

# **Fases minerales portadoras de níquel en el horizonte saprolítico del yacimiento San Felipe**

Alfonso Chang-Rodríguez  
Arturo L. Rojas-Purón

## **Resumen**

Este artículo reporta el resultado de la caracterización física, química y mineralógica del horizonte saprolítico del yacimiento cubano de lateritas niquelíferas San Felipe. Los análisis por técnicas de DRX, MEB y EDAX mostraron que la capa útil es predominantemente de grano muy fino, menor de 0,074 mm, representando esta fracción alrededor del 80 % en peso como promedio. Las esmectitas son las principales portadoras de Ni (1,0- 4,0 % NiO), seguidas de la goethita (1,0-1,5 % NiO). La serpentina, aunque contiene de un 5,0 % a un 7,5 % de NiO, se encuentra en muy poca cantidad en estos materiales silicatados, al igual que los óxidos de Mn.

**Palabras clave:** lateritas niquelíferas; yacimiento San Felipe; saprolitas; esmectitas; fases portadoras de níquel.

## **Nickel bearing mining phases in the San Felipe ore body saprolite horizon**

### **Abstract**

The article presents the results from the mineralogical, chemical and physical characterization of the saprolite horizon of San Felipe nickel laterites deposit. Analysis by X ray diffraction, sweep electronic and X ray dispersive spectrometry showed that the useful layer is mainly made of very fine grains less than 0,074 mm; this fraction accounts for 80% in average weight. Smectites are the main minerals containing nickel (1,0–4,0 % of NiO) in the saprolite area, followed by goethite(1,0–1,5 % of NiO). Serpentine in spite of bearing nickel among 5,0 % to 7,5 % of NiO are present in a very little quantity, as well as manganese oxides.

**Keywords:** nickel laterites; San Felipe ore body; saprolites; smectites; nickel bearing faces.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio mineralógico de la corteza de meteorización, localizada a 30 km al noroeste del municipio de Camagüey, constituye una necesaria e importante contribución al conocimiento de la composición sustancial de la materia prima mineral de la cual se extraerá níquel, teniendo en cuenta que la industria niquelífera es uno de los renglones principales de la economía cubana actual.

La región centro oriental donde se ubica el complejo ofiolítico Camagüey (Figura 1) está constituida por las formaciones de la cobertura neoa autóctona, del Paleógeno continental, del margen marginal y las formaciones intrusivas del arco volcánico está formado por varios niveles desde la base a tope:

- a) Nivel de ultramafitas metamorizadas (tectonitas)
- b) Zona de transición ultramafitas metamorizadas cúmulos ultramáficos (ZT)
- c) Nivel cumulativo
- d) Nivel de diques paralelos de diabasas
- e) Nivel efusivo-sedimentario.

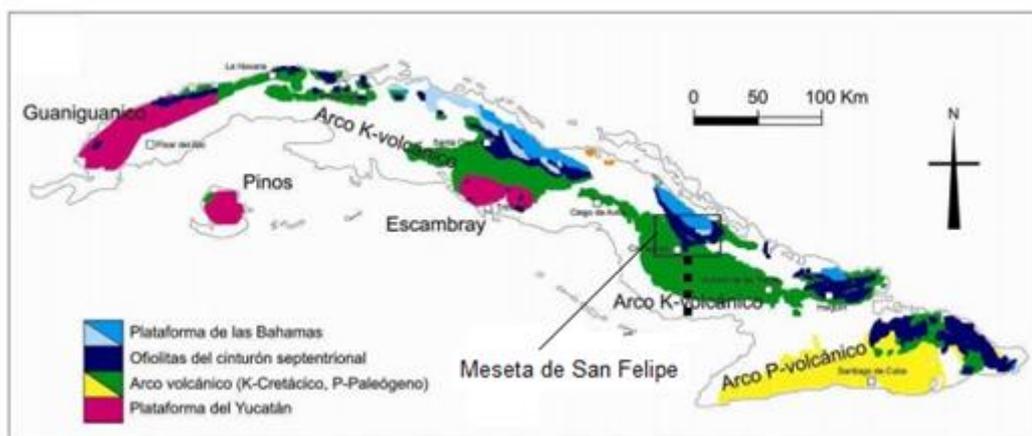


Figura 1. Esquema de ubicación geográfica del yacimiento San Felipe, exponiendo sus rasgos geológicos regionales (modificado de Chang 2005).

La necesidad de conseguir una extracción de níquel eficiente y sustentable, de acuerdo con las condiciones actuales de la economía cubana, es el móvil que ha motivado a desarrollar esta investigación para caracterizar mineralógicamente el horizonte saprolítico (menas silicatadas) del yacimiento de lateritas niquelíferas San Felipe (en lo adelante SF).

Según la clasificación de los depósitos lateríticos de níquel (Brand, Butt & Elías 1998; Gleeson, Butt & Elias 2003), el yacimiento SF es del tipo silicatado-arcilloso. Sus perfiles lateríticos presentan un horizonte limonítico (amarillo-marrón) de poco espesor (entre 3 m y 6 m), en tanto la zona saprolítica (verde-grisácea) llega a alcanzar decenas de metros (12 m como promedio) y en ella se concentra el componente niquelífero en las arcillas esmectíticas de la saprolita media y superior (Gallardo et al. 2010, 2011; Chang 2013).

Al igual que en los yacimientos australianos de Murrin Murrin y Bulong (Burger 1996; Camuti & Riel 1996; Wells & Butt 2000; Gaudin et al. 2004, 2005), en estos depósitos lateríticos cubanos tipo arcillosos son las esmectitas las constituyentes de la mineralización niquelífera (Brand, Butt & Elías 1998; Freyssinet et al. 2005; Elias 2002).

Marín (2011), al caracterizar geoquímica y mineralógicamente perfiles lateríticos de SF, confirma el carácter arcilloso de este depósito, planteando, además, la presencia de sílice a lo largo de estos perfiles y de níquel en la saprolita media y superior. Este autor también señala el comportamiento diferenciado que tienen durante la sedimentación las esmectitas y serpentinas de los óxidos de hierro, aunque no llega a definir la repartición del níquel según las distintas fases minerales componentes de estos horizontes silicatados, tanto en las esmectitas como los minerales del grupo de la serpentina y algunos óxidos de Fe y Mn.

El presente trabajo estudia las principales fases minerales portadoras de níquel en el horizonte saprolítico del yacimiento SF utilizando las técnicas de microscopía electrónica de barrido, entre otras, a partir de una cuidadosa preparación de muestras, con el fin de ahondar en el conocimiento sobre los minerales arcillosos silicatados portadores de níquel que pueden ser suministrados al proceso metalúrgico del níquel de este metal en Cuba.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Muestreo y caracterización de los perfiles**

Estudios previos (Chang 2001, 2005) permitieron establecer los sectores NW, E y SE como los más perspectivas para valorar la concentración del níquel en estos perfiles lateríticos de SF y un sector centro-oeste menos niquelífero.

El muestreo se realizó a partir de dos perfiles perspectivas para el níquel, dentro del sector SE (Figura 2), expresados en los pozos de perforación N37 E105 y N49 E105 (Figura 3); se tomaron once muestras de interés en la zona silicatada, que abarca los horizontes de saprolita, serpentinita lixiviada y la roca madre (peridotita) para el depósito laterítico de SF (Figura 3).

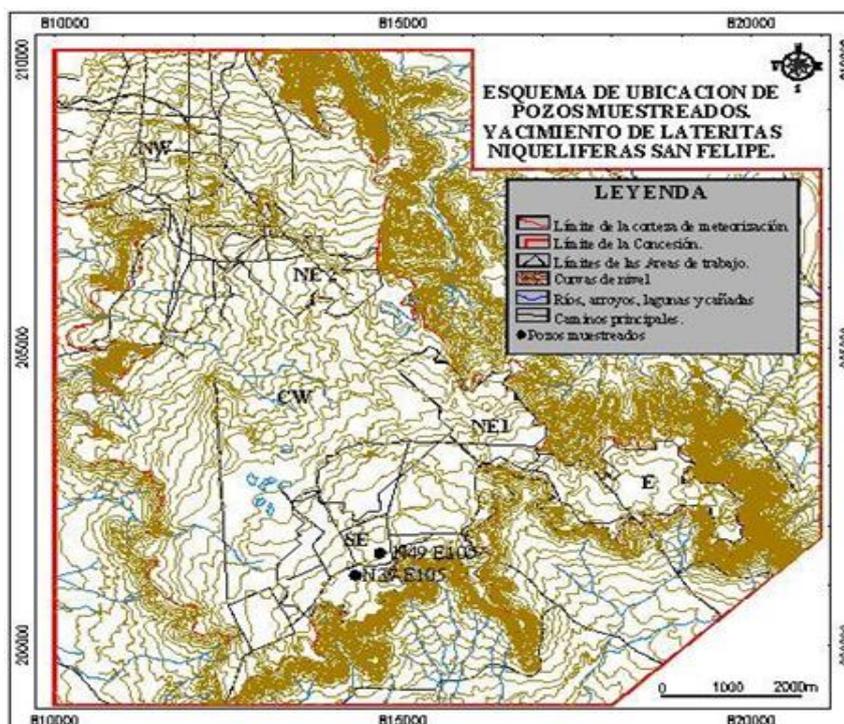


Figura 2. Esquema de ubicación de los pozos muestreados del yacimiento San Felipe.

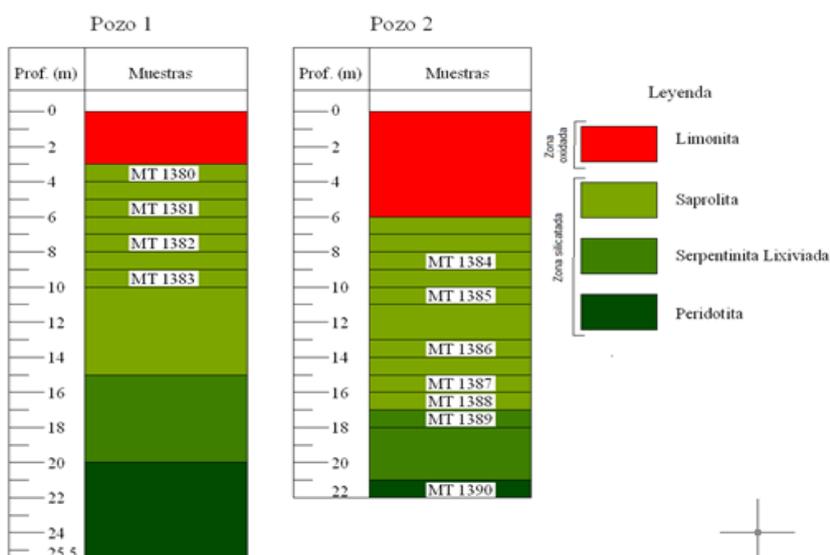


Figura 3. Esquema de los perfiles lateríticos de los pozos muestreados. MT # indica la profundidad a la que se tomó la muestra.

## 2.2. Métodos analíticos

Debido a la necesidad de obtener las fracciones idóneas para el estudio de las fases portadoras de níquel se realizó un cuidadoso trabajo de preparación de muestras, según:

f) Separación granulométrica

- Por tamización
- Por levigación, para partículas menores de 0,074 mm

g) Separación magnética, empleando imán de mano, marca Sochnev-5.

La tamización se realizó para obtener, por vía húmeda, nueve clases granulométricas:

F1: > 10,00 mm; F2: < 10,00 mm > 4,75; F3: < 4,75 mm > 2,00; F4: < 2,00 mm > 1,00; F5: < 1,00 mm > 0,50; F6: < 0,50 mm > 0,25; F7: < 0,25 mm > 0,10; F8: < 0,10 mm > 0,074; F9: < 0,074 mm.

Para los análisis químicos de elementos mayoritarios se empleó la espectrometría de absorción atómica y la espectrometría de emisión con plasma acoplado por inducción (ICP) para los elementos: Si, Mg, Al, Ni, Co, Cr, Mn.

La caracterización mineralógica de las muestras se obtuvo mediante difracción de rayos-X (DRX), microscopía electrónica de barrido con EDAX. El DRX se llevó a cabo mediante el método de polvo, empleando un difractómetro ARL Scintag, operado a 40 kV y 35 mA, en el intervalo de 6° a 70° en 2 $\theta$ , con un paso angular de 0,02°.

Las diferentes asociaciones minerales, así como las relaciones texturales entre los minerales, se estudiaron en probetas pulidas mediante microscopía de luz reflejada, empleando un microscopio del tipo Nikon Eclipse LV100 POL del Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales de la Facultad de Geología, Universidad de Barcelona.

La composición mineralógica se determinó sobre la base del conteo de partículas bajo el microscopio binocular y el cálculo de la proporción en peso de los diferentes minerales para las fracciones por encima de 0,074 mm. Para el cálculo de la fracción 0,074 mm fue necesario el análisis de DRX y confección de briquetas, las cuales fueron analizadas en el microscopio electrónico de barrido marca JEOL, modelo JMS-6100, con un detector de electrones secundarios con el que se obtienen las imágenes y para realizar los microanálisis un detector de rayos X de

energía dispersiva modelo DX4 del Newcastle Technology Center (Australia).

Corridas de lotes automáticas fueron creadas para realizar cientos de análisis microquímicos cuantitativos (EDAX) en partículas minerales, seleccionadas aleatoriamente con tamaño de grano mayores de 5  $\mu\text{m}$  en secciones pulidas. En algunas muestras se obtuvo datos composicionales adicionales en minerales de níquel (específicamente asbolana), a partir de análisis spot EDAX, utilizando el software Philips SEM505/MS EDS.

Con MEB/EDAX se crearon corridas de lotes automáticas para realizar cientos de análisis cuantitativos en partículas minerales seleccionadas aleatoriamente en cada muestra. Los datos de análisis elemental de cada lote fueron ploteados en un diagrama de dispersión para validar las asociaciones de los elementos y de las especies minerales específicas a ser identificadas, junto con sus rangos en composición, incluyendo el contenido de níquel.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Características físicas del horizonte saprolítico**

El material saprolítico (muestras del 1380 al 1388) es predominantemente de grano fino (F9: < 0,074 mm), representando entre un 70 % y un 95 % en peso de las muestras. La fracción granulométrica ligeramente fina (F7) constituye la segunda fracción de importancia en estos horizontes saprolíticos, aunque es destacable el componente granulométrico menor de 0,50 mm y mayor de 0,074 mm (F6-F7-F8) que llega a representar alrededor de un 12 % en peso de las muestras (Tabla 1).

En el material serpentinitico lixiviado (muestra 1389) predominan las fracciones finas (F9) y las gruesas (F2 a F5), desde 1 mm hasta 4,75 mm, representando el 80 % en peso de la muestra. La peridotita serpentinizada (muestra 1390) es predominantemente de grano grueso (granos mayores de 0,50 mm y menores de 10,00 mm) que representa alrededor del 80 % en peso, en tanto la fracción fina (F9) llega a alcanzar hasta un 15 % del peso de la muestra.

Para estos depósitos lateríticos ya se conoce que la granulometría constituye un importante factor que permite caracterizar las lateritas (Quintana 1985; González & Quintana 1984 y Almaguer & Zamarsky 1993), pues incide tanto en su comportamiento durante el proceso de sedimentación de la pulpa esmectítica (Castellanos 2015), como en la concentración de determinados elementos (Rodríguez 1990).

Por otra parte, también se ha definido que la granulometría de los horizontes del perfil laterítico está en función del grado de madurez de la corteza de intemperismo (Rojas 1995), de modo que el proceso de beneficio de la materia prima mineral de los horizontes silicatados del depósito de SF debe diferenciar el componente saprolítico superior de grano fino (menor de 0,074 mm) y los horizontes inferiores, más próximos al protolito ultrabásico, constituidos por materiales de mayor granulometría (mayor de 0,50 mm).

Tabla 1. Composición granulométrica del horizonte saprolítico del yacimiento San Felipe

Fracción granulométrica	Muestras/Contenido (% en peso)											
	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	
F1	4,64	1,37	0,69	0,39	5,98	0,10	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	
F2	3,09	5,78	0,98	0,71	10,4	0,29	0,03	1,13	1,86	8,08	37,67	
F3	1,49	2,16	1,18	0,61	4,08	0,09	0,23	0,79	2,70	11,88	19,51	
F4	1,19	1,87	1,16	0,60	3,29	0,17	0,28	0,77	0,82	18,88	11,07	
F5	2,07	3,04	1,80	1,23	3,99	1,50	1,35	1,32	1,33	10,82	8,65	
F6	3,92	4,14	2,04	2,21	3,55	1,02	0,71	1,56	1,56	0,91	3,90	
F7	6,06	7,92	1,47	2,27	5,58	5,04	1,34	2,79	2,80	3,32	2,87	
F8	3,98	2,56	2,28	2,00	3,78	2,06	0,88	1,11	1,11	1,35	1,21	
F9	73,55	71,18	88,4	89,98	59,34	89,71	95,18	90,53	87,82	44,37	15,06	
TOTAL	99,99	100,02	100,0	100,0	99,99	99,98	100,0	100,0	100,0	99,99	100,33	

Observaciones: Fracciones granulométricas:

F1: > 10,00 mm; F2: < 10,00 mm > 4,75; F3: < 4,75 mm > 2,00;

F4: < 2,00 mm > 1,00; F5: < 1,00 mm > 0,50; F6: < 0,50 mm > 0,25;

F7: < 0,25 mm > 0,10; F8: < 0,10 mm > 0,074; F9: < 0,074 mm.

### 3.2. Composición química del horizonte saprolítico

El yacimiento SF se diferencia notablemente de los depósitos de lateritas ferroniquelíferas del resto del país (Formell 2003), por ser del tipo arcilloso (Gallardo et al. 2010, 2011; Marín 2011). No obstante, su dinámica de alteración hipergénica cumple con los principios definidos para los yacimientos de meteorización ya estudiados por Golightly (1981).

Las características químicas del horizonte saprolítico de la corteza de intemperismo del yacimiento SF (Tabla 2) muestran un cuadro geoquímico, en correspondencia con la génesis de estos depósitos exógenos, evidenciando una zonalidad química muy bien definida. Los cambios más importantes se detectan en la concentración de MgO, pues se observan entre los 17 m y 21 m, definiendo el límite entre la saprolita y la serpentinita lixiviada y entre esta y la peridotita serpentinizada del

basamento. Dentro del horizonte saprolítico ocurre otro cambio significativo a los 15 m, donde se divide la saprolita fina superior de la saprolita gruesa inferior.

Tabla 2. Composición química del horizonte saprolítico del yacimiento San Felipe (contenido %)

Muestra	Ni	Co	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
MT1380	1,47	0,025	34,58	45,85	3,74	5,42	nd
MT1381	1,42	0,034	33,01	46,85	4,26	4,08	nd
MT1382	1,36	0,05	30,72	50,75	4,45	3,14	nd
MT1383	1,64	0,046	28,01	51,72	4,89	2,89	nd
MT1384	1,43	0,075	24,72	54,08	4,06	2,92	0,91
MT1385	1,94	0,088	27,87	48,76	4,65	2,86	1,18
MT1386	1,33	0,053	27,72	52,43	4,48	3,00	1,13
MT1387	1,71	0,04	22,01	50,97	9,64	2,41	0,90
MT1388	0,92	0,023	17,86	54,39	14,22	1,79	0,82
MT1389	0,78	0,02	15,58	54,94	16,02	1,69	0,75
MT1390	0,66	0,018	13,72	50,73	22,74	1,31	0,61

nd: no determinado.

El SiO<sub>2</sub> presenta valores cercanos al 50 % en toda la zona silicatada del perfil, poniendo de manifiesto que la sílice ha sido solo parcialmente lixiviada (Formell 2003). Solamente en la parte superior de la saprolita fina, donde los valores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son los máximos, la concentración de SiO<sub>2</sub> es menor.

El Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presenta valores entre 2,4 % y 4,08 % en prácticamente todo el horizonte saprolítico. Hacia la parte alta de este horizonte su concentración aumenta ligeramente, con valores que alcanzan el 5 % en peso.

El contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> disminuye con la profundidad. Los valores oscilan entre el 13,72% (peridotita serpentizada) y el 34,58 % en peso (saprolita superior). En las muestras que fue determinado, el Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presenta valores bajos (inferiores al 1 % en peso), con una ligera tendencia a aumentar en superficie.

Las concentraciones de Ni se mantienen constantes en buena parte de la zona silicatada del perfil, con valores que se sitúan por encima del 1 % en peso. La zona que más concentra el níquel es la saprolita fina, alcanzando valores de 1,94 % en peso.

Las concentraciones de Co son más o menos constantes y bajas (inferiores a 0,05 % en peso) en la zona silicatada del perfil, exceptuando

la saprolita media donde se observa un máximo que alcanza el 0,088 % en peso.

### 3.3. Composición mineralógica del horizonte saprolítico

El panorama mineralógico de los horizontes saprolíticos es básicamente de silicatos de Mg y Fe. Aquí predominan los minerales del grupo de las esmectitas que están entre 50 % y 70 %, serpentina (lizardita y antigorita), cloritas y piroxenos (enstatita), abundante sílice libre en forma de ópalos y calcedonia (Tabla 3). En estos perfiles de poco grado de intemperismo existe un mayor predominio de filosilicatos, propio de los procesos de alteración que sufren las rocas ultrabásicas, entre ellos tenemos cloritas (tipo pennina-clinocloro), según los reflejos difractométricos: 14,16A0 (0,3); 4,73A0 (1,2); 2,84A0 (0,7); 2,44A0 (1,2); lizardita según: 7,34A0 (10); 4,62A0 (1); 3,63A0 (5,5); 2,68A0 (0,8); 2,51A0 (2,2); 1,53A0 (2,2); esmectitas según 15,5A0 (1); 13,2A0 (1); 6,42A0 (1).

Las asbolanas constituyen las principales fases representantes de los minerales de Mn; se encuentran en muy poca cantidad y tienden a concentrarse en pátinas, en las zonas de fracturas. En estos perfiles también se ha detectado la presencia de ernieniquelita (aunque en poca cantidad), como una de las fases minerales de Mn presentes en el material saprolítico (Rodríguez 2001).

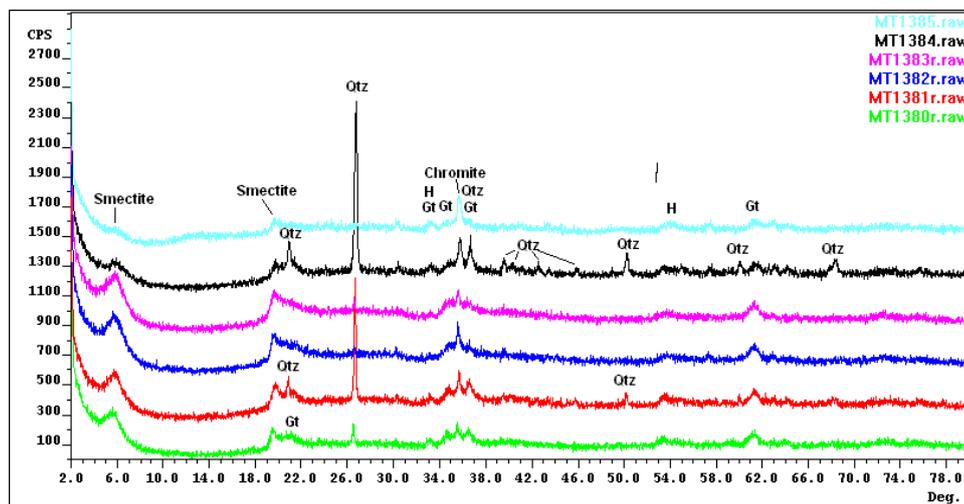


Figura 4a. Difractogramas de rayos-x (DRX) para las muestras del horizonte saprolítico del depósito de San Felipe. Muestras desde MT1380 a 1385. Minerales: H=Hematita, Gt=Goethita, Qtz=Cuarzo, Smectite=Esmetita, Chromite=Cromita.

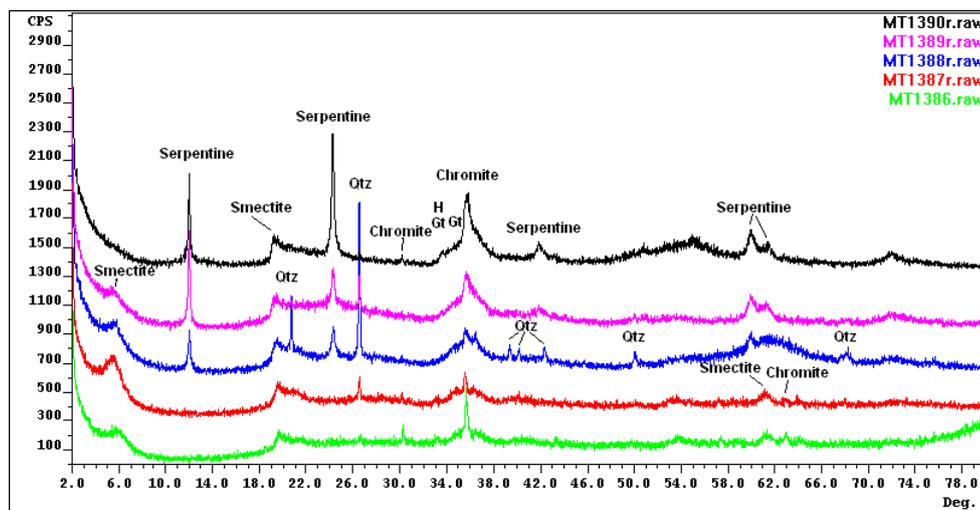


Figura 4b. Difractogramas de rayos-x (DRX) para las muestras de la zona silicatada del depósito de San Felipe. Muestras desde MT1386 a 1390. Minerales: H=Hematita, Gt=Goethita, Qtz=Cuarzo, Smectite=Esmetita, Chromite=Cromita, Serpentine=Serpentina.

Un resumen de la composición mineralógica de la zona silicatada del yacimiento San Felipe (Tabla 3) expone que las esmectitas constituyen la fase mineral predominante en este depósito arcilloso cubano.

Tabla 3. Composición mineralógica del horizonte saprolítico del yacimiento San Felipe (según Alliston, England & Shrestha 1999)

Mineral	MUESTRAS/ Contenido en %										
	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390
Cromita	1,96	1,76	1,27	2,05	1,84	0,41	2,63	1,62	1,23	0,43	0,16
Clorita	3,60	3,30	3,37	3,68	1,34	2,46	3,36	0,03	0,01	0,03	0,00
Sílice libre	13,85	19,13	12,62	8,64	37,86	11,74	9,48	12,98	11,88	12,67	11,54
Goethita	22,27	11,91	7,39	5,99	9,24	8,04	8,43	8,87	7,91	5,81	2,03
Hematita	5,10	2,81	2,69	1,72	3,53	2,78	2,85	4,61	3,23	2,39	0,93
Magnetita	0,63	2,10	,49	1,58	3,75	3,30	2,13	1,77	0,20	1,32	1,58
Muscovita	0,74	1,37	1,20	0,00	0,00	1,56	2,75	1,00	0,00	0,00	0,00
Esmectitas	51,67	57,02	70,52	75,77	41,89	68,63	67,55	62,91	39,90	20,26	19,20
Asbolanas	0,15	0,62	0,45	0,57	0,54	1,06	0,82	0,99	0,27	0,24	0,11
Serpentina	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,22	36,37	56,84	64,79
TOTAL	99,99	100,02	100,0	100,0	99,99	99,98	100,0	100,0	100,0	99,99	100,33

El depósito laterítico de SF se caracteriza por la presencia de sílice libre amorfa, a través de todo el horizonte saprolítico, en cantidades mayores de 9 % por muestra, alcanzando hasta un 37 % en peso.

Al valorar la distribución de los minerales por fracciones granulométricas (Tabla 4) se detectó que más del 80 % de los minerales se concentra en

la fracción fina (menor de 0,074 mm, F9), excepto la sílice libre que lo hace en la más gruesa (mayor de 10,00 mm, F1).

Por otra parte, elementos perjudiciales para los procesos tecnológicos, como la sílice libre, se concentran en fracciones gruesas mayores de 2,0 mm y pudieran ser beneficiadas mecánicamente.

Tabla 4. Composición mineralógica promedio por clases granulométricas dentro del horizonte saprolítico del yacimiento San Felipe.

Mineral	Fracciones granulométricas (mm) / Contenido en %									TOTAL
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	
Cromita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,25	0,43	0,81	1,50
Clorita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,08	0,17	0,33	2,19	2,80
Sílice libre	4,64	2,46	0,78	0,52	0,55	0,22	0,24	0,10	2,19	11,70
Goethita	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,68	6,03	6,80
Hematita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,01	1,02	2,08	3,20
Magnetita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,16	0,72	0,91	1,80
Muscovita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,35	0,54	0,90
Esmectitas	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,06	0,98	0,67	63,15	64,90
Asbolanas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,14	0,91	1,10
Serpentina	0,00	0,00	1,07	0,03	0,01	0,02	0,00	0,00	4,17	5,30
TOTAL	4,65	2,46	1,85	0,56	0,62	0,52	1,92	4,44	82,98	100,0

Observaciones: Fracciones granulométricas:

F1: > 10,00 mm; F2: < 10,00 mm > 4,75; F3: < 4,75 mm > 2,00;

F4: < 2,00 mm > 1,00; F5: < 1,00 mm > 0,50; F6: < 0,50 mm > 0,25;

F7: < 0,25 mm > 0,10; F8: < 0,10 mm > 0,074; F9: < 0,074 mm

### 3.4. Química mineral

#### Horizonte saprolítico (muestras 1380-1387)

Los resultados MEB de este horizonte confirmaron la presencia mayoritaria de esmectita, en menor cantidad, óxido de hierro (goethita/hematita) y cuarzo. Algunas áreas de alta sílice, hierro moderado y bajo magnesio pueden solamente ser descritas como serpentina. Fue observada, además, una pequeña cantidad de cromita.

La mayor parte del níquel en este horizonte está presente en la esmectita. Aunque niveles altos de níquel están presentes en la serpentina; esta fase es mucho menos abundante que la esmectita y, por tanto, un contribuyente menor sobre el contenido de níquel total. La mayoría de la goethita detectada también porta níquel. Se detectaron, además, algunas partículas de asbolana, conteniendo más de 10,0 % NiO y una partícula de clorita con 12,5 % NiO. El contenido de níquel (rango) para cada especie contenedora de níquel, determinado por el diagrama

de dispersión (Figura 5) y por análisis de grano EDAX (en el caso de la asbolana), es como sigue:

Esmectita	1,0–4,0 % NiO
Goethita	1,0–1,5 % NiO
Serpentina	5,0–7,5 % NiO
Asbolana	10,0–16,5 % NiO y 6,5-15,0 % CoO
Clorita	12,5% NiO

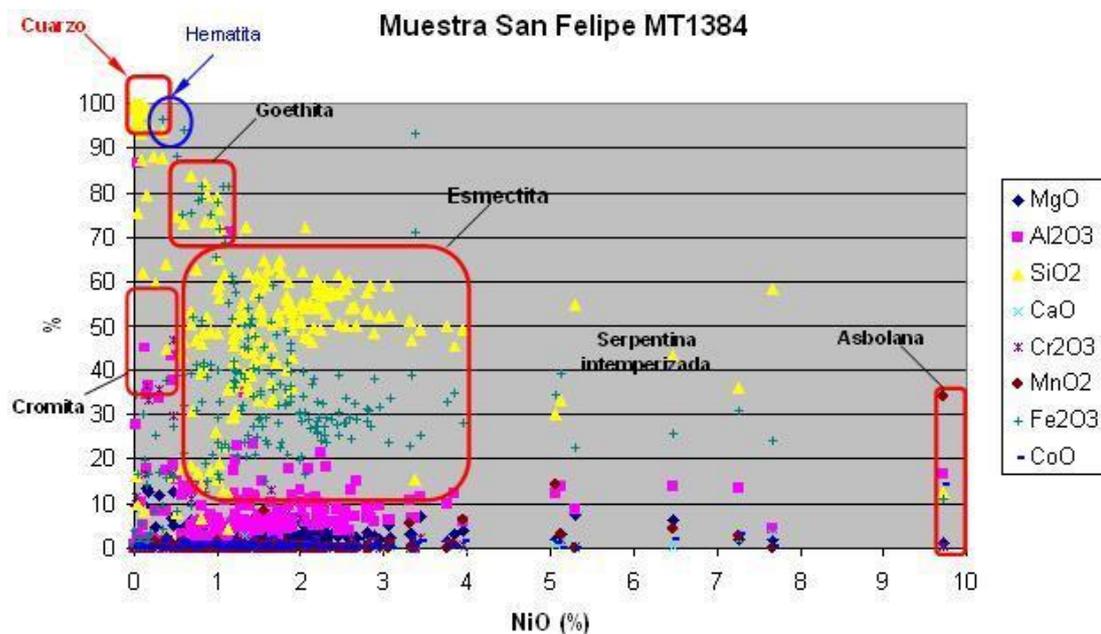


Figura 5. Diagrama de dispersión para ilustrar la relación entre la concentración de NiO y la concentración de otros óxidos en el horizonte saprolítico del yacimiento San Felipe.

Los granos de cromita en la muestra varían en diámetro desde 0,06 mm hasta 0,20 mm, con una media de 0,12 mm. Los granos de cuarzo van de 0,04 mm a 9,00 mm, con un promedio de 0,42 mm.

En el horizonte saprolítico de SF predominan las esmectitas con un 65 % y constituyen las principales portadoras de Ni (1,0–4,0 % NiO); en segundo lugar, la goethita, con un casi 7 %, portando entre 1,0–1,5 % NiO y la serpentina, que aunque constituye solo un 5 %, tiene de un 5,0–7,5 % de NiO, haciendo esta fase mineral interesante para un futuro proceso de beneficio mineral de estos materiales silicatados.

#### Horizonte serpentinitico (muestra 1388-1390)

Las pruebas MEB de este horizonte confirmaron la presencia mayoritaria de serpentina y serpentina entrecrecida con asbolana. También están presentes pequeñas cantidades de óxido de hierro (hematita y goethita),

cuarzo y cromita. En este horizonte el níquel está contenido principalmente dentro de la serpentina/asbolana. La esmectita, serpentina y goethita son contribuyentes menores al contenido total de níquel. El contenido de níquel (rango) para cada especie contenedora de níquel, determinado por el diagrama de dispersión (Figura 6) y por análisis de grano EDAX (en el caso de la asbolana), es como sigue:

Serpentina	1,0–4,0 % NiO
Serpentina/asbolana	4,5–15,0 % NiO
Asbolana	11,5–18,0 % NiO y 2,0–7,0 % CoO
Goethita	< 2,0 % NiO

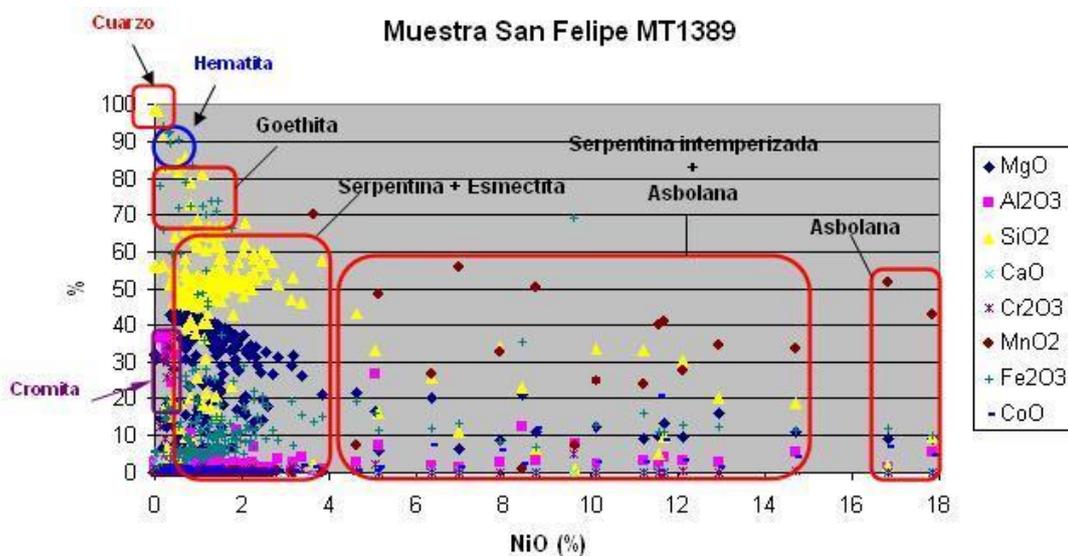


Figura 6. Diagrama de dispersión para ilustrar la relación entre la concentración de NiO y la concentración de otros óxidos en el horizonte serpentínico del yacimiento San Felipe.

Los granos de cromita en la muestra varían en diámetro desde 0,02 mm hasta 0,24 mm, con una media de 0,08 mm. Los granos de cuarzo van de 0,02 mm a 0,15 mm, con un promedio de 0,05 mm. A partir de los resultados químicos y mineralógicos obtenidos divide las muestras caracterizadas en dos horizontes fundamentales: saprolítico y serpentínico.

**Horizonte saprolítico (muestras con bajo contenido de MgO y alto de NiO)**

Este horizonte se caracteriza por un alto contenido de esmectita (mayor del 65 % en peso como promedio), acompañada por cantidades pequeñas de óxidos de hierro (principalmente goethita, pero también alguna hematita) y cromita, con clorita y gibbsita, ocasionalmente. Los

contenidos de cuarzo son variables. Algunas áreas de alta sílice/hierro moderado/bajo magnesio pueden solamente ser descritas como serpentina. En la mayoría de las muestras de este horizonte el níquel ocurre principalmente en las esmectitas (1,0-5,0 % NiO) y, en menor extensión, en la goethita (1,0-10,0 % NiO) debido a su relativa menor abundancia.

La serpentina también contiene valores altos de níquel (más de 9,5 % NiO), esto se debe, en ocasiones, a la asbolana mezclada. La asbolana está presente en la mayoría de las muestras. Sin embargo, aunque ella proporciona la única ocurrencia de cobalto observada, su contribución a los valores totales de níquel es baja debido a su baja abundancia relativa (excepto en la muestra MT1385 donde es un componente significativo). La fracción granulométrica predominante para este horizonte es la menor de 0,074 mm, con más de 80 % en peso como promedio.

#### **Horizonte serpentinitico (muestras con alto MgO y bajo NiO)**

En este horizonte la serpentina y serpentina/asbolana son los componentes mayoritarios con contenidos promedios superiores al 70 % en peso, presentando pequeñas cantidades de óxidos de hierro (principalmente goethita y alguna hematita), cuarzo, cromita y clorita. El níquel está contenido fundamentalmente dentro de la serpentina (4,5-15,0 % NiO), debido principalmente a la asbolana mezclada, goethita (1,0-4,0 % NiO) y asbolana (6,0-14,0 % NiO). Las fracciones granulométricas predominantes son las gruesas mayores de 1,0 mm hasta 4,75 mm, con casi el 60 % en peso como promedio; subordinadamente, participan las fracciones finas menores de 0,074 mm.

En ambos horizontes, las partículas de goethita son típicamente de grano muy fino (<5  $\mu\text{m}$ ) y comúnmente ocurren intermezcladas con minerales silicatados y, en algunos casos, con cromita de grano fino y asbolana.

Los granos de cromita en las muestras varían en diámetro desde 0,01 mm hasta 1,00 mm, con una media de 0,16 mm. Los granos de cuarzo van de 0,02 mm a 9,00 mm, con un promedio de 0,42 mm.

#### **4. CONCLUSIONES**

El depósito laterítico arcilloso de San Felipe se caracteriza por:

- a) Estar formado por un material saprolítico predominantemente de grano fino (< 0,074 mm), con una diferencia granulométrica entre el componente saprolítico medio-superior de grano fino y los horizontes inferiores, próximos al protolito ultrabásico, constituidos

estos últimos por materiales serpentiniticos de granulometría más gruesa (mayor de 0,50 mm).

- b) Presentar una zonalidad geo-química definida, no obstante, se detectan cambios importantes en la concentración de MgO, que permiten definir el límite entre la saprolita y la serpentinita lixiviada y entre esta y la peridotita serpentinizada del basamento. Dentro del horizonte saprolítico ocurre otro cambio significativo que permite dividir la saprolita fina superior de la saprolita gruesa inferior.
- c) Ser las esmectitas las fases principales portadoras de Ni con contenidos entre un 1,0–4,0 % de NiO, además de la goethita, que contiene entre 1,0–1,5 % de NiO y en un tercer orden de importancia la serpentinita, que aunque tiene de un 5,0–7,5 % de NiO, se encuentran en muy poca cantidad en estos materiales silicatados, al igual que los óxidos de Mn.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio Elio Trincado de la Empresa Geominera Oriente, por la realización de las determinaciones químicas a través de espectrometría de absorción atómica y la espectrometría de emisión con plasma acoplado por inducción (ICP). Al Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales de la Facultad de Geología (Universidad de Barcelona), por acceder a la microscopía de luz reflejada. Al Newcastle Technology Center (Australia) por permitir el uso del microscopio electrónico de barrido.

## 6. REFERENCIAS

- ALLISTON, R.; ENGLAND, B. & SHRESTHA, P. 1999: Mineralogical Investigation of San Felipe Laterites. Newcastle Technology Centre, Australia, 19 p.
- ALMAGUER, A & ZAMARSKY, V. 1993: Estudio de la distribución del Fe, Ni y Co en los tamaños de granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía. *Minería & Geología* 10(2): 17-23.
- BRAND, N. W.; BUTT, C. R. M. & ELÍAS, M. 1998: Nickel laterites: Classification and features. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics* 17(4): 81-88.
- BURGER, P. A. 1996: The Bulong, Western Australia, Ni/Co laterite deposits. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series 6*: 37-41.
- CAMUTI, K. S. & RIEL, R. G. 1996: Mineralogy of the Murrin Murrin nickel laterites. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series 6*: 209-210.

- CASTELLANOS, J. 2015: Procesamiento de minerales niquelíferos arcillosos. En: VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, Cuba, 4-8 mayo. ISSN 2307-499X.
- CHANG, A. 2001: Reports on distribution of chemical elements, geological controls, tectonics and morphology of San Felipe Plateau. San Felipe Mining Limited (Inédito). 47 p.
- CHANG, A. 2005: Características geólogo-geoquímicas y mineralógicas del yacimiento de lateritas niquelíferas San Felipe, Camagüey, Cuba. En: Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (1) (Geociencias 2005). Congreso de Minería (1). Palacio de las Convenciones, Ciudad de La Habana, Cuba, 5-8 abril. (Memorias) 1, 587-601. ISBN 978-959-7117-03-7
- CHANG, A. 2013: Esmectitas nontroníticas portadoras de la mineralización niquelífera del yacimiento laterítico-saprolítico San Felipe. En: V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, Cuba, 1-5 abril. ISSN 2307-499X.
- ELIAS, M. 2002: Nickel laterite deposits -a geological overview, resources and exploitation. *Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication 4*: 205-220.
- FORMELL, 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 niquelíferas. En: Taller Internacional de la Geología y Minería del Níquel Cubano, TGMNI 02. V Congreso Cubano de Geología y Minería, Ciudad de La Habana, Cuba, 24-28 marzo.
- FREYSSINET, PH.; BUTT, C. R. M.; MORRIS, R. C. & PIANTONE, P. 2005: Ore-forming processes related to lateritic weathering. *Economic Geology, 100<sup>th</sup> Anniversary Volume 1*: 681-722.
- GAUDIN, A.; GRAUBY, O.; NOACK, Y.; DECARREAU, A. & PETIT, S. 2004: Accurate crystal chemistry of ferric smectites from the lateritic nickel ore of Murrin Murrin (Western Australia). I. XRD and multi-scale chemical approaches. *Clay Minerals* 39(3): 301-315.
- GAUDIN, A.; DECARREAU, A.; NOACK, Y. & GRAUBY, S. 2005: Clay mineralogy of the nickel laterite ore developed from serpentinized peridotitas at Murrin Murrin, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences* 52(2): 231-241.
- GALLARDO, T.; CHANG, A.; TAULER, E. & PROENZA, J. 2010: El yacimiento San Felipe (Camaguey, Cuba): un ejemplo de lateritas niquelíferas tipo arcilla. *Macla* 13: 87-88. ISSN 1885-7264.
- GALLARDO, T.; CHANG, A.; TAULER, E.; GARCÍA, E.; PROENZA, J. & SUARES, M. 2011: Caracterización mineralógica de las esmectitas niquelíferas del yacimiento de San Felipe (Camaguey, Cuba). *Macla* 15: 89-90. ISSN 1885-7264.
- GLEESON, S. A.; BUTT, C. R. M. & ELIAS, M. 2003: Nickel laterites: a review. *SEG Newsletter Soc. Econ. Geosci.* 54: 9-16.
- GOLIGHTLY, J. P. 1981: Nickeliferous laterite deposits. *Econ. Geol.* 75: 710-735.

- GONZÁLEZ, R. & QUINTANA, R. 1984: Estudio de la pulpa cruda del material laterítico del yacimiento de Moa: Análisis granulométrico. *Minería y Geología* 2(3): 135-146.
- MARÍN, P. 2011: *Caracterización del perfil laterítico rico en níquel de San Felipe (Cuba) y separación de fases minerales mediante caída de partículas en un fluido viscoso*. Tesis de grado. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. 60 p.
- QUINTANA, R. 1985: Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa: análisis físico-mineralógico. *Minería y Geología* 3(1): 94-104.
- RODRÍGUEZ, A. 1990: *Prospección y exploración en las cortezas de intemperismo sobre ultramafitas en Nicaro y Pinares de Mayarí*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Cuba. 120 p.
- RODRÍGUEZ, J. 2001: Acerca del primer hallazgo del mineral ernieniquelita  $NiMn_3O_7 \cdot 3H_2O$  en Cuba. En: 6<sup>ta</sup> Convención Internacional de las Industrias Metalúrgica, Mecánica y del Reciclaje METANICA '2001 (TECNOMAT 2001). La Habana, 21 de julio.
- ROJAS, A. 1995: *Principales fases minerales portadoras de Ni en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Cuba. 94 p.
- WELLS, M. A. & BUTT, C. R. M. 2006: Geology, geochemistry, mineralogy of the Murrin Murrin nickel laterite deposit. *CRC for Landscape Evolution and Mineral Exploration Restricted Report 126R*, 93 p.

**Alfonso Chang-Rodríguez** [alfonsochr@geocmg.co.cu](mailto:alfonsochr@geocmg.co.cu)  
Especialista A en Geología. Empresa Geominera Camagüey,  
Cuba

**Arturo L. Rojas Purón** [artrojaspuron@ismm.edu.cu](mailto:artrojaspuron@ismm.edu.cu)  
Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Auxiliar.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.