

VALORACIONES ACERCA DEL AVANCE DE LA METEORIZACIÓN EN LA REGOLITA DE GABRO DEL SECTOR "CAYO GUAM" EN MOA (PROV. HOLGUIN)

ASSESSMENTS ON THE PROGRESS OF WEATHERING IN THE GABBRO REGOLITH OF THE "CAYO GUAM" SECTOR IN MOA (HOLGUIN PROVINCE)

 JOSÉ ANTONIO ALONSO PÉREZ¹,  WALDO DAMIÁN LAVAUT COPA¹,  GISELLE VALDIVIA GARCÍA²,
 MERCEDES TORRES LA ROSA¹,  INÉS MILIA GONZÁLEZ^{3*},  CARBENY RAMIRO CAPOTE MARRERO¹,
 XIOMARA CAZAÑAS DÍAZ¹,  RAFAEL ANTONIO ALONSO RODRÍGUEZ³

¹Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba (IGP-SGC). Vía Blanca No. 1002. Municipio San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba. Correo-e: waldo23@gmail.com, mtlarosa@igp.minem.cu, dprospeccion@igp.minem.cu

²Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), MINEM, Carretera de Varona No. 12028, Km 1½, Boyeros, La Habana, Cuba. Correo-e: giselle@cipimm.minem.cu

³Centro Nacional de Investigaciones Científicas; Ave. 25, esq. 21-A, Reparto Cubanacán, Playa, La Habana, Cuba. Correo-e: ralonsorodr@gmail.com.

*Correspondencia: josea@igp.minem.cu

RESUMEN: Se presentan resultados de composición química y mineral en la regolita de gabro que se muestreó en una zona del sector "Cayo Guam" de la región de Moa, con el objetivo de determinar la intensidad, clasificación del proceso de meteorización y determinación del espesor de mineral arcilloso útil en la regolita, respectivamente. Como métodos de investigación se emplearon los índices: químico de alteración (CIA) y máfico-ultramáfico (UMIA), los cuales permitieron clasificar dicho evento de meteorización como de extrema intensidad (grado VI; UMIA = 41.09 - 94.07%; CIA = 56.43 - 96.56%). De igual forma mediante el empleo de tres variantes de Análisis Termogravimétrico se determinó la composición mineral de la regolita, constatándose presencia de mezclas de arcillas caolínicas de estructura desordenada y halloysita, minerales que se advierten desde los niveles más profundos de la regolita, clasificándose la misma como sialítica simple (caolínica), proceso que culminó con el de lateritización-alitización y formación simultánea de bloques de alcreta de composición gibbsita que se observan en la zona superficial del perfil finalmente (IOL: 79.21 - 79.78%). Los resultados que se lograron se consideran similares a los que obtuvieron otros investigadores en la propia región, en consecuencia indican que la regolita del sector investigado, dado el espesor útil de la capa caolínica (0.5 - 16.30 m), presenta buenas potencialidades para su empleo como fuente de materiales cementicios suplementarios y en la confección de elementos refractarios de cerámica roja.

Palabras clave: regolita, gabro, caolinita, halloysita, índices de meteorización.

ABSTRACT: Results of chemical and mineral composition in the gabbro regolite sampled in an area of the "Cayo Guam" sector of the Moa region are presented, with the objective of determining the intensity, classification of the weathering process and determination of the thickness of useful clay mineral in the regolite, respectively. As research methods, the following indexes were used: chemical alteration index (CIA) and mafic-ultramafic index (UMIA), which allowed classifying this weathering event as of extreme intensity (grade VI; UMIA = 41.09 - 94.07%; CIA = 56.43 - 96.56%). The mineral composition of the regolith was also determined using three variants of Thermogravimetric Analysis, showing the presence of mixtures of kaolinitic clays of disordered structure and halloysite, minerals that can be seen from the deepest levels of the regolith, classifying it as simple sialitic (kaolinitic), a process that culminated with lateritization-alitization and simultaneous formation of alkali blocks of gibbsite composition that are finally observed in the superficial zone of the profile (IOL: 79.21 - 79.78%). The results obtained are considered similar to those obtained by other researchers in the region itself, and therefore indicate that the regolith of the investigated sector, given the useful thickness of the kaolinitic layer (0.5 - 16.30 m), presents good potential for its use as a source of supplementary cementitious materials and in the manufacture of refractory elements for red ceramics.

Keywords: regolith, gabbro, kaolinite, halloysite, weathering index.

Recibido: 12/01/2024

Aceptado: 18/02/2024



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



INTRODUCCIÓN

Alujas et al., (2018), Almenares et al., (2017), entre otros investigadores, consideran que la expansión de la industria del cemento a nivel global, constituye un motivo de preocupación tanto para los expertos como las autoridades del medio ambiente, motivado por los elevados volúmenes de gases de efecto invernadero (CO₂) que se emiten a la atmósfera durante el proceso de calcinación de la materia prima mineral en los hornos rotatorios industriales. En ese sentido, las empresas cementeras productoras, se interesan cada vez más por establecer nuevas estrategias de expansión que ofrezcan alternativas ecológicas cada vez más eficientes, con el propósito de darle cumplimiento a las normas de vertimiento ambiental vigentes en los diferentes países, para ello ejecutan un número importante de proyectos (I+D+i) encaminados a la elaboración de formulaciones en base: clínquer- arcilla calcinada-caliza.

Entre los materiales cementicios suplementarios (MCS) convencionales que con tales fines se utilizan, cabe mencionar las escorias granuladas y cenizas volantes que proceden de las industrias minero-metalúrgicas, sin embargo, su utilización presenta cada vez más obstáculos, relacionados (entre otros aspectos) con las acciones de (oferta / demanda) que a mediano y/o corto plazo establecen los mercados internos de diferentes países, con el propósito de garantizar el suministro estable de los mismos a las industrias cementeras (Almenares et al., 2017) . De igual forma y con similares propósitos, se emplean además regolitas de composición arcilloso-caoliníticas para la formulación de mezclas en base clínquer - arcilla calcinada (metacaolín) - caliza, dado que estas mantienen y/o incrementan la resistencia mecánica y durabilidad de la matriz cementicia, en consecuencia, el consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera disminuye, tal como lo refieren Alujas et al., (2018) y Almenares et al., (2017) entre otros investigadores.

Por su parte, Benítez et al., (2023) citando a Cohen et al., (2010), definen la regolita en su concepto más amplio, como aquel material de origen supergénico que cubre la roca fresca de diversas composiciones petromineralógicas, al unísono constituye un testigo importante e inequívoco de las condiciones del clima, la paleogeografía, el paleorelieve y la geología. Para la cartografía de la superficie resulta crucial debido a su correspondencia con las formas del terreno.

Por lo expuesto, la búsqueda de fuentes alternativas de MCS a partir del proceso de calcinación de las arcillas caoliníticas (metacaolín) a temperaturas que oscilan entre los 600 y 700 °C, resulta un tema de investigación y vigencia actual, dada la abundancia relativa de los citados recursos geológicos en los yacimientos que se ubican en diferentes regiones del país.

En Cuba, en concordancia con la Norma Cubana (NC TS 528: 2013) y las modificaciones propuestas por Alujas et al., (2018), se indicaron los parámetros tanto primarios como complementarios de calidad que deben cumplir las menas que proceden de depósitos caoliníticos cubanos, para la posterior elaboración de mezclas en base clínquer-arcilla calcinada-caliza y obtención de cemento de bajo carbono (LC³). Al respecto cabe añadir además, la influencia determinante que tiene en la respuesta de la actividad puzolánica de la formulación de clínquer-arcilla calcinada - caliza del cemento, en este caso de bajo carbono (LC3) que se elabore, el grado de (orden-desorden) del mineral caolinítico presente en la composición mineral de las menas en los yacimientos, por tal motivo debe tenerse en cuenta también y evaluarse mediante la aplicación de alguna de las técnicas instrumentales de análisis estructural con que se disponga al efecto en cada país, tal como plantearon Almenares, (2017), Figueredo (2017) y Alujas et al., (2018) entre otros.

De ahí que, que la situación problemática de la investigación que se plantea consiste en que, no se dispone de información actualizada en relación con la clasificación e intensidad que determinó el espesor de mineral arcilloso útil presente en la regolita acumulada durante el proceso de meteorización en la zona del sector "Cayo Guam" que se evalúa, asimismo, en qué medida, ese

proceso resultó similar o no en magnitud al de la regolita que se investigó en etapas pretéritas en una zona aledaña del propio sector, hecho que imposibilita, en el momento actual, la toma de decisiones para el aprovechamiento integral de la materia prima mineral a mediano o corto plazo para su posible empleo en la industria de materiales de la construcción en el municipio Moa".

Por lo expuesto, el problema que se plantea es el siguiente: "Se desconoce como transcurrió el avance del proceso de meteorización que tuvo lugar en la regolita de gabro del sector "Cayo Guam" en el área de muestreo evaluada en la presente investigación".

De igual forma, el objeto de estudio considera: "Los índices de meteorización química, así como el uso de las técnicas combinadas de Análisis Térmico (TG-DTG-DDTG), que determinaron la clasificación, regularidades de composición mineral y espesor de mineral arcilloso útil que se sucedieron durante las neoformaciones de meteorización en la regolita de gabro en la zona del sector "Cayo Guam" que se investigó".

El objetivo general es : "Caracterizar el proceso de meteorización en de la regolita de gabro del sector "Cayo Guam" que permita proponer sus potencialidades de uso actual en el municipio Moa".

Como objetivos específicos se plantearon los siguientes:

1. Realizar el muestreo representativo -desde la profundidad hasta la superficie del perfil de regolita- del sector objeto de investigación.
2. Determinar la composición química y de fases de cada una las muestras seleccionadas.
3. Calcular los índices de meteorización: (1) índice químico de alteración (CIA); (2) máfico-ultramáfico (UMIA), (3) lateritización (IOL), a fin de establecer las litologías correspondientes e intensidad del proceso global de meteorización que transcurrió en el perfil.
4. Proponer potencialidades de uso que resulten más atractivas para la regolita del sector sobre la base de los resultados obtenidos.

A fin de darle respuesta al problema científico, se propuso la siguiente hipótesis de investigación (causa-efecto): "Mediante el cálculo de los índices de meteorización; CIA, UMIA e IOL, así como la identificación de los minerales presentes en la regolita de gabro del sector "Cayo Guam", se dispondrá de información veraz acerca de la intensidad y clasificación del proceso de meteorización, así como del espesor de mineral útil que posibilite su posterior empleo como fuente de materia prima para la industria de materiales de la construcción en el municipio Moa, finalmente".

MATERIALES Y MÉTODOS

En las Figuras 1 y 2 se muestra el mapa geológico en el que se señalan, coordenadas Lambert y vista general del perfil de regolita objeto de investigación, representado como parte del complejo ofiolítico de gabro del macizo Sagua - Moa - Baracoa dentro del contexto geológico regional, ampliamente diseminado en toda el área de estudio (Njila y Díaz-Martínez, 2016). Dentro ellas destacan, por su interés actual, las litologías propias del complejo cumulativo básico pertenecientes a la corteza oceánica, representada a su vez por extensos cuerpos de gabroides en forma de diques, con rasgos propios de gabros bandeados en la base del complejo, mientras que hacia la parte superior se aprecia la textura propia de los gabros isotrópicos, señalándose la presencia adicional de afloramientos arcillosos de regolitas caoliníticas con potencias que alcanzan en el caso de la regolita de "Cayo Guam" entre 0.5 - 16.3 m (OMoa-b). Se señala, además, que el muestreo de la regolita se realizó en la margen contraria del río del mismo nombre al que realizaron con anterioridad los referidos investigadores.

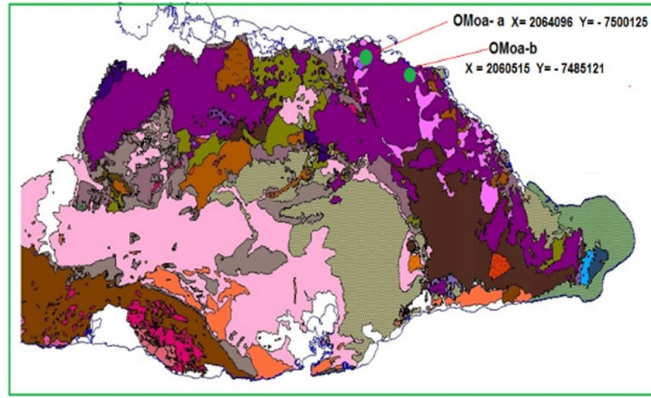


FIGURA 1. Mapa geológico con la ubicación (en coordenadas Lambert) de las regolitas de "Centeno" (OMoa-a) y "Cayo Guam" (OMoa-b) objeto de investigación vinculadas al macizo ofiolítico "Sagua - Moa - Baracoa" (Lavaut-Copa et al., 2022)



FIGURA 2. Se muestra el perfil de regolita "Cayo Guam" en Moa (OMoa-b). En la imagen se aprecian los bloques de alcreta que se extienden sobre la superficie de la regolita (Lavaut-Copa et al., 2022)

En la [tabla I](#) se señala la zonalidad litológica del perfil de regolita seleccionado, para ello se tuvieron en cuenta los criterios de clasificación propuestos por [Lavaut-Copa et al., \(2022\)](#) que consideran las características litológicas y consistencia final de la regolita, parámetros que de conjunto determinan el grado de madurez del perfil de meteorización que se investiga.

TABLA I. Zonalidad litológica y profundidades a las que fueron tomadas las muestras de regolitas de gabro en el sector de "Cayo Guam" (OMoa-b)

Muestra	Intervalo (m)	Litología
OMoa b-8	0.00 - 0.10	Alcreta
OMoa b-6	0.10 - 0.50	Laterita típica nodular
OMoa b-5	0.50 - 1.80	Sialitita aluminosa no nodular
OMoa b-4	1.80 - 4.30	Sialitita aluminosa no nodular
OMoa b-3	4.30 - 14.30	Saprolita fina aluminosa
OMoa b-2	14.30 - 16.30	Saprolita gruesa aluminosa
OMoa b-1	0.00 - 0.00	Gabro (protolito)

Equipos y selección de parámetros

Composición química de elementos mayoritarios

Para la determinación de la composición química de elementos mayoritarios en las muestras analizadas, se procedió inicialmente a la digestión, mediante fusión con metaborato de litio (LiBO_2) en un equipo (Fluxy) modelo M-4 de la *Corporation Scientifique Claisse Canada*, Quebec, 2010, el cual posee tres quemadores. De cada tipo de muestra se pesaron 500 mg los que fueron mezclados con 2,5 g de metaborato de litio (LiBO_2) y fundidos en el equipo automatizado de fusión. Finalmente, la muestra resultante se lixivió con posterioridad con 50 mL de HCl $1,75 \text{ mol}^* \text{ L}^{-1}$.

Las medidas de las intensidades de las líneas de emisión se realizaron en un espectrómetro ICP-OES, modelo Spectro ARCOS del Lab. "Elio Trincado" de la Empresa Geominera Oriente, con observación radial del plasma y comercializado por la empresa *SPECTRO Analytical Instruments*, Alemania. Los parámetros se listan en la [Tabla II](#).

TABLA II. Parámetros de operación utilizados del espectrómetro ICP-OES, modelo "Spectro ARCOS" (Lab. "Elio Trincado" Empresa Geominera Oriente)

Parámetro	Valor
Modo de observación	Axial
Modelo del nebulizador	Lichte modificado
Tipo cámara de nebulización	Ciclónica vidrio
Antorcha cuarzo (\varnothing interior)	2.5 mm
Tiempo de lectura	28 segundos
Generador de radiofrecuencia	27.12 MHz
Potencia radiofrecuencia	
Alta Mg II/ Mg I	1400 W
Baja Mg II/Mg I	900 W
Flujo de Argón (plasma)	12 L /min
Flujo Argón (nebulizador)	0.8 L/min
Alta Mg II/ Mg I	1.3 L/min
Baja Mg II/Mg I	
Flujo Argón (auxiliar)	1.0 L/min
Velocidad aspiración muestra	2.0 mL/min

TABLA III. Parámetros de operación del termoanalizador NETZSCH STA 449 - F3

Régimen de calentamiento	Dinámico
Masa de muestra (mg)	Se consigna en cada termograma
Masa del material de referencia	60.00 mg ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)
Tipo de crisoles	Al_2O_3 (tamaño estándar)
Material del horno	SiC ($T_{\text{amb}} - 1500^\circ\text{C}$)
Gas en cámara de calentamiento	Aire
Flujo gas protector	200 ml/min (Ar)
Velocidad de calentamiento	10.0 K /min
Sensibilidad de la termobalanza	0.001 mg - 35.0 g
Sensibilidad termogramas ATD y TG	- 0.001 - 5000 $\mu\text{V}/\text{mg}$
Tiempo total de medición	1h 37 min y 10 seg.
Intervalo de temperatura	27-1000°C

Composición mineral

Con la finalidad de obtener la composición de los minerales térmicamente activos presentes en la regolita de gabro de Moa, en particular las arcillas e impurezas (goethita, alumogoethita y gibbsita), se registraron termogramas simultáneos de Termogravimetría (TG), así como su primera y segunda derivada (DTG, D2TG), en el termoanalizador modelo STA 449 F3 de la firma alemana

NETZSCH del CIPIMM. Los parámetros de operación se listan en la **tabla III**. Como aspecto de interés se señala que, en el caso del análisis cuantitativo mediante el uso de dicha técnica, el error relativo es $\pm 5.00\%$ para concentraciones altas y medias, mientras que en el caso de concentraciones bajas de los minerales que se identificaron, dicho error relativo osciló entre 8 y 10%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción petrográfica del gabro bandeado de la región de Moa

Las características petrográficas del gabro olivínico bandeado de la región de Moa, el cual presenta a su vez estructura masiva y textura alotriomórfica, granular bandeada; en algunos sectores poiquilitica, mientras que los cristales se desarrollan en forma de granos finos a gruesos. Los principales minerales son: plagioclasa, clinopiroxeno, olivino, mientras que el ortopiroxeno resulta escaso. Las plagioclasas constituyen el 45% del volumen de la roca, son de composición labradorita (AN_{54}). Se observa en un sector plagioclasas pequeñas, de bordes redondeados que varían de 0.36 mm a 1.28 mm. En otro se presenta una granulometría gruesa, con formas tabulares anchas, a veces intersticial, cuyos tamaños son aproximadamente de 4,2 x 1,6 mm. En general, son cristales frescos, pero en algunas zonas hay cristales con manchas oscuras de aspecto criptocristalino y relieve alto, constituido por una mezcla de calcita y caolinita (Colectivo de autores, IGP-SGC, 2018).

El clinopiroxeno generalmente, es del tipo augita de forma irregular e intersticial, generalmente anfibolitizado, representa el 30% de la composición de la roca, mientras que el ortopiroxeno resulta escaso (1-2%), también de forma irregular e intersticial, de baja birrefringencia y con mayor grado de alteración. Se observan inclusiones de pequeños granos de magnetita de forma subhédricas. Por su parte, el olivino representa el 20% de la composición petrológica de la roca, aparece en forma intersticial y en cristales xenomórficos. El mismo se encuentra serpentinizado, atravesado por vetas de crisotilo, magnetita segregada en los retículos y además de clorita, observándose desarrollo de iddingsita.

Composición química y mineral de la regolita

En la **tabla IV** se exponen los resultados del análisis químico de elementos mayoritarios, con la finalidad de determinar sus principales regularidades, calcular los índices de meteorización, valorar al unísono sus potencialidades como posibles fuentes de MCS y en la industria de cerámica roja para la confección de ladrillos en base arcilla calcinada.

TABLA IV. Resultados de análisis químico cuantitativo de elementos mayoritarios en las muestras del perfil de regolita seleccionadas

Desde (m)	Hasta (m)	Muestra	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	FeO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	PPI (%)
2 ND	0.10	8	46,03	9,44	15,59	0.67	0.75	0.21	0.10	0.77	25.92
0.00	0.50	6	11,02	8,04	64,00	0.94	1.05	0.21	0.10	2.61	11.24
0.50	1.80	5	31,60	32,50	17,07	0.70	0.70	< 0.1	0.41	0.20	15.70
1.80	4.30	4	31,50	35,82	15,16	0.61	0.79	< 0.1	0.10	0.16	14.34
4.30	14.30	3	33.20	48.90	12.28	0.80	0.86	< 0.1	0.10	0.21	14.29
14.30	16.30	2	26,00	35,50	17,10	1.06	1.47	< 0.1	0.10	0.14	18.75
0.00	0.00	1 (gabro; protolito)	19,10	48,90	7,70	6.72	8.97	1.49	3.24	0.13	2.45

Para el análisis de regularidades de composición química en cada zona del perfil objeto de investigación, se analizó tanto el comportamiento de la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, como el cambio que experimentaron los tenores de Fe_2O_3 desde la profundidad hasta la superficie de la regolita.

Los resultados (Figura 3) señalan disminución abrupta de la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ a partir de la zona de saprolita gruesa de la regolita (prof.: 14.30 -16.30 m) hasta la superficie del perfil, motivado por la neoformación de la plagioclasa cálcica albitizada presente en la composición petromineralógica del protolito (gabro olivínico) en arcillas caolínicas, hecho que se verificó con posterioridad mediante el empleo del Análisis Térmico. De igual forma, en relación con los tenores de óxido de hierro-III (figura 4b) se observó un comportamiento similar desde la profundidad a la superficie, hecho que se justifica por el incremento de minerales oxidados formados a partir de las reacciones de neoformación del olivino presentes en la composición petromineralógica del protolito (goethita, alumogoethita y hematita) cuyos resultados semicuantitativos se muestran en las tablas V, VI, VII, VIII, IX, X, mientras que en las figuras 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se presentan los termogramas (TG-DTG-DDTG) correspondientes.

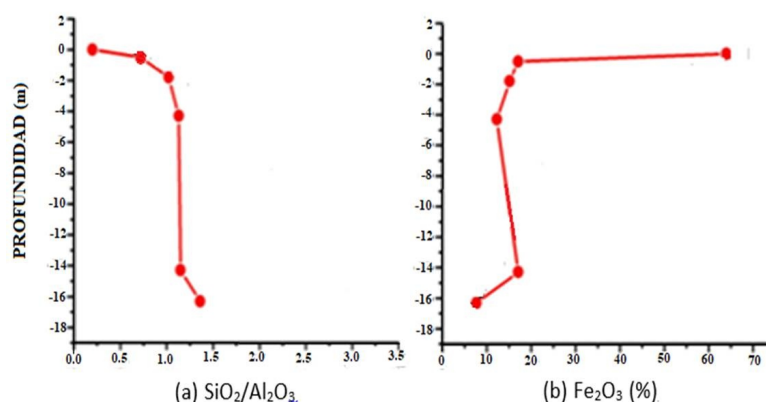


FIGURA 3. Comportamiento de la relación: (a) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; (b) Fe_2O_3 (%) vs. profundidad del perfil de regolita

TABLA V. Resultados del análisis térmico semicuantitativo mediante el empleo de variantes combinadas TG - DTG - DDTG en minerales térmicamente activos en la muestra de laterita típica nodular (muestra Omoab-6)

Minerales identificados	T (máx.) endoeffecto DTG (°C)	Factor estequiométrico de cálculo	Contenido mineral (%)
Alumogoethita; α -(Fe, Al)OOH; 7 %mol Al	333	9.29	78
Halloysita	500	8.20	4
Total			82

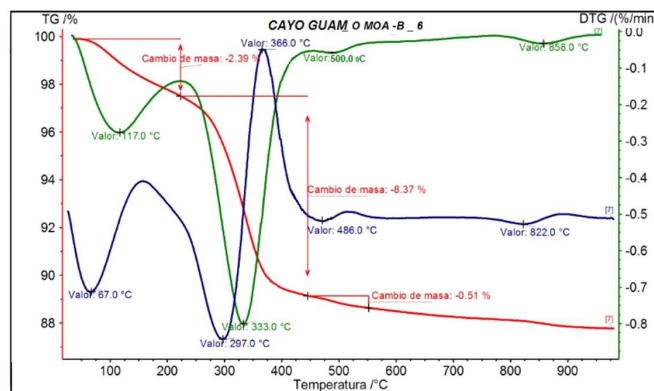


FIGURA 4. Termogramas TG-DTG-DDTG de laterita típica nodular (muestra OMOAB-6); prof.: 0 - 0.5)

TABLA VI. Resultados del análisis térmico cuantitativo mediante el empleo de variantes combinadas TG - DTG - DDTG en minerales térmicamente activos presentes (Muestra Omoab-5; prof.: 0.5 - 1.8 m)

Minerales identificados	T (máx.) endoeffecto DTG (°C)	Factor estequiométrico de cálculo	Contenido mineral (%)
Gibbsita; α -(Fe, Al) OOH	292	2.89	8
Alumogoethita; α -(Fe, Al) OOH; 7 %mol Al	333	9.30	10
Caolinita (estructura desordenada, Md)	538	7.17	64
Total			82

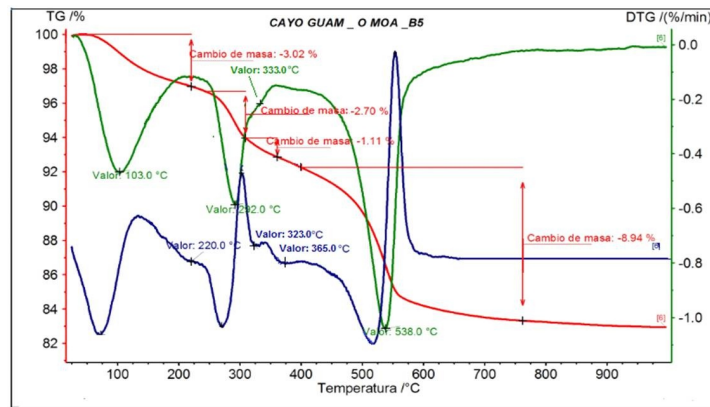


FIGURA 5. Termogramas TG-DTG-DDTG de sialita aluminiferosa no nodular (mtra. OMOab-5) prof.: 0.5 - 1.8

TABLA VII. Resultados del análisis cuantitativo mediante el empleo de variantes combinadas TG - DTG - DDTG en minerales térmicamente activos presentes en la muestra Omoab-4

Minerales identificados	T (máx.) endoeffecto DTG (°C)	Factor estequiométrico de cálculo	Contenido mineral (%)
Gibbsita; $Al(OH)_3$	281	2.89	3
Goethita; α -FeOOH	313	9.90	9
Caolinita (estructura desordenada)	537	7.17	71
Total			83

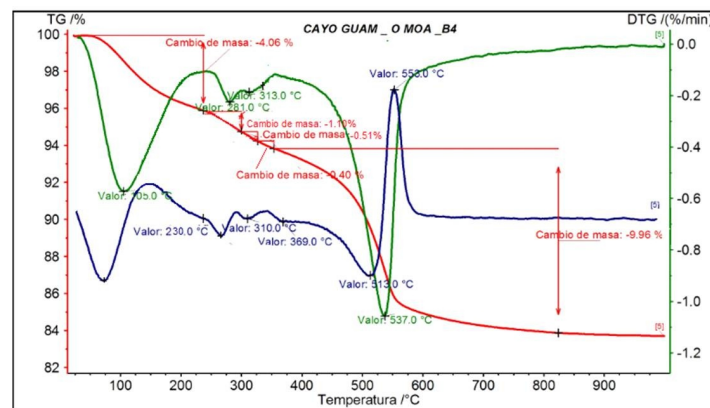


FIGURA 6. Termogramas TG-DTG-DDTG de sialita aluminica no nodular (OMOab-4) prof.: 1.8 - 4.3 m

TABLA VIII. Resultados del análisis cuantitativo mediante el empleo de variantes combinadas TG - DTG - DDTG en minerales térmicamente activos presentes en la muestra Omoab-3

Minerales identificados	T (máx.) endoeфекto DTG (°C)	Factor estequiométrico de cálculo	Contenido mineral (%)
Gibbsita; Al(OH) ₃	287	2.89	3
Alumogoethita; α-(Fe, Al) OOH, 5 %mole Al	322	9.70	4
Caolinita (estructura desordenada; Md)	547	7.17	78
Total			85

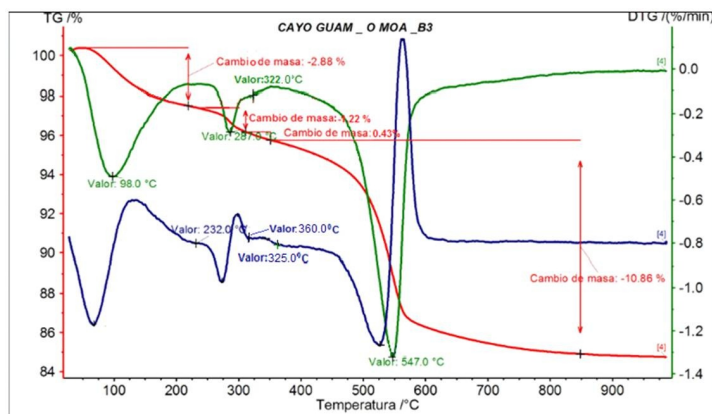


FIGURA 7. Termogramas TG-DTG-DDTG de saprolita fina aluminica (mtra. OMOab-3); prof.: 4.3 -14.3 m

TABLA IX. Resultados del análisis cuantitativo mediante el empleo de variantes combinadas TG - DTG - DDTG en minerales térmicamente activos presentes en la muestra Omoab-2 (prof.: 14.3 - 16.3 m)

Minerales identificados	Temp. (máx.) endoeфекto DTG (°C)	Factor estequiométrico de cálculo	Contenido mineral (%)
Gibbsita; Al(OH) ₃	277	2.89	7
Alumogoethita; α-(Fe, Al) OOH; 4 %mol Al	318	9.80	10
Caolinita (estructura desordenada, Md)	530	7.17	66
Total			83

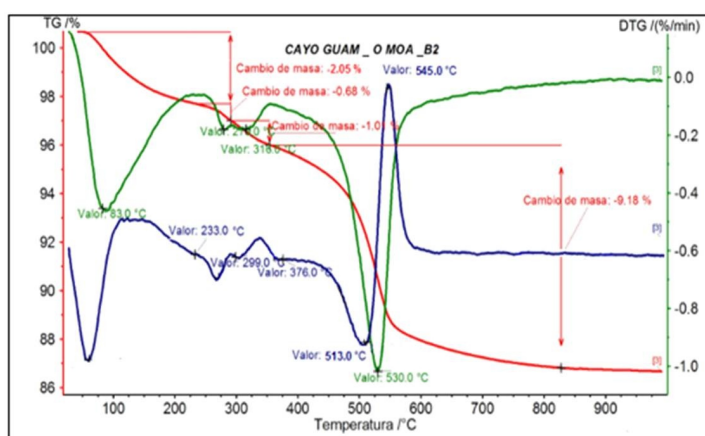


FIGURA 8. Termogramas TG-DTG-DDTG de saprolita gruesa aluminica (mtra. OMOab-2); prof.: 14.3 - 16.3 m

TABLA X. Resultados del análisis cuantitativo mediante el empleo de variantes TG - DTG - DDTG en minerales térmicamente activos presentes en la muestra Omoab-8

Minerales identificados	Temp. (máx.) endoeфекto DTG (°C)	Factor estequiométrico de cálculo	Contenido mineral (%)
Goethita; α-FeOOH	285	9.90	15
Gibbsita; Al(OH) ₃	316	2.89	63
Caolinita (estructura desordenada, Md)	530	7.17	14
Total			92

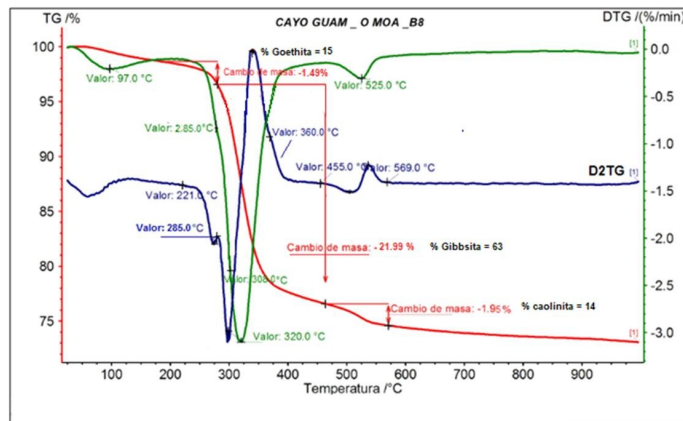


FIGURA 9. Termogramas TG-DTG-DDTG de alcreta (muestra OMOab-8)

A partir de la información mineralógica que se reporta y sobre la base de resultados del análisis químico de elementos mayoritarios, se procedió a realizar entonces el cálculo de los índices de meteorización química, con el objetivo de determinar el grado de descomposición e intensidad del proceso de meteorización que transcurrieron en la regolita objeto de investigación.

Nadlonek y Bojakowska (2018) entre otros, plantean que el cálculo de los índices se fundamenta en diferentes expresiones molares que se establecen entre los analitos químicos interelementales de menor movilidad geoquímica; ej. Al₂O₃, TiO₂, con aquellos que presentan mayor movilidad bajo condiciones geológicas supergénicas; ej: CaO, Na₂O, K₂O. Como aspecto de interés se señala, además, que la utilización de un tipo de índice u otro, dependerá de la naturaleza y neoformaciones que se establecen entre protolito / regolita. En el caso del perfil evaluado, se seleccionaron los índices de meteorización; IOL, CIA y UMIA, cuyas expresiones de cálculo y resultados se muestran en las tablas XI y XII, respectivamente.

TABLA XI. Índices de meteorización utilizados en la investigación (Nadlonek y Bojakowska, 2018)

ÍNDICE	Fórmula de cálculo	Referencia
Índice Químico de Alteración (CIA)	$100 * [Al_2O_3 / \text{moles } (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)]$	Nesbitt y Young (1984,1989)
Índice de Lateritización y/o Bauxitización (IOL; IOB)	$100 * [(Al_2O_3 + Fe_2O_3 \text{ total}) / (Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 \text{ } \tau)]$	Babechuk et al, (2014)
Índice de Alteración Máfico - Ultramáfico (UMIA)	$100 * [(Al_2O_3 + Fe_2O_3(t)) / (Al_2O_3 + MgO + CaO + Na_2O + Fe_2O_3 \text{ } \tau)]$	Aiglsperger et al., (2015)

Los resultados de la tabla anterior informan, en primer lugar, valores de significación para los índices UMIA y CIA en la zona de saprolita y sialitita respectivamente (UMIA = 91.85 - 93.32%; CIA= 92.38-96.08%), asimismo se advierte desde los niveles más profundos de la regolita (prof.: 14.30-16-30m; UMIA = 86.32%; CIA= 92.38%), cambios bruscos si estos se comparan con los que se reportaron en el protolito, motivado por la neoformación mineralógica de la plagioclasa en arcillas del grupo de la caolinita fundamentalmente.

TABLA XII. Resultados de los índices de meteorización (IOL, UMIA y CIA) obtenidos en muestras del perfil de regolita del sector "Cayo Guam" (Fuente: Lavaut-Copa et al., 2019)

Muestra	Intervalo (m)	Litología	IOL (%)	UMIA (%)	CIA (%)
OMoab-8	0.00 - 0.10	Alcreta	77.78	94.07	96.56
OMoab-6	0.10 - 0.50	Laterita Típica (Nodular)	79.21	91.56	83.79
OMoab-5	0.50 - 1.80	Sialitita Alumoferosa (no Nodular)	43.68	93.32	96.08
OMoab-4	1.80 - 4.30	Sialitita Alumínica (no Nodular)	40.42	92.77	96.28
OMoab-3	4.30 - 14.30	Saprolita Fina Alumínica	38.67	91.85	95.75
OMoab-2	14.30 - 16.30	Saprolita Gruesa Alumoferosa	38.04	86.32	92.38
OMoab-1	0.00 - 0.00	Protolito (gabro)	23.93	41.09	56.43

Por su parte, los resultados del índice de lateritización (IOL) confirmaron que, en el perfil del Sector, se sucedieron dos eventos de meteorización simultáneos; lateritización (IOL = 79.21%) y alitización; (IOL=77.78%) ambos de elevada intensidad, con neoformación de arcillas caoliníticas a minerales bauxíticos (gibbsita), hecho que justificaría en este caso la presencia adicional de los bloques flotantes de alcreta que se observan en la superficie de la regolita (Figura 2).

Como aspecto de interés se señala que las diferencias que se observan en los índices de meteorización evaluados, se relacionan de forma directa con el factor microrelieve tipo colina que caracteriza el perfil objeto que se investigó, en consecuencia, el incremento brusco que se observa para los valores de los índices: UMIA (86.32%); CIA (92.38%), a partir de la zona más profunda de la regolita (prof.:14.30-16.30m).

Por otra parte, los resultados del CIA que obtuvieron Njila y Díaz-Martínez (2016) en cinco muestras de regolita evaluadas (99.02-99.29%), a partir del muestreo se realizó en la margen contraria del río "Cayo Guam", comparados con los que se obtuvieron en la presente investigación, resultaron ser de orden similar a los que se reportaron en la presente investigación, en consecuencia, confirman la extrema intensidad de los procesos de meteorización que transcurren en las regolitas de gabro en dicha región.

En relación con el posible empleo de las arcillas de la región de Moa, Brocard (2011) evaluó la regolita del sector "Centeno" en la industria de cerámica roja. Los resultados que se lograron cumplen los requisitos que establecen las normas cubanas NC 360: 2005; NC 359: 2005, para la confección de ladrillos cerámicos con arcilla calcinada, asimismo, la mezcla conformada a partir del 40% de arcilla cocida, 57% de arena sílice residual y 3% de agua arrojó los mejores resultados, atendiendo a las propiedades físico-mecánicas y rangos que establecen ambas normas cubanas para la confección de ladrillos cerámicos y bloques cerámicos conformados con arcilla calcinada, resultados que pudieran extrapolarse a los de la regolita objeto de investigación, en particular las muestras: Omoa b-2,3,4 y 5, respectivamente.

TABLA XIII. Relación de muestras de regolitas en el sector evaluados que cumplen la NC TS 528: 2013 para su posible empleo como fuentes de MCS

Muestras	Sector	% Caol. (mín.)	% Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	% PPI	% Na ₂ O	% CaO	% SO ₃
Omoab-5	"Cayo Guam"	63.85	31,60	0.97	15.70	< 0.1	0.70	n. d
Omoab-4		71.14	31,50	0.88	14.34	< 0.1	0.61	n. d
Omoab-3		77.57	33.20	0.66	14.29	< 0.1	0.80	n. d
Omoab-2		65.57	26,00	0.73	18.75	< 0.1	1.06	n. d
NC TS 528: 2013 (MCS)		40 (B)	> 18.0 (B)	> 0.3 (B)	> 7.0 (B)	< 3.0 (C)	3.0 Max. (C)	3.0 Max. (C)

Simbología:

B - Parámetros de calidad de la materia prima mineral (básicos, estricto cumplimiento)

C- Parámetros de calidad complementarios de la materia prima mineral según la NC 528: 2013.

(*)- Contenido másico de caolinita (%), estimado a partir del resultado de los termogramas TG-DTG de las muestras.

n.d- No se determinó.

Por otra parte, a partir de los resultados que se muestran en la **tabla XIII**, se concluyó además que la regolita evaluada del citado sector muestra potencialidades de empleo como fuente de materiales cementicios complementarios (MC) base metacaolín, por dicho motivo, las posibilidades de uso de dicha regolita se diversificarían, excepto la muestra de alcreta (Omoab-8), dado que la misma no cumple la NC TS 528: 2013 correspondiente.

A partir de los criterios de **Lavaut-Copa (2019, 2022)**, se plantea que, durante el avance de la meteorización, tuvo lugar la saprolitización y sialitización de la plagioclasa cálcica albitizada (labrador-bytownita), de forma paralela, el olivino y los piroxenos presentes en la composición del protolito, proceso que transcurrió según la siguiente secuencia de reacciones de neoformación:

1. Saprolitización-sialitización:



2. Lateritización



3. Alitización de la caolinita:



Tal comportamiento se relaciona con el factor microrelieve, fundamentalmente en este caso típico de colina donde se produjeron las reacciones de neoformación en dicha regolita, por consiguiente la acumulación, redistribución y evacuación selectiva de los componentes químicos, que concluyó con el asentamiento de los minerales neoformados que determinaron el espesor de la regolita en la zona de saprolitas y sialititas, hecho que se constató en los valores de los índices CIA y UMIA reportados (**tabla XII**), lo que permitió clasificar dicha regolita como caolínica (sialítica simple), dada la neoformación de minerales de un mismo grupo estructuro-laminar de arcillas (1:1); caolinita y halloysita respectivamente.

CONCLUSIONES

1. En la regolita del sector "Cayo Guam", la disminución brusca de la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ desde la profundidad hasta la superficie de la regolita (prof.: 14.30 - 16.30m; UMIA = 86.32%; CIA= 92.38%), señala la extrema intensidad del proceso de meteorización (grado VI), a partir de la reacción de neoformación de la plagioclasa cálcica (labrador) presente en la composición petromineralógica del gabro bandeado del citado sector en Moa, en mezclas de arcillas -de bajo orden cristalino- del grupo de la caolinita, lo que permitió clasificar dicha regolita desde el punto de vista mineralógico como caolínico (sialítico simple).
2. El valor del índice de lateritización (IOL) que se obtuvo en la zona superficial del perfil de "Cayo Guam" (IOL= 79.21%), confirma la extrema intensidad del proceso de meteorización, dado el incremento de los tenores de Fe_2O_3 desde la profundidad hasta la zona superficial de la regolita, con el subsiguiente proceso de alitización y formación de alcreta de composición gibbsita finalmente.

3. El comportamiento de los índices de meteorización en el citado perfil, guarda relación directa con el factor microrelieve tipo colina, en consecuencia, el drenaje de las aguas, la desintegración mecánica y descomposición química gradual del protolito (gabro) con la acumulación, redistribución y evacuación selectiva de sus componentes químicos y neoformación de minerales arcillosos del grupo de la caolinita de estructura desordenada se propicia, eventos que al unísono determinaron los elevados valores de los índices de meteorización UMIA y CIA, respectivamente.
4. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la regolita del sector se concluye que dicha regolita muestra potencialidades para su posible empleo en la confección de elementos de cerámica roja y/o como fuente de materiales cementicios suplementarios (MCS) en la formulación de cemento de bajo carbono (LC3), hecho que permite la diversificación de estas para su posterior empleo a mediano o corto plazo en la industria de materiales de la construcción de Moa.

RECOMENDACIONES

Se propuso llevar a cabo nuevas investigaciones relacionadas con la determinación cuantitativa del metal crítico escandio (Sc), así como de otros elementos de las tierras raras (ETR) presentes en la composición mineral de la regolita y vinculados a las arcillas caoliníticas como a los minerales de oxidados de hierro (goethita, alumo-goethita, hematita) a través de mecanismos de adsorción y/o en posiciones estructurales en los citados minerales, esto motivado por los contenidos máficos que se reportaron en rocas máficas cubanas, los cuales resultaron ser en el caso del Sc, del orden de 3,5 veces mayor que en las correspondientes rocas ultramáficas, según indicó Lavaut-Copa (2015) citando a Kudelasek (1989), esto sin dudas, si las investigaciones tecnológicas resultaran positivas, permitirá la toma de decisiones acerca del aprovechamiento integral de esa materia prima mineral de manera sostenible de las regolitas en todo el sector "Cayo Guam" en Moa, dada la abundancia relativa de estos recursos geológicos en la región y las potencialidades de uso que se proponen para el producto arcilloso previa calcinación (metacaolín).

REFERENCIAS

- Almenares, Reyes, R.S., (2017): *Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios* (Tesis Doctoral). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Alujas, Díaz, A., Almenares, Reyes, R.S., Arcial, Carratalá, F., Martirena, Hernández, J.F., (2018): *Proposal of a methodology for the preliminary assessment of kaolinitic clay deposits as a source of SCMs*. RILEM Bookseries. doi:10.1007/978-94-024-1207-9_5. (1)
- Benítez, Frómeta, P., Estévez, Cruz, E., Peñalver L.L., (2023): Cartografía de los depósitos cuaternarios a partir de datos de pozos en el NNW de la Cordillera de Guaniguanico, Cuba. *Cuaternario y Geomorfología*. 37 (1-2). 51-76, <https://doi.org/10.17735/cyg.v37i1-2.94098>
- Brocard, Rivera Y.(2011): *Evaluación de mezclas de arcillas de la región de Centeno y arena sílice residual para su utilización en la industria cerámica*. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Facultad de Metalurgia-Electromecánica, Especialidad de Metalurgia.
- Cohen, D. R., Kelley, D. L., Anand, R., Coker, W.B. (2010). Major advances in exploration geochemistry, 1998-2007. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10 (1). 3-16. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-215>.
- Colectivo de autores IGP-SGC (2018): *Sistema de clasificación de las rocas cubanas*. Editorial. Centro Nacional de Información Geológica. IGP-SGC. La Habana. ISBN 978-959-7117-91-9.

- Figueredo, Torres, J.L., (2017): *Influencia del orden estructural de la caolinita sobre la actividad puzolánica*. Tesis en Opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez, Facultad de Metalurgia y Electromecánica, departamento de Metalurgia Química.
- Lavaut, Copa, W.D (2015): Las bajas concentraciones metalíferas: reto de la actividad minero-metalúrgica cubana. *Geoinformativa*. 9. (1). 17-21.
- Lavaut, Copa, W. D., Capote, Marrero, C.R., Cobiella, Reguera, J.L., Alonso, Pérez, J.A., Torres, Rodríguez, D., Milia, González, I., Torres, La Rosa, M., de la Paz, Marrero, D., Revé, Barrio, L., González, Castellano, D., San Jorge, W, A., (2022): Mapas Mineragénicos 1:250 000 de Cuba. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, Vol. 12, No. 2.
- Nadlonek, W., Bojakowska, I. (2018). Variability of chemical weathering indices in modern sediments of the Vistula and Odra Rivers (Poland). *Applied Ecology and Environmental Research*. 16(3): 2453 - 2473. ISSN 1785 0037.
- Norma Cubana NC 359: 2005: *Ladrillos y bloques cerámicos de arcilla cocida. Método de ensayo*.
- Norma Cubana NC 360: 2005: *Ladrillos y bloques cerámicos de arcilla cocida. Requisitos*.
- Norma Cubana NC TS 528. 2013. *Cemento hidráulico - Puzolanas- Especificaciones*.
- Njila, T., Díaz-Martínez, R. (2016): Estudio químico-mineralógico de los perfiles lateríticos ferrosialtíticos en los sectores Téneme, Farallones y Cayo Guam, en el noreste de Cuba. *Revista Geológica América Central*. 54: 67-83, doi: [10.15517/rgac.v54i0.21149](https://doi.org/10.15517/rgac.v54i0.21149).

José Antonio Alonso Pérez. Licenciado en Química, Universidad de La Habana, 1980. Nacido en La Habana en 1953. Investigador Agregado, 1982; Máster en Química Inorgánica, Universidad de La Habana, 2003. Ha recibido 21 cursos y estudios de postgrado en diferentes especialidades de la química-física del estado sólido, tales como: (1) Difracción de rayos-X (DRX), (2) Análisis Térmico, (3) Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), (4) Espectrometrías Mossbauer y de rayos-X (MEB-EDS), (5) Física de los rayos-X, (6) Cristalografía y cristalografía química, entre otros. De forma paralela impartió dos cursos de postgrado a profesionales de la industria del vidrio y de las empresas geológicas del país. Especialista de mineralogía analítica con 42 años de experiencia. Jefe de proyectos (I+D). En la actualidad es revisor de tareas técnicas (TT) y trabajos temáticos productivos (TTP) adjuntos al departamento de la actividad geológica del IGP-SGC. Sus principales resultados se resumen en los siguientes: (1) Confección del mapa pronóstico para fosforitas, escala 1: 500 000 y estudio de la composición sustancial; (2) Caracterización mineralógica de residuales de la industria del níquel y pasivos ambientales mineros cubanos; (3) Potencialidades de las menas de magnesio en Cuba; (4) Caracterización de turmalinas del Terreno Pinos, Isla de la Juventud; (5) Mapa mineragénico de Cuba a escala 1: 250 000; (6) Potencialidades de uso actual de los minerales industriales cubanos en producciones de alto valor agregado; (7) Servicios científico-técnicos de DRX y (8) Análisis Térmicos vinculados a proyectos de investigación y empresas geomineras nacionales. Ha publicado 58 artículos en diferentes revistas científicas de su especialidad y otros que se encuentran en proceso de publicación. Fue profesor instructor de la sede universitaria 10 de Octubre entre los años 2009-2010 y tutor de 5 tesis de diploma y 2 de maestría. Es miembro de la Sociedad Cubana de Geología y de la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de Cuba, donde ha presentado trabajos en diferentes eventos científicos. Ha recibido premios en foros de base del Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba.