fe})_2(\text{SiO}_4)$	(7)47,6 (10)52,4	
	brucita	$\text{Mg}(\text{CO}_3)$	(7)69(8)31	3,0-3,2
	talco	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	(7)47,6 (10)52,4	2,39
		$\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})$	(7)69 (8)31	
	Ciniclora	$(\text{Mg,Fe})_3 \text{Al} (\text{Si}_3 \text{AlO}_{10})$	(7)31,7 ((9)63,5	2,7-2,8
	pennina	$) (\text{OH})_8$	(8)4,8	
			composición variable	2,6-2,85
SiO_2	cuarzo		(9)100	2,65
	nepouita	$\text{Ni}_6 (\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	(composición variable)	
	nontronita	$\text{Fe}_2 ((\text{Si,Al})_4 \text{O}_{10})(\text{OH})_8$ $n\text{H}_2\text{O}$	n.H ₂ O(variable)	1.72-1.87

Nota: *, pueden incluirse como formas de sílice (SiO_2) los silicatos presentes en las formas mineralógicas de (7).

(8), para el componente: H_2O . Además deben considerarse las fases de cloritas,

(10), para el componente: CO_2 . esmectitas (nontronita y montmorillonita) entre

(11), para el componente: NiO . las fases de silicatos.

Anexo 5. Análisis mineralógico del análisis magnético de Punta Gorda

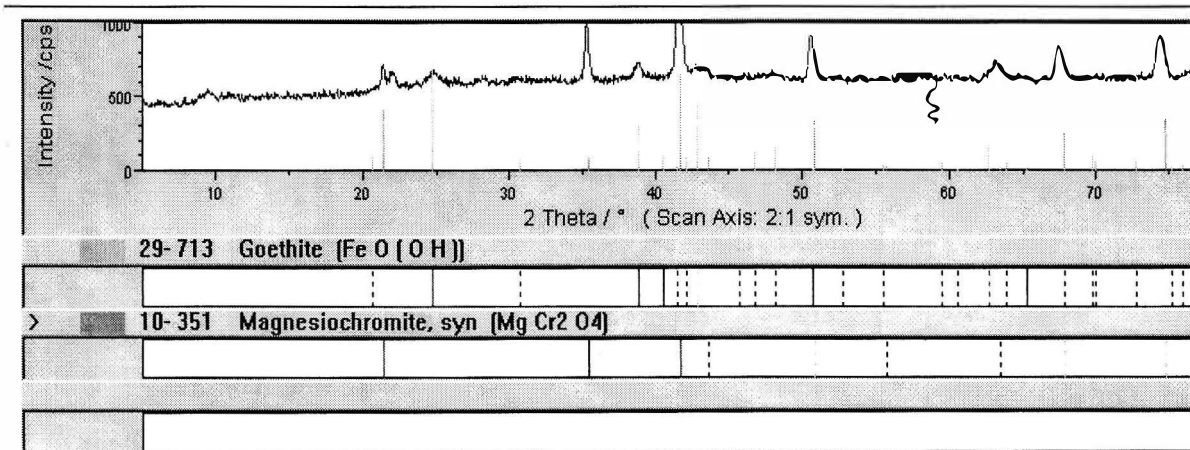


Fig5a. Digfractograma de la fracción -0.4 +0.2mm con intensidad de corriente de 1 A

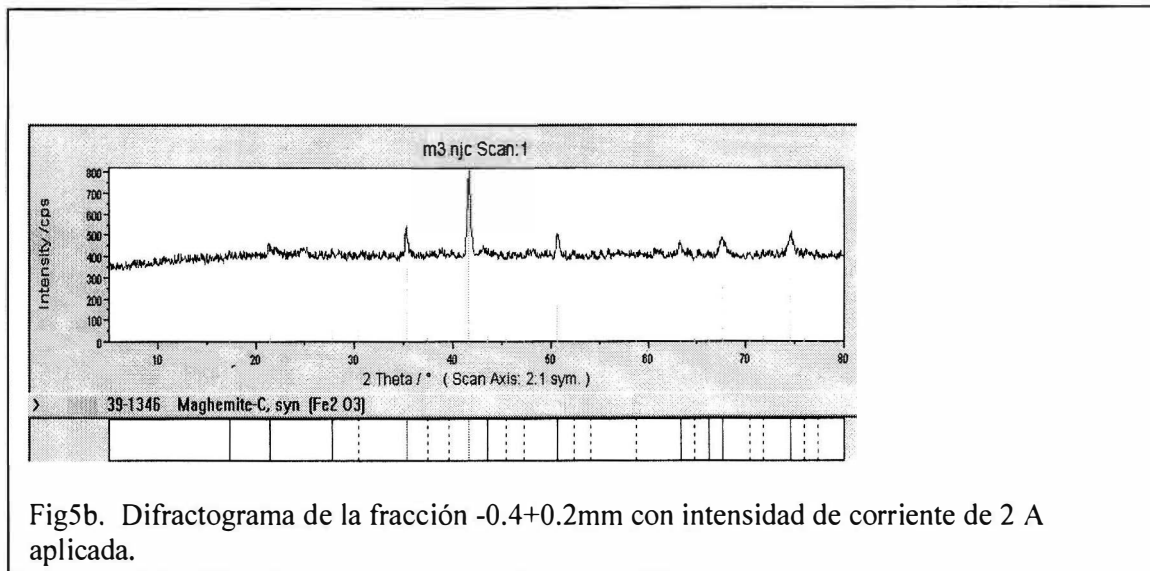


Fig5b. Diffractograma de la fracción -0.4+0.2mm con intensidad de corriente de 2 A aplicada.

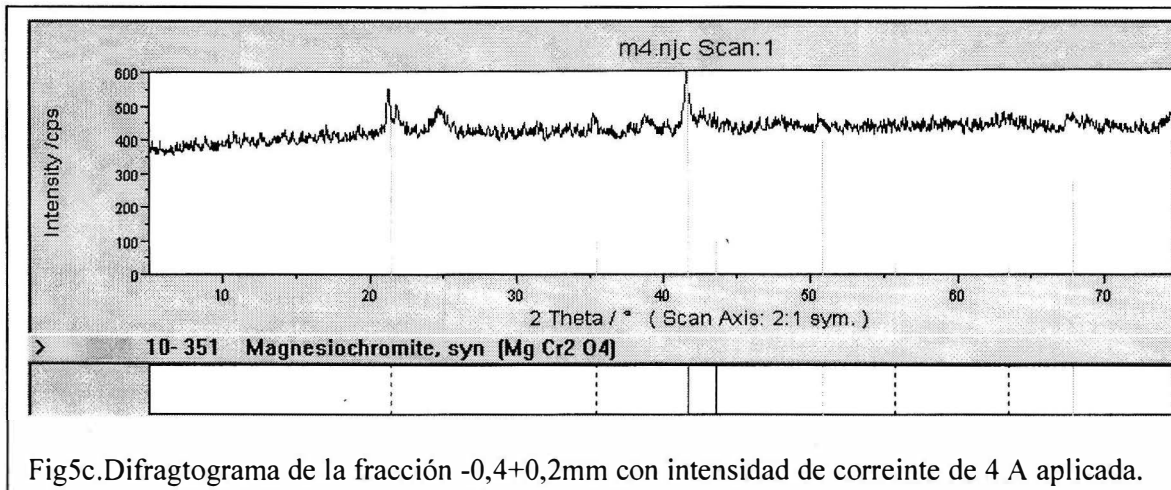


Fig5c. Diffractograma de la fracción -0,4+0,2mm con intensidad de corriente de 4 A aplicada.

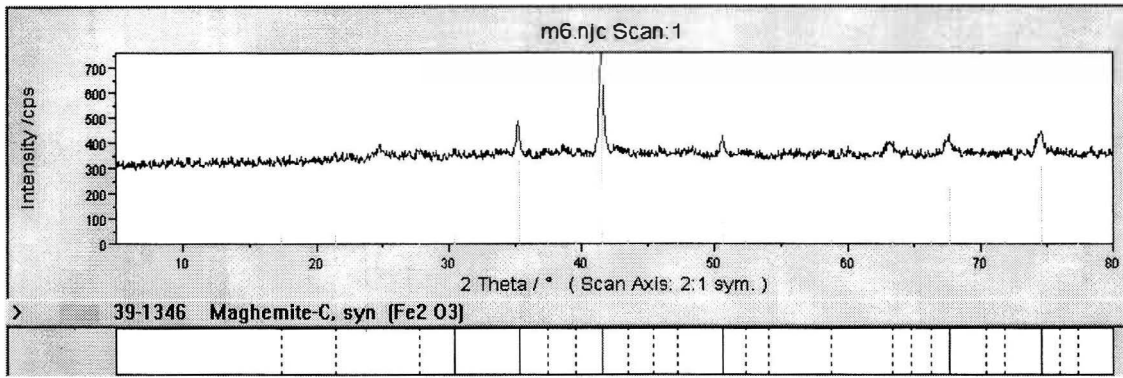


Figura 5d. Difractograma de la fracción-0,2+0,071mm con intensidad de corriente de 1 A aplicada.

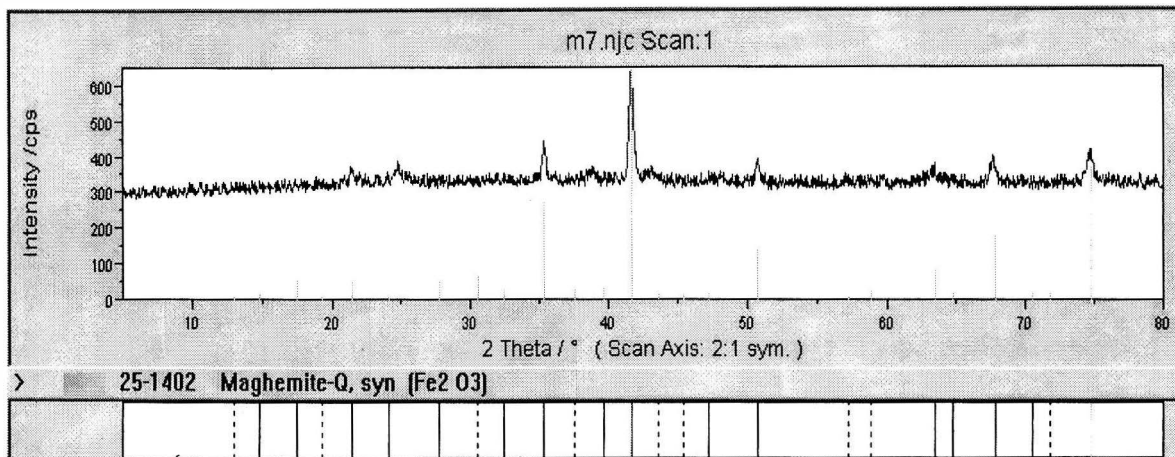


Figura 5e. Difractograma de la fracción -0,2+0,071mm con 2 A de corriente aplicada.

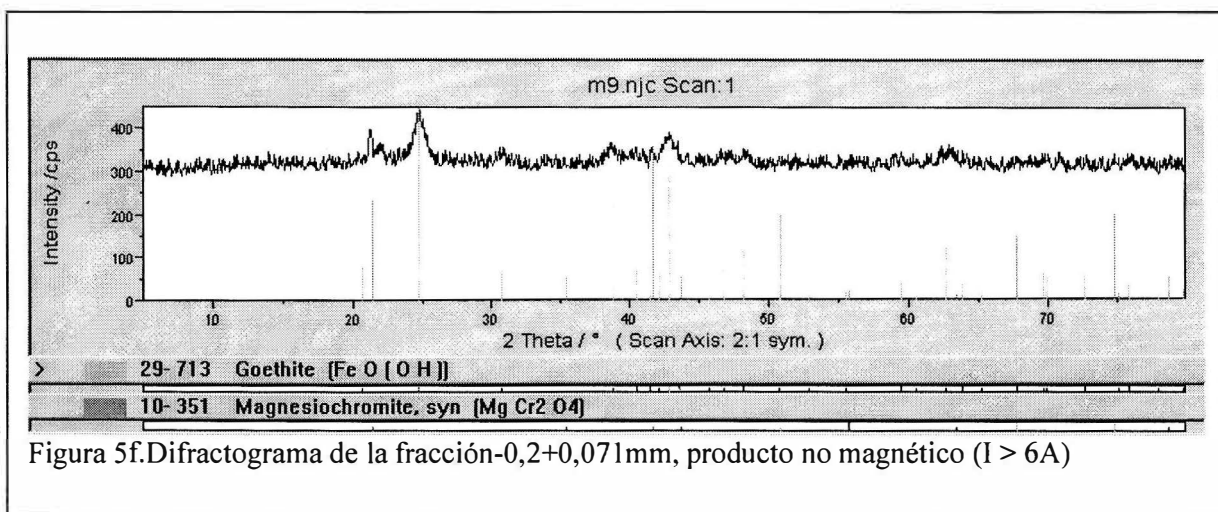


Figura 5f. Difractograma de la fracción-0,2+0,071mm, producto no magnético ($I > 6A$)

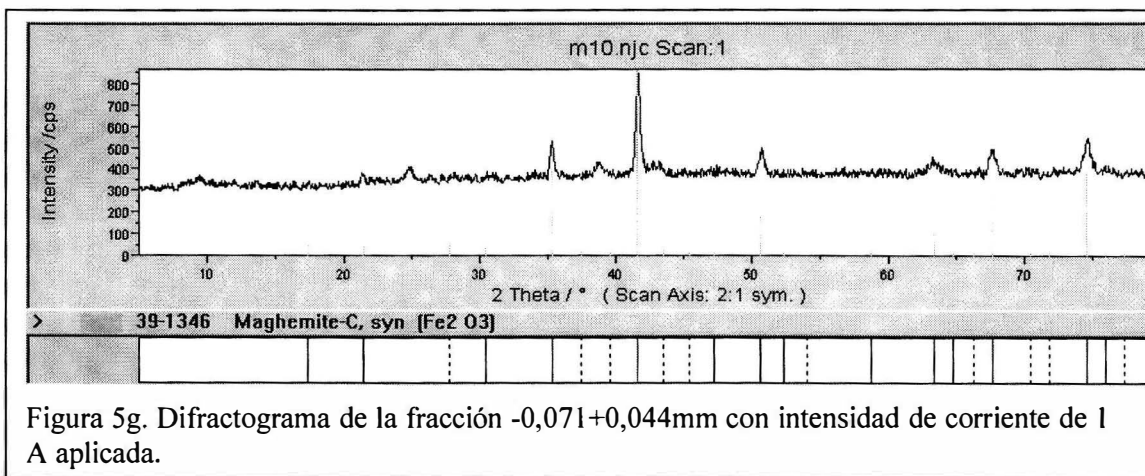


Figura 5g. Difractograma de la fracción -0,071+0,044mm con intensidad de corriente de 1 A aplicada.

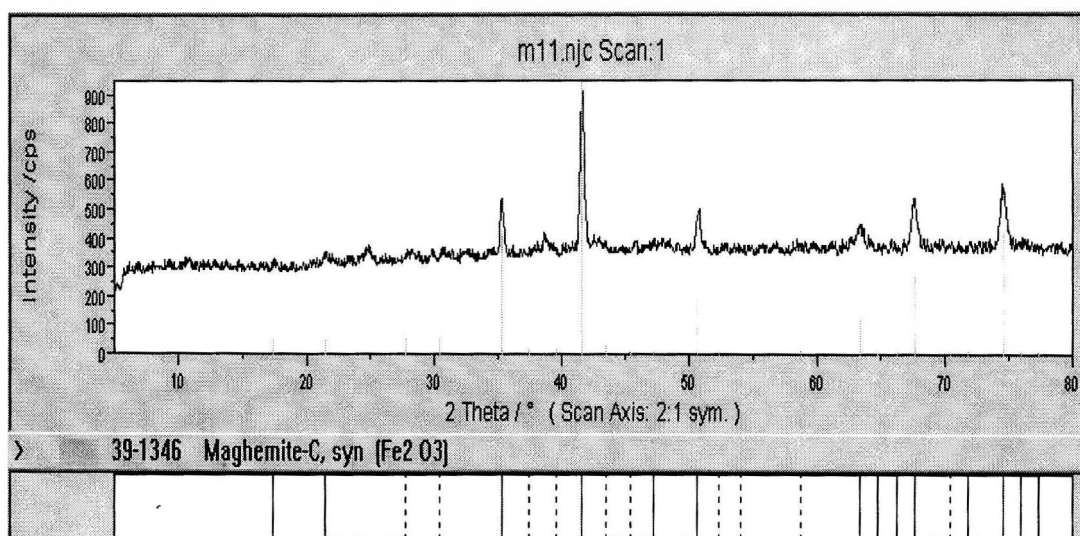


Figura 5h. Difractograma de la fracción -0,071+0,044mm con intensidad de corriente de 2 A aplicada.

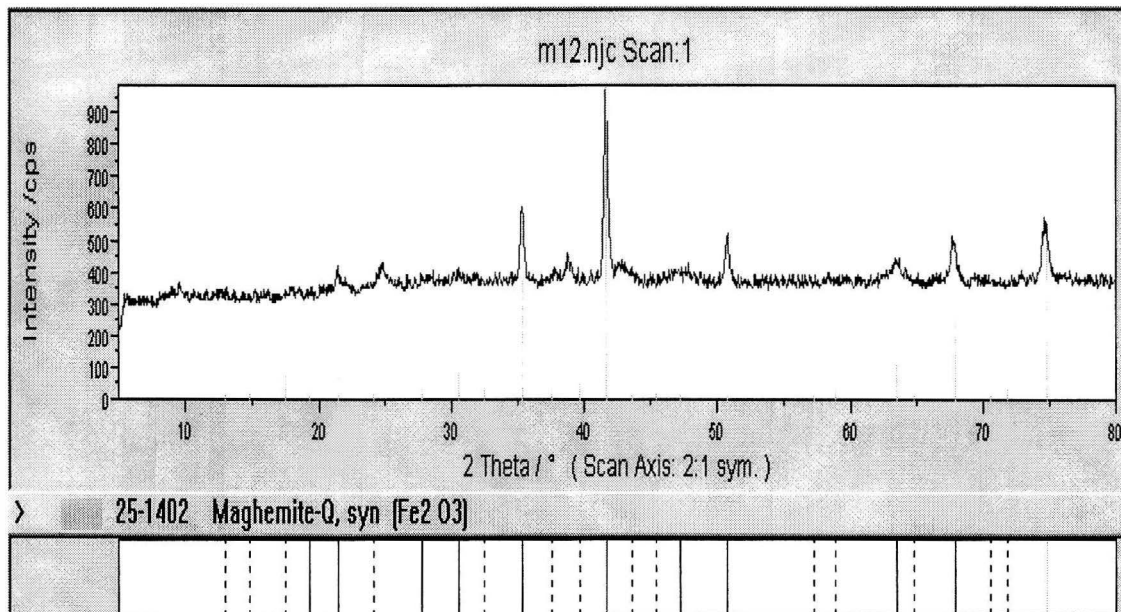


Figura 5i. Difractograma de la fracción -0,071+0,044mm con intensidad de corriente de 4 A aplicada.

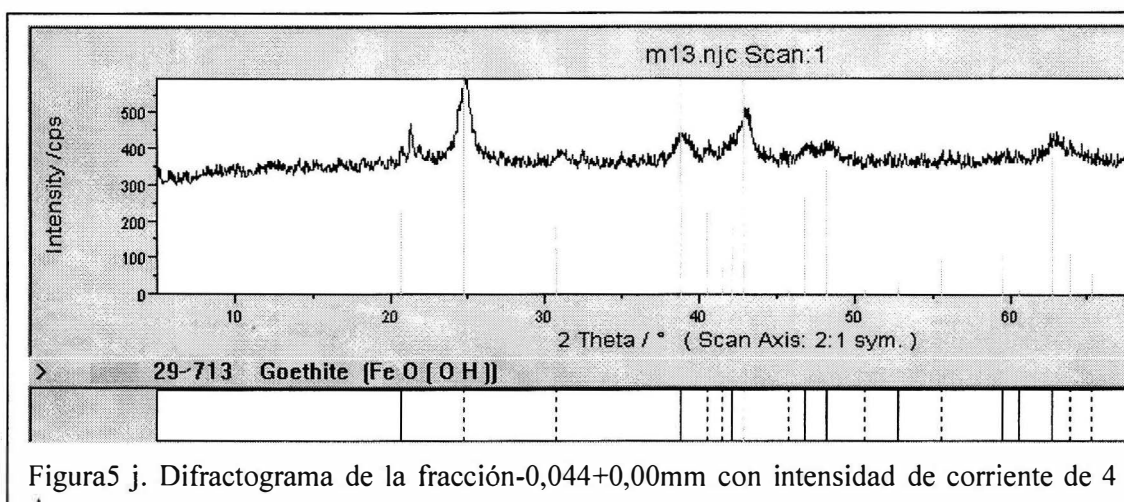


Figura 5 j. Difractograma de la fracción-0,044+0,00mm con intensidad de corriente de 4

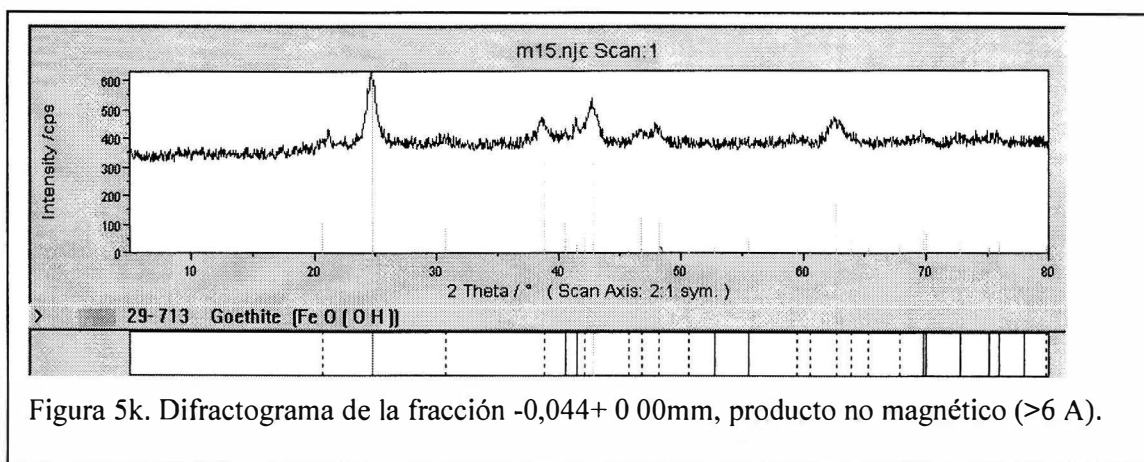


Figura 5k. Difractograma de la fracción -0,044+ 0 00mm, producto no magnético (>6 A).

Mineralogía cuantitativa del análisis magnético según AUTOQUAN

Mineralogía cuantitativa de la fracción -0,4 +0,2mm de Punta Gorda con intensidad de corriente de 1A.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido %</i>	<i>error</i>
Goethita	38.40	6.90
Maghemita	25.10	5.10
Magnesiocromita	14.60	3.90
Magnetita	21.90	6.60

Mineralogía cuantitativa de la fracción -0,4+0,2mm de Punta Gorda con intensidad de corriente de 2A.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error</i>
Goethita	24.00	6.90
Maghemita	66.90	6.90
Magnesiocromita	9.10	3.60
Magnetita	0.00	0.00

Mineralogía cuantitativa de la fracción -0,4 +0,2mm de Punta Gorda con intensidad de corriente de 4A.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Gibbsita	15.20	5.40
Goethita	53.20	7.80
Hematita	4.80	3.00
Maghemita	13.10	3.90
Magnesiocromita	13.60	5.10
Magnetita	0.00	0.00

Mineralogía cuantitativa de la fracción 0,2+0,071mm de Punta Gorda con intensidad de corriente de 1A.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Goethita	34.70	7.80
Maghemita	38.70	9.60
Magnesiocromita	1.69	2.13
Magnetita	24.80	10.20

Mineralogía cuantitativa de la fracción 0,2+0,071mm de Punta Gorda con intensidad de corriente de 2A.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Goethita	35.40	7.50
Hematita	6.00	3.30
Maghemita	17.00	10.50
Magnesiocromita	2.70	3.60
Magnetita	38.90	12.90

Mineralogía cuantitativa de la fracción 0,2+0,071mm del producto no magnético de Punta Gorda (I > 6A)

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Gibbsita	13.60	4.50
Goethita	83.20	5.70
Hematita	1.90	3.60
Maghemita	0.00	0.00
Magnesiocromita	0.00	0.00
Magnetita	1.29	1.05

Mineralogía cuantitativa de la fracción -0,071+0,044mm de Punta Gorda con intensidad de corriente de 1A.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Goethita	36.10	6.00
Maghemita	42.50	9.00
Magnesiocromita	2.53	2.88
Magnetita	18.80	7.50

Mineralogía cuantitativa de la fracción -0,071+0,044mm de Punta Gorda con intensidad de corriente de 2A.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Goethita	31.90	6.30
Maghemita	36.20	11.70
Magnesiocromita	1.17	2.67
Magnetita	30.80	13.50

Mineralogía cuantitativa de la fracción -0,071+0,044mm de Punta Gorda con intensidad de corriente de 4A.

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Goethita	23.90	6.60
Hematita	9.81	2.67
Maghemita	0.70	2.28
Magnesiocromita	0.00	0.00
Magnetita	65.60	5.10

Mineralogía cuantitativa de la fracción -0,044 +0,00mm, producto no magnético de Punta Gorda (I > 6A)

Mineral	Contenido en %	error en %
Gibbsita	3.27	2.70
Goethita	90.50	3.00
Hematita	2.36	1.71
Maghemita	0.00	0.00
Magnesiocromita	1.84	2.28
Magnetita	1.99	1.92

Anexo 6. Función experimental de distribución β (I, ρ)

Función experimental de distribución β^{Ni} (I, ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Ni,%				
	I, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
	0,53	0,57	0,73	0,73	1,00
-2,935+2,92	0,87	0,65	0,96	0,79	0,60
-2,92+2,90	0,00	0,95	1,041	0,8	0,58
-2,90+2,70	0,00	1,09	1,97	0,72	1,14
-2,70+2,50	0,00	0,00	1,310	1,24	1,14
-2,50+0,0	1,51	0,98	1,00	1,044	0,96

Función experimental de distribución β^{Co} (I, ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Co,%				
	I, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
$\geq 2,935$	0,312	0,367	0,854	0,537	0,168
-2,935+2,92	0,386	0,281	0,854	0,235	0,077
-2,92+2,90	0,000	0,21	0,541	0,43	0,075
-2,90+2,70	0,000	0,110	0,226	0,24	0,114
-2,70+2,50	0,000	0,000	0,222	0,339	0,110
-2,50+0,0	0,129	0,021	0,360	0,221	0,140

Función experimental de distribución β^{Fe} (l , ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Fe, %				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	37,03	33,27	26,33	26,33	35,89
-2,935+2,92	35,02	30,68	22,09	25,51	24,94
-2,92+2,90	0,00	28,020	20,470	22,900	24,56
-2,90+2,70	0,00	28,11	20,140	24,22	20,58
-2,70+2,50	0,00	0,00	20,000	24,27	20,35
-2,50+0,0	17,93	17,52	19,180	22,3	32,30

Función experimental de distribución β^{Mg} (l , ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Mg, %				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	0,37	0,90	0,51	0,32	0,45
-2,935+2,92	1,81	1,20	1,46	0,51	0,38
-2,92+2,90	0,00	2,01	1,510	0,46	0,43
-2,90+2,70	0,00	2,40	1,300	0,6	0,56
-2,70+2,50	0,00	0,00	3,210	1,94	0,850
-2,50+0,0	3,56	3,50	3,350	2,39	0,48

Función experimental de distribución β^{Al} (l , ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Al, %				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	7,13	6,13	6,30	3,63	3,75
-2,935+2,92	9,75	7,87	7,17	4,21	3,96
-2,92+2,90	0,00	8,15	7,30	4,65	4,09
-2,90+2,70	0,00	8,15	7,62	4,58	4,07
-2,70+2,50	0,00	0,00	7,65	7,64	3,58
-2,50+0,0	12,70	17,96	18,79	4,19	3,75

Función experimental de distribución β^{SiO_2} (l , ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de SiO ₂ , %				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	1,60	1,28	1,28	1,71	1,77
-2,935+2,92	1,07	2,20	2,20	1,79	1,78
-2,92+2,90	0,00	2,50	2,50	1,84	1,85
-2,90+2,70	0,00	2,80	2,80	1,95	1,95
-2,70+2,50	0,00	3,00	3,00	1,95	1,05
-2,50+0,0	26,45	17,26	13,120	8,52	2,68

Función experimental de distribución β^{Cr} (l , ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Cr,%				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	1,44	1,79	1,40	1,02	1,01
-2,935+2,92	1,24	1,64	0,01	0,67	0,69
-2,92+2,90	0,00	1,00	0,01	0,47	1,03
-2,90+2,70	0,00	0,85	0,01	1,00	1,03
-2,70+2,50	0,00	0,00	0,01	0,30	1,01
-2,50+0,0	0,28	0,41	1,26	0,90	0,62

Función experimental de distribución β^{Mn} (l , ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Mn,%				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	2,84	3,37	7,09	1,56	0,83
-2,935+2,92	2,84	2,32	7,03	1,70	0,73
-2,92+2,90	0,00	1,88	7,030	1,20	0,72
-2,90+2,70	0,00	1,80	1,563	1,78	0,65
-2,70+2,50	0,00	0,00	1,850	2,50	0,74
-2,50+0,0	1,55	0,68	3,090	1,58	0,95

Función experimental de distribución β^{Cu} (l , ρ) de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Cu,%				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	0,019	0,022	0,033	0,031	0,034
-2,935+2,92	0,015	0,022	0,033	0,014	0,035
-2,92+2,90	0,000	0,02	0,033	0,059	0,036
-2,90+2,70	0,000	0,031	0,031	0,035	0,045
-2,70+2,50	0,000	0,000	0,033	0,029	0,04
-2,50+0,0	0,031	0,025	0,030	0,038	0,026

Función experimental de distribución $\beta^{Zn}(l, \rho)$ de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Zn,%				
	l, mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
≥2,935	0,022	0,038	0,045	0,070	0,059
-2,935+2,92	0,022	0,068	0,096	0,081	0,060
-2,92+2,90	0,000	0,065	0,087	0,075	0,064
-2,90+2,70	0,000	0,056	0,070	0,082	0,074
-2,70+2,50	0,000	0,000	0,007	0,065	0,09
-2,50+0,0	0,056	0,044	0,057	0,038	0,050

Anexo 7. Mineralogía cuantitativa del análisis densométrico de Punta Gorda

Mineralogía Cuantitativa del producto pesado, densidad mayor de 2,90g/cm³ de la fracción -1+0,4 de Punta Gorda.

Mineral

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Goethita	59.20	7.80
Hematita	0.00	0.00
Litioforita	21.40	5.70
Maghemita	0.00	0.00
Magnesiocromita	19.40	6.00
Magnetita	0.00	0.00

Mineralogía Cuantitativa típica del producto ligero de la fracción -2,0+1,0mm de Punta Gorda

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Gibbsita	78.50	3.60
Lizardita 1T	11.45	2.07
Cuarzo 10.08		2.37

Mineralogía Cuantitativa típica del producto ligero de la fracción -4,0+2,0mm de Punta Gorda

<i>Mineral</i>	<i>Contenido en %</i>	<i>error en %</i>
Gibbsita	81.70	3.30
Lizardita 1T	7.23	1.92
Cuarzo 11.05		2.16
Bernesita		
Clinocrisotilo		

Anexo 8. Función de distribución másica experimental de la separación magnética de Punta Gorda

La distribución experimental de la función $\gamma(\chi_m)$ de la fracción (-0.044+0.00) mm de Punta Gorda.

Intensidad de la corriente en el analizador, A	Salida de las fracciones $\gamma(I)$, %	Susceptibilidad magnética media χ_m (cm^3/g). 10^{-6}	Intensidad promedio	Longitud del De intervalo ΔI , A	Función de distribución $\gamma(I)$	$\Delta I * \gamma(I)$
0,5	0	380	0,25	0,5	0	0
1,0	0	240	0,75	0,5	0	0
2,0	0,9788	86	1,5	1	0,0098	0,0098
4	2,7706		3	2	0,0139	0,0277
6	2,0814		5	2	0,0104	0,0208

La distribución experimental de la función $\gamma(\chi_m)$ de la fracción (-0.071+0.044) mm de Punta Gorda.

Intensidad de la corriente en el analizador, A	Salida de las fracciones $\gamma(I)$, %	Susceptibilidad magnética media χ_m (cm^3/g). 10^{-6}	Intensidad promedio	Longitud del De intervalo ΔI , A	Función de distribución $\gamma(I)$	$\Delta I * \gamma(I)$
0,5	0,0000	380	0,25	0,5	0,0000	0,0000
1,0	1,0452	240	0,75	0,5	0,0209	0,0105
2,0	6,5672	86	1,5	1	0,0657	0,0657
4	4,8639		3	2	0,0243	0,0486
6	1,7934		5	2	0,0090	0,0179

La distribución experimental de la función $\gamma(\chi_m)$ de la fracción (-0.2+0.071) mm de Punta Gorda.

Intensidad de la corriente en el analizador, A	Salida de las fracciones $\gamma(I)$	Susceptibilidad magnética media χ_m (cm^3/g). 10^{-6}	Intensidad promedio	Longitud del De intervalo ΔI , A	Función de distribución $\gamma(I)$	$\Delta I * \gamma(I)$
0,5	0,0000	380	0,25	0,5	0,0000	0,0000
1,0	0,2062	240	0,75	0,5	0,0041	0,0021
2,0	7,9420	86	1,5	1	0,0794	0,0794
4	5,4242		3	2	0,0271	0,0542
6	2,3470		5	2	0,0117	0,0235

La distribución experimental de la función $\gamma(\chi_m)$ de la Fracción (-0.4+0.2) mm de Punta Gorda.

Intensidad de la corriente en el analizador, A	Salida de las fracciones $\gamma(I)$	Susceptibilidad magnética media χ_m (cm^3/g). 10^{-6}	Intensidad promedio	Longitud del De intervalo ΔI , A	Función de distribución $\gamma(I)$	$\Delta I * \gamma(I)$
0,5	0,0000	380	0,25	0,5	0,0000	0,0000
1,0	0,7299	240	0,75	0,5	0,0146	0,0073
2,0	5,9854	86	1,5	1	0,0599	0,0599
4	5,1063		3	2	0,0255	0,0511
6	4,0822		5	2	0,0204	0,0408

La distribución experimental de la función $\gamma(\chi_m)$ de la fracción (-1.0+0.4) mm de Punta Gorda.

Intensidad de la corriente en el analizador, A	Salida de las fracciones $\gamma(I)$	Susceptibilidad magnética media χ_m (cm^3/g). 10^{-6}	Intensidad promedio	Longitud del De intervalo ΔI , A	Función de distribución $\gamma(I)$	$\Delta I * \gamma(I)$
0,5	0,0000	380	0,25	0,5	0,0000	0,0000
1,0	0,0000	240	0,75	0,5	0,0000	0,0000
2,0	5,3548	86	1,5	1	0,0535	0,0535
4	3,7893		3	2	0,0189	0,0379
6	1,4156		5	2	0,0071	0,0142

La distribución experimental de la función $\gamma(\chi_m)$ de la fracción (-2.0+1.0) de Punta Gorda.

Intensidad de la corriente en el analizador, A	Salida de las fracciones $\gamma(I)$	Susceptibilidad magnética media χ_m (cm^3/g). 10^{-6}	Intensidad promedio	Longitud del De intervalo ΔI , A	Función de distribución $\gamma(I)$	$\Delta I * \gamma(I)$
0,5	19,1367	380	0,25	0,5	0,3827	0,1914
1,0	13,9333	240	0,75	0,5	0,2787	0,1393
2,0	12,9000	86	1,5	1	0,1290	0,1290
4	11,0100		3	2	0,0551	0,1101
6	7,2033		5	2	0,0360	0,0720

La distribución experimental de la función $\gamma(\chi_m)$ de la fracción (-4.0+2.0) mm de Punta Gorda.

Intensidad de la corriente en el analizador, A	Salida de las fracciones $\gamma(I)$	Susceptibilidad magnética media χ_m (cm^3/g). 10^{-6}	Intensidad promedio	Longitud del De intervalo ΔI , A	Función de distribución $\gamma(I)$	$\Delta I * \gamma(I)$
0,5	15,4667	380	0,25	0,5	0,3093	0,1547
1,0	10,8000	240	0,75	0,5	0,2160	0,1080
2,0	6,9333	86	1,5	1	0,0693	0,0693
4	7,1333		3	2	0,0357	0,0713
6	6,1667		5	2	0,0308	0,0617

La distribución experimental de la función $\gamma(\chi_m)$ de la fracción (-8.0+4.0) mm de Punta Gorda.

Intensidad de la corriente en el analizador, A	Salida de las fracciones $\gamma(I)$	Susceptibilidad magnética media χ_m (cm^3/g). 10^{-6}	Intensidad promedio	Longitud del De intervalo ΔI , A	Función de distribución $\gamma(I)$	$\Delta I * \gamma(I)$
0,5	9,8000	380	0,25	0,5	0,1960	0,0980
1,0	7,6000	240	0,75	0,5	0,1520	0,0760
2,0	6,6667	86	1,5	1	0,0667	0,0667
4	5,9000		3	2	0,0295	0,0590
6	5,1333		5	2	0,0257	0,0513

La distribución experimental de la función $\gamma(\chi_m)$ de la fracción (-10+8.0) mm de Punta Gorda.

Intensidad de la corriente en el analizador, A	Salida de las fracciones $\gamma(I)$	Susceptibilidad magnética media χ_m (cm^3/g). 10^{-6}	Intensidad promedio	Longitud del De intervalo ΔI , A	Función de distribución $\gamma(I)$	$\Delta I * \gamma(I)$
0,5	9,8000	380	0,25	0,5	0,1960	0,0980
1,0	7,4667	240	0,75	0,5	0,1493	0,0747
2,0	6,6667	86	1,5	1	0,0667	0,0667
4	5,9000		3	2	0,0295	0,0590
6	4,9333		5	2	0,0247	0,0493

Anexo 9. Función experimental de distribución $\beta(I,I)$ de Punta Gorda.

Función experimental de distribución, $\beta^{\text{Ni}}(I,I)$ de Punta Gorda

l,mm	Contenido de Ni, %				
	I, A				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	2,01	2,14	1,98	2,24	1,80
6	1,52	1,98	2,15	2,35	2,22
3	1,58	2,10	2,34	2,42	2,81
1,5	1,15	1,80	2,22	2,07	1,69
0,7	0,00	0,00	1,39	1,60	1,38
0,3	0,00	1,34	1,49	1,64	1,53
0,1355	0,00	1,02	1,06	1,03	1,25
0,0575	0,00	0,84	0,93	0,96	1,16
0,022	0,00	0,00	0,85	1,02	1,27

Función experimental de distribución, $\beta^{\text{Co}}(I,I)$ de Punta Gorda

l,mm	Contenido de Co, %				
	I, A				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	0,541	0,327	0,281	0,222	0,174
6	0,413	0,412	0,266	0,354	0,356
3	0,422	0,425	0,400	0,354	0,312
1,5	0,613	0,554	0,411	0,354	0,348
0,7	0,000	0,000	0,589	0,767	0,583
0,3	0,000	0,416	0,423	0,440	0,330
0,1355	0,000	0,229	0,298	0,318	0,356
0,0575	0,000	0,151	0,168	0,173	0,182
0,022	0,000	0,000	0,074	0,086	0,087

Función experimental de distribución, $\beta^{Fe}(l,I)$ de Punta Gorda

Cc	Contenido de Fe, %				
	I, A				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	25,00	22,40	20,57	20,50	20,43
6	27,11	21,80	20,73	20,67	22,30
3	26,41	21,74	21,10	21,37	20,11
1,5	35,26	24,78	22,37	21,39	21,91
0,7	0,00	0,00	40,61	28,80	25,58
0,3	0,00	47,70	44,85	42,30	42,37
0,1355	0,00	54,20	53,23	49,72	45,32
0,0575	0,00	55,93	56,53	54,10	43,28
0,022	0,00	0,00	57,20	59,85	54,48

Función experimental de distribución, $\beta^{Mg}(l,I)$ de Punta Gorda

l, mm	Contenido de Mg, %				
	I, A				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	5,12	5,20	5,26	5,64	7,20
6	6,52	6,53	6,54	7,22	7,34
3	6,30	5,62	6,57	7,42	7,83
1,5	5,18	5,91	6,42	5,61	6,46
0,7	0,00	0,00	2,96	3,63	2,42
0,3	0,00	0,62	0,72	0,63	0,54
0,1355	0,00	0,76	0,88	0,94	0,76
0,0575	0,00	0,72	0,74	0,77	0,66
0,022	0,00	0,00	0,49	0,50	0,40

Función experimental de distribución, $\beta^{Al}(l,I)$ de Punta Gorda

l, mm	Contenido de Al, %				
	(I), A				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	6,29	7,57	7,29	7,61	7,78
6	7,96	6,41	7,41	7,79	9,06
3	7,00	8,14	9,03	9,73	10,98
1,5	4,94	7,44	9,02	10,65	11,67
0,7	0,00	0,00	5,41	6,43	6,97
0,3	0,00	3,30	3,56	3,79	3,78
0,1355	0,00	2,89	3,27	3,43	3,67
0,0575	0,00	2,47	2,82	2,99	3,71
0,022	0,00	0,00	2,43	2,56	3,45

Función experimental de distribución, $\beta^{SiO_2}(l,l)$ de Punta Gorda

l,mm	Contenido de SiO ₂ , %				
	(l), A				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	16,64	21,21	21,99	25,21	25,50
6	15,42	20,48	20,78	22,83	24,44
3	14,98	17,24	18,20	18,64	19,24
1,5	12,81	13,69	14,85	16,63	17,09
0,7	0,00	0,00	3,35	4,21	5,84
0,3	0,00	3,06	3,10	3,08	3,44
0,1355	0,00	2,31	2,60	2,66	3,25
0,0575	0,00	2,36	2,48	2,62	3,51
0,022	0,00	0,00	2,34	2,39	3,01

Función experimental de distribución, $\beta^{Cr}(l,l)$ de Punta Gorda

l,mm	Contenido de Cr, %				
	(l), A				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
6	0,30	0,21	0,05	0,05	0,04
3	0,70	0,52	0,45	0,40	0,36
1,5	1,87	0,56	0,31	0,28	0,03
0,7	0,00	0,00	1,50	1,43	0,56
0,3	0,00	1,83	1,63	1,46	1,20
0,1355	0,00	3,96	3,80	3,74	3,22
0,0575	0,00	3,52	3,00	2,89	2,56
0,022	0,00	0,00	1,52	1,30	1,27

Función experimental de distribución, $\beta^{Mn}(l,l)$ de Punta Gorda

l,mm	Contenido de Mn, %				
	(l), A				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	4,98	3,62	1,84	3,43	2,58
6	4,04	2,64	3,95	3,91	3,23
3	3,77	3,88	5,37	7,09	8,48
1,5	3,12	4,83	6,86	6,52	3,57
0,7	0,00	0,00	3,87	5,01	5,15
0,3	0,00	2,62	2,57	3,00	2,14
0,1355	0,00	1,98	2,07	2,39	2,62
0,0575	0,00	1,04	1,21	1,16	1,47
0,022	0,00	0,00	0,63	0,53	0,65

Función experimental de distribución, $\beta^{Cu}(l,I)$ de Punta Gorda

l,mm	Contenido de Cu, %				
	(I), A				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	0,047	0,034	0,023	0,036	0,032
6	0,023	0,023	0,031	0,037	0,039
3	0,025	0,029	0,039	0,048	0,052
1,5	0,020	0,030	0,040	0,040	0,029
0,7	0,000	0,000	0,026	0,030	0,024
0,3	0,000	0,017	0,018	0,023	0,018
0,1355	0,000	0,012	0,014	0,017	0,017
0,0575	0,000	0,098	0,018	0,020	0,022
0,022	0,000	0,000	0,012	0,012	0,014

Función experimental de distribución, $\beta^{Zn}(l,I)$ de Punta Gorda

l,mm	Contenido de Zn, %				
	(I), A				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	0,038	0,039	0,033	0,039	0,042
6	0,036	0,037	0,041	0,046	0,046
3	0,047	0,047	0,054	0,057	0,064
1,5	0,065	0,064	0,070	0,065	0,054
0,7	0,000	0,000	0,049	0,068	0,070
0,3	0,000	0,059	0,055	0,063	0,057
0,1355	0,000	0,045	0,048	0,053	0,061
0,0575	0,000	0,034	0,035	0,037	0,053
0,022	0,000	0,000	0,036	0,036	0,129

Anexo 10. Distribución de los componentes en el material inicial y (L,I) de Punta Gorda

Distribución γ^{Ni} (L,I) en el material inicial de Punta Gorda

Tamaño	Valores de la función de distribución, , mm.A				
	(I), A				
	0.0-0.5	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,000197	0,000160	0,000132	0,000132	0,000089
-8.0+4	0,000936	0,000946	0,000904	0,000873	0,000717
-4.0+2.0	0,000877	0,000815	0,000583	0,000622	0,000624
-2.0+1.0	0,005018	0,005691	0,006520	0,005189	0,002763
-1.0+0.2	0,000000	0,000000	0,004116	0,003357	0,001076
-0.4+0.2	0,000000	0,000419	0,003811	0,003585	0,002666
-0.2+0.071	0,000000	0,000212	0,008520	0,005668	0,002957
-0.071+0.044	0,000000	0,000696	0,004847	0,003672	0,001640
-0.044+0.00	0,000000	0,000000	0,005723	0,019488	0,018112

Distribución γ^{Co} (L,I) en el material inicial de Punta Gorda

Tamaño	Valores de la función de distribución, , mm.A				
	(I), A				
	0.0-0.5	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,000053	0,000024	0,000019	0,000013	0,000009
-8.0+4	0,000255	0,000197	0,000112	0,000132	0,000115
-4.0+2.0	0,000235	0,000165	0,000100	0,000091	0,000069
-2.0+1.0	0,002669	0,001755	0,001206	0,000887	0,000570
-1.0+0.2	0,000000	0,000000	0,001745	0,001607	0,000456
-0.4+0.2	0,000000	0,000130	0,001085	0,000961	0,000576
-0.2+0.071	0,000000	0,000048	0,002398	0,001745	0,000845
-0.071+0.044	0,000000	0,000125	0,000870	0,000664	0,000257
-0.044+0.00	0,000000	0,000000	0,000500	0,001630	0,001238

Distribución γ^{Fe} (L,I) en el material inicial de Punta Gorda

Tamaño	Valores de la función de distribución, , mm.A				
	(I), A				
	0.0-0.5	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,002450	0,001673	0,001371	0,001210	0,001008
-8.0+4	0,016736	0,010438	0,008705	0,007683	0,007213
-4.0+2.0	0,014705	0,008453	0,005265	0,005488	0,004465
-2.0+1.0	0,153500	0,078552	0,065654	0,053573	0,035908
-1.0+0.2	0,000000	0,000000	0,120266	0,060359	0,020021
-0.4+0.2	0,000000	0,014902	0,114902	0,092449	0,074022
-0.2+0.071	0,000000	0,000000	0,427784	0,272910	0,107641
-0.071+0.044	0,000000	0,046177	0,293293	0,207858	0,061310
-0.044+0.00	0,000000	0,000000	0,385147	1,140679	0,779961

Distribución γ^{Mg} (I,I) en el material inicial de Punta Gorda

Tamaño	Valores de la función de distribución, , mm.A				
	(I), A				
	0.0-0.5	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,000502	0,000388	0,000351	0,000333	0,000355
-8.0+4	0,004024	0,003127	0,002747	0,002684	0,002375
-4.0+2.0	0,003509	0,002186	0,001640	0,001904	0,001739
-2.0+1.0	0,022552	0,018721	0,018845	0,014046	0,010586
-1.0+0.2	0,000000	0,000000	0,008773	0,007601	0,001893
-0.4+0.2	0,000000	0,000195	0,001848	0,001377	0,000951
-0.2+0.071	0,000000	0,000158	0,007051	0,005149	0,001797
-0.071+0.044	0,000000	0,000592	0,003825	0,002974	0,000939
-0.044+0.00	0,000000	0,000000	0,003266	0,009434	0,005763

Distribución γ^{Al} (I,I) en el material inicial de Punta Gorda

Tamaño	Valores de la función de distribución, , mm.A				
	(I), A				
	0.0-0.5	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,000616	0,000565	0,000486	0,000449	0,000384
-8.0+4	0,004913	0,003069	0,003110	0,002894	0,002931
-4.0+2.0	0,003898	0,003165	0,002254	0,002500	0,002438
-2.0+1.0	0,021509	0,023588	0,026461	0,026671	0,019130
-1.0+0.2	0,000000	0,000000	0,016030	0,013474	0,005456
-0.4+0.2	0,000000	0,001032	0,009119	0,008274	0,006599
-0.2+0.071	0,000000	0,000603	0,026272	0,018825	0,008726
-0.071+0.044	0,000000	0,002039	0,014639	0,011499	0,005260
-0.044+0.00	0,000000	0,000000	0,016379	0,048839	0,049325

Distribución γ^{SiO_2} (I,I) en el material inicial de Punta Gorda

Tamaño	Valores de la función de distribución, , mm.A				
	(I), A				
	0.0-0.5	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,001631	0,001642	0,001681	0,001481	0,001258
-8.0+4	0,009521	0,011723	0,009589	0,007921	0,007581
-4.0+2.0	0,008449	0,007482	0,004651	0,003848	0,003206
-2.0+1.0	0,029574	0,039136	0,032402	0,031606	0,027250
-1.0+0.2	0,000000	0,000000	0,009927	0,008817	0,004570
-0.4+0.2	0,000000	0,000957	0,007950	0,006735	0,006003
-0.2+0.071	0,000000	0,000481	0,020909	0,014595	0,007710
-0.071+0.044	0,000000	0,001947	0,012872	0,010059	0,004973
-0.044+0.00	0,000000	0,000000	0,015722	0,045551	0,043097

Distribución γ^{Cr} (I,I) en el material inicial de Punta Gorda

Tamaño	Valores de la función de distribución, , mm.A				
	(I), A				
	0.0-0.5	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,0000039	0,0000030	0,0000027	0,0000024	0,0000020
-8.0+4	0,0001852	0,0000991	0,0000194	0,0000177	0,0000130
-4.0+2.0	0,0003898	0,0002022	0,0001123	0,0001027	0,0000808
-2.0+1.0	0,0081467	0,0017751	0,0009200	0,0007114	0,0000533
-1.0+0.2	0,0000000	0,0000000	0,0044418	0,0030018	0,0004364
-0.4+0.2	0,0000000	0,0005707	0,0041756	0,0031930	0,0020966
-0.2+0.071	0,0000000	0,0008263	0,0305417	0,0205038	0,0076475
-0.071+0.044	0,0000000	0,0029064	0,0155641	0,0111162	0,0036269
-0.044+0.00	0,0000000	0,0000000	0,0102347	0,0247766	0,0181836

Distribución γ^{Mn} (I,I) en el material inicial de Punta Gorda

Tamaño	Valores de la función de distribución, , mm.A				
	(I), A				
	0.0-0.5	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,00049	0,00027	0,00012	0,00020	0,00013
-8.0+4	0,00249	0,00126	0,00166	0,00145	0,00104
-4.0+2.0	0,00210	0,00151	0,00134	0,00182	0,00188
-2.0+1.0	0,01360	0,01532	0,02014	0,01634	0,00585
-1.0+0.2	0,00000	0,00000	0,01145	0,01050	0,00403
-0.4+0.2	0,00000	0,00082	0,00659	0,00656	0,00373
-0.2+0.071	0,00000	0,00041	0,01666	0,01311	0,00623
-0.071+0.044	0,00000	0,00085	0,00628	0,00444	0,00208
-0.044+0.00	0,00000	0,00000	0,00424	0,01005	0,00923

Distribución γ^{Cu} (l,l) en el material inicial de Punta Gorda

Tamaño	Valores de la función de distribución, , mm.A				
	(l), A				
	0.0-0.5	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,000005	0,000003	0,000002	0,000002	0,000002
-8.0+4	0,000014	0,000011	0,000013	0,000014	0,000012
-4.0+2.0	0,000014	0,000011	0,000010	0,000012	0,000012
-2.0+1.0	0,000088	0,000095	0,000118	0,000100	0,000047
-1.0+0.2	0,000000	0,000000	0,000076	0,000062	0,000018
-0.4+0.2	0,000000	0,000005	0,000047	0,000051	0,000031
-0.2+0.071	0,000000	0,000002	0,000115	0,000091	0,000041
-0.071+0.044	0,000000	0,000081	0,000091	0,000077	0,000032
-0.044+0.00	0,000000	0,000000	0,000081	0,000233	0,000200

Distribución γ^{Zn} (l,l) en el material inicia de Punta Gorda l

Tamaño l,mm	Valores de la función de distribución, mm.A				
	(l), A				
	0.0-0.5	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-4	4.0-6.0
-10+8.0	0,000004	0,000003	0,000002	0,000002	0,000002
-8.0+4	0,000022	0,000018	0,000017	0,000017	0,000015
-4.0+2.0	0,000026	0,000018	0,000013	0,000015	0,000014
-2.0+1.0	0,000281	0,000201	0,000204	0,000162	0,000089
-1.0+0.2	0,000000	0,000000	0,000144	0,000143	0,000055
-0.4+0.2	0,000000	0,000019	0,000142	0,000137	0,000100
-0.2+0.071	0,000000	0,000009	0,000388	0,000291	0,000144
-0.071+0.044	0,000000	0,000028	0,000179	0,000143	0,000075
-0.044+0.00	0,000000	0,000000	0,000242	0,000691	0,001847

Anexo 11 Contenido de los elementos en el material inicial γ (l, ρ)

Distribución γ^{Ni} (l, ρ) en el material inicial de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Ni, cm ³ /mm.g				
	l,mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,02	0,0165	0,1888	0,1194	0,0429
-2.92+2.90	0,00	0,0117	0,0223	0,0267	0,0309
-2,90+2,70	0,00	0,0109	0,0194	0,0224	0,0586
-2,70+2,50	0,00	-	0,0061	0,0378	0,0249
-2,50+0,0	0,63	0,2486	0,2653	0,1289	0,0536

Distribución γ^{Co} (l, ρ) en el material inicial de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Co, cm ³ /mm.g				
	l,mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,0076	0,0071	0,1680	0,0355	0,0055
-2,92+2,90	-	0,0026	0,0116	0,0144	0,0040
-2,90+2,70	-	0,0011	0,0022	0,0075	0,0059
-2,70+2,50	-	-	0,0010	0,0103	0,0024
-2,50+0,0	0,0540	0,0053	0,0955	0,0273	0,0079

Distribución γ^{Fe} (l, ρ) en el material inicial de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Fe, cm ³ /mm.g				
	l,mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,6875	0,0305	4,3452	3,8571	1,7816
-2,92+2,90	-	0,0248	0,4381	0,7656	1,3074
-2,90+2,70	-	0,0240	0,1979	0,7528	1,0585
-2,70+2,50	-	-	0,0938	0,7379	0,4447
-2,50+0,0	7,5296	0,8880	5,0885	2,7536	1,8096

Distribución γ^{Mg} (l, ρ) en el material inicial de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Mg, cm ³ /mm.g				
	l,mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,0355	0,0305	0,2872	0,0766	0,0269
-2,92+2,90	-	0,0248	0,0323	0,0154	0,0229
-2,90+2,70	-	0,0240	0,0128	0,0186	0,0288
-2,70+2,50	-	-	0,0150	0,0590	0,0186
-2,50+0,0	1,4950	0,8880	0,8888	0,2951	0,0269

Distribución γ^{Al} (l, ρ) en el material inicial de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Al, cm ³ /mm.g				
	l,mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,1914	0,1998	1,410	0,6371	0,2830
-2,92+2,90	-	0,1007	0,156	0,1555	0,2177
-2,90+2,70	-	0,0815	0,075	0,1423	0,2093
-2,70+2,50	-	-	0,036	0,2323	0,0782
-2,50+0,0	5,3347	4,5567	4,985	0,5174	0,2099

Distribución $\gamma^{SiO_2}(l, \rho)$ en el material inicial de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de SiO ₂ , cm ³ /mm.g				
	l,mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,0210	0,0559	0,4328	0,2701	0,1274
-2,92+2,90	-	0,0309	0,0535	0,0615	0,0985
-2,90+2,70	-	0,0280	0,0275	0,0606	0,1003
-2,70+2,50	-	-	0,0141	0,0593	0,0229
-2,50+0,0	11,1075	4,3799	3,4808	1,0520	0,1503

Distribución $\gamma^{Cr}(l, \rho)$ en el material inicial de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Cr, cm ³ /mm.g				
	l,mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,0243	0,0415	0,0020	0,1016	0,0492
-2,92+2,90	-	0,0124	0,0002	0,0157	0,0547
-2,90+2,70	-	0,0085	0,0001	0,0311	0,0529
-2,70+2,50	-	-	0,0000	0,0092	0,0221
-2,50+0,0	0,1176	0,1040	0,3343	0,1111	0,0347

Distribución $\gamma^{Mn}(l, \rho)$ en el material inicial de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Mn, cm ³ /mm.g				
	l,mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,0558	0,0588	1,3828	0,2565	0,0519
-2,92+2,90	-	0,0232	0,1505	0,0401	0,0383
-2,90+2,70	-	0,0180	0,0154	0,0553	0,0334
-2,70+2,50	-	-	0,0087	0,0759	0,0162
-2,50+0,0	0,6509	0,1725	0,8198	0,1951	0,0530

Distribución $\gamma^{Cu}(l, \rho)$ en el material inicial de Punta Gorda

Densidad g/cm ³	Contenido de Cu, cm ³ /mm.g				
	l,mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,0003	0,0006	0,0065	0,0020	0,0025
-2,92+2,90	-	0,0003	0,0007	0,0020	0,0019
-2,90+2,70	-	0,0003	0,0003	0,0011	0,0023
-2,70+2,50	-	-	0,0002	0,0009	0,0008
-2,50+0,0	0,0129	0,0063	0,0080	0,0047	0,0015

Distribución $\gamma^{Zn}(l, \rho)$ en el material inicial de Punta Gorda

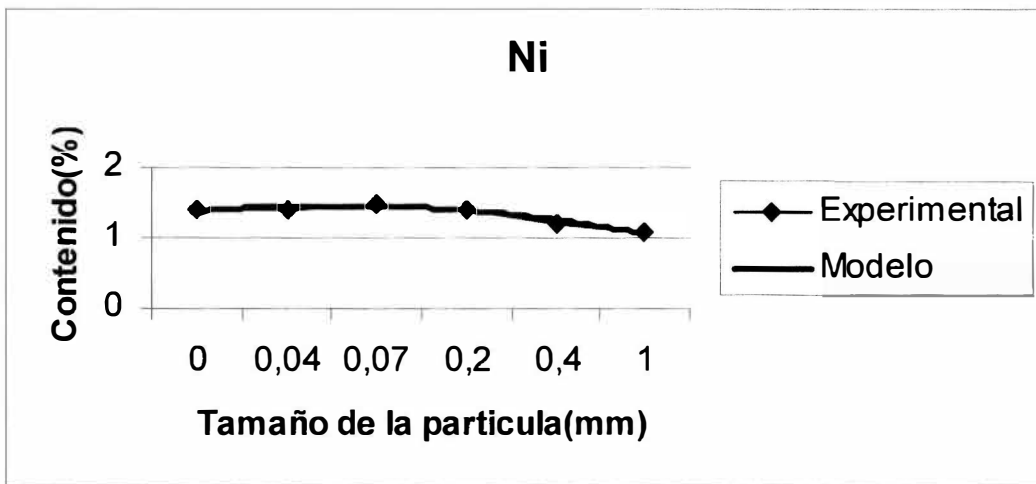
Densidad g/cm ³	Contenido de Zn, cm ³ /mm.g				
	l,mm				
	-4.0+2.0	-2.0+1.0	-1.0+0.4	-0.4+0.2	-0.2+0.071
-2,935+2,92	0,0004	0,0017	0,0189	0,0123	0,0043
-2.92+2.90	-	0,0008	0,0019	0,0025	0,0034
-2,90+2,70	-	0,0006	0,0007	0,0025	0,0038
-2,70+2,50	-	-	0,0000	0,0020	0,0019
-2,50+0,0	0,0234	0,0111	0,0151	0,0047	0,0028

Anexo 12. Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales.

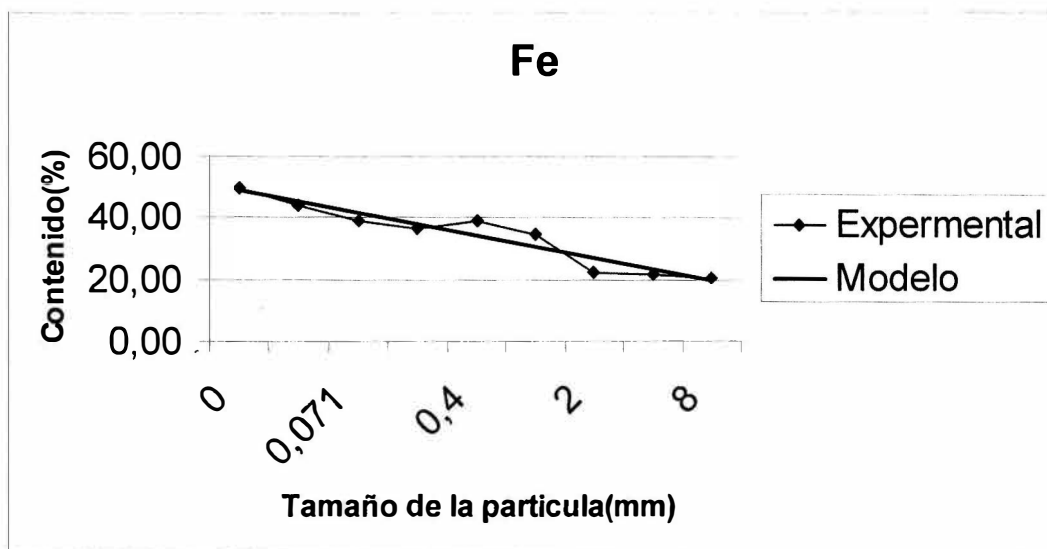
Anexo 12 a. Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales atendiendo al $\beta(l)$ de Punta Gorda

Tamaño	Ni		Fe		Al		SiO ₂		Mg		Cr	
	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo
-10+8	1,80	1,5	20,69	18,24	12,76	13,28	20,16	38,96	5,67	4,88	0,27	0,01
-8+4	1,56	1,42	21,85	28,65	9,83	6,59	22,16	13,30	5,54	3,13	0,23	0,03
-4+2	1,60	1,33	22,18	35,90	9,62	4,64	19,38	7,77	5,92	2,50	0,27	0,07
-2+1	1,08	1,11	34,63	40,20	5,32	3,90	6,71	5,94	1,87	0,89	1,30	0,16
-1+0.4	1,20	1,25	39,20	43,01	4,15	3,51	4,43	5,06	1,08	0,84	2,11	0,53
-0.4+02	1,42	1,35	36,50	44,00	4,10	3,39	3,94	4,79	0,79	0,82	2,09	1,30
-0.2+0.071	1,50	1,47	38,91	44,64	3,65	3,31	4,01	4,63	0,70	0,81	2,37	4,98
-0.071+0.044	1,40	1,39	43,90	44,78	3,44	3,30	3,75	4,59	0,57	0,80	2,68	9,26
-0.044+0.00	1,38	1,36	49,66	44,99	3,51	3,27	3,41	4,54	0,43	0,80	1,96	1,96
Análisis de datos												
R ²	0,92		0,91		0,95		0,85		0,92		0,90	
Fcal	1,08		0,77		0,60		0,002		0,68		0,26	
F crítico	4,49		4,49		4,49		4,49		4,49		4,49	
Probabilidad	0,32		0,39		0,044		0,97		0,41		0,62	

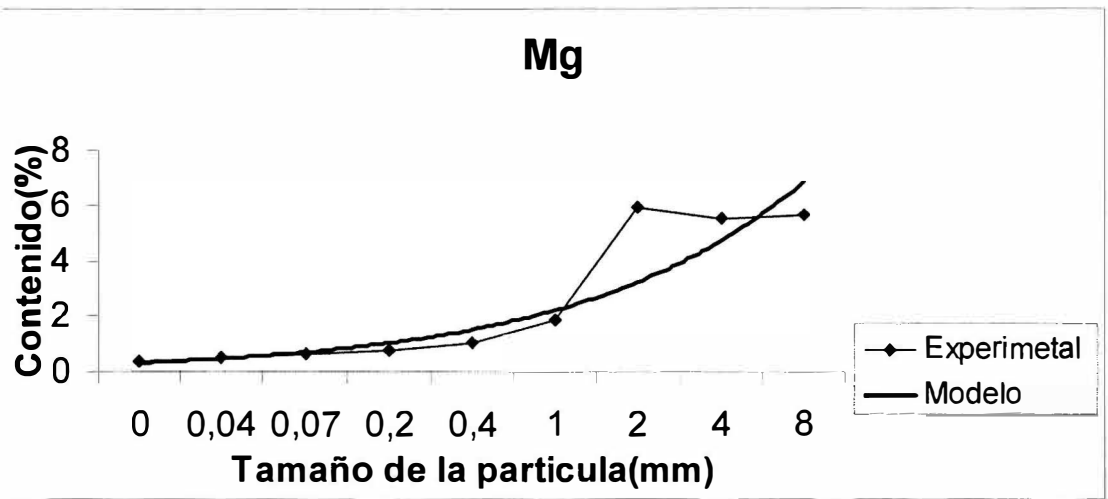
(Cont. 12a) Figuras comparativas de contenido $\beta(l)$ para los elementos principales entre el modelo y los valores experimentales atendiendo al tamaño de la partícula de Punta Gorda.



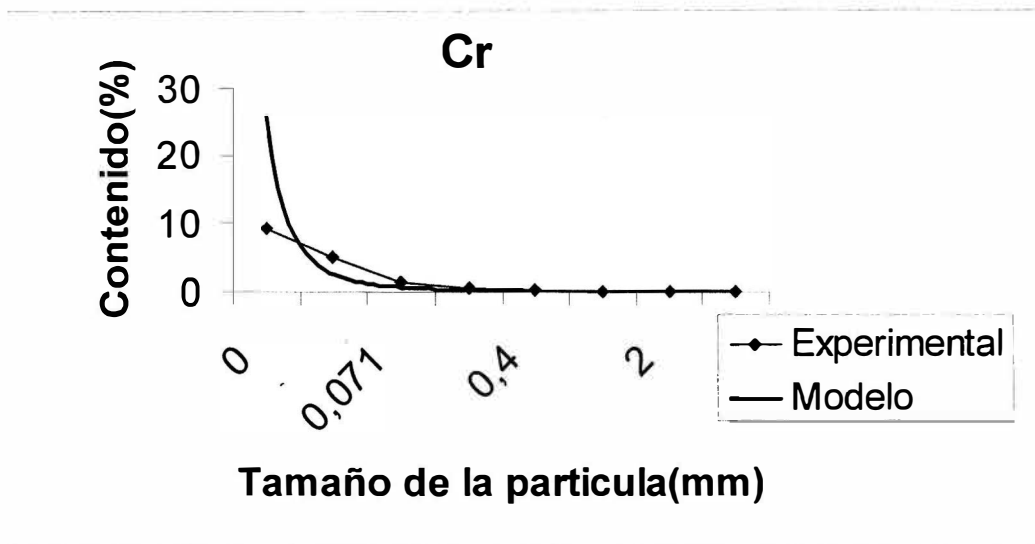
Anexo 12a. Fig. I. Variación de contenido de Ni en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda.



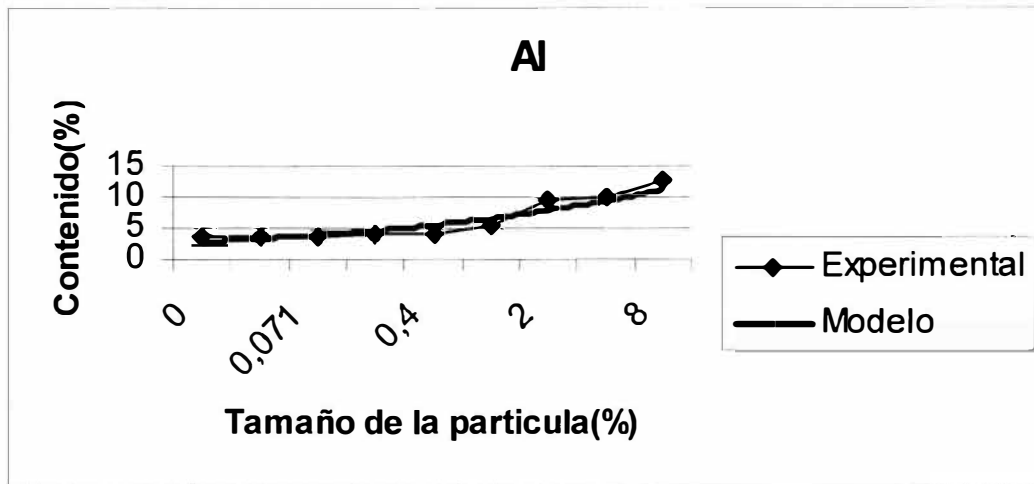
Anexo 12a. Fig. II. Variación de contenido de Fe en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda.



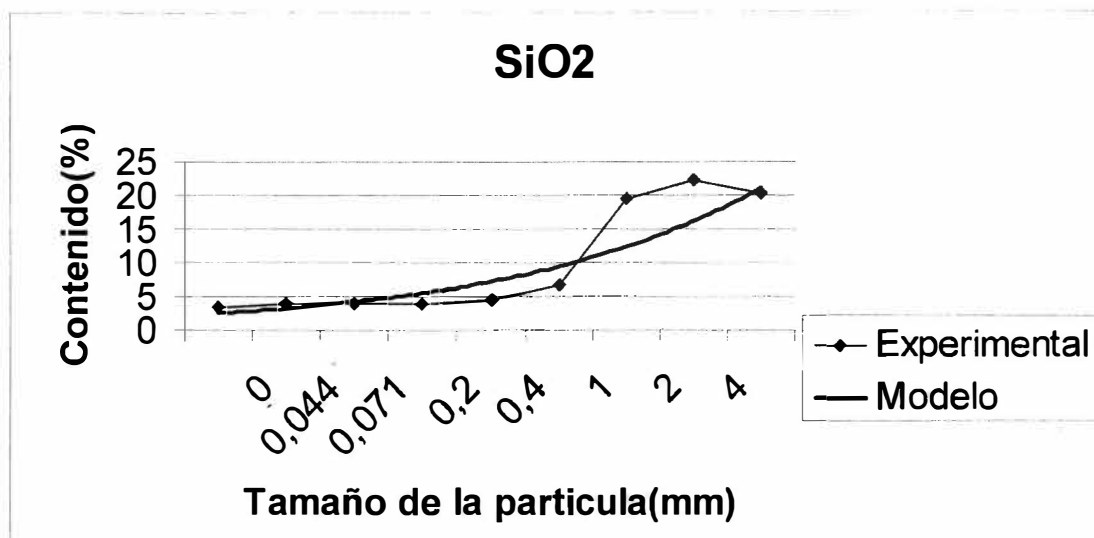
Anexo 12a. Fig. III. Variación de contenido de Mg en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda



Anexo 12a. Fig. IV. Variación de contenido de Cr en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda



Anexo 12a. Fig. V. Variación de contenido de Al en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda



Anexo 12a. Fig. VI. Variación de contenido de SiO₂ en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda.

Anexo 12 b Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales contenido atendiendo al tamaño de la partícula y la intensidad de la corriente, $\beta(l, I)$ de Punta Gorda.

l (mm)	I (A)	Ni		Fe		Al		SiO ₂		Mg		Cr	
		$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo	$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo
8	0.5	2,01	1,07	25,00	28,40	6,29	6,78	16,64	15,97	5,12	5,61	0,04	1,53
	1	2,14	1,21	22,40	26,88	7,57	7,15	21,21	16,99	5,20	5,81	0,04	0,99
	2	1,98	1,49	20,57	24,08	7,29	7,97	21,99	19,25	5,26	6,24	0,04	0,41
	4	2,24	2,05	20,50	19,33	7,61	9,89	25,21	24,71	5,64	7,20	0,04	0,07
	6	1,80	2,61	20,43	15,51	7,78	12,27	25,50	31,72	7,20	8,30	0,04	0,01
4,0	0.5	1,5	1,07	27,11	28,40	7,96	6,78	15,42	15,97	6,52	5,61	0,30	1,53
	1	2,0	1,21	21,80	26,88	6,41	7,15	20,48	16,99	6,53	5,81	0,21	0,99
	2	2,2	1,49	20,73	24,08	7,41	7,97	20,78	19,25	6,54	6,24	0,05	0,41
	4	2,3	2,05	20,67	19,33	7,79	9,89	22,83	24,71	7,22	7,20	0,05	0,07
	6	2,2	2,61	22,30	15,51	9,06	12,27	24,44	31,72	7,34	8,30	0,04	0,01
2,0	0.5	1,6	1,07	26,41	28,40	7,00	6,78	14,98	15,97	6,30	5,61	0,70	1,53
	1	2,1	1,21	21,74	26,88	8,14	7,15	17,24	16,99	5,62	5,81	0,52	0,99
	2	2,3	1,49	21,10	24,08	9,03	7,97	18,20	19,25	6,57	6,24	0,45	0,41
	4	2,4	2,05	21,37	19,33	9,73	9,89	18,64	24,71	7,42	7,20	0,40	0,07
	6	2,8	2,61	20,11	15,51	10,98	12,27	19,24	31,72	7,83	8,30	0,36	0,01
1,0	0.5	1,2	1,07	35,26	28,40	4,94	6,78	12,81	15,97	5,18	5,61	1,87	1,53
	1	1,8	1,21	24,78	26,88	7,44	7,15	13,69	15,97	5,91	5,81	0,56	0,99
	2	2,2	1,49	22,37	24,08	9,02	7,97	14,85	16,99	6,42	6,24	0,31	0,41
	4	2,1	2,05	21,39	19,33	10,65	9,89	16,63	19,25	5,61	7,20	0,28	0,07
	6	1,7	2,61	21,91	15,51	11,67	12,27	17,09	24,71	6,46	8,30	0,03	0,01
0,4	0.5	0,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	1,4	1,49	40,61	24,08	1,49	1,49	3,35	1,54	2,96	2,31	1,50	0,41
	4	1,6	2,05	28,80	19,33	1,85	1,85	4,21	1,98	3,63	2,66	1,43	0,07
	6	1,4	2,61	25,58	15,51	2,29	2,29	5,84	2,54	2,42	3,07	0,56	0,01

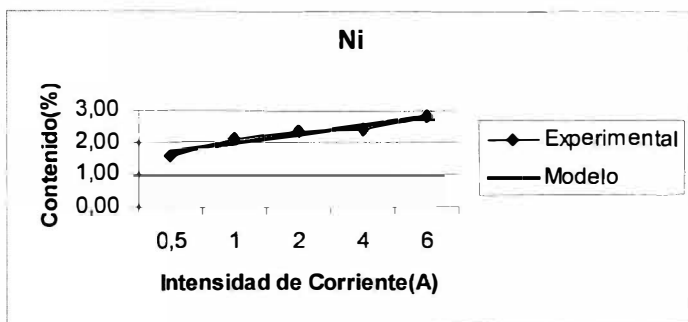
Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales contenido atendiendo al tamaño de la partícula y la intensidad de la corriente, $\beta(l, I)$.

(Continuación anexo 12b)

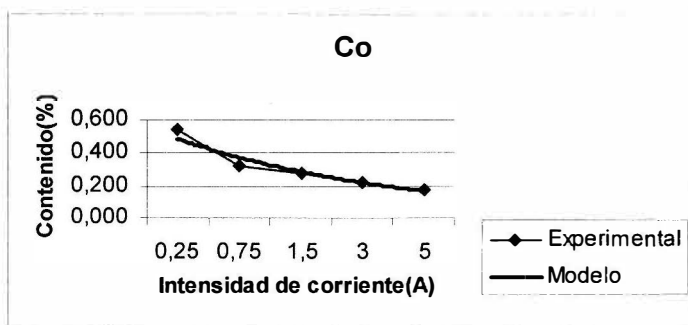
I (A)	Ni		Fe		Al		SiO ₂		Mg		Cr	
	$\beta(\Pi)$ exp	$\beta(\Pi)$ modelo	$\beta(\Pi)$ exp	$\beta(\Pi)$ modelo	$\beta(\Pi)$ exp	$\beta(\Pi)$ modelo	$\beta(\Pi)$ exp	$\beta(\Pi)$ modelo	$\beta(\Pi)$ exp	$\beta(\Pi)$ modelo	$\beta(\Pi)$ exp	$\beta(\Pi)$ modelo
0.5	0,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,3	1,21	47,70	44,80	3,30	1,34	3,06	1,36	0,62	2,15	1,83	3,84
2	1,5	1,49	44,85	40,13	3,56	1,27	3,10	1,54	0,72	2,31	1,63	1,60
4	1,6	2,05	42,30	32,21	3,79	1,34	3,08	1,98	0,63	2,66	1,46	0,28
6	1,5	2,61	42,37	25,86	3,78	1,27	3,44	2,54	0,54	3,07	1,20	0,05
0.5	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,0	1,21	54,20	44,80	2,89	7,15	2,31	1,36	0,76	2,15	3,96	3,84
2	1,1	1,49	53,23	40,13	3,27	7,97	2,60	1,54	0,88	2,31	3,80	1,60
4	1,0	2,05	49,72	32,21	3,43	9,89	2,66	1,98	0,94	2,66	3,74	0,28
6	1,2	2,61	45,32	25,86	3,67	12,27	3,25	2,54	0,76	3,07	3,22	0,05
0.5	0,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,8	1,21	55,93	44,80	2,47	1,34	2,36	1,36	0,72	2,15	3,52	3,84
2	0,9	1,49	56,53	40,13	2,82	1,27	2,48	1,54	0,74	2,31	3,00	1,60
4	1,0	2,05	54,10	32,21	2,99	1,34	2,62	1,98	0,77	2,66	2,89	0,28
6	1,2	2,61	43,28	25,86	3,71	1,27	3,51	2,54	0,66	3,07	2,56	0,05
0.5	0,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,84
2	0,9	1,49	57,20	40,13	2,43	1,27	2,34	1,54	0,49	1,52	1,07	1,60
4	1,0	2,05	59,85	32,21	2,56	1,34	2,39	1,98	0,50	1,30	1,27	0,28
6	1,3	2,61	54,48	25,86	3,45	1,27	3,01	2,54	0,40	1,27	1,52	0,05
sis de datos												
0,94		0,80		0,98		0,86		0,89		0,80		
0,59		2,38		0,19		0,05		1,29		0,94		
3,95		3,95		3,95		3,95		3,95		3,95		
0,45		0,13		0,67		0,82		0,26		0,33		

l (mm)	I (A)	Co	
		$\beta(l)$ exp	$\beta(l)$ modelo
8,0	0.5	0,541	0,556
	1	0,327	0,487
	2	0,281	0,374
	4	0,222	0,220
	6	0,174	0,129
4,0	0.5	0,413	0,556
	1	0,412	0,487
	2	0,266	0,374
	4	0,354	0,220
	6	0,356	0,129
2,0	0.5	0,422	0,556
	1	0,425	0,487
	2	0,400	0,374
	4	0,354	0,220
	6	0,312	0,129
1,0	0.5	0,613	0,556
	1	0,554	0,487
	2	0,411	0,374
	4	0,354	0,220
	6	0,348	0,129
Análisis de dato			
	R ²	0,96	
	Fcal	1,00	
	Fcrit	2,87	
	Prob.	0,43	
0,4	0.5	0,000	0,000
	1	0,000	0,000
	2	0,589	0,374
	4	0,767	0,220
	6	0,583	0,129
0,2	0.5	0,000	0,000
	1	0,416	0,000
	2	0,423	0,374
	4	0,440	0,220
	6	0,330	0,129
0.071	0.5	0,000	0,000
	1	0,229	0,000
	2	0,298	0,374
	4	0,318	0,220
	6	0,356	0,129
0,044	0.5	0,000	0,000
	1	0,151	0,000
	2	0,168	0,374
	4	0,173	0,220
	6	0,182	0,129
-0,044	0.5	0,000	0,000
	1	0,000	0,000
	2	0,074	0,374
	4	0,086	0,220
	6	0,087	0,129
Análisis de datos			
	R ²		
	Fcal	2,22	
	Fcrit	2,62	
	Prob.	0,09	

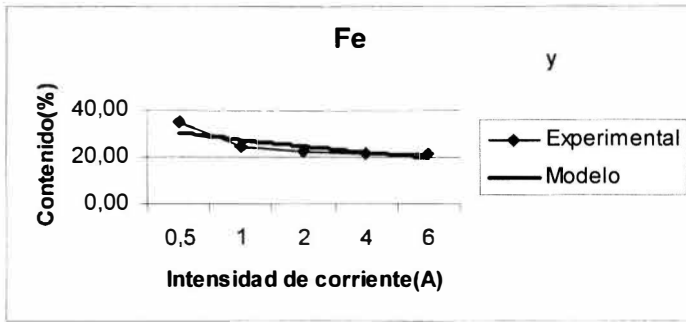
(Cont. 12b) Figuras comparativas de la función de distribución de contenido $\beta(l,I)$ para los elementos entre el modelo y los valores experimentales atendiendo al tamaño de la partícula y la intensidad de la corriente de Punta Gorda.



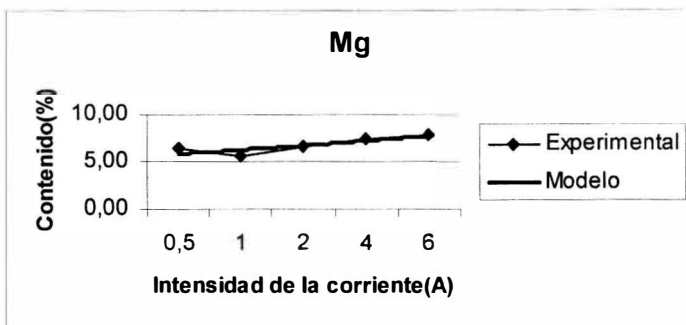
Anexo 12b. Fig. I. Variación de contenido de Ni según análisis magnético de la mena niquelífera del yacimiento Punta Gorda.



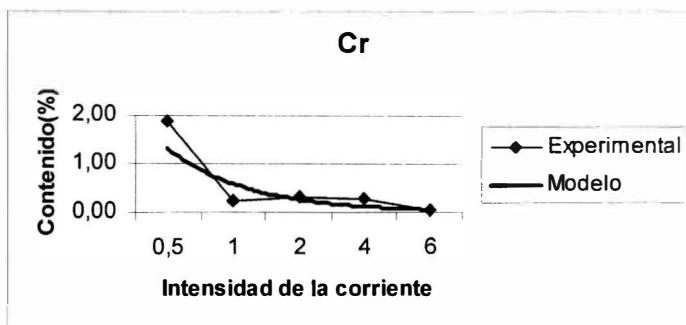
Anexo 12b. Fig. II. Variación de contenido de Co según análisis magnético de la mena niquelífera de Punta Gorda.



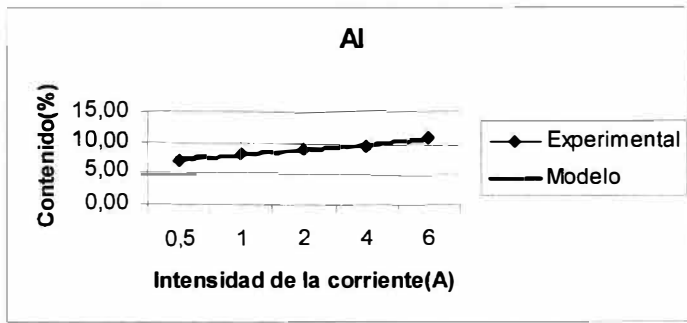
Anexo 12b.Fig. III. Variación de contenido de Fe según análisis magnético de la mena niquelífera de Punta Gorda



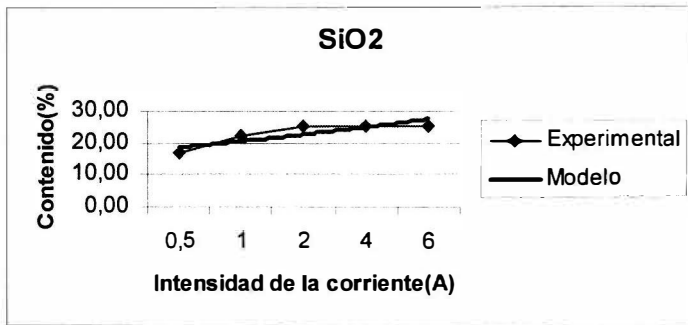
Anexo 12b Fig. IV. Variación de contenido Mg según análisis magnético de la mena niquelífera de Punta Gorda



Anexo 12b Fig. V. Variación de contenido de cromo según análisis magnético de la mena niquelífera de Punta Gorda.



Anexo 12b. Fig. VI. Variación de contenido de Al según análisis magnético de la mena níquelífera de Punta Gorda.

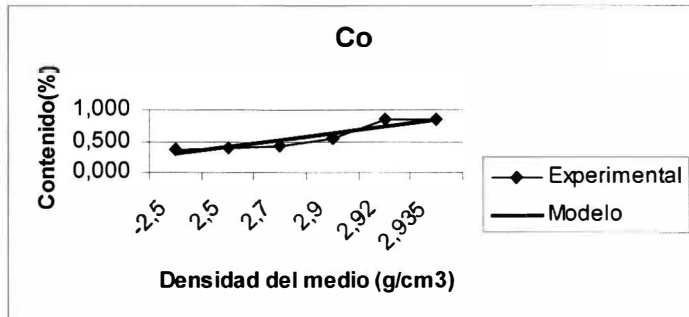


Anexo 12b. Fig. VII. Variación de contenido de SiO₂ según análisis magnético de la mena níquelífera de Punta Gorda

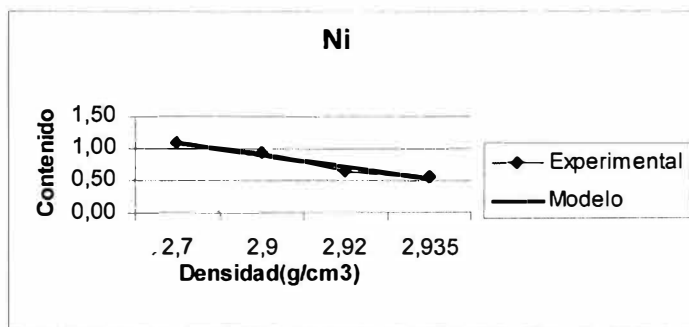
Anexo 12 c Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales atendiendo al tamaño de la partícula y la densidad del medio separador. $\beta(l, \rho)$ de Punta Gorda.

ρ (g/cm ³)	Ni		Fe		Al		SiO ₂		Mg		Cr	
	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$	$\beta(l\rho)$
	exp	modelo	exp	modelo	exp	modelo	exp	modelo	exp	modelo	exp	modelo
2,935	0,53	0,73	37,03	33,33	7,13	7,23	1,60	2,38	0,37	1,40	1,44	1,087
2,92	0,87	0,73	35,02	33,30	9,75	7,23	1,07	2,39	1,81	1,40	1,24	1,084
2,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
2,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
2,935	0,57	0,73	33,27	33,33	6,13	7,23	1,47	2,38	0,90	1,40	1,79	1,087
2,92	0,65	0,74	30,68	33,30	7,87	7,23	2,56	2,39	1,20	1,40	1,64	1,084
2,9	0,95	0,74	28,020	33,26	8,15	7,24	2,85	2,40	2,01	1,42	1,00	1,08
2,7	1,09	0,78	28,11	32,90	8,15	7,30	2,85	2,48	2,40	1,52	0,85	1,04
2,5	0,00	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
2,935	0,73	0,73	26,33	33,33	5,45	7,23	1,28	2,38	0,51	1,40	1,40	1,087
2,92	0,96	0,74	22,09	33,30	7,17	7,23	2,54	2,39	1,46	1,40	0,01	1,084
2,9	1,041	0,74	20,47	33,26	7,447	7,24	2,83	2,40	1,51	1,42	0,01	1,08
2,7	1,970	0,78	20,14	32,90	7,620	7,30	2,71	2,48	1,30	1,52	0,01	1,04
2,5	1,310	0,82	20,00	32,54	7,650	7,37	3,00	2,56	3,21	1,63	0,01	1
2,935	0,73	0,73	26,33	33,33	3,63	7,23	1,71	2,38	0,32	1,40	1,02	1,087
2,92	0,79	0,74	25,51	33,30	4,21	7,23	1,79	2,39	0,51	1,40	0,67	1,084
2,9	0,8	0,74	22,90	33,26	4,65	7,24	1,84	2,40	0,46	1,42	0,47	1,08
2,7	0,72	0,78	24,22	32,90	4,58	7,30	1,95	2,48	0,60	1,52	1,00	1,04
2,5	1,24	0,82	24,27	32,54	7,64	7,37	1,95	2,56	1,94	1,63	0,30	1
1 2,935	1,00	0,73	35,89	33,33	3,75	7,23	1,77	2,38	0,45	1,40	1,01	1,087
2,92	0,60	0,74	24,94	33,30	3,96	7,23	1,78	2,39	0,38	1,40	0,69	1,084
2,9	0,58	0,74	24,56	33,26	4,09	7,24	1,85	2,40	0,43	1,42	1,03	1,08
2,7	1,14	0,78	20,58	32,90	4,07	7,30	1,95	2,48	0,56	1,52	1,03	1,04
2,5	1,14	0,82	20,35	32,54	3,58	7,37	1,05	2,56	0,85	1,63	1,01	1
-2,5												
lisis de datos												
	0,96		0,88		0,83		0,90		0,97		0,93	
	1,06		3,06		1,72		1,76		2,21		1,77	
	4,04		4,04		4,04		4,04		4,04		4,04	
	0,31		0,09		0,20		0,19		0,14		0,19	

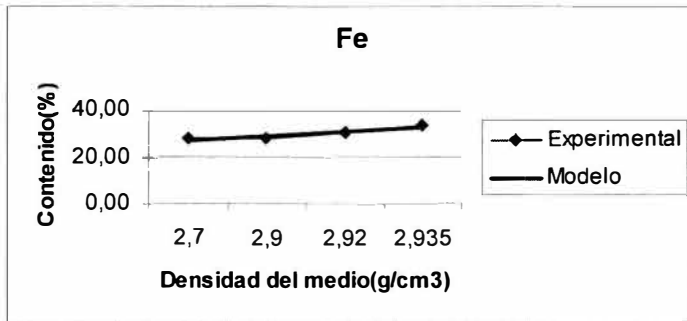
(Cont. Anexo 12c) Figuras comparativas de la función de distribución de contenido $\beta(l, \rho)$ para los elementos entre el modelo y los valores experimentales atendiendo al tamaño de la partícula y la densidad del medio de Punta Gorda.



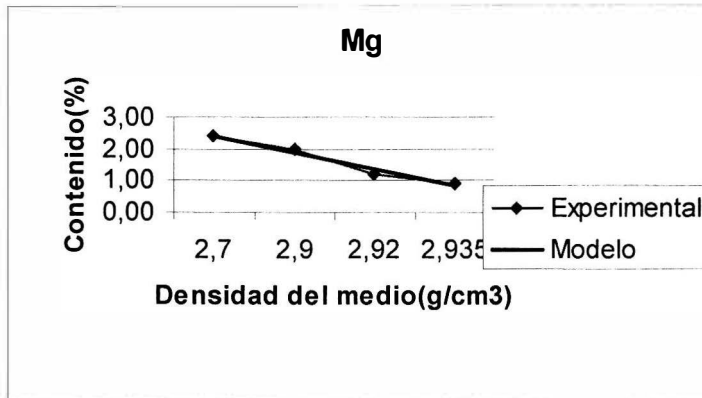
Anexo 12c. Fig. I Variación de contenido de Co según análisis densométrico de la mena niquelífera de Punta Gorda.



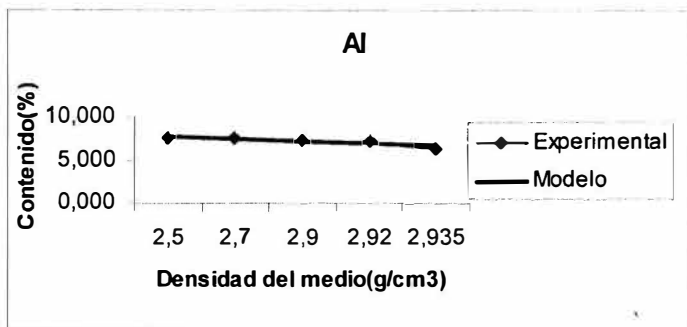
Anexo 12c. Fig. II. Variación de Ni según análisis densométrico de la mena niquelífera de Punta Gorda.



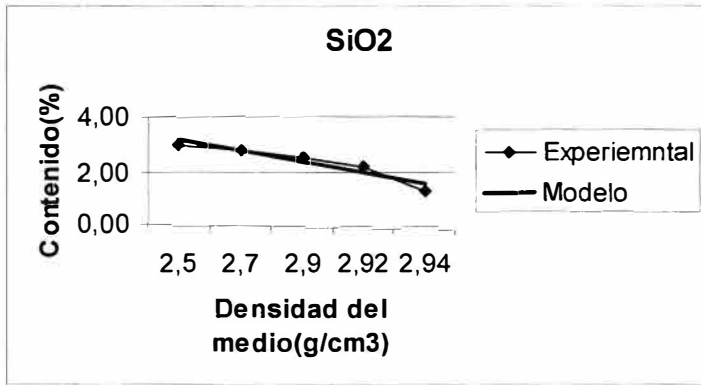
Anexo 12c. Fig. III. Variación de Fe según análisis densométrico de la mena niquelífera de Punta Gorda



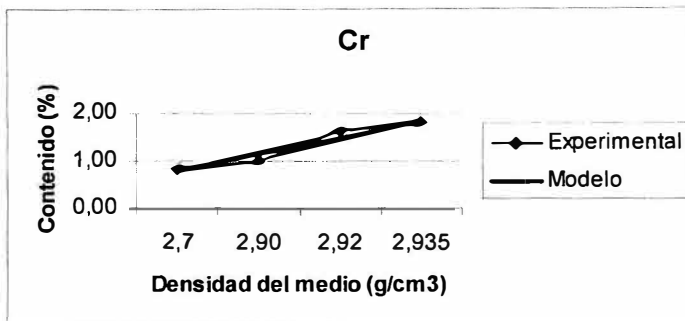
Anexo 12c. Fig. VI. Variación de Mg según análisis densométrico de la mena niquelífera de Punta Gorda.



Anexo 12c. Fig. V. Variación de Al según análisis densométrico de la mena niquelífera de Punta Gorda.



Anexo 12c. Fig. VI Variación de SiO₂ según análisis densométrico de la mena níquelífera de Punta Gorda.



Anexo 12c. Fig. VII. Variación de Cr según análisis densométrico de la mena níquelífera de Punta Gorda.