

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS PULPAS ACUOSAS DE MINERALES LATERÍTICOS

Aida Álvarez Alonso, José Antonio Alonso, Mailene Duménigo, José Castellanos Suárez

Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica, Cuba, Carretera Varona 12028 Km 1½, Boyeros, La Habana. Correo electrónico aidaa@gms.minbas.cu

RESUMEN

Se realiza un estudio de las propiedades físico-químicas de pulpas de minerales lateríticos preparadas a partir de dos muestras procedentes de los yacimientos "Camarioca Sur" y "San Felipe" (Tipo VI; bajo magnesio), ubicados en Moa-Baracoa y Camagüey respectivamente, con el objetivo de evaluar la relación de dichas propiedades con los diferentes comportamientos encontrados en trabajos anteriores en los procesos de sedimentación y preparación de pulpas cuando se emplean aditivos.

Para el estudio se emplean diversas técnicas de análisis como Difracción de Rayos-X; Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) con EDAX; Espectrometría de Absorción Atómica (EAA) y Espectroscopia de Emisión Atómica con Plasma Acoplado por Inducción (ICP-OES), etc.

Se encontró una relación de la especiación sustancial de las menas lateríticas con los mecanismos básicos que gobiernan el comportamiento de estas pulpas, la formación incipiente de óxidos de hierro adicionales del tipo hematita y goethita, así como el óxido de aluminio (bayerita), cuando se utilizaron los modificadores base hierro y aluminio en la muestra de "Camarioca Sur".

Se observó una regularidad en el comportamiento de estos materiales cuando se calculó el índice relativo de fases de hierro (amorfo/cristalinas) hidrogoethita/goethita, el cual resultó ser mayor para Camarioca Sur, si se compara con las saprolitas arcillosas de "San Felipe", en las que predominan la arcilla cristalina nontronita, en mezcla con los óxidos amorfos de silicio hidratados (ópalo, calcedonia, marshalita), los que dadas sus propiedades físico-químicas relevantes: grado coloidal y adsorción de agua (hinchamiento), muy superiores para las arcillas esmectíticas, hacen que se dificulten los procesos posteriores de preparación de pulpas, aún en presencia de aditivos, lo que pudiera ser un elemento favorable para la comprensión de estos procesos.

No se encontró una modificación en la composición química de las pulpas por la acción de los aditivos, pero si granulometrías muy diferentes para ambos tipos de minerales y una posible influencia de los aditivos respecto al grado de fineza.

ABSTRACT

It had been performed a study of physical-chemical properties of lateritic ore pulps prepared from two samples of "Camarioca South" and "San Felipe" (Type VI, low magnesium) deposits - located in Moa-Baracoa and Camaguey respectively - in order to assess the relationship of these properties with the different behaviours found in previous works on the sedimentation processes and preparation of pulps when using additives.

For the study were used various analysis techniques such as X-ray diffraction, scanning electron microscopy (SEM) with EDAX, atomic absorption spectrometry (AAS) and atomic emission spectroscopy with inductively coupled plasma (ICP-OES).

It was found a substantial relationship between the speciation of lateritic ores with basic mechanisms that govern the behaviour of these pulps, the incipient formation of additional iron oxides hematite as well as goethite type and aluminium oxide (bayerite), when iron base and aluminium modifiers were used in the sample of "Camarioca South."

There was a regularity in the behaviour of these materials when calculating the relative index of iron phases (amorphous / crystalline) hidrogoethite / goethite, which was greater for South Camarioca, compared with the clayey saprolite "San Felipe", where nontronite crystal clay is dominant, mixed with hydrated silicon oxide amorphous (opal, chalcedony, marshalite), which because of its relevant chemical properties: colloidal grade and water absorption (swelling), much higher for smectite clays, make difficult the subsequent processes of preparation of pulps, even in the presence of additives, which could be a favourable factor for understanding these processes.

We found no change in the chemical composition of pulps by the action of additives, but very different grain sizes for both types of minerals and a possible influence of additives on the degree of fineness.

INTRODUCCION

La industria del níquel es una de las principales fuentes de riquezas de Cuba y los depósitos de lateritas niquelíferas son su más importante recurso mineral. Cuba cuenta con amplias reservas de Ni en cortezas de intemperismo lateríticas que se localizan en varios depósitos del macizo oriental Moa – Baracoa. En la actualidad existen en el país dos plantas metalúrgicas activas, una con la tecnología carbonato – amoniacal (proceso Caron) y otra con la tecnología de lixiviación ácida a presión (HPAL) que se ubican al Norte de la provincia de Holguín. El trabajo que nos ocupa se refiere solo a la tecnología ácida.

El CIPIMM ha venido trabajando durante varios años en el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de nuestros minerales niquelíferos y la mejora de los procesos ya existentes. Estas tecnologías han tenido como base fundamental la modificación de las propiedades físico químicas de las pulpas por diferentes vías. Algunas de estas tecnologías se encuentran ya aplicadas en la industria y otras están en vías de aplicación, sin embargo no existe un conocimiento completo de los fenómenos que rigen estos procesos.

Tecnología 1.- Incremento del % de Sólidos en los espesadores de pulpa cruda de Moa Nickel: Esta tecnología logra un incremento del % de sólidos en el flujo de fondo de los sedimentadores de más de un 2 % y a la vez incrementa la productividad del mismo en más de 1,5 veces. La tecnología fue probada inicialmente en el CIPIMM a escala de Laboratorio y Planta Piloto y luego en la Empresa Moa Nickel a escala piloto y finalmente a escala industrial. La tecnología fue introducida en uno de los sedimentadores y luego generalizada al resto hasta su introducción total en la industria (Alfonso, Certificado de Patente No. 23357 y Castellanos, Certificado de Patente No. 23478).

Tecnología 2.- Preparación Directa de Pulpa: Esta tecnología, basada también en el empleo de aditivos, en un inicio estuvo dirigida al procesamiento de los minerales de San Felipe, donde la pulpa cruda poseía propiedades muy diferentes a las de las pulpas obtenidas con minerales de los yacimientos hasta entonces conocidos en el país, debido fundamentalmente al alto contenido de arcillas, obteniéndose atractivos resultados en escala de Planta Piloto pequeña. Este alto contenido de arcillas es el responsable de las pésimas características de sedimentación que presentan las pulpas crudas, aun con el uso de floculantes, y de que su manipulación, en general, fuese muy compleja por la alta viscosidad que las mismas presentan. Más tarde este mismo proceder se empleó con éxito para el tratamiento de los minerales complejos que deberá asimilar Moa Nickel en el futuro (Camarioca Norte y Sur), los que presentan un desmejoramiento considerable de sus características de sedimentación. Teniendo en cuenta estos resultados el CIPIMM, de conjunto con Moa Nickel, decidió pasar a una prueba de Planta Piloto de mayor escala (2 t/h) en la propia Planta, confirmándose que se podría alcanzar un 48 % de sólidos y una viscosidad 10 veces menor que la de la pulpa cruda de igual concentración. El uso de esta tecnología elimina la necesidad de empleo de los sedimentadores. Otros minerales como la serpentina, los nódulos marinos, los minerales nontroníticos de Australia y otros, respondieron satisfactoriamente a esta tecnología (Certificado de Patente No. 23430).

En ambos casos los cambios en el comportamiento de las pulpas de minerales se obtienen mediante el empleo, en formas y dosis muy específicas, de diferentes aditivos que cambian entre otras cosas la viscosidad y compactación de las suspensiones.

Todo lo antes expresado nos define la necesidad de conocer la esencia de los procesos que rigen estos cambios, a fin de utilizarlos en su forma óptima y aplicar sus bondades a otros problemas similares.

Para este estudio se seleccionaron inicialmente los depósitos, por ser los existentes en el Centro y porque no es posible abarcarlos todos desde un principio:

- “San Felipe” bajo magnesio, el cual presenta interés económico para el país por sus amplias reservas de Ni y que se localiza en el peniplano Camagüey.
- Camarioca Sur, uno de los minerales complejos que deberá asimilar Moa Nickel en el futuro, que presentan una considerable afectación de sus características de sedimentación con relación a los minerales que hoy procesa la Planta.

Por tanto, los objetivos del Proyecto, que se ha planificado para dos años, pueden ser definidos como sigue:

- Realizar estudios de las propiedades físico-químicas de las pulpas de minerales niquelíferos y la influencia de diferentes agentes modificadores sobre ellas (2009-2010).
- Buscar correlaciones entre la naturaleza de estos efectos y las propiedades físico-químicas de las pulpas en estado natural y modificado, de manera que pueda predecirse el comportamiento e incluso aplicarse a otros tipos de minerales. (2010)

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la ejecución de este estudio se utilizaron dos muestras de diferentes: San Felipe VI (bajo magnesio) y Camarioca Sur y en su tratamiento se emplearon los reactivos:

- $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
- Solución H_2SO_4 (1N)

Los métodos empleados en cada uno de los estudios se detallan en los epígrafes correspondientes.

Preparación de las muestras

Las pulpas para los estudios se prepararon en las condiciones que se muestran en la Tabla I, teniendo en cuenta las experiencias obtenidas en las pruebas de las tecnologías 1 y 2 a los diferentes niveles. Para ello se emplearon los testigos de estos minerales conservados en el CIPIMM después de la realización de las investigaciones para el desarrollo y aplicación de estas tecnologías y otros trabajos relacionados.

Tabla I.- Condiciones de preparación de las pulpas para los estudios.

CONDICIONES	SAN FELIPE VI BAJO MAGNESIO	CAMARIOCA SUR
Molino Laboratorio (capacidad)	6L	6 L
RPM molino	35	70
Cantidad de barras	11	1
Tamaño barra	21 cm	21 cm
Peso barras	11900 g	1082 g
Tiempo molienda	3,5 minutos	10 min (desagregación)
Temperatura *	≈ 25°C	≈ 25°C

Granulometría	2,7 mm	2,5 mm
Peso de la muestra	1000 g	1000 g
% de H ₂ O en el mineral	33	19
Pe (peso específico del mineral)	2,7 g/cm ³	3,6 g/cm ³
% de sólido de la pulpa – 1 mm	25%	25%
% rechazo (f + 1 mm)	1,5%	1,85%

En el Anexo 1 se muestra el esquema de preparación de las muestras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las muestras

Análisis granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico de las muestras se pueden ver en la Tabla II, en la que se aprecia una significativa diferencia entre ambos materiales, prevaleciendo la fracción más fina (<0,074 mm) en las muestras de Camarioca Sur. Este hecho se corrobora más tarde con las micrografías, comprobándose que a esta escala también se mantiene la misma diferencia. Es decir una mayor fineza del mineral de Camarioca Sur.

Tabla II.- Análisis granulométrico

Granulometría en mm	% en peso	
	San Felipe	Camarioca Sur
-1 + 0,5	38,41	0,50
-0,5 + 0,2	5,31	4,90
Corte		
-0,2 + 0,1	4,72	1,13
-0,1 + 0,074	2,87	2,46
-0,074	48,99	88,01

Análisis Químico

Los análisis químicos se realizaron según la Norma DCM PT 0900 del Departamento de Caracterización de Materiales del CIPIMM que emplea la Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado por Inducción (ICP-AES por sus siglas en inglés) para el análisis de minerales de níquel. Los resultados se muestran en la Tabla III.

Tabla III.- Resultados de la caracterización química de las muestras de cabeza.

Identificación	Elementos (%)							
	Ni	Co	Fe	SiO ₂	Mg	Al	Cr	Mn
San Felipe VI	1,55	0,070	24,90	39,30	3,32	1,34	1,23	0,50
Camarioca Sur	1,49	0,152	51,26	11,16	3,66	11,91	1,49	0,70

De acuerdo a los resultados del análisis químico se observa una notable diferencia en el contenido de Fe, Si y Al entre ambos materiales, lo que está íntimamente relacionado al tipo de mineral, que es muy diferente en cada caso. El bajo contenido de Fe y alta sílice son típicos de las arcillas, que se encuentran en alto contenido en San Felipe.

Caracterización mineralógica

Para la caracterización mineralógica se emplearon combinaciones de las técnicas de:

➤ Difracción de Rayos X

Los difractogramas se obtuvieron por el método de polvo y se registraron en un equipo Philips modelo PW - 1710 con los siguientes parámetros de operación:

Tabla IV.- Parámetros de operación

Goniómetro	Vertical
Sistema de focalización	Bragg-Brentano
Radiación $K\alpha$	Fe
Filtro	Mn
Diferencia de potencial aplicada	30 kV
Corriente anódica	20 mA
Calibración del equipo	Se chequeó con el patrón externo de silicio (pastilla)
Registro angular	6-80° (2θ)

Todos los difractogramas se registraron según variante de medición punto a punto; paso angular de 0,05° (2θ), con el empleo de un tiempo de medición en cada posición angular de 3 segundos, lo cual garantiza la calidad requerida de los registros que se logran.

Los resultados numéricos de intensidades relativas y ángulos de difracción se convirtieron en difractogramas continuos con el empleo del programa "Origin 7.0". Las distancias interplanares se determinaron con el programa Ttod para PC. El análisis cualitativo de fases se realizó con la utilización de la base de datos PCPDFWIN; versión 1.30, de la JCPDS-ICDD / 2002, compatible con Windows 98 para Office 2000. Todas las muestras se analizaron en el difractómetro sin previa pulverización. Los difractogramas se muestran en el anexo 2.

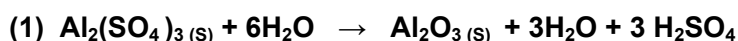
Los registros que se lograron para la muestras del mineral de "Camarioca Sur" (figura 1), reflejan la composición sustancial típica de los ocreos estructurales que se manifiestan comúnmente en todos los perfiles geológicos de los depósitos lateríticos de la región de Moa. En ellos se detectaron como fase cristalina fundamental, la goethita y/o alumogoethita: $\alpha\text{-(Fe, Al)OOH}$ que constituye un oxihidróxido de hierro de alto Peso Específico (P.E), cuyos valores oscilan entre 4,0- 4,4 g/cm³ en las menas limoníticas. Por otra parte, dicha fase cristalina coexiste en todas las muestras con su homólogo amorfo hidrogoethita, la que presenta a su vez contenidos variables de agua adsorbida en su composición estequiométrica: $\text{FeOOH} \cdot n \text{H}_2\text{O}$; P. E = 3,3- 4,0 g/cc. El resto de la composición sustancial de las muestras, lo conforman las especies cristalinas: talco (la arcilla del tipo silicato de magnesio), gibbsita (hidróxido de aluminio), clorita (aluminosilicato arcilla), espinelas de hierro (maghemita-magnetita y/o cromita) acompañadas siempre de la arcilla del grupo de las esmectitas nontronita en baja cuantía.

Un aspecto de relevancia en la muestra tecnológica del yacimiento "Camarioca Sur" es el contenido apreciable de la fase amorfa hidrogoethita que se detecta en todos los registros, la cual se distingue siempre por la pronunciada elevación (o deriva del fondo) que tiene lugar en el intervalo angular comprendido entre los 20-60° (2θ ; $K\alpha$ Fe), como señalan Alonso J. A et al (2007, 2009), entre otros autores.

Aunque solo se muestran los difractogramas de las muestras lavadas, también se obtuvieron los de las no lavadas y en el caso de Camarioca Sur la diferencia encontrada entre ambos se debe fundamentalmente a la pérdida de material amorfo hidrogoethita por el efecto del lavado con agua - como era de esperar- dada la naturaleza coloidal de esta fase, hecho que se demuestra en el incremento de cristalinidad (reflexiones más estrechas) que se observan en algunos de sus principales máximos de difracción como son: $d = 4,18$; $2,24$; $2,19$ y $1,71 \text{ \AA}^0$, con la correspondiente disminución de los valores del fondo del difractograma respecto a la muestra no-lavada. Lo anterior se complementa con el incremento del valor de la razón de intensidades (P/F) que se obtuvo para dos de sus principales máximos $d = 4,18 \text{ \AA}^0$ y el doblete $2,24$ - $2,19 \text{ \AA}^0$.

Si se comparan los resultados que se obtuvieron de la muestra de "Camarioca Sur" con aquellas que se trataron además con los aditivos de hierro y aluminio (figuras 2 y 3), se pueden plantear las siguientes regularidades respecto a la composición sustancial de las muestras:

1. La relación de intensidades (señal/fondo; P/F) de la reflexión: $d = 4,18 \text{ \AA}^0$ disminuye (en unidades relativas, u/r) desde 1,91 hasta 1,83 -1,80 (u/r) respectivamente, lo que indica el incremento de contenido de la fase amorfa hidrogoethita en la muestra sin lavar con agua.
2. La relación de intensidades que se observa para el doblete que aparece en el rango angular comprendido entre 45 - 55° (2θ); máximos de difracción: $d = 2,24$ - $2,19 \text{ \AA}^0$ y que se adjudica a la goethita cristalina, se modifica en dos sentidos diferentes cuando se emplearon los aditivos, si se comparan los respectivos registros con el del ensayo en blanco o cabeza (figuras 1). En tal sentido, cuando se utilizó el aditivo Al se aprecia un ligero incremento del máximo $d = 2,24 \text{ \AA}^0$ (figuras 3) si se compara con el máximo contiguo que se detecta al de distancia interplanar (d) $= 2,19 \text{ \AA}^0$, lo que indica la probable formación de una nueva fase, en este caso del tipo óxido de aluminio hidratado, bayerita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), una especie que resulta además estable en el rango de pH donde se utilizó. Lo anterior se puede explicar a través de la siguiente reacción:



De forma análoga, cuando se utilizó el aditivo de hierro se produce un cambio, pero esta vez en sentido inverso respecto a la relación de intensidades del doblete, pues se incrementa entonces y se ensancha por otro lado, el máximo $d = 2,20$ - $2,19 \text{ \AA}^0$, que se justifica en la aparición de un nuevo máximo de diferente naturaleza al del caso del aditivo aluminio, en este caso el óxido de hierro anhidro, hematita (α - Fe_2O_3), una fase que se corrobora dada la presencia de dos máximos adicionales de pequeña intensidad: en $d = 3,68$ y $1,84 \text{ \AA}^0$ respectivamente. La siguiente ecuación justifica lo expuesto a partir de la reacción de oxidación que experimenta el aditivo en solución acuosa a pH ácido:



3. Como un aspecto de interés se señala además que en el caso de las mediciones que se realizaron sin previo lavado de las muestras y tratamiento con el aditivo de Fe, el incremento de la relación de intensidades señal/fondo del doblete $d = 2,20$ - $2,19 \text{ \AA}^0$ va desde 1,17 hasta 1,23 (u/r), lo que se justifica por formación de otra nueva fase adicional, el óxido de hierro III anhidro hematita, que contribuye también al aumento del valor de la relación. La hipótesis anterior se confirma con el aumento de razón de intensidades (P/F) del máximo $d = 4,18 \text{ \AA}^0$ de la goethita cristalina desde un valor de 1,82 a 1,89 (u/r).



Ensayos similares se realizaron al mineral de “San Felipe”. La Tabla IV muestra un análisis comparativo respecto a la muestra de “Camarioca Sur” a fin de evaluar de forma cualitativa los contenidos de fase amorfa y cristalina que existen en ambos tipos litotecnológico de menas.

Tabla IV.- Resultados comparativos de contenidos de fase amorfa y cristalina en las muestras de “Camarioca Sur” y “San Felipe” evaluados a partir de las áreas totales correspondientes a la señal de fondo y los máximos de difracción de las fases cristalinas respectivamente.

Muestra	Tratamiento	Área (mm ²) de los máximos de difracción asociados a fases cristalinas	Área (mm ²) de Fondo (fase amorfa)	Relación Áreas Amorfo / Cristalina
Camarioca Sur	Al y lavada H ₂ O	6,236	36,841	5,91
Camarioca Sur	Fe y lavada H ₂ O	5,447	37,014	6,79
Camarioca Sur	lavada H ₂ O (Bk)	5,299	36,698	6,92
Camarioca Sur	Al sin lavar H ₂ O	4,951	36,300	6,09
Camarioca Sur	Fe sin lavar H ₂ O	6,011	38,842	6,46
Camarioca Sur	Sin lavar H ₂ O (Bk)	5,446	37,716	6,91
San Felipe	Al y lavada H ₂ O	5,654	24,547	4,34
San Felipe	Fe y lavada H ₂ O	5,055	24,968	4,93
San Felipe	lavada H ₂ O (Bk)	5,274	24,643	4,67
San Felipe	Al sin lavar H ₂ O	4,823	22,257	4,65
San Felipe	Fe sin lavar H ₂ O	4,834	23,767	4,92
San Felipe	Sin lavar H ₂ O (Bk)	5,446	23,775	4,36

El análisis de los resultados de la tabla indican que en el caso de las muestras de “Camarioca Sur” el contenido de fase amorfa resultó ser mucho mayor que en las muestras de “San Felipe” y por otro lado su especiación sustancial es también diferente, pues en “Camarioca Sur” se tratan de geles de oxihidróxidos amorfos de hierro del tipo hidrogoethita como ya se mencionó, mientras que en “San Felipe” el contenido de material amorfo es más bajo y está íntimamente asociado a una mezcla de óxidos de silicio hidratados del tipo ópalo y calcedonia según refieren algunos autores entre los que se mencionan a Formell, Cabrera, Chang y González, durante las investigaciones tanto geológicas y mineralógicas realizadas en este depósito que se justifican dada la génesis y las características morfoestructurales de los cuerpos minerales, los que resultan ser muy diferentes en ambos depósitos.

➤ Microscopia Electrónica de Barrido

La observación microestructural de las muestras objeto de estudio se realizó en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de tipo ambiental de la firma Philips, modelo XL30 ESEM del Instituto SEGEMAR (Argentina). La composición química elemental puntual se analizó mediante una microsonda dispersiva en energía (EDAX) acoplada al MEB.

El Anexo 3 muestra las micrografías obtenidas, estas fueron obtenidas con un aumento 100X (200 μ = 4 cm).

Las micrografías muestran una gran diferencia entre los dos tipos de muestras. Las muestras de Camarioca Sur son muy homogéneas (de granos redondeados y de igual tamaño) con respecto a las de San Felipe, en las que se observan partículas irregulares y de muy diferentes tamaños. Como ya se había visto en el análisis granulométrico, las muestras de Camarioca Sur son mucho más finas, solo un pequeño número de partículas alcanza entre 25 y 100 μ , siendo el resto finísimo, mientras que las muestras de San Felipe presentan muchas partículas que llegan hasta los 200-300 μ y de formas muy irregulares. Estas formas son típicas de las arcillas y son generalmente responsables del

comportamiento de las mismas, tal como lo presenta Push⁷ en sus estudios de la microestructura de las arcillas.

Se observa además que las partículas son aun más finas en las muestras de Camarioca Sur con aditivos, lo que pudiera ser solo casual por el pequeño tamaño de las muestras que se emplean para esta técnica, pero no se aprecia este comportamiento en las muestras de San Felipe. Para llegar a conclusiones más seguras este aspecto deberá ser mejor estudiado.

Pruebas de espesamiento

Las pruebas de sedimentación se llevaron a cabo en probetas de 1 L en forma estática, realizándose la evaluación de por la Norma Ramal para ambos minerales (San Felipe y Camarioca Sur), para lo que se prepararon pulpas al 20% de sólidos y se adicionaron las sales de Fe y Al en las condiciones óptimas estudiadas con anterioridad (Herrera, Bobes, Castellanos-2001,2002,2003,2006, Alfonso-2003, Iglesias 2006).

En el caso de San Felipe, bajo las condiciones del ensayo, no ocurrió sedimentación alguna para ninguna de las sales en el tiempo estudiado (72 h). Los resultados de Camarioca Sur se muestran en la Tabla V. Los datos y gráficos correspondientes a estas pruebas se muestran en el Anexo 5.

Los resultados obtenidos corroboran los ya observados en trabajos anteriores: incremento del contenido de sólidos en la pulpa espesada en las muestras con aditivos con respecto a las muestras sin aditivos. Esta prueba nos permite asegurar que las muestras conservan sus propiedades con respecto a las utilizadas con anterioridad y con ello nos confirman que los estudios realizados por otras técnicas son válidos.

Tabla V.- Resultados del espesamiento de las muestras de Camarioca Sur

Probeta	Sólidos (%)	Tiempo (h)	Aditivo (Kg/t)
BK	40.9	24	
	41.58	48	
	41.58	72	
1	44.8	24	2kg FeSO ₄ .7H ₂ O + 1kg/t H ₂ SO ₄ (SO ₄) ²⁻ = 3.32
	46.8	48	
	47.04	72	
2	44.5	24	0.3kg/t Al ₂ (SO ₄) ₃ .11H ₂ O (técnico)+1.5kg/t H ₂ SO ₄
	46.6	48	
	46.1	72	

RESULTADOS

Un análisis de la bibliografía muestra que se han presentado diferentes hipótesis para explicar los fenómenos que se han observado en estos tipos de sistemas, específicamente en el caso de los minerales que hemos seleccionado para el estudio se han realizado muchos análisis y especialmente en el caso de Moa existen un gran número de publicaciones, muchas de ellas en Cuba, que analizan diferentes efectos en estas pulpas, pero hasta ahora nunca antes se habían obtenido resultados

similares a los de las tecnologías del CIPIMM, por lo que es de suponer que algo ha faltado en estos análisis.

No hay dudas de que los sistemas bajo estudio son complejos y el estudio de los trabajos realizados con anterioridad y de este mismo trabajo muestran que hay varias posibles causas para los fenómenos estudiados, entre ellas:

- Variaciones en la especiación mineralógica de las fases de hierro en las menas.
- La relación másica que existe entre las fases amorfas (formadoras de geles coloidales) y sus homólogos cristalinos.

Ambas causas provocarán diferentes modificaciones en las propiedades físico-químicas de estos sistemas acuosos, las que a su vez producen variaciones en la cinética del proceso de sedimentación-compactación de acuerdo al tipo de modificador que se utilice, como son las siguientes:

- Cambios en la carga de las partículas en suspensión.
- Cambio en las propiedades reológicas de las suspensiones.
- Cambio en la forma de acomodamiento de las partículas.
- Pérdida de agua de los compuestos.
- Cambios estructurales, entre otras.

La primera de estas causas no fue posible estudiarla en este momento por carecer de los equipos requeridos para ello, pero ya en 1982 Valdés realizó estudios vinculados a este tema. La literatura reporta muchas mediciones de esta magnitud, algunas contradictorias, pero todos coinciden que hay una estrecha vinculación entre las propiedades superficiales y los comportamientos reológicos de las pulpas. Todos coinciden en que la mayor viscosidad se muestra para el llamado punto isoeléctrico o potencial (p.i.e.) $Z=0$, pues la repulsión entre las partículas se hace mínima y predominan las fuerzas de atracción de Vander Waals (<http://www.zeta-meter.com>). Pérez García (2006,2007) confirma este hecho y plantea que este valor se desplaza hacia pH ácidos cuando se trabaja con agua industrial, supuestamente debido a la adsorción específica del catión magnesio, fundamentalmente.

Turro Breff al estudiar la influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (colas) del proceso industrial Caron encuentra que las propiedades reológicas de las pulpas dependen, fundamentalmente, de la concentración de sólidos y de las propiedades superficiales, dado el alto contenido de partículas finas y afirman que el valor del pH del punto isoeléctrico depende de los contenidos de magnetita y maghemita. Un resultado similar encuentra Pérez García (2006) cuando estudia además el efecto de la temperatura.

Cerpa (200, 2003) en sus estudios comparativos del comportamiento reológico de muestras lateríticas de diferentes yacimientos que procesa la Empresa Moa Niquel S.A afirman que el pH del p.i.e está determinado por la fase mineralógica que se encuentra en mayor proporción en la muestra y el valor de la carga es más positiva mientras más goethita, confirma que las máximas viscosidades corresponden a los valores del p.i.e. y encuentran que los comportamientos reológicos van desde newtonianos y pseudoplásticos (Z máx.) hasta fluidos plásticos ($Z=0$).

Estos resultados corroboran nuestras observaciones en los estudios a diferentes escalas sobre la tecnología 1 en la que habíamos detectado que los aditivos no favorecían la sedimentación en la etapa de sedimentación libre, pero en cambio mejoraban notablemente el proceso de compactación.

No hay dudas de que es imposible hablar de causas por separado, pues como se ve lo que prevalece en la realidad es una interacción entre todas las propiedades de las suspensiones. La granulometría, temperatura, la composición mineralógica, las cargas superficiales, que a su vez están condicionadas

por el pH de las suspensiones y otras muchas más están íntimamente relacionadas y es difícil establecer fronteras.

Sin embargo, al realizar este trabajo se ha podido comprobar el enorme peso que la composición mineralógica tiene en estos fenómenos. Como puede apreciarse en la caracterización mineralógica de las muestras bajo estudio estas son totalmente diferentes y diferentes son también los mecanismos que se presentan como predominantes. Como ya se mencionó anteriormente se pudo concluir que en la muestra de Camarioca Sur no solo resultó muy diferente la composición mineralógica en sí misma, sino también la relación entre las fases amorfas y cristalinas.

En general el tema de la composición mineralógica es de los más abordados, como los trabajos de Beyris que plantea que la presencia de hematita, magnetita y maghemita (fases minerales de metales pesados) favorece el proceso de sedimentación de la pulpa mientras, que la presencia de fases de metales ligeros como la gibbsita, cuarzo, antigorita y hematita, producen el efecto contrario, pero no explica la influencia de los aditivos.

En el caso de las muestras de San Felipe prevalecen además las propiedades de las arcillas y en tal caso entran a jugar un papel importante otras propiedades como el hinchamiento de las arcillas, en las que como señala García Romero, la hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmectitas, y su importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida. Este es un aspecto al que debemos prestar atención también en etapas futuras, ya que, como se ha visto de los resultados de este trabajo y de los consultados en la literatura, el empeoramiento de las propiedades de fluidez de las pulpas está íntimamente relacionado con la presencia de arcillas en los minerales.

CONCLUSIONES

1. Con el empleo de la metodología utilizada, apoyada en el uso de técnicas instrumentales modernas para la caracterización de los minerales, se confirma que los sistemas objeto de estudio son de alta complejidad y se puede corroborar el peso que tiene en los cambios que ocurren en las propiedades físico-químicas de dichos sistemas acuosos, la especiación mineralógica de las fases de hierro en las menas lateríticas.
2. Se encuentra como otra posible causa a considerar en la modificación de las propiedades físico químicas de las pulpas de minerales el balance que existe entre la composición másica de las fases amorfas (formadoras de geles coloidales) y las fases cristalinas (de mayor peso específico que las primeras). Observándose que en la preparación de pulpas a partir de las arcillas nontroníticas de "San Felipe", el índice relativo entre material amorfo/fase cristalina, resultó ser menor en cuantía y

naturaleza, si se compara con el de las menas de “Camarioca Sur” -en presencia o no de modificadores.

3. Los resultados preliminares obtenidos en la presente etapa del proyecto con el empleo de la técnica instrumental de DRX, demuestran la formación incipiente de tres fases adicionales en el proceso de sedimentación-compactación de las pulpas lateríticas: hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) y bayerita ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) cuando se utilizaron los aditivos de hierro y aluminio en las menas de “Camarioca Sur”.

4. Los resultados del análisis por MEB-EDAX muestran que en las micrográficas existen diferencias significativas entre los dos tipos litotecnológicos de muestras evaluadas. Por una parte, las de “Camarioca Sur” son muy homogéneas (de granos redondeados y tamaño similar) y muy finas con respecto a las de “San Felipe”, en las que se observa una mayor heterogeneidad microgranulométrica, con partículas irregulares de muy diferentes tamaños y formas, las cuáles son típicas de las arcillas.

5. Los resultados de las pruebas de espesamiento corroboran los reportados en trabajos anteriores, observándose el mismo efecto de incremento del contenido de sólidos en la pulpa espesada en las muestras con aditivos respecto a las muestras sin aditivos. Este hecho nos permite plantear que las muestras conservan sus propiedades y soportan la validez de los estudios realizados mediante la aplicación de otras técnicas.

RECOMENDACIONES

1. Continuar los estudios con estos y otros depósitos favoreciendo al máximo la posible formación de las especies detectadas a fin de evaluar su presencia y efectos con mayor seguridad.
2. Completar los estudios con el empleo de otras técnicas que permitan establecer las correlaciones entre todos los aspectos relacionados con los comportamientos observados.
3. Profundizar en los estudios del comportamiento de las arcillas como vía para encontrar nuevas posibilidades en la manipulación de estas pulpas en la industria.

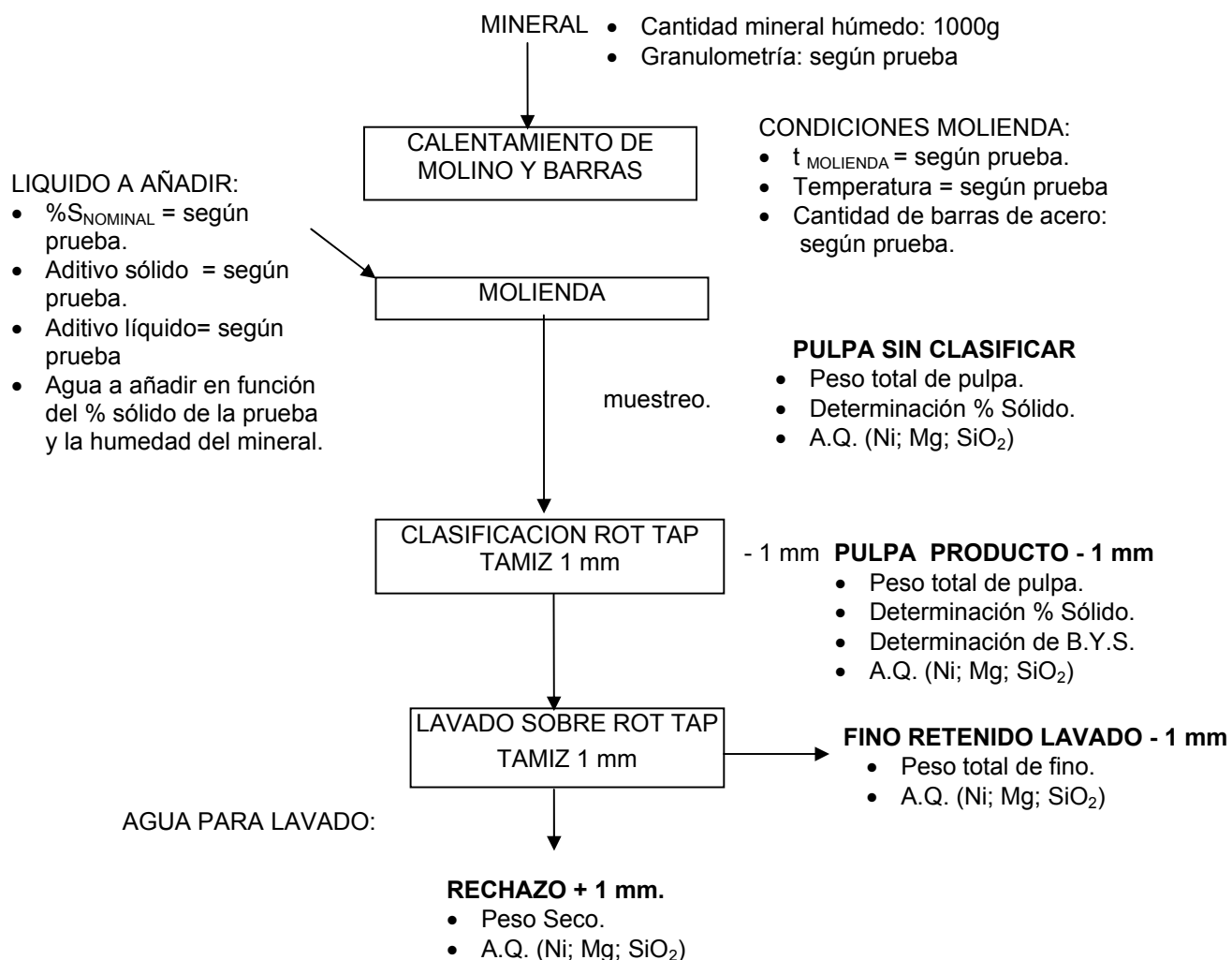
BIBLIOGRAFIA

- Alfonso Olmo, E.L.; Bugallo, F.; Alvarez Alonso, A.; Castellanos Suarez, J. (2009).- Procedimiento para el tratamiento de pulpas acuosas de minerales lateríticos en la tecnología ácida a presión; Certificado de Patente No. 23353.
- Alfonso, E., Álvarez, A., Castellanos, J., Iglesias, C., Herrera, V., Navarrete, C., Guerra, I. (2006).- Aumento de la productividad en la planta de espesadores de la empresa Moa Nickel S.A., Trabajo Destacado XVII Forum de Ciencia y Técnica Nacional.
- Alonso Pérez J. A, Cabrera I, Acevedo, J.E.(2007).- Composición sustancial de escorias de fundición obtenidas a partir de concentrados y productos del procesamiento industrial de minerales, 2da Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Ciudad de La Habana, Cuba.
- Alonso Pérez J. A, Cabrera I., Hernández N.(2009).- Composición sustancial de los residuos lixiviados del mineral serpentinitico obtenidos por dos variantes tecnológicas a presión atmosférica, 3ra Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Ciudad de La Habana, Cuba.
- Beyris Mazar, P., Falcón Hernández, J.(2007).- Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología de lixiviación ácida a presión: incidencia de la composición mineralógica. Minería y Geología Vol. 23 No.1, ISSN 1993 8012.
- Bobes, L., Herrera V. , Castellanos,J., Alvarez, A., Acevedo, E., Cisneros, M., Zelenenko, V., Fernandez, R., Cabrera, I., Díaz, A., Anaya, M., Rodríguez, J. - Metallurgical Investigation of San Felipe Ores. SF-II. Informe de Investigaciones para San Felipe Mining.
- Cabrera I, Alonso J.A, Hernández N, y otros (2005).- Características de la mineralización niquelífera en muestras tecnológicas de cortezas de intemperismo aplicando técnicas moderna, 1ra Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Ciudad de La Habana, Cuba.

- Castellanos Suarez, J.; Alfonso Olmo, E.L.; Álvarez Alonso, A. (2009).- Procedimiento para mejorar el espesamiento de pulpas acuosas de minerales lateríticos en la tecnología ácida a presión; Certificado de Patente No. 23478.
- Castellanos Suarez, J.; Montejo Serrano, E., Alfonso Olmo, E. L.; Pérez Pérez, M.; Cuervo Samón, G.; Hernández, N.; Bugallo, F.; Romero, J. B.; Alcalá Fariñas, R. (2009).- Procedimiento para aumentar el porcentaje de sólidos de minerales limoníticos y arcillosos en pulpas de alimentación a las autoclaves en el proceso de lixiviación ácida. Certificado de Patente No. 23430.
- Castellanos, J., Bobes, L., Hernández, M., Montejo, E., Díaz, A., Anaya, M., Cabrera, I., López, M., Duménigo, M., Navarrete, C., Cuervo, C. (2001).- Metallurgical Investigation of San Felipe Ores from "Pozo Criollo. SF-III, Informe de Investigaciones para San Felipe Mining.
- Castellanos, J., Bobes, J., Hernández, M., Montejo, E., Álvarez, A., Cabrera, I., Cuervo, G. (2001).- Research of San Felipe Ores from Mini Pit San Felipe IV, Informe de Investigaciones para San Felipe Mining.
- Castellanos, J., Montejo, E., Hernández, M., Navarrete, C., Anaya, M., Cuervo, G., Duménigo, M., Aja, R., Romero, J.B., Alcalá, R., Acevedo, E., Álvarez, A. (2002).- San Felipe IV-A sample from MINIPIT Metallurgical Report Ore preparation and HPAL, results using high % solid slurry by using CIPIMM'S Technologies. Informe de Investigaciones para San Felipe Mining.
- Castellanos, J., Montejo, E., Cabrera, I., Navarrete, C., Hernández, M., Anaya, M., Alfonso, E., Cuervo, G., Cañizares, M., Alcalá, R., Romero, J. B. (2003).- San Felipe VI. Investigación Metalúrgica para la tecnología IA del CIPIMM. Mineral de San Felipe. Informe de Investigaciones para San Felipe Mining.
- Castellanos, J., Montejo, E., Álvarez, A., Iglesias, C. (2006).- Preparación directa de pulpas de alto % de sólidos con la Tecnología CIPIMM 2. Planta semi-industrial. Reporte técnico.
- Cerpa, A. (2000).- Influencia de las características mineralógicas y coloidoquímicas de las suspensiones de minerales lateríticos. *TECNOLOGÍA QUÍMICA* Vol. XX, No. 1.
- Cerpa, A.; Tartaj, P.; García-González, M. T. y otros (2003).- Estudio comparativo del comportamiento reológico de muestras lateríticas de diferentes yacimientos que procesa la Empresa Moa Niquel S.A., *Latin Am. Met. Mat.*, Vol.23, no.1, p.03-08. ISSN 0255-6952.
- Chang, A. (2005).- Caracterización geólogo-geoquímica y mineralógica del yacimiento de lateritas niquelíferas de San Felipe provincia Camagüey, 1ra Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Ciudad de La Habana, Marzo, Cuba.
- Formell Cortina, F. (2003).- Diferencias en el desarrollo morfoestructural de las regiones metalogénicas exógenas de Oriente septentrional y Camagüey Central y su influencia en la formación de las cortezas de intemperismo lateríticas, V Congreso Cubano de Geología y Minería, Ciudad de La Habana, Marzo, Cuba.
- García Romero, E., Suarez Barrios, M. (1999).- Arcillas, Propiedades y Usos, (Universidad <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/Arcillas.htm>
- González R.B, Chang A, Ravelo R y otros (2005).- Interrelación de SiO₂, sílice libre y mineralización niquelífera en el depósito de lateritas San Felipe, Camagüey, 1ra Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Ciudad de La Habana, Cuba.
- Herrera, V., Castellanos, J., Navarrete, C., Liz, M., Hernández, R., Díaz, A., Anaya, M., Álvarez, A. (1999).- HPAL Metallurgical Preliminary Study of San Felipe Ore SF-I, Informe de Investigaciones para San Felipe Mining.
- Iglesias, C., Álvarez, A., Castellanos, J., Herrera, J., Alfonso, E., Navarrete, C., Guerra, I. (2006).- Prueba industrial de dosificación de aditivo CIPIMM a la pulpa cruda alimentada al sedimentador C. Reporte Técnico, Dpto. Técnico Moa Nickel S.A.
- Pérez García, L.; Garcell Puyans, L. R. (2006).- Efecto de la granulometría y de las propiedades superficiales sobre la reología de las suspensiones concentradas de laterita, *TECNOLOGÍA QUÍMICA* Vol. XXVI, No. 1.
- Pérez García, L. (2007).- Adsorción de iones en suspensiones acuosas de lateritas. *TECNOLOGÍA QUÍMICA* Vol. XXVII, No. 3.
- Pérez García, L.; Garcell Puyans, L. R. (2006).- Influencia de la distribución de tamaño de las partículas y de la temperatura sobre la reología de suspensiones lateríticas. *TECNOLOGÍA QUÍMICA* Vol. XXVI, No. 1.
- Potencial Z: Un curso completo en 5 minutos. Z Metter Inc., <http://www.zeta-meter.com>.
- Turro Breff, A.; Garcell Puyans, L. R.; Izquierdo Pupo, R. (2003).- Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (colas) del proceso industrial Caron, *TECNOLOGÍA QUÍMICA* Vol. XXIII, No. 2.
- Valdés, F. (1982).- Fundamentos químico-coloidales de la sedimentación de pulpas acuosas de mineral laterítico. Informe de Investigaciones 472, CIPIMM.

Anexos

1. Procedimiento estándar para la preparación directa de pulpa



2. Difractogramas

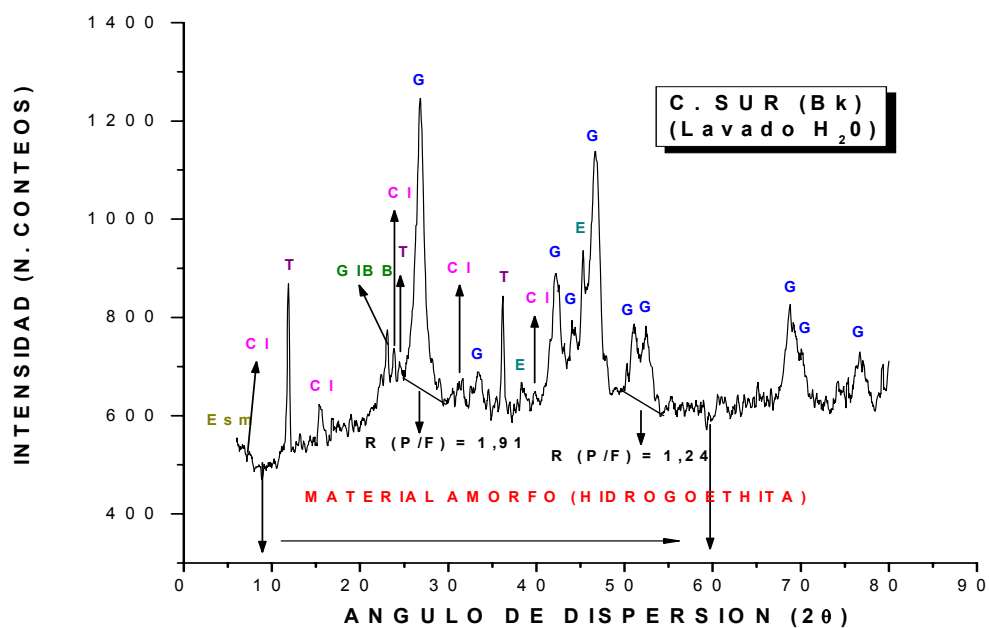


Figura 1.- Difractograma del mineral de cabeza "Camarioca Sur"

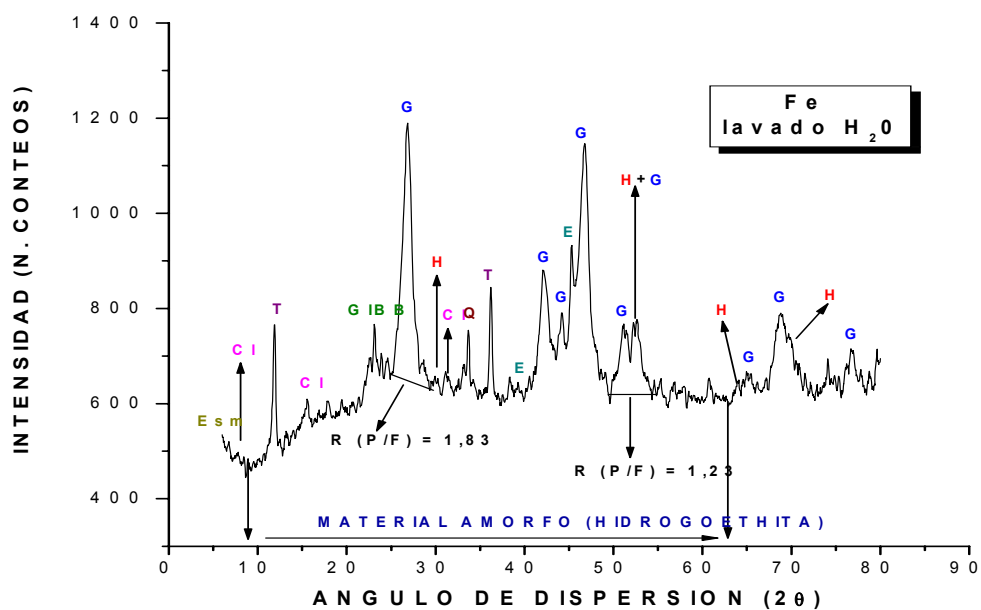


Figura 2.- Difractograma del mineral de "Camarioca Sur" con aditivo de Fe

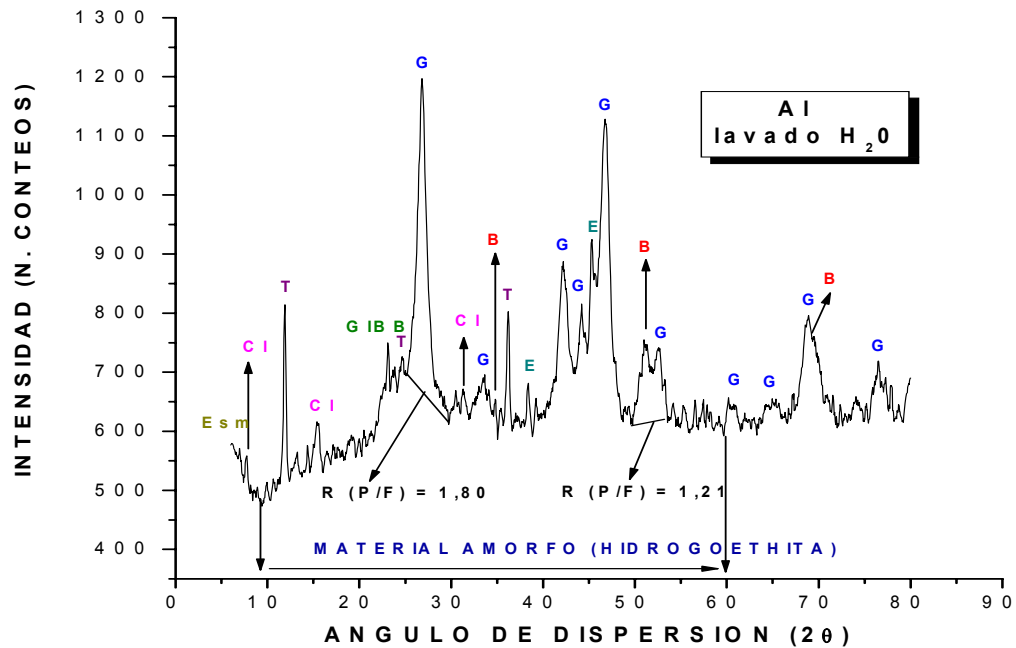


Figura 3.- Difractograma del mineral de “Camarioca Sur” con aditivo de Al

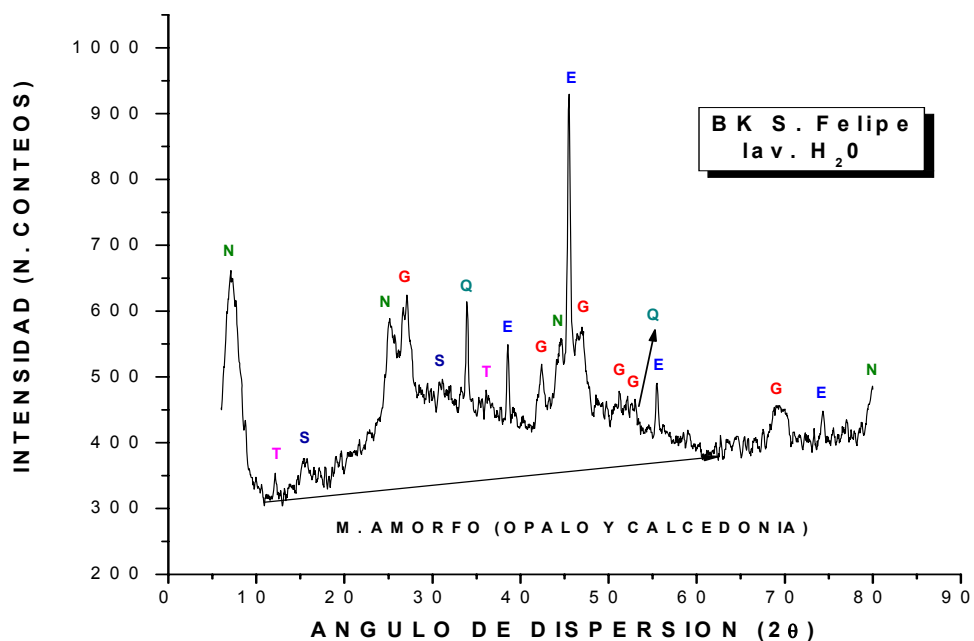


Figura 4.- Difractograma del mineral nontronítico de “San Felipe

Leyenda: G-Goethita; Material Amorfo (hidrogoethita); T- Talco; Gibb-Gibbsita
Cl-Clorita; E – Espinela de Fe, E – Esmeclita (montmorillonita, N- nontronita; G-Goethita;
Material Amorfo (ópalo+calcedonia); Q- cuarzo; T- Talco; S- Serpentina

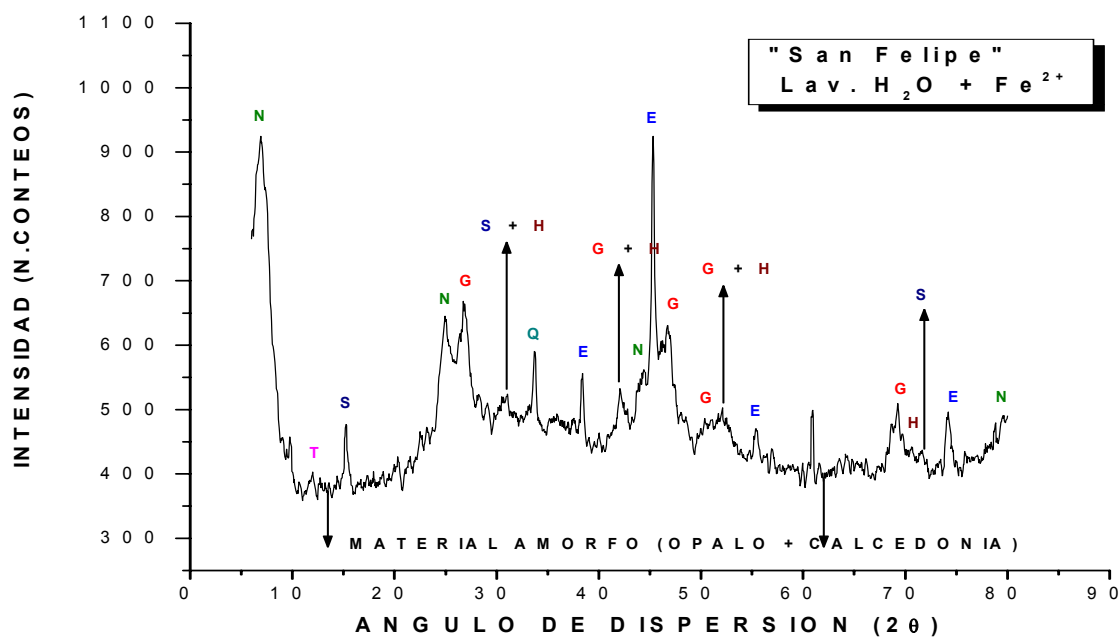


Figura 5.- Difractograma del mineral de "San Felipe" con el aditivo Fe^{2+}

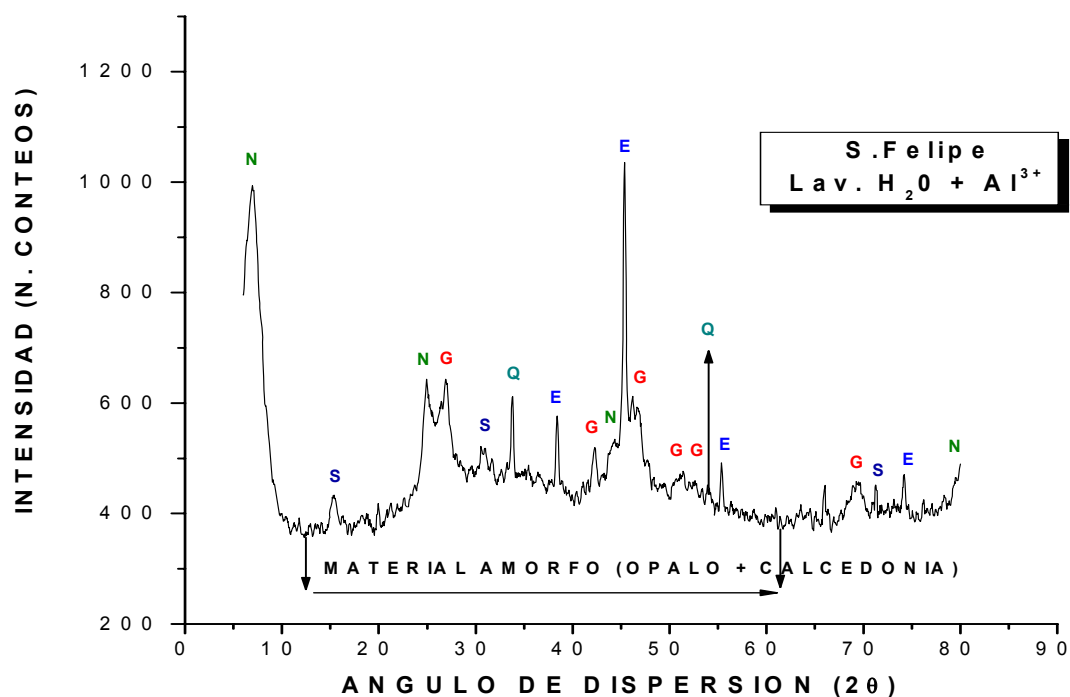
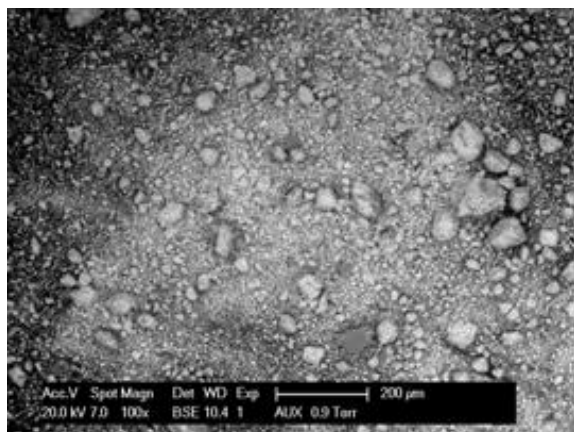


Figura 6.- Difractograma del mineral de "San Felipe" con el aditivo Al^3

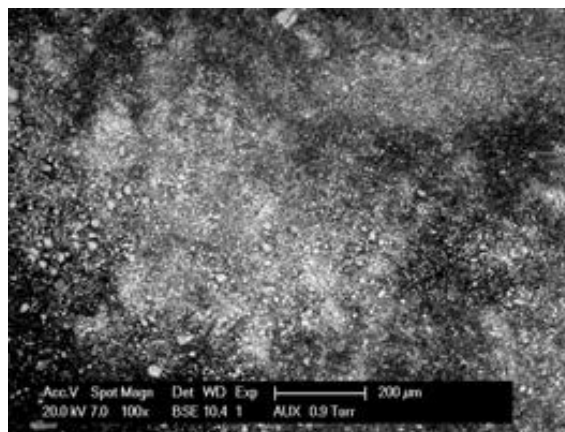
Leyenda: N- nontronita; G-Goethita; Material Amorfo (ópalo+calcedonia)
E- Espinela de Fe (trevorita); Q- cuarzo; T- Talco; S- Serpentina

3. Micrografías

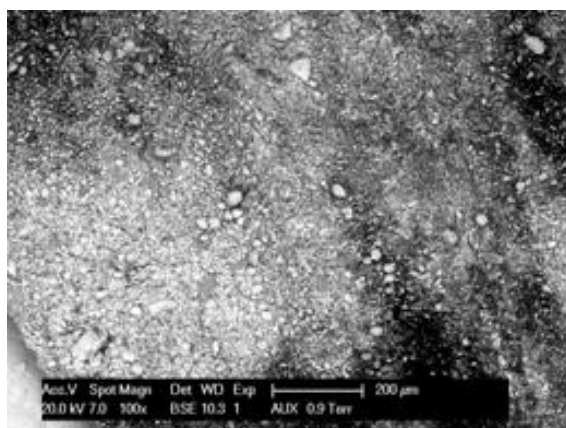
Camarioca Sur Cabeza



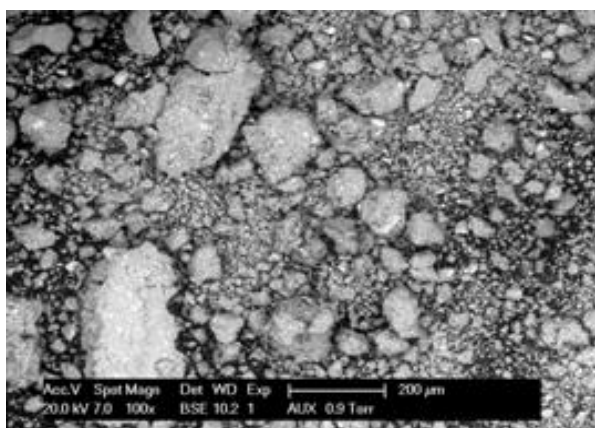
Camarioca Sur Fe



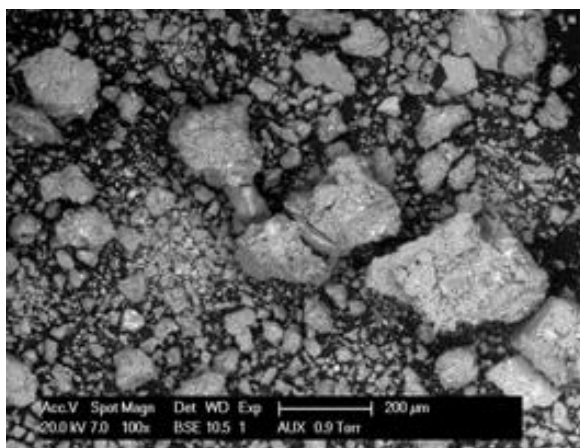
Camarioca Sur Al



San Felipe Cabeza



San Felipe Fe



San Felipe Al

