



CONTROL ANALÍTICO DE MENAS PLYGORSKÍTICAS DEL YACIMIENTO “PONTEZUELA” (PROV. CAMAGÜEY)

José Antonio Alonso Pérez⁽¹⁾, Abdel Casanova Gómez⁽¹⁾, Asor Martínez Montalvo⁽¹⁾, Rey Ravelo Lescaille⁽²⁾, Natalia Vega Sánchez⁽³⁾, Carlos Toledo Sánchez⁽⁴⁾, Rodney Cárdenas Meralla⁽¹⁾, Lydia Calzada González⁽¹⁾, Martha Velázquez Garrido⁽¹⁾, Yania Cabaleiro Piedra⁽¹⁾, Rubén Alcalá Fariñas⁽¹⁾ y Heidy Carpio Morales⁽¹⁾

1. Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica, MINEM, Carretera de Varona, Km 1^{1/2}, Capdevila, Boyeros; e-mail: joseantonio@cipimm.minem.cu
2. Empresa GEOMINERA Camagüey
3. Empresa Central de Laboratorios “José Isaac del Corral” (LACEMI); e-mail: natalia@lacemi.cu
4. Instituto de Geología y Paleontología, MINEM; e-mail: carlos.ts@igp.minem.cu

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo consistió en determinar la composición mineralógica de menas arcillosas con mineralización de palygorskita del yacimiento “Pontezuela” de la provincia de Camagüey, a fin de clasificarlas en función de sus posibles aplicaciones industriales.

Con tal finalidad, se caracterizaron 16 muestras compuestas que corresponden a cuatro tipos litogeológicos que se detectaron durante la ejecución del Proyecto Geológico de Exploración Detallada (E.D), a través del empleo de las siguientes técnicas instrumentales: (1) Difracción de rayos-X (DRX), (2) Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), acoplada a un espectrómetro de fluorescencia de rayos-X dispersivo en energía (EDS) y (3) Análisis Térmico en sus variantes (CDB-TG-D1TG), combinadas a su vez con los ensayos de distribución de tamaño de partículas, y de esta forma correlacionar la composición mineralógica de las muestras y su distribución por clases granulométricas, lo que permitiría obtener una valoración más certera de los recursos que conforman todas las menas del depósito.

Los resultados obtenidos permitieron agrupar las menas en cuatro tipos naturales fundamentales por contenidos máficos de palygorskita: $\geq 75\%$ (tipo I); tipo II ($> 50 \wedge < 75\%$); tipo III ($> 30 \wedge < 50\%$) y tipo IV ($< 30\%$) respectivamente, sin embargo, dicha clasificación debe complementarse con otros ensayos físico-químicos, teniendo en cuenta los posibles usos del mineral en la industria y de esta forma proponerle al Comité Técnico de Normalización la posterior elaboración de la Norma Cubana de especificaciones e incluirlas en el balance anual de recursos minerales con que cuenta el país en los archivos de la ONRM.

ABSTRACT

The aim at the present work is to determine mineralogical composition of clay ores as palygorskite mineralization of “Pontezuela” deposit, located at the Camagüey province as the objective of to classify these in dependence of their industrial applications.

For this purpose, sixteen compound samples belonging to four lytogeological types and detected during the detailed geological prospecting, were characterized by means of several instrumental techniques: (1) X-ray diffraction, (2) Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry, (3) Thermal Analysis (TG-D1TG) and (4) Infrared Spectroscopy (IR), with the purpose of to determine the clay mineral compositions and their admixtures, combined as the particle size distributions assays, as the objective to establish the possible correlations between the mineralogical composition of all the samples and their particle size distribution kinds and, on the other hand, to classify these by natural types, which will let to obtain a more reliable appraisalment of the current calculated resources.

The obtained results let us grouped the ores in four fundamental natural types: $\geq 75\%$ (type I); type II ($> 50 \wedge < 75\%$); Type III ($> 30 \wedge < 50\%$) y type IV $< 30\%$ respectively. However, this proposal must be complemented as other physical-chemical assays, according to the possible uses of these ores in the mineral industry and, at the same time, we must propose to the Technical Normalization Committee to elaborate the Cuban Standard Specifications, with the objective of putting together the ores, according to their types in the list of natural resources of Cuba, which can be found in the files of the ONRM.



INTRODUCCIÓN

Según considera Nemecz E (1981)¹ entre otros autores, la palygorskita (según la nomenclatura mineralógica europea) o attapulgita (norteamericana), constituye aquel mineral arcilloso del grupo de las hormitas (con la sepiolita), cuya fórmula global es: $(\text{Mg}^{2+}, \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+})_2 [(\text{OH})_4 (\text{OH}_2)_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10}]. 4\text{H}_2\text{O}$. Desde el punto de vista geológico, sus menas se forman por la meteorización de minerales ricos en magnesio o como producto de la alteración hidrotermal de rocas de composición alcalina.

Nemecz E (1981)¹, plantean que el mineral presenta una estructura cristalina peculiar en la cual se aprecia la disposición laminar de tetraedros (SiO_4) unidos a través de vértices de oxígenos, estos a su vez a una doble capa de piroxenos, orientándose a lo largo de la familia de planos de índices de Miller (100). Por su parte, la estructura presenta además un sistema de canales con tres tipos diferentes de moléculas de agua (enlazada, zeolítica e hidroxílica), las que participan en la armazón reticular de piroxenos con iones intercambiables, necesarios para balancear el exceso de carga negativa del enrejado cristalino. Tal singularidad estructural se manifiesta en el hábito fibroso y textura microporosa de sus microcristales y por tal motivo, el mineral acusa propiedades físico-químicas entre las que destacan su elevada área superficial ($> 100 - 200 \text{ m}^2/\text{g}$) y volumen de poros, las que determinan sus múltiples aplicaciones industriales relacionadas con procesos de sorción.

Entre las importantes aplicaciones que presentan los minerales del grupo de las hormitas se mencionan las siguientes: (1) secado de turbocombustible de aviación; (2) fertilizantes y enmendantes de suelos; (3) productos para la elaboración de lechos de mascotas (peces, canarios, perros); (4) tratamiento de residuos tóxicos; (5) soporte de fungicidas, herbicidas y pesticidas; (6) coadyuvante de filtración; (7) controlador de humedad; (8) absorbentes de aceites y (9) clarificador en la industria de bebidas y licores, entre otras (Alonso J.A *et al.* 2014)².

En Cuba existen recursos de menas palygorskíticas que se localizan en la localidad de Pontezuela en la provincia de Camagüey, las cuales forman parte de las actuales concesiones geólogo-mineras de dicha Empresa, por lo que ofrecen potencialidades de aplicación en los procesos industriales de referencia como sustitutos de productos comerciales importados. Cabe destacar que nuestro país importa para la industria del petróleo la arcilla attapulgita de los Estados Unidos a un precio aproximado de \$ 600 USD / tonelada, así como la sepiolita española (TOLSA S.A) y la bentonita mexicana modificada a su forma ácida (TONSIL S.A) para el consumo en la industria de decoloración de aceites, purificación de grasas comestibles y sebos que se utilizan en la industria de cosméticos (Velázquez M *et al.*, 2010)³.

Las investigaciones que se relacionan con el mineral cubano del depósito "Pontezuela", comenzaron a partir del año 2009. En ese sentido Vega N *et al.* (2009)⁴ realizan la primera caracterización mineralógica de una muestra tecnológica del mineral y de forma paralela, Cavado R *et al.* (2009)⁵ demuestran que dado los contenidos del mineral útil palygorskita (77%) y magníficas propiedades de sorción de agua, llevar a cabo pruebas de uso en las instalaciones de INTEVEP-PDVSA en Venezuela, con la finalidad de valorar la efectividad el mineral cubano en el secado de turbocombustible de aviación obteniéndose resultados satisfactorios, los que permitieron dar los primeros pasos para la posible sustitución del mineral cubano por la arcilla attapulgita importada.

Más tarde, Velázquez M *et al.* (2010)³ ejecutan un nuevo proyecto a partir de la misma muestra tecnológica que se investigó en la etapa del 2009, mediante el proceso industrial de molienda y clasificación en la planta de procesamiento de minerales de Najasa en la provincia de Camagüey, pues se requerían mayores volúmenes de mineral ($12,5 \text{ m}^3$) para realizar la prueba industrial de secado del turbocombustible en la Refinería "Sergio Soto" de la provincia de Cienfuegos. El producto obtenido (fracción $-1.5 + 0.6 \text{ mm}$) se evaluó durante más de 6 meses en dicha Refinería lo que hizo posible procesar un total de 20, 220 barriles de kerosén por cada tonelada de arcilla, formando parte



de la actual reserva comercial de la planta para un total 141,521 barriles, previéndose además la posterior ejecución de un programa de ampliación que incluye la comercialización del mineral a otros países del ALBA entre ellos Venezuela que consume cerca de 700 toneladas / año.

Teniendo en cuenta los resultados que se lograron en etapas anteriores de trabajo, era menester entonces trazar una nueva estrategia empresarial que contemplara la valoración integral de todos los recursos del depósito "Ponzezuela", desde el punto de vista integral (geológico, mineralógico y tecnológico), a fin de definir no solo aquellas menas que cumplieran la especificación de contenido mínimo de palygorskita para el secado del turbocombustible (75%), sino también para el resto de las menas que pudieran emplearse en otras aplicaciones industriales y/o agrícolas, por tal motivo, se ejecutó el Proyecto Geológico de Exploración Detallada, que incluyó la evaluación mineralógica de todos los tipos litogeológicos presentes en el depósito, lo que contribuyó a dar pasos concretos en la explotación racional del mismo y potenciar el estudio de factibilidad técnico-económico.

Por lo expuesto, el objetivo general del trabajo que se presenta consiste en determinar la composición mineralógica de menas de arcillas palygorskíticas del yacimiento "Ponzezuela", en función de sus posibles aplicaciones industriales.

Objetivos específicos:

- (1) Caracterizar 16 muestras compuestas litogeológicas del Proyecto Geológico de Exploración Detallada "Ponzezuela", sobre la base del contenido másico de arcilla palygorskita e impurezas minerales y a través del empleo de las siguientes técnicas instrumentales de Mineralogía Analítica: (1) Difracción de Rayos-X; (2) Análisis Térmico (variantes de Calorimetría Diferencial de Barrido, Termogravimetría y Derivada del Cambio de Masa; CDB-TG-D1TG); (3) Microscopía Electrónica de Barrido - Fluorescencia de Rayos-X Dispersiva en Energía (MEB-EDS), (4) Espectroscopía Infrarroja (IR); (5) Ensayo de distribución por tamaño de partículas.
- (2) Clasificar teniendo en cuenta los resultados obtenidos, los diferentes tipos de menas en función de sus posibles aplicaciones industriales.

MATERIALES Y MÉTODOS

(1) Equipos y selección de parámetros instrumentales

Se utilizaron un conjunto de técnicas instrumentales para la caracterización de las muestras: (1) Difracción de Rayos-X (DRX); (2) Calorimetría Diferencial de Barrido, Termogravimetría y Velocidad del Cambio de Masa (D1TG); (3) Microscopía Electrónica Barrido (MEB-EDS) y el análisis de distribución por tamaños de partículas (vía húmeda) en el intervalo de granulometrías entre 0,01 y 1,200 μm .

Los difractogramas de polvos de rayos-X, se registraron en un equipo Philips modelo PW - 1710, con los siguientes 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	Patrón externo (silicio)
Registro angular	6-80° (2θ)



Todos los difractogramas se obtuvieron según la variante de medición punto a punto; paso angular $0,05^\circ$ (2θ), tiempo de medición en cada posición angular de 3 segundos. Los resultados numéricos de intensidades relativas y ángulos de difracción, se convirtieron en difractogramas continuos con el empleo del programa "X'Pert" High-Score de PANanalytical, versión 2003, e incluye la Base de Datos de patrones de difracción de polvos (PCPDFWIN; JCPDS - ICDD / 2003), versión 1.30, compatible con Windows 7, para Office 2010.

En el caso de los resultados semicuantitativos que se reportan por DRX, la valoración de la incertidumbre (expresada como desviación estándar) oscila entre $\pm 5 - 10\%$, utilizándose para ello la variante RIR (Reference Intensity Ratio) de Chung F.H (1974)⁶ implementada en el programa X'Pert.

Por su parte, los termogramas simultáneos de CDB, TG y D1TG, se obtuvieron en un equipo de la firma alemana NETZSCH, modelo STA449 F3, con el empleo de los siguientes parámetros instrumentales de operación:

Régimen de calentamiento	Dinámico
Masa de muestra	Se consigna en los termogramas
Masa del material de referencia (α -Al ₂ O ₃)	Idem al anterior
Tipo de crisoles	Al ₂ O ₃ (corindón; tamaño estándar)
Material del horno	SiC (T.amb. – 1500°C)
Gas utilizado en la cámara de calentamiento	Aire (sin flujo controlado)
Flujo del gas protector de la termobalanza	20.0 ml/min (Ar)
Velocidad de calentamiento	10.0 K /min
Sensibilidad de la termobalanza	0.001 g – 35.0 g
Sensibilidad de las curvas DSC y TG	-0.001 - 5000 μ V/mg
Tiempo total de medición	1h 37 min 10 s
Rango de temperatura de trabajo	25 -1000°C

Los datos experimentales de las mediciones, tanto calorimétricas (CDB) como termogravimétricas (TG), se convierten en sendos termogramas continuos con el empleo del programa "Proteus" (versión 5.2.1/07.04.2011), suministrado por el fabricante y compatible con Windows para Office 2010, obteniéndose además por la misma vía los termogramas de la primera derivada de la masa (Velocidad del cambio de masa; D1TG, dm/dt).

En el caso de la MEB-EDS, se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido modelo Vega de la firma TESCAN de la República Checa, con microsonda de FRX acoplada de la firma OXFORD del Laboratorio Central de Criminalística del MININT. Del mismo modo para la obtención de los espectros IR se utilizó el espectrómetro por Transformada de Fourier (FTIR), marca BRUCKER del propio laboratorio del MININT.

Por último, el análisis de distribución por tamaño de partículas se realizó vía húmeda a través del empleo de un analizador de rayos laser japonés, marca HORIBA, modelo LA 950V2 con que dispone el Departamento de Metalurgia Extractiva del CIPIMM.

(2) Selección de muestras

En la tabla I se presenta la relación de muestras compuestas seleccionadas de los diferentes pozos de perforación que se ejecutaron en el proyecto de Exploración Detallada. Como criterio de selección se consideraron las características litogeológicas de las rocas a saber: litología, color, textura, número de pozo e intervalo de profundidad.



Todas las muestras se prepararon con un grado de molienda del 100% por debajo del tamiz 0.074 mm, requisito mínimo que se establece para la ejecución de los análisis.

Tabla I. Selección de muestras compuestas del proyecto de Exploración Detallada “Pontezuela”

No. muestra compuesta	Pozo Exploración	Intervalo de profundidad (m)	Litotipo Geológico
1	11	4,70 - 4,75	2
2	12	1,60 - 1,65	1
3	16	5,10 - 5,15	2
4	16	8,15 - 8,20	2
5	15	2,95 - 3,00	3
6	15	5,70 - 5,75	4
7	18	1,95 - 2,00	1
8	14	3,60 - 3,65	2
9	13	1,20 - 1,25	1
10	10	2,95 - 3,00	3
11	13	5,35 - 5,40	2
12	18	4,90 - 4,95	1
13	19	2,30 - 2,35	4
14	17	1,80 - 1,85	3
15	17	8,70 - 8,75	4
16	17	10,55 - 10,60	4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las 16 muestras compuestas seleccionadas del depósito, así como de aquellas que representan los diferentes tipos de menas que se detectaron en el proyecto de Exploración Detallada (muestras 3, 4, 9 y 10). Como criterio de selección se consideró la correlación de intensidades que se establece entre las principales fases minerales presentes en los difractogramas de polvos de rayos-X: (1) palygorskita ($d = 10.4 \text{ \AA}$); (2) montmorillonita ($d = 15.0 \text{ \AA}$) y (3) cuarzo ($d = 3.34 \text{ \AA}$) las que determinaron su posterior clasificación.

(1) Difracción de rayos-X

El análisis por DRX tuvo como objetivo determinar en primer lugar, la composición sustancial cualitativa de fases cristalinas y no cristalinas presentes en las menas evaluadas, y de forma paralela, calcular los contenidos máxicos de mineral útil (palygorskita), la arcilla montmorillonita e impurezas (cuarzo, plagioclasas, cristobalita, arcilla clorita, goethita, compuestos amorfos). Se destaca en la composición mineralógica semicuantitativa que se reporta (tabla II), el contenido de fases de corto alcance cristalino (amorfos), el cual se calculó a partir de la sumatoria de fases cristalinas respecto al por ciento máxico total (100%).



Tabla II. Resultados de análisis semicuantitativos obtenidos por DRX para las muestras evaluadas

No.	Pozo E. D	Intervalo de profundidad (metros)	% Palyg.	% Arcilla montm.	% Cuarzo	% Plag.	% Cristob.	% Óxidos amorfos	% Arcilla clorita	% Goethita
1	11	4,70 - 4,75	8	30	54	4	1	2	1	-
2	12	1,60 - 1,65	34	31	22	7	1	3	1	1
3	16	5,10 - 5,15	6	25	48	15	1	2	2	1
4	16	8,15 - 8,20	90	2	4	-	1	2	1	-
5	15	2,95 - 3,00	12	22	50	4	-	3	5	5
6	15	5,70 - 5,75	51	20	20	3	1	1	2	2
7	18	1,95 - 2,00	64	16	8	3	3	4	2	-
8	14	3,60 - 3,65	82	7	3	2	2	2	2	-
9	13	1,20 - 1,25	30	21	34	5	2	3	2	3
10	10	2,95 - 3,00	60	22	5	2	2	2	2	5
11	13	5,35 - 5,40	75	8	8	1	2	2	2	2
12	18	4,90 - 4,95	20	30	42	2	1	2	1	2
13	19	2,30 - 2,35	10	25	54	2	2	2	2	3
14	17	1,80 - 1,85	80	10	3	1	1	1	1	3
15	17	8,70 - 8,75	20	30	36	3	2	4	3	2
16	17	10,55 - 10,60	63	10	17	2	2	3	1	2

Los resultados de la tabla II, indican que las muestras pueden clasificarse en cuatro tipos de menas, de acuerdo a los contenidos máxicos de palygorskita en: **tipo I ($\geq 75\%$)**; **tipo II ($> 50 \wedge < 75\%$)**; **tipo III ($> 30 \wedge < 50 \%$)** y **tipo IV ($< 30\%$)** respectivamente.

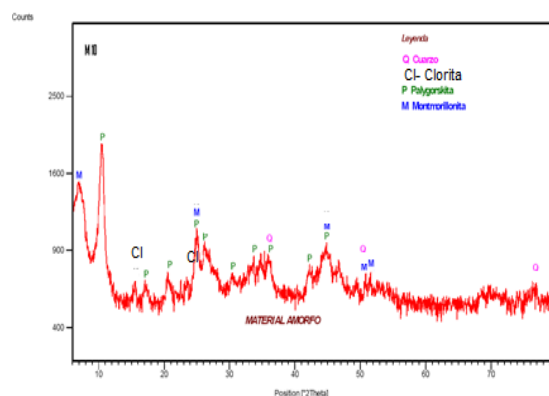
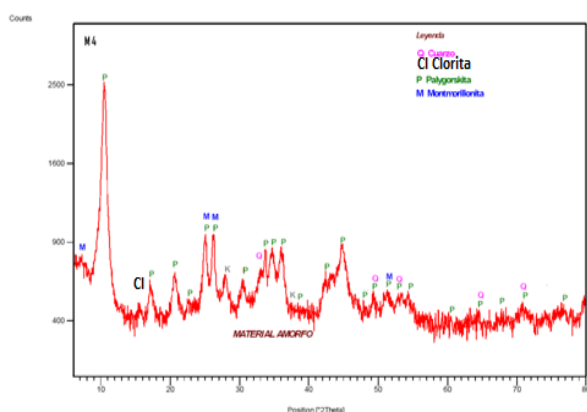
Se señala que del total de muestras analizadas, solo cumplen con el requisito del 70% de palygorskita para su empleo en el secado del turbocombustible (tipo I), el 25% del total de las mismas (muestras 4, 8, 11, 14).

Del mismo modo para el tipo natural de mena (II), el 25% del total de las muestras (6, 7, 10 y 16) cumplen con dicho requisito, proponiéndose utilizarlas en las siguientes aplicaciones: (1) tratamiento de residuos tóxicos, (2) soporte de fungicidas, herbicidas y pesticidas; (3) coadyuvante de filtración; (4) controlador de humedad; (5) absorbentes de aceites y grasas; (6) clarificador en la industria de bebidas y licores (en sustitución de sus correspondientes productos importados DECALITE y PERLITA), donde no solo se requieren contenidos apreciables de palygorskita, sino también de arcillas microporosas con propiedades de sorción tales como las del grupo de esmectitas (montmorillonita, beidelita, etc.).

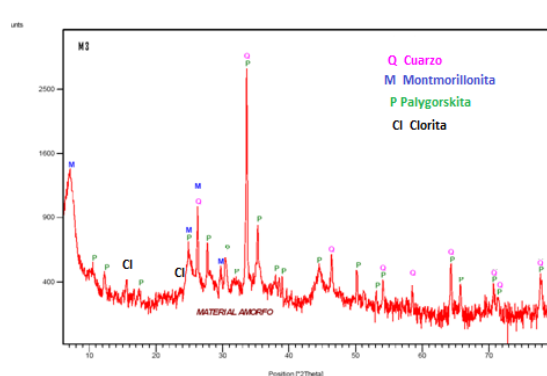
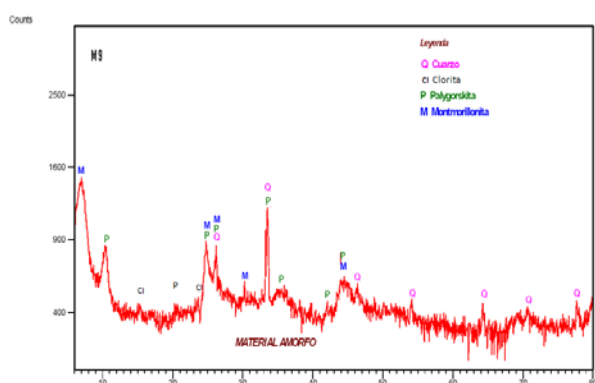
Por su parte, las muestras 2 y 9 (12,5% del total) cumplen los intervalos de contenidos máxicos de mineral útil para el tipo III, proponiéndose en aquellas aplicaciones que se relacionan con la preparación de lechos de peces ornamentales, la cría de aves, perros y gatos domésticos, en sustitución de las arcillas comerciales (AA 60 / 100 y AAS <100).

De la misma forma, las muestras (1, 3, 5, 12, 13 y 15) se agrupan en el tipo IV de menas que constituyen las de mayor aporte respecto al total analizadas (37,5%), pudiéndose emplear en la elaboración de formulaciones personalizadas de fertilizantes y/o enmendantes de suelos con propiedades ecológicas, en mezclas con materia orgánica mediante la tecnología desarrollada en el CIPIMM por Velázquez M *et al.* (2012)⁷.

En las figuras 1, 2, 3 y 4 se muestran los difractogramas característicos para los cuatro tipos representativos de menas presentes en el depósito (muestras 4, 10, 9 y 3) respectivamente.



Figuras. 1 y 2. Difractogramas de las muestras compuestas 4 y 10 del yacimiento “Pontezuela” (TIPO I y II)



Figuras 3 y 4. Difractogramas de las muestras compuestas 9 y 3 del yacimiento “Pontezuela” (TIPO III y IV)

(2) Análisis Térmico (CDB -TG - D1TG)

El objetivo de aplicación de esta técnica consistió en corroborar por un lado, los resultados obtenidos por DRX a fin de sustentar la clasificación de las menas por contenidos máxicos de palygorskita, y por otro lado, precisar la cuantificación de las arcillas identificadas y otras fases acompañantes en el intervalo de temperatura de interés. Los resultados obtenidos se reportan en la tabla III.

En la dicha tabla se observa buena coincidencia entre los contenidos que se reportan para las fases térmicamente activas presentes en las menas (montmorillonita, palygorskita, clorita, goethita) y los DRX (tabla II), confirmándose la veracidad de la clasificación que se propone para las menas.

Tabla III. Resultados Termogravimétricos cuantitativos obtenidos para las muestras de “Pontezuela”

No. muestra compuesta	% Palygorskita	% Montmorillonita	% Goethita	% Clorita
1	13	35	1	2
2	34	36	5	1
3	9	27	-	2
4	93	2	1	1



5	18	26	9	5
6	52	23	3	2
7	55	11	-	1
8	80	6	-	1
9	33	25	3	-
10	56	26	9	2
11	75	7	2	2
12	23	32	1	4
13	17	32	4	2
14	78	10	4	-
15	21	35	2	3
16	61	14	2	-

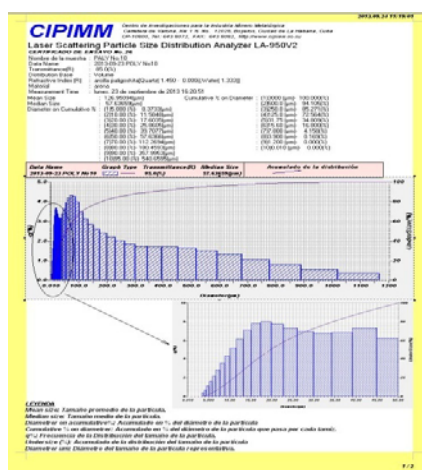
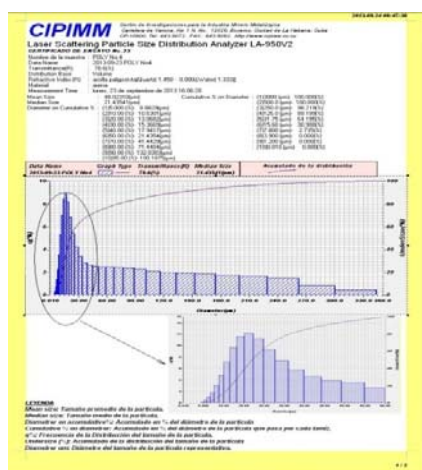
Notas: Tipo I ($\geq 75\%$); tipo II ($> 50 \wedge < 75\%$); tipo III ($> 30 \wedge < 50 \%$); tipo IV ($< 30\%$)

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por ambas técnicas, se realizaron con posterioridad pruebas preliminares de beneficio mediante el empleo de la variante de flotación (escala de laboratorio) en el CIPIMM, para ello se seleccionó la de mena tipo II, con la finalidad de incrementar los contenidos de arcillas útiles (palygorskita, montmorillonita) y disminuir por otro los de cuarzo y el resto de impurezas acompañantes. Los resultados obtenidos arrojan mayores contenidos másicos de ambas arcillas en los concentrados (incremento de la ley del 15%) con respecto al mineral cabeza, los que resultan prometedores ya que permitirían elevar a categorías superiores los recursos para las menas tipo II y/o tipo III del yacimiento.

(3) Ensayo por distribución de tamaño de partículas (% q vs. D)

Los ensayos de distribución por tamaños de partículas tuvieron como objetivo establecer correlaciones entre la distribución poblacional de partículas finas ($< 2,0 \mu\text{m}$) con aquellas de mayores tamaños en función de la composición mineralógica de las muestras, hecho que reflejan los correspondientes diagramas de Distribución de frecuencia (% q) vs. (Diámetro de partícula, D) en el intervalo de trabajo que se seleccionó ($0.01 - 1,200 \mu\text{m}$), utilizándose para ello las propias muestras 3, 4, 9 y 10 representativas (figuras 5, 6, 7 y 8).

En la figura 5 que se logra para la muestra 4 (tipo I), se observa el predominio de la distribución de pequeños tamaños de partículas ($0.010 - 30 \mu\text{m}$; máximo $15 \mu\text{m}$). Este comportamiento guarda relación con el contenido de arcilla en la muestra y coincide con los resultados que se reportan por DRX y Análisis Térmico (91% palygorskita, 2% montmorillonita) e impurezas acompañantes (7%), obteniéndose un tamaño promedio ($D = 48,02 \mu\text{m}$).

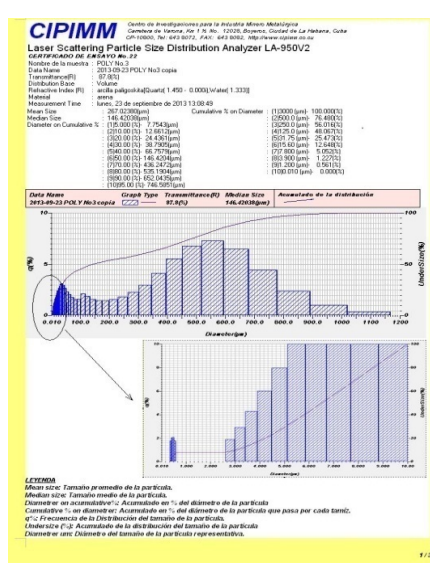
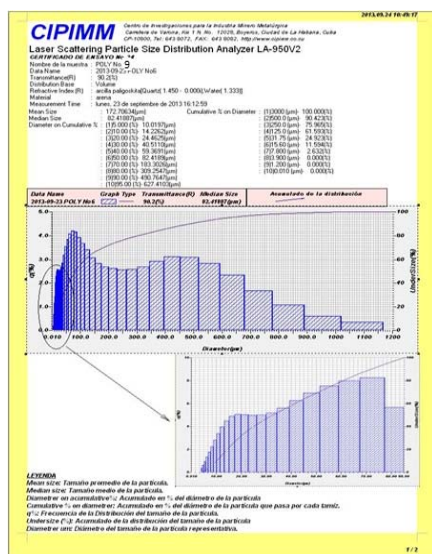


Figuras 5 y 6. Distribución de tamaño de partículas para las muestras compuestas # 4 y 10 de “Pontezuela” (tipo I y II)

Para el tipo II de menas (muestra 10, figura 6), se aprecia también predominio de la fracción de menores tamaños de partículas vinculada a las arcillas, cuyos contenidos promedios según DRX y A.Térmico son del 58% de palygorskita y 24% de montmorillonita respectivamente, sin embargo, debe destacarse que la contribución de la población de mayores tamaños por presencia de impurezas aumenta respecto a la muestra anterior (18%), lo cual se refleja en su correspondiente histograma de distribución de frecuencias. En este tipo de mena el tamaño promedio de partículas es mucho mayor que el obtenido para la mena tipo I ($D = 126,95 \mu\text{m}$).

En la muestra 9 (figura 7) las distribuciones normales de tamaños de partículas señalan que el contenido de arcillas palygorskita y montmorillonita es significativo (31% palygorskita y 23% montmorillonita), no obstante, la contribución de impurezas (49%) también es importante y del mismo orden que la fracción fina y guarda estrecha relación con el tipo III de menas. En dicha muestra el tamaño promedio de partículas es superior a los tipos I y II ($D = 172,70 \mu\text{m}$).

Por último, en el gráfico de distribución de tamaños de partículas para la muestra 3 tipo IV (figura 8), se observa que el contenido de impurezas no arcillosas (cuarzo, plagioclasas y goethita entre otras) alcanza el 69%, mientras que el de palygorskita y montmorillonita alcanza solo el 6% y 26% respectivamente, por dicho motivo, la población de tamaños mayores donde predominan las impurezas. Se señala además que el tamaño de partículas promedio es significativo ($D = 267,02 \mu\text{m}$) dada la elevada cantidad de impurezas presentes.



A partir del análisis de los histogramas de distribución de tamaños de partículas que se logran para los diferentes tipos, se establece una tendencia que relaciona la contribución de arcillas respecto a sus impurezas acompañantes, resultado que presenta un interés práctico cuando se precise llevar a cabo el control mineralógico de productos del beneficio que se obtengan por la variante de flotación, teniendo en cuenta los resultados que se lograron, los que se resumen en la siguiente tabla (tabla IV).

MUESTRA COMPUESTA	Tipo mena	Tamaño promedio de partículas D (μm)
4	I	48,02
10	II	126,95
6	III	172,70
3	IV	267,02

La utilización de la técnica de MEB tuvo como finalidad conocer por una parte las características morfológicas de las partículas de palygorskita (forma, tamaño, textura) y determinar por otro lado, la microcomposición elemental del mineral de “Pontezuela” mediante el empleo de la microsonda (EDS) estableciendo la correspondiente comparación con aquellas muestras de palygorskitas que se reportan en diferentes localidades del mundo (figuras 9 y 10).

SEXTA CONVENCION CUBANA DE CIENCIAS DE LA TIERRA, GEOCIENCIAS '2015



FRACCIÓN	% O	% Mg	% Al	% Si	% Fe	% Total
Fina (≤ 0.1 mm)	55.23	9.91	3.00	23.62	8.24	100
Gruesa (> 1.00 mm)	55.25	9.38	2.72	23.78	8.87	100
Media (≤ 0.5 mm)	55.13	9.39	2.68	23.84	8.96	100

Tabla V. Resultados cuantitativos obtenidos por EDS en tres fracciones de la muestra 4 (rica en arcilla palygorskita) del yacimiento "Pontezuela"

En la imagen MEB (figura 10) se observan partículas finas con formas sub-redondeadas o angulosas (< 0.1 mm), las que presentan a su vez una textura granular microporosa característica de la palygorskita, hecho que favorece los procesos físico-químicos de sorción en las que estas pudieran emplearse.

Según considera Nemecz E (1980)¹, la microcomposición elemental que se logra por EDS (figura 10), es típica para arcillas del grupo de las hormitas (palygorskita), además no se observaron diferencias apreciables entre los contenidos de Si, Mg, Al y Fe entre fracciones, hecho que confirma buena homogeneidad química.

Al compararse la microcomposición del mineral cubano con otras muestras de palygorskitas que reporta la literatura (Nemecz E, 1981)¹, vemos que los contenidos de hierro son mayores en el mineral de "Pontezuela", lo cual se debe a la asociación del oxihidróxido de hierro goethita presente como impureza acompañante e identificada tanto por DRX como Análisis Térmico. No obstante, existe también la posibilidad de sustitución isomórfica del aluminio por parte del hierro total en la estructura cristalina del mineral cubano: $(\text{Mg}^{2+}, \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+})_2 [(\text{OH})_4 (\text{OH}_2)_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10}]. 4\text{H}_2\text{O}$.

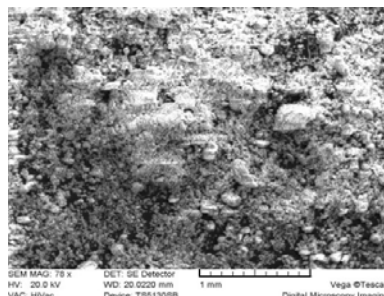
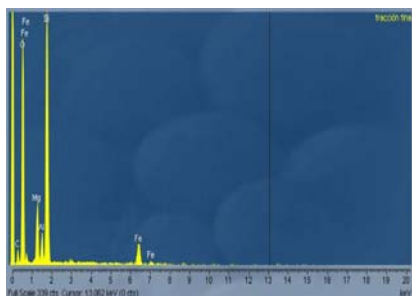
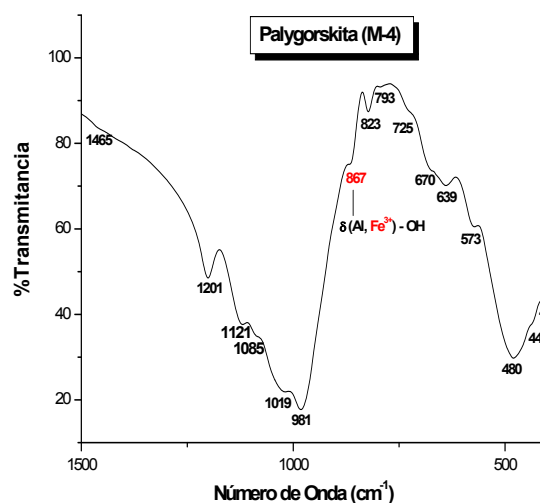
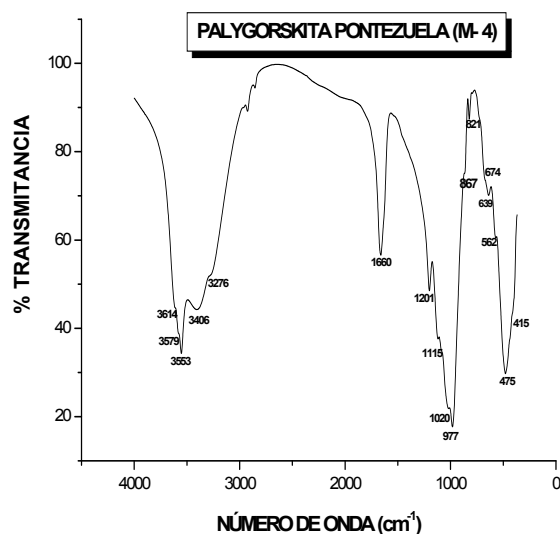


Figura 9. Espectro EDS muestra 4

Figura 10. Imagen MEB muestra 4

(e) Espectroscopía infrarroja (IR)

La utilización de esta técnica experimental tuvo como objetivo delimitar la asociación del hierro en la estructura del mineral palygorskita, para ello se obtuvo el correspondiente espectro IR de la propia muestra 4, registrada en dos intervalos espectrales diferentes (figuras 11 y 12).



Figuras 11 y 12. Espectros IR de la muestra 4 del yacimiento “Pontezuela”

En el espectro completo que corresponde al intervalo de 4000 - 400 cm^{-1} (figura 11) se identifican las bandas de vibración (γ) y deformación (δ) de los enlaces asociados a los grupos funcionales de la palygorskita según plantean Van Olphen H y Fripiat J.J (1979)⁸: γ OH; γ O - Si - O; δ Al - OH y δ Mg - OH. Por su parte, en el espectro que se logra en el intervalo de 1500 y 400 cm^{-1} se observa como la banda que aparece en $\gamma = 867 \text{ cm}^{-1}$, se asigna a la vibración de deformación (δ Al - OH) y señala la posible sustitución isomórfica del Fe^{3+} por Al^{3+} en la estructura del mineral cubano (figura 12).

CONCLUSIONES

- Mediante el empleo de técnicas instrumentales combinadas de DRX y Análisis Térmico en sus variantes (CDB-TG-D1TG), se determinó la composición mineralógica de 16 muestras compuestas del depósito “Pontezuela”, lo cual permitió clasificarlas en cuatro tipos de menas a partir de los contenidos máxicos del mineral palygorskita en: (1) $\geq 75\%$ (tipo I; 25%); (2) $> 50 \wedge < 75 \%$ (tipo II; 25%); (3) $> 30 \wedge < 50\%$ (tipo III, 12,5%) y (4) $< 30\%$ (tipo IV; 37,5%) respectivamente.
- Sobre la base de la clasificación que se propone, es factible sustituir los diferentes tipos de menas de “Pontezuela” en diferentes aplicaciones industriales por algunos productos comerciales importados que se utilizan en el país, como por ejemplo: (1) **ATTAPULGITA** (secado del turbocombustible) **por menas tipo I**; (2) **DECALITE y PERLITA** (tratamiento de residuos tóxicos, soporte de fungicidas, herbicidas y pesticidas, coadyuvante de filtración, controlador de humedad, adsorbentes de aceites y como clarificador en la industria de bebidas y licores); **menas tipo II**; (3) **AA 60 /100, AAS < 100** para la elaboración de lechos para piscicultura, aves y perros; **menas tipo III**; (4) **fórmulas completas NPK** para su empleo en mezclas de minerales con propiedades ecológicas en la agricultura (**tipo IV**).
- El ensayo de distribución por tamaños de partículas en el yacimiento “Pontezuela” con el empleo del analizador laser del CIPIMM, demostró su utilidad para llevar a cabo el Control Mineralógico de fases arcillosas e impurezas acompañantes en menas naturales palygorskíticas y/o productos del beneficio, pues se logran histogramas de distribución de frecuencias diferentes para cada tipo de mena, a la vez que resulta un análisis menos costoso que los instrumentales de fases que se realizan.



4. La valoración microestructural del mineral palygorskita del depósito “Pontezuela” por MEB corrobora la textura microporosa, dado el pequeño tamaño y morfología subredondeada que presentan sus partículas, confiriéndole al mineral elevada Área Superficial y Volumen de poros. Del mismo modo, la composición elemental que se obtuvo por EDS, es semejante a palygorskitas que reporta la literatura consultada excepto en los mayores contenidos de hierro, los que se vinculan a impurezas de goethita (α -FeOOH) y a efectos de sustitución isomórfica de Fe^{3+} por Al^{3+} en la estructura del mineral, lo cual se verificó a través del empleo de la Espectroscopía IR.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Pérez, J.A; Casanova Gómez, A; Martínez Montalvo, A y otros 2014.** Caracterización preliminar de muestras compuestas de palygorskita del yacimiento Pontezuela. II Taller de Técnicas de Laboratorio de las Geociencias, Filial Habana, Sociedad Cubana de Geología, Instituto Politécnico del Petróleo, 24 de Enero, La Habana, Cuba.
- Cavado, A; Iraola, D y otros 2009.** Resultados obtenidos en INTEVEP-PDVSA Venezuela acerca de la utilización de la arcilla palygorskita cubana del yacimiento Indira en el secado del turbocombustible. Informe final de proyecto, CEINPET, CUPET-MINBAS.
- Chung, F.H 1974.** Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures 1. Matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis, J. Appl. Cryst. 7, 519-525.
- Nemecz, E 1981.** Clay Minerals, Ed. Akadémiai Kiadó, Budapest, ISBN 963 05 1989 5
- Van Olphen, H; Fripiat, J.J 1979.** Data Handbook for clay materials and other non-metallic minerals, Ed. Pergamon Press Inc., England, ISBN 0-08-022850-X
- Vega, N; Alonso, J.A; Zalba, P; Cavado, A; Iraola, D 2009.** Caracterización y comparación de la arcilla utilizada en la producción de turbocombustible con la palygorskita cubana del yacimiento Indira”, 3ra Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, III Congreso de Minería (MINERÍA 2009), MINIMETAL IV, Simposio de Minería y Metalurgia MIN 4-07, La Habana, ISBN 978-959-7117-19-3.
- Velázquez Garrido, M; Montejo Serrano, E y otros 2010.** Investigaciones para el uso de la palygorskita en la economía nacional. Informe final de etapa, CIPIMM.
- Velázquez Garrido, M; Montejo Serrano, E y otros 2012.** Proyecto de Transferencia Tecnológica de agromenas. Informe final, CIPIMM.