

Caracterización de perfiles silicatados en el depósito laterítico de níquel de Punta Gorda, Moa, Cuba

Silicate profiles characterization in lateritic nickel deposit of Punta Gorda, Moa, Cuba

Arturo Luis Rojas-Purón^{1*}, Rômulo Simões-Angélica², Lázaro Fernández-Martínez³,
Andres Salazar-Moreno¹

¹Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

²Universidad Federal de Pará, Belem, Brasil.

³Empresa Productora de Níquel y Cobalto *Ernesto Che Guevara*, Moa, Holguín, Cuba.

*Autor para la correspondencia: arojaspurnh@gmail.com

Resumen

Aunque los perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda (Moa) han sido clasificados como oxidados, estudios relativos a la calidad de la mena níquelífera han revelado dentro del yacimiento sectores con perfiles del tipo arcilloso y esmectítico. Ello incitó a caracterizar mineralógicamente los horizontes saprolíticos de los perfiles lateríticos en el bloque O-48 del yacimiento, con técnicas de Difracción de rayos-X y Espectroscopía de ICP-AES. Se distinguieron de este modo, perfiles lateríticos constituidos por horizontes propiamente arcillosos (con predominio de caolinita) asociados con perfiles de horizontes esmectíticos-cloríticos. Las esmectitas son del tipo saponita-Fe y montmorillonita y las cloritas del tipo clinocloro, enriquecidas en Fe. La paragénesis del componente esmectítico (Sm)- clorítico (Chl) se interpreta como un proceso de meteorización progresiva de Sm a Chl. En el sector O-48 del depósito Punta Gorda, las saprolitas esmectíticas-cloríticas son las portadoras de la mayor cantidad de níquel, con contenidos desde 1,07 % hasta 1,59 % de NiO, mientras que las caoliníticas son pobres en este metal (menos de 0,69 % de NiO).

Palabras clave: lateritas ferroníquelíferas, menas de níquel, cortezas de meteorización, depósito Punta Gorda, caolinita, cloritas, esmectitas, goethita, níquel

Abstract

Although the lateritic profiles of Punta Gorda deposit, Moa municipality have been classified as oxidized, studies related to the quality of nickel ore have

revealed within the deposit, sectors with clayey and smectite type profiles. This prompted the mineralogical characterization of the saprolitic horizons of the lateritic profiles in the O-48 block of the deposit, with X-ray diffraction and ICP-AES spectroscopy techniques. Lateritic profiles constituted by clay horizons (with predominance of kaolinite) associated with smectitic-chloritic horizons were distinguished. Smectite are Fe- saponite and montmorillonite type and the chlorites of the clinochlorite type, enriched in Fe. The paragenesis of the smectite (Sm)-chloritic (Chl) component is interpreted as a process of progressive weathering from Sm to Chl. In the O-48 sector of the Punta Gorda deposit, the smectitic-chloritic saprolite are the carriers of highest amount of nickel, with contents from 1.07 % to 1.59 % NiO, while the kaolinite ones are poor in this metal (less than 0.69 % NiO).

Keywords: ferrous nickeliferous laterites, nickel ores, weathering crusts, Punta Gorda deposit, kaolinite, chlorites, smectite, goethite

1. INTRODUCCIÓN

Los depósitos lateríticos de Ni-Co, atendiendo a la mineralogía de la mena predominante, se clasifican en tres tipos: a) depósitos de tipo silicatado hidratado, b) depósitos de tipo óxido y c) depósitos de tipo arcilla (Brand *et al.*, 1998; Elias, 2002; Gleeson *et al.*, 2003; Freyssinnet *et al.*, 2005).

Los depósitos lateríticos de Ni-Co cubanos son mayormente de tipo óxido, dentro de los que figura el yacimiento Punta Gorda (Brand *et al.*, 1998; Gleeson *et al.*, 2003; Marsh y Anderson, 2011; Butt y Cluzel, 2013; Domenech *et al.*, 2017). Desde el punto de vista geológico, el yacimiento se inserta dentro del macizo ofiolítico Moa-Baracoa, conformado por unidades oceánicas del cinturón ofiolítico Mayarí-Baracoa, localizado en el nordeste de Cuba (Iturralde-Vinent, 1996; Proenza *et al.*, 1999).

El macizo Moa-Baracoa (Figura 1A) está compuesto por un manto de tectonita harzburgítica, con dunita subordinada y una Zona de Transición Moho (MTZ, por sus siglas en inglés) muy bien conservada (Figura 1B), donde existen gabros estratificados e isotrópicos y basaltos tipo almohadilla cubiertos por secuencias del manto (Marchesi *et al.*, 2006). Las rocas ultramáficas están serpentinizadas hasta en un 95 % con relación a serpentinita típica. Las peridotitas están cortadas por diques de gablo, gablo de pegmatita, norita de olivino y piroxenita menor (Proenza *et al.*, 1999; Marchesi *et al.*, 2006).

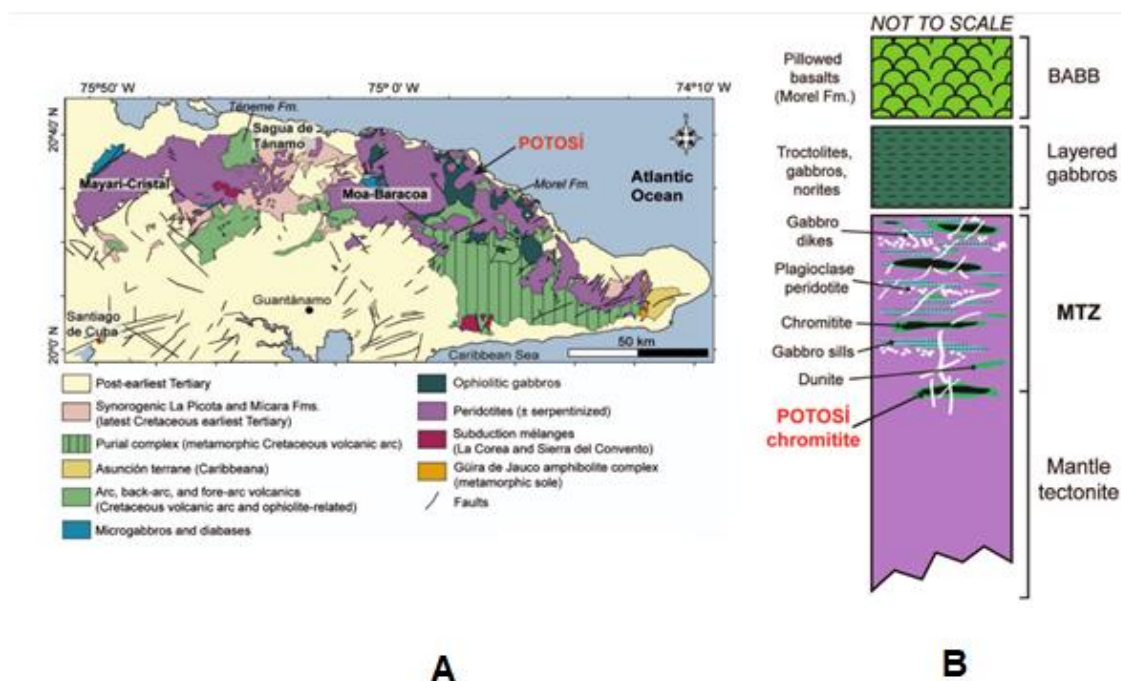


Figura 1. A) Mapa geológico regional de los macizos ofiolíticos del noreste oriental cubano, según Pushcharovsky *et al.* (1988). B) Esquema de columna litoestratigráfica del macizo ofiolítico Moa-Baracoa, según Marchesi *et al.*, 2006.

Las cortezas lateríticas de Ni de Punta Gorda se han desarrollado a partir de la meteorización de las rocas ultramáficas (principalmente harzburgitas y en menor cantidad dunitas) y máficas del macizo ofiolítico, con cuerpos de gabro.

Desde el punto de vista mineralógico, el yacimiento ha sido estudiado como una típica corteza ferroniquelífera formada por perfiles lateríticos oxidados (Lavaut-Copa, 1998, 2018; Oliveira *et al.*, 2001; Galí *et al.*, 2006; Rojas *et al.*, 2012; Domenech y otros, 2017; Aiglsperger *et al.*, 2016), en la cual se destaca la presencia, en los horizontes superiores de la unidad regolítica, de óxidos de Fe (goethita, hematita, maghemita), oxihidróxidos de Mn (asbolanas, litioforitas), de Al (gibbsita) mezclados con algunos silicatos de Fe y Mg (serpentina, cloritas, piroxenos), entre otros.

El yacimiento Punta Gorda está actualmente en explotación por la Empresa Productora de Níquel *Ernesto Che Guevara*, la cual emplea la tecnología carbonato-amoniaco (conocida como proceso Caron) para obtener óxido de níquel. Estudios relativos a la calidad de la mena que ingresa a este proceso (Terrero-Reynosa, 2010; Fernández-Martínez, 2020) han revelado la existencia de sectores atípicos dentro del yacimiento (particularmente en el bloque O-48), con presencia de arcillas mezcladas con otros silicatos.

El hallazgo de tales sectores atípicos sugiere la posible presencia de grandes cuerpos o unidades estratigráficas referidas a la zona de transición manto-corteza (Proenza *et al.*, 1999) que explicarían la existencia de minerales arcillosos y de otro tipo en zonas próximas al depósito y su relación con protolitos de carácter más básico (feldespatos, piroxenos con Al, etc.) que generan perfiles arcillosos o esmectíticos.

Lo antes expuesto motivó una investigación, cuyo objetivo fue caracterizar mineralógicamente los horizontes saprolíticos de los perfiles lateríticos en el bloque O-48 del yacimiento Punta Gorda, a fin de esclarecer la existencia de perfiles no oxidados dentro de este.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el sector O-48 (Figura 2), que abarca un área de afloramiento aproximada de unos 60 m² del yacimiento Punta Gorda, el cual está desarrollado sobre un basamento de rocas ultrabásicas y básicas serpentinizadas, con evidencias de una diversidad petrológica que puede incluir cuerpos de gabros y basaltos (Marchesi *et al.*, 2006), así como peridotitas cortadas por diques de gabro, noritas con olivino y piroxenitas (Terrero-Reynosa, 2010).

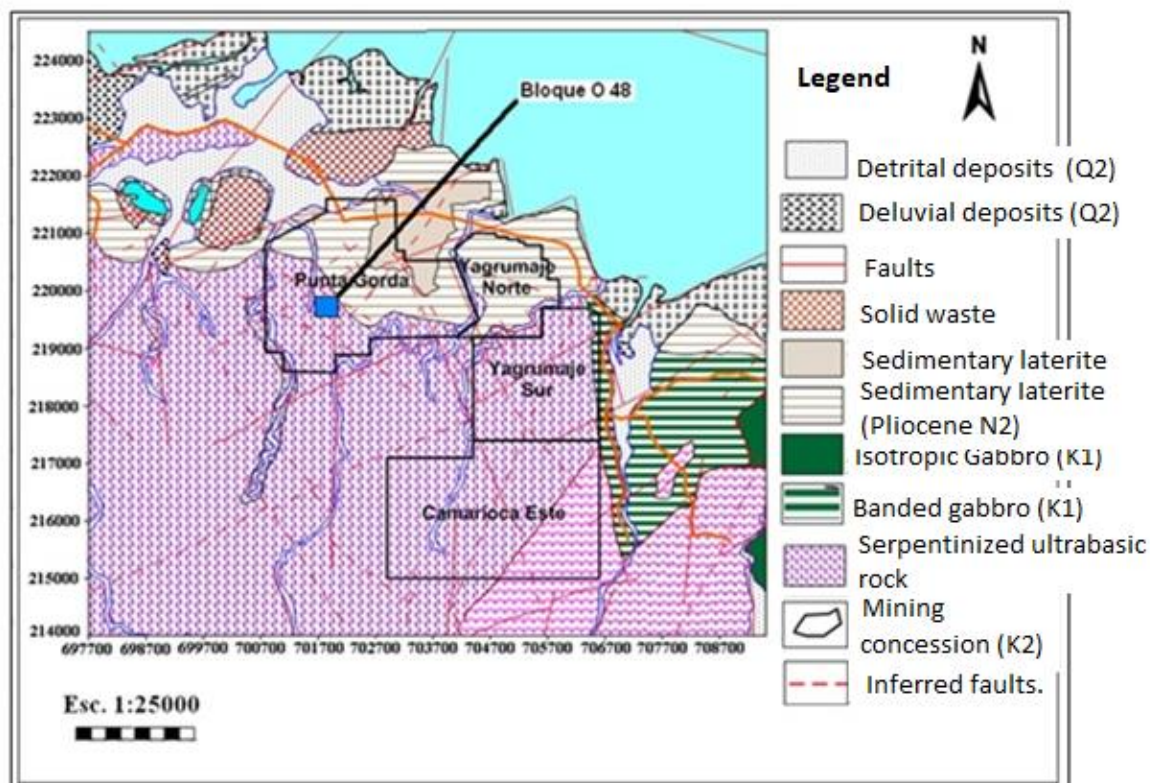


Figura 2. Mapa geológico del yacimiento Punta Gorda, tomado de Guerásimov, 1973 (modificado según Fernández-Martínez, 2020).

2.1. Materiales

Se estudiaron muestras (aproximadamente de 1 kg) de los principales horizontes de la corteza de meteorización del sector O-48, en los perfiles lateríticos (P1, P2 y P5) con presencia de material arcilloso de color blanco (Figura 3) designados como perfiles lateríticos arcillosos (PLA), y en los perfiles (P3, P4 y P6) con horizontes de material verde claro (esmectítico-clorítico) denominados perfiles lateríticos esmectíticos (PLE) (Figura 4).

Los PLA exhiben horizontes saprolíticos con material blanco arcilloso, y horizontes oxidados, propiamente de lateritas, con un material de amarillento a pardo rojizo oscuro; todos con bajo contenido de níquel, según ha sido reportado por Terrero-Reynosa (2010).

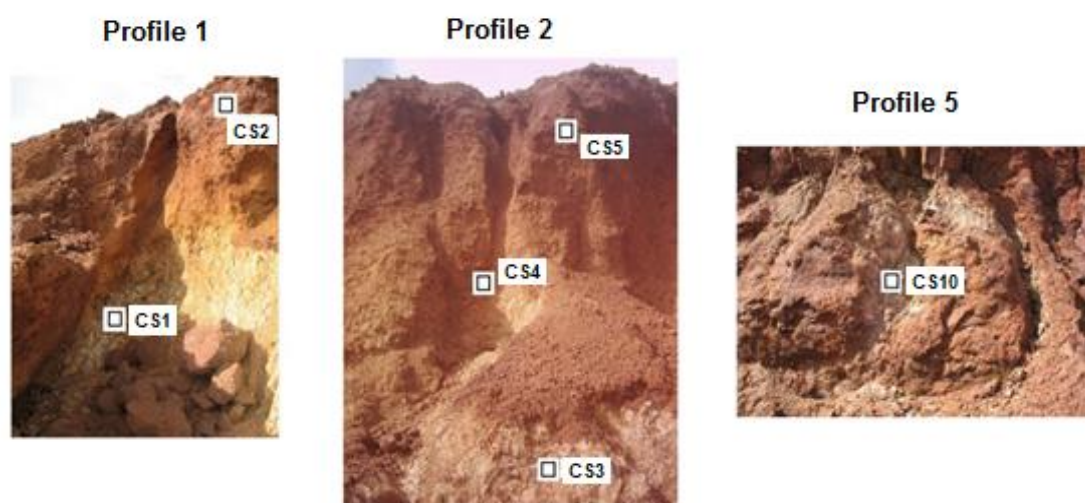


Figura 3. Perfiles lateríticos arcillosos del sector O-48 del yacimiento Punta Gorda. Se indican los puntos de toma de muestras y la denominación de estas.

Los PLE muestran horizontes saprolíticos con material verde claro mezclados con ocre rojo hasta pardo-rojizos en un entorno de materiales rocosos, parcialmente meteorizados, asociados en una zona de fallamientos; todos con carácter níquelífero, según Terrero-Reynosa (2010).

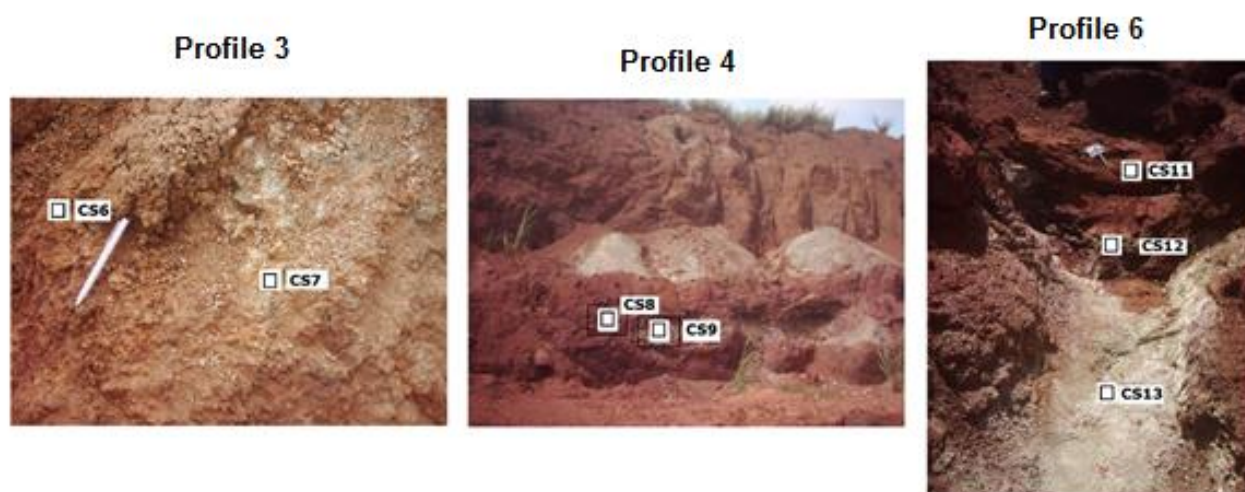


Figura 4. Perfiles lateríticos esmectíticos níquelíferos del sector O-48 del yacimiento Punta Gorda. Se indican los puntos de toma de muestras y la denominación de estas.

2.2. Métodos

Las determinaciones químicas de las muestras volumétricas se realizaron en los laboratorios del Centro de Investigación del Níquel (CEDINIQ) en Moa. Se empleó la Espectroscopía de Emisión Atómica de plasma acoplado (ICP-AES) para los elementos mayores (Mg, Si, Fe, Ni, Al, Co, Mn y Cr).

Las determinaciones mineralógicas cursaron por una etapa de reconocimiento preliminar de las muestras, para valorar las características físicas más sobresalientes, según el método de Microscopía óptica ordinaria. Se utilizó un microscopio binocular tipo TECHNIVAL, modelo AXIOLAB POL de la CARL ZEISS.

Como técnica analítica principal se empleó la Difracción de Rayos X (DRX), mediante el método policristalino. Se utilizó el difractómetro PHILIPS, modelo PW 3710 de la Universidad Federal de Pará, Brasil, y se empleó radiación de Cu K α y Co K α , con régimen de 40 kV, 20 mA, detector Lynxeye, en 0.012° y tiempo de conteo paso a paso: 96 s; con ángulos 2 θ de 5° a 65° y, para algunas muestras, de 5° a 80°. Las muestras fueron homogenizadas según el método de Bragg-Brentano. Se hizo la identificación del mineral utilizando el software X'Pert HighScore (Degen *et al.*, 2014).

3. RESULTADOS

3.1. Características químicas de los perfiles lateríticos

Los perfiles arcillosos (Tabla 1) mostraron en sus horizontes silicatados (saprolíticos) altos contenidos de sílice y alúmina y bajos de magnesio (hasta 3,5 %), de hierro (hasta 8,5 %); y de cromo (inferior a 0,85 %); ello refleja el predominio del componente arcilloso mezclado con cierta cantidad de óxidos de hierro (Figura 5).

Hacia la parte superior de estos perfiles, en los horizontes oxidados, predominaron los óxidos de hierro y alúmina con algún contenido de sílice, dada la presencia de minerales ferrosos con cierta cantidad residual de arcillas.

Tabla 1. Contenido de los elementos mayores en los perfiles arcillosos del sector O-48 del yacimiento Punta Gorda

Perfil	Muestra	Componente/contenido en %							
		NiO*	CoO*	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO*	Al ₂ O ₃
1	CS2	0,57	0,07	64,88	8,20	0,55	2,18	0,23	11,61
	CS1	0,69	0,02	5,57	36,80	3,44	0,85	0,01	20,13
	CS5	0,48	0,07	51,87	8,80	0,51	3,13	0,36	18,33
2	CS4	0,27	0,00	8,43	40,60	1,34	0,85	0,00	20,53
	CS3	0,36	0,00	4,86	39,70	1,27	0,63	0,00	22,27
5	CS10	0,60	0,00	2,86	41,80	2,74	0,47	0,03	21,66

* Se incluyen los elementos menores: NiO, CoO y MnO.

En los perfiles lateríticos esmectíticos-cloríticos se distinguen tres horizontes saprolíticos (Figura 5):

- saprolita inferior, con alto contenido de sílice (entre 37 % y 40 %) y alúmina (entre 12 % y 18 %), y cierta cantidad de MgO (de 3,6% a 11,0 %) y de Fe₂O₃ (de 5 % a 6 %);
- saprolita media, con contenido de Fe₂O₃ de alrededor de un 39 %, de SiO₂ de 21 % a 23 % y de Al₂O₃ de 5 % a 10 %;
- saprolita superior, con altos contenidos Fe₂O₃ (43,7 % a 49,59 %) y de sílice (16,20 % a 23,0 %), contenidos de 5,4 % a 6,07 % de MgO, y de alrededor de un 6,0 % de alúmina, que evidencian la presencia de silicatos de Mg-Al-Fe, mezclados con óxidos de Fe. El perfil P6 (Tabla 2) exhibe los contenidos más altos de MgO (6,7 % a 11,14 %).

Tabla 2. Contenido de los elementos mayores en los perfiles esmectíticos del sector O-48 del yacimiento Punta Gorda

Perfil	Muestra	Componente/contenido en %							
		NiO*	CoO*	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO*	Al ₂ O ₃
3	CS7	1,46	0,05	39,15	21,20	7,19	2,35	0,25	10,70
	CS6	1,07	0,03	6,57	40,30	3,68	0,66	0,43	18,56
	CS8	1,27	0,03	49,59	16,20	5,44	2,48	0,30	6,77
4	CS9	1,37	0,02	6,29	37,40	6,33	0,75	0,12	17,04
	CS11	1,20	0,03	43,73	23,00	6,07	2,35	0,25	6,20
6	CS12	1,37	0,07	39,87	23,80	8,26	2,07	0,43	5,79
	CS13	1,59	0,05	5,14	40,00	11,14	0,61	0,15	12,52

* Se incluyen los elementos menores: NiO, CoO y MnO.

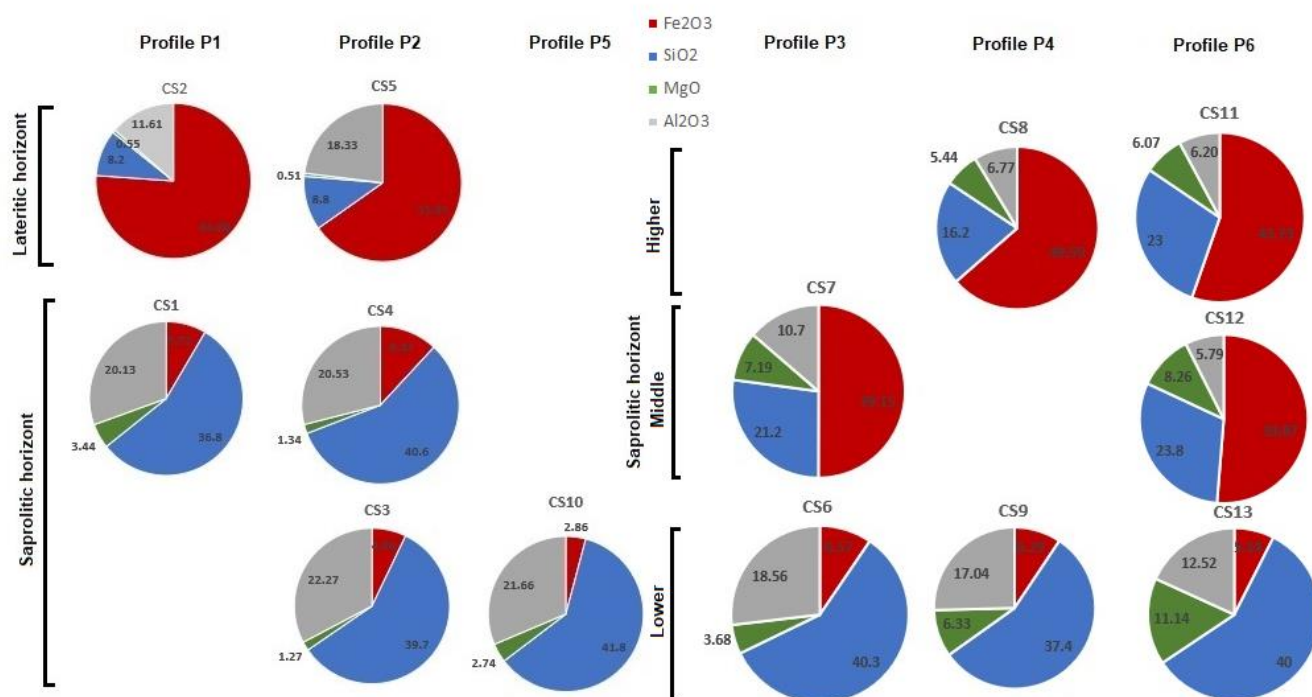


Figura 5. Representación gráfica del contenido (en % en peso) de los elementos mayores (Fe₂O₃, SiO₂, MgO, Al₂O₃), de las muestras de los perfiles lateríticos del sector O-48.

El diagrama molar ternario de NiO+MgO-Al₂O₃+Fe₂O₃-SiO₂ para los perfiles arcillosos expone una distribución agrupada de las muestras saprolíticas arcillosas (Figura 6A), caracterizadas por la abundancia en su composición de sílice y alúmina y con muy bajo contenido de NiO+MgO (en una proporción inferior a 10). El material laterítico de estos perfiles está enriquecido en

$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, pero empobrecido en $\text{NiO} + \text{MgO}$, similar a lo que ocurre en depósitos de Filipinas e Indonesia (Ito *et al.*, 2021; Aquino *et al.*, 2022).

El diagrama de los perfiles esmectíticos (Figura 6B) permite distinguir la transición en la composición de las saprolitas: desde un horizonte saprolítico inferior esmectítico (muestras CS13, CS9 y CS6), según los resultados de DRX; a otro horizonte medio, esmectítico-clorítico (muestras CS7, CS11 y CS12), y superior, principalmente clorítico (muestra CS8).

Las saprolitas esmectíticas presentan mayor variabilidad en cuanto a magnesio y níquel, con alto contenido de sílice (Figura 6B); en tanto las saprolitas cloríticas poseen una alta proporción de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$, que llega a representar alrededor de un 60 % y más, y con menor proporción de sílice (de 20 % a 30 %).

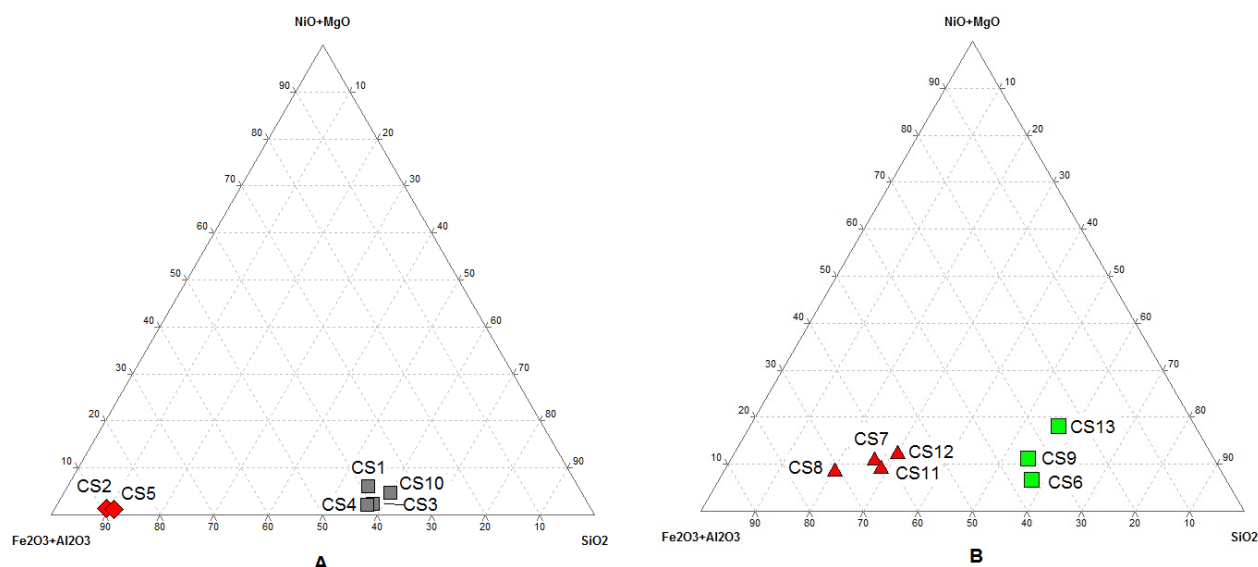


Figura 6. Diagrama molar ternario de $\text{NiO} + \text{MgO}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ - SiO_2 de muestras del sector O-48 del yacimiento Punta Gorda. A-Perfiles caoliníticos. B- Perfiles esmectíticos.

3.2. Mineralogía de los perfiles

Los perfiles arcillosos (no níquelíferos) presentan horizontes saprolíticos netamente caoliníticos (Figura 7) de un típico material blanco, que en P1 y P5 aparece mezclado con esmectita y goethita, y algo de talco. En el perfil P2 la caolinita se asocia al cuarzo, evidenciando una mineralización silíceas.

La paragénesis caolinita-esmectita-talco hace suponer la existencia de un cuerpo lateral feldespático meteorizado, asociado a una cuña de material básico de piroxenos y filosilicatos magnesianos. Verticalmente, hacia el

horizonte laterítico, no se observa la formación de los óxihidróxidos de Al, sino la presencia de los óxidos de Fe típicos.

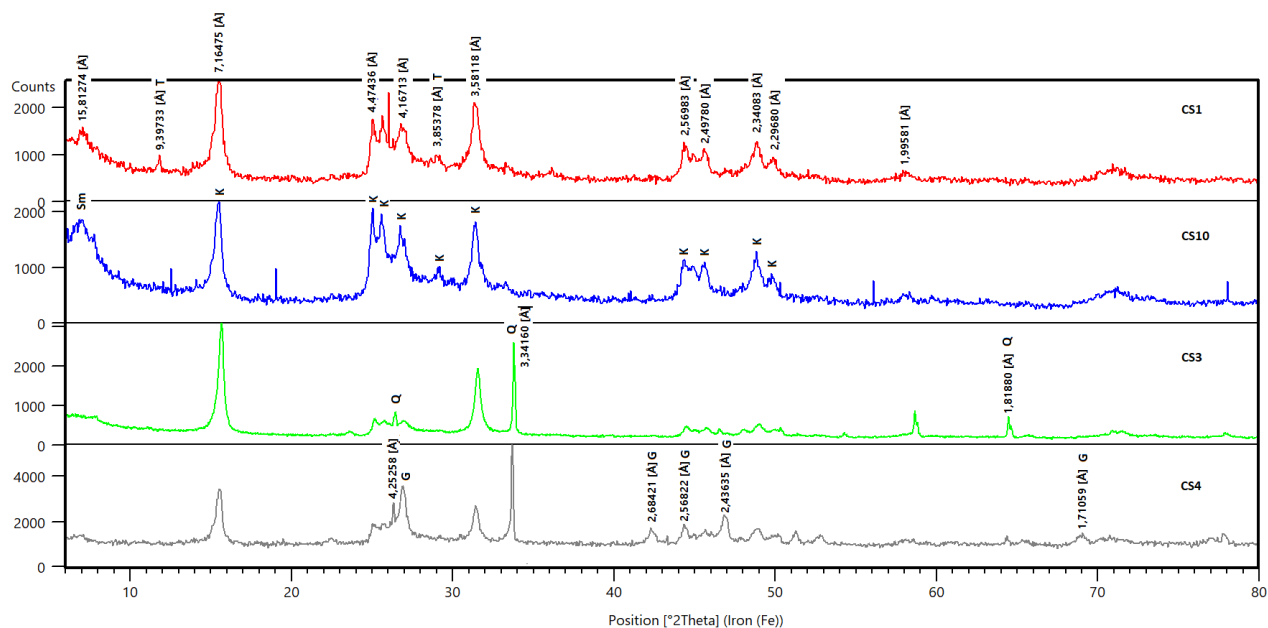


Figura 7. Difractogramas de muestras del horizonte silicatado (CS1, CS10, CS3 y CS4) de los perfiles caolíníficos no níquelíferos. Minerales: K- caolinita; Sm: esmectita; T: talco; G: goethita; Q: cuarzo.

Los horizontes lateríticos están compuestos principalmente de óxidos de Fe, predominantemente goethita, con hematita y maghemita, y algo de caolinita. No se detecta gibbsita, lo que hace suponer un inacabado proceso de meteorización durante la formación de arcilla.

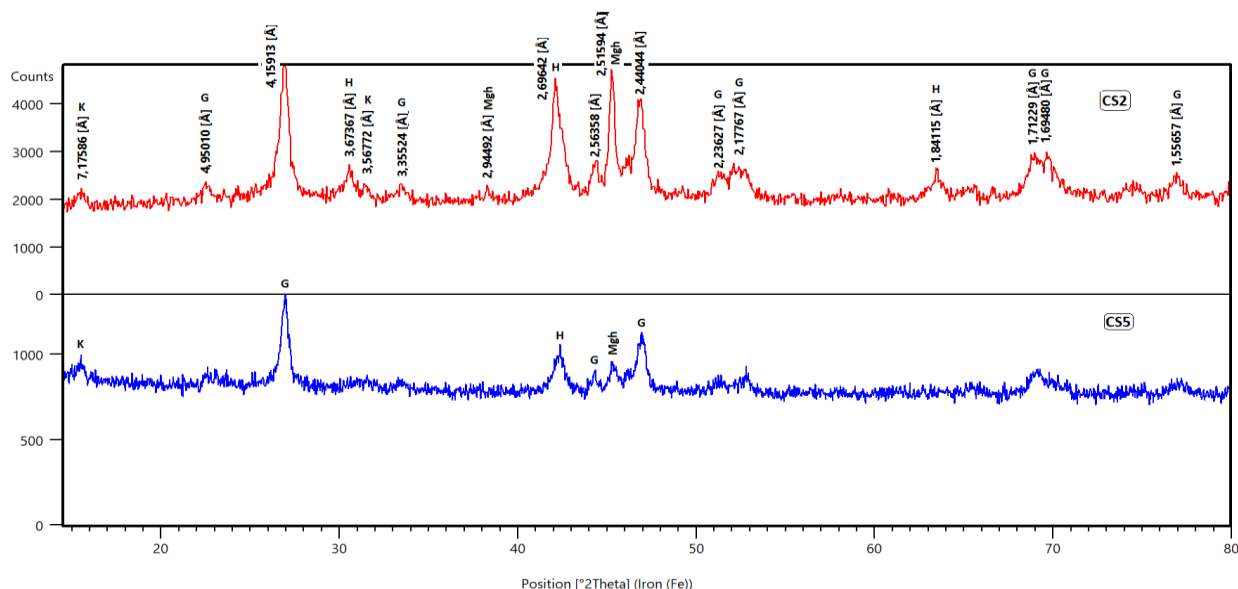


Figura 8. Difractogramas de muestras del horizonte laterítico (CS2 y CS5) de los perfiles arcillosos no níquelíferos. Minerales: G: goethita; H: hematita; Mgh: maghemita; K: caolinita.

Mineralógicamente, los perfiles esmectíticos (níquelíferos) presentan un horizonte saprolítico inferior netamente esmectítico, tipo montmorillonita ((Mg, Ni)_x Si₄ [Fe, Al, Mg, Ni]_{2-x} O₁₀ [OH]₂), con una transición gradual a clorita, tipo clinocloro-pennina níquelífera ((Mg, Ni)_{3.75}Fe_{1.25}Si₃Al₂O₁₀(OH)₈). La gradualidad de la transición se observa más claramente en el perfil P6 (Figura 11); en P3 es menos evidente, con saprolita intermedia enriquecida en clorita con algo de esmectita (muestra CS7) y en P4 ocurre una transición más brusca (Figura 10), de saprolita inferior a saprolita superior, predominado en esta última la clorita (muestra CS8) sin presencia de esmectita.

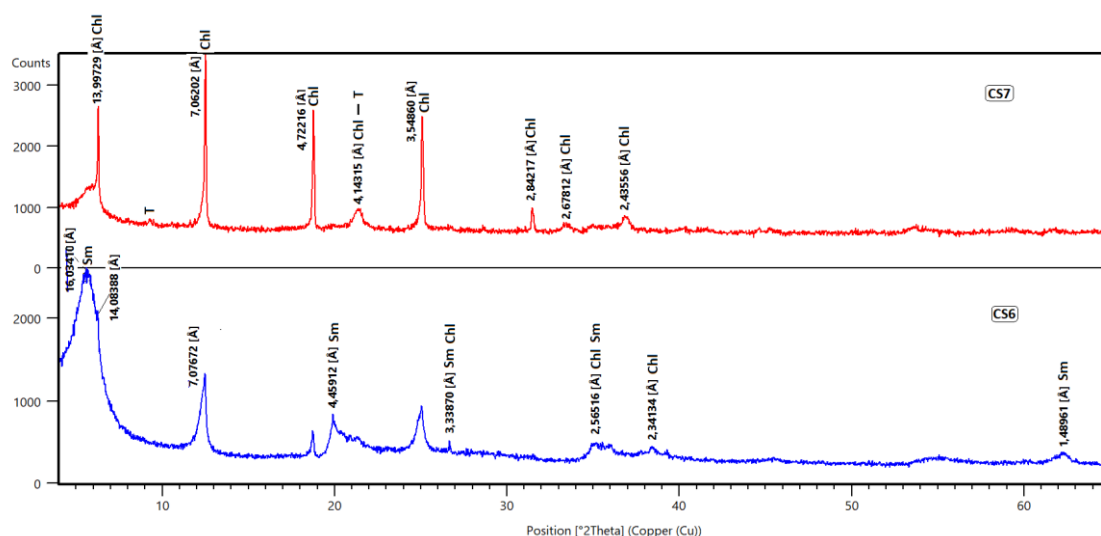


Figura 9. Difractogramas de muestras del horizonte silicatado (CS7 y CS6) del perfil P3. Minerales: Chl: clorita; T: talco; Sm: esmectita (montmorillonita).

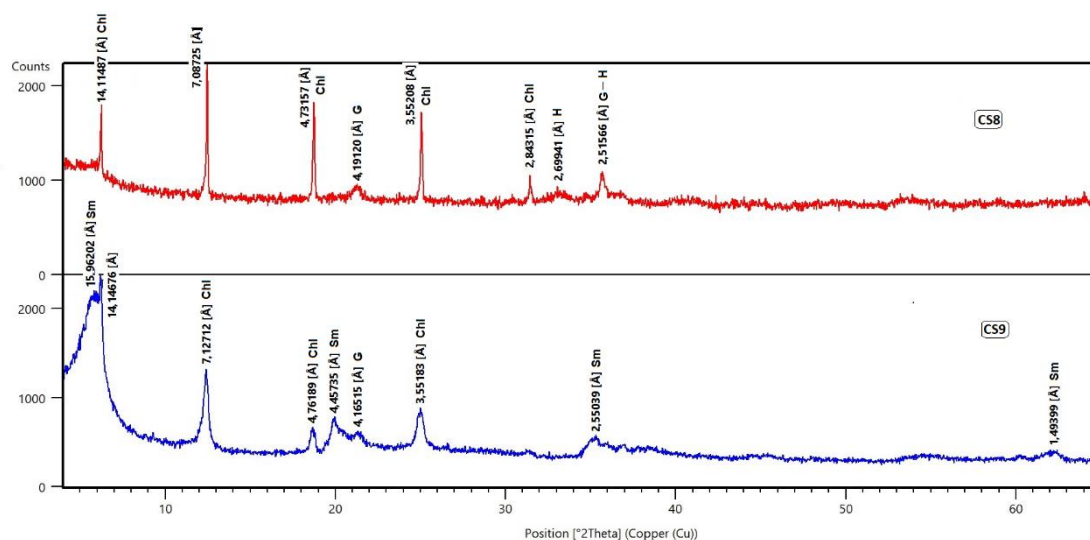


Figura 10. Difractogramas de muestras del horizonte silicatado (CS8 y CS9) del perfil P4. Minerales: Sm: esmectita (montmorillonita); Chl: clorita; G: goethita; H: hematita.

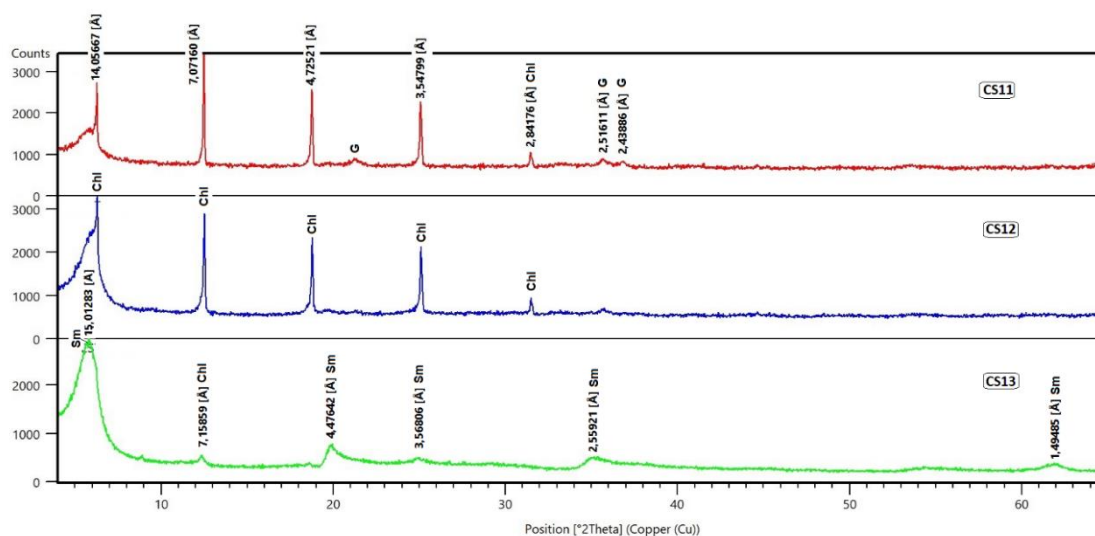


Figura 11. Difractogramas de muestras del horizonte silicatado (CS11, CS12 y CS13) del perfil P6. Minerales: Sm: esmectita (montmorillonita); Chl: clorita; G: goethita.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el sector O-48 del yacimiento Punta Gorda se presentan perfiles constituidos por horizontes propiamente arcillosos no níquelíferos (menos de un 0,69 % de NiO) asociados con perfiles con horizontes esmectíticos-cloríticos níquelíferos (entre 1,07 % y 1,59 % de NiO). Para este yacimiento, clasificado frecuentemente como depósito de tipo oxidado (Brand *et al.*, 1998; Oliveira *et al.*, 2001; Butt y Cluzel, 2013), la presencia de estos perfiles silicatados es atípica. En este sector se revelan cuatro aspectos de interés:

- Presencia de perfiles lateríticos con horizontes saprolíticos de tipo arcilloso y esmectítico-clorítico, dentro de un depósito laterítico oxidado.
- Distribución bien diferenciada del níquel en los horizontes saprolíticos: los arcillosos (caoliníticos) son pobres en níquel (menos de 0,69 % de NiO), en tanto los esmectíticos-cloríticos son níquelíferos (1,07 % a 1,59 % de NiO).
- Existencia probable de un protolito compuesto de rocas básicas con intrusivos o cuerpos feldespáticos que, por meteorización, dan lugar a arcillas.
- Ocurrencia de una transición genética entre el componente esmectítico y el clorítico.

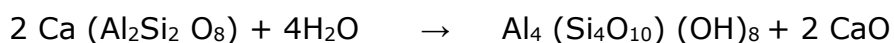
En el sector O-48 los perfiles lateríticos arcillosos se localizan principalmente hacia su parte oriental (perfiles P1, P2); P5 se ubica más hacia el centro, asociado a una posible zona de falla; mientras que los del tipo esmectítico-clorítico niquelíferos (perfiles P3, P4, P6) se ubican hacia la parte occidental. Esta distribución geográfica bien delimitada apoya el criterio de considerar la decisiva influencia del tipo de roca madre en la génesis de estos horizontes saprolíticos.

El níquel se distribuye de manera bien diferenciada en cada uno de los tipos de perfiles bajo estudio; los arcillosos son netamente no niquelíferos, mientras que los esmectíticos-cloríticos son niquelíferos. Esto permite un beneficio mineral basado en ciertos aspectos megascópicos (color, grado de compactación, entre otros) que pueden mejorar la calidad de la mena niquelífera suministrada al proceso Caron.

La existencia de un protolito compuesto por rocas básicas con intrusivos o cuerpos feldespáticos que dan lugar a arcillas por meteorización, es un tema por desarrollar o validar con materiales de estos perfiles. Aquí solo se ha inferido la génesis de la caolinita, de una parte, y las cloritas por otra, según el tipo de protolito a partir del cual se formaron.

Los perfiles arcillosos poseen un buen desarrollo del horizonte saprolítico (básicamente caolinítico), con una potencia estimada de 1,5 m a 3 m. La caolinita expone un cuadro difractométrico completo (Figura 7), en el que aparecen algunos reflejos de esmectitas (15,81 Ao) y talco (9,39 Ao). La presencia de estas dos últimas fases minerales presume la existencia de una mezcla de rocas peridotíticas y harzburgíticas con cuerpos de gabros en el sector O-48 del yacimiento Punta Gorda. En los horizontes oxidados de estos perfiles, se manifiestan ciertas cantidades de arcilla mezclada con los óxidos de hierro.

La génesis de la caolinita se justifica por la asociación mineralógica producida durante el proceso de meteorización del componente feldespático (plagioclasa básica) en el cuerpo de gabro según la reacción:



Plagioclasa Ca

Caolinita

Lo anterior encuentra sustento en resultados de investigaciones de Proenza *et al.* (1999) y Marchesi *et al.* (2006) que refieren la existencia de rocas gabroicas mezcladas con peridotitas dentro del macizo ofiolítico nororiental cubano.

No obstante, es también probable que la caolinita se formara a partir de la esmectita (montmorillonita) mediante un proceso diagenético (Putzolu *et al.*, 2020a y Putzolu *et al.*, 2020b) teniendo en cuenta que en los difractogramas de muestras caoliníticas como CS1 y CS10 (Figura 7) se define claramente el reflejo difractométrico 15,81 Å, atribuible a la esmectita. Además, estas muestras poseen un mayor contenido de magnesio entre las saprolíticas de estos perfiles caoliníticos.

De modo que la presencia de caolinita en este caso puede tener dos fuentes de origen: uno por meteorización de cierta cantidad de feldespatos (plagioclasa-Ca) y otro diagenético, a partir de esmectitas (montmorillonita).

En los perfiles esmectíticos-cloríticos de Punta Gorda hay distinción química entre las saprolitas esmectíticas (Sm) y las cloríticas (Chl). Las primeras presentan mayor contenido de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), y variable de magnesio; en tanto las cloríticas son netamente ferrosas, con menos sílice y alúmina, y un contenido más estable de magnesio, según lo ilustra la Figura 12.

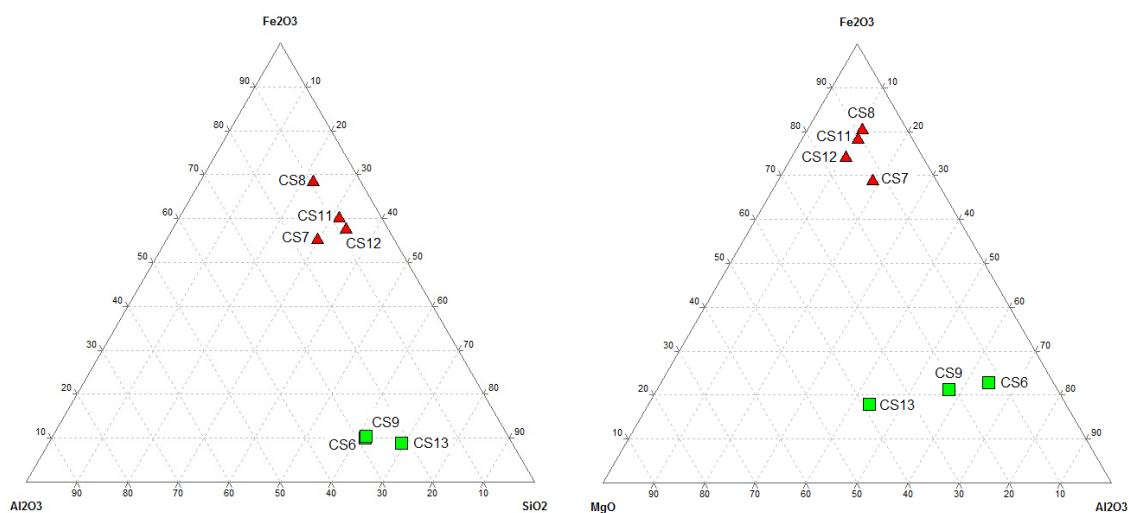


Figura 12. Diagrama molar ternario de muestras esmectíticas (CS6, CS9, CS13) y cloríticas (CS7, CS8, CS11, CS12) de saprolitas del sector O-48 del yacimiento Punta Gorda.

Lo anterior permite suponer que lo que ocurre en este caso es la transformación del componente esmectítico (Sm) a clorítico (Chl) mediante un proceso de meteorización progresiva, ya referida por varios autores en otros sistemas lateríticos (Beaufort *et al.* 1997; Murakami *et al.*, 1999; Gaudin *et al.*, 2005; Elert *et al.*, 2015; Meng *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2020), pues la existencia de cloritas con significativo contenido de hierro, superior al componente esmectítico, así como las observaciones de campo (Figura 4) que

revelan un material clorítico rojizo terroso (propio de un producto alterado hipergénicamente), apuntan hacia un proceso de transformación de Sm a Chl por meteorización en un sistema laterítico.

Por otra parte, vale señalar que, con respecto a la paragénesis de esmectitas y cloritas (Sm–Chl) en los horizontes saprolíticos y su mecanismo de formación en estos sistemas lateríticos, no existe un criterio único; pues, además del criterio de Gaudin *et al.* (2005), una interpretación diferente exponen Putzolu *et al.* (2020b), cuando reconocen la formación de esmectita a partir de clorita (Chl – Sm) en un sistema laterítico de Ni, lo cual solo había sido reconocido, hasta ese momento, como un proceso común que ocurre en regiones donde la alteración superficial es sobre rocas metamórficas (facies de esquistos verdes).

En la mineralogía del horizonte saprolítico de los perfiles esmectíticos – cloríticos resulta útil tener en cuenta lo expuesto por Gaudin *et al.* (2005) que distinguen en la zona saprolita dos tipos de plasma-esmectítico. Uno es de tipo *Mg-rich smectite* (saponita), previamente reportado por Camuti and Riel (1996) en la saprolita de Murrin Murrin, y comúnmente observado en otras saprolitas desarrolladas sobre rocas ultrabásicas (Nahon *et al.*, 1982; Colin *et al.*, 1985; Yang & Shau, 1991). El segundo tipo de plasma-esmectítico es *Fe-rich smectite dioctahedral* (Fe-nontronite, Fe-Montmorillonite). Además, estas presentan grandes variaciones en el contenido de Mg: desde Fe(Cr)80Mg(Ni)20 hasta Fe(Cr)50 Mg(Ni)50, reconocidas como esmectitas Fe–Mg. Anteriormente, las esmectitas ricas en hierro de la zona de saprolita se habían descrito generalmente como nontronitas (Besnus *et al.*, 1975; Nahon *et al.*, 1982).

Consideramos que la paragénesis detectada en muestras de saprolitas en el depósito de Punta Gorda, se ajusta a lo planteado por Gaudin *et al.* (2005) en Murrin Murrin y que lo que puede existir en realidad son fases minerales intermedias entre los miembros esmectíticos dioctaédricos (nontronita de Fe, montmorillonita de Fe) y los trioctaédricos (saponita de Mg + Ni).

5. CONCLUSIONES

- En el yacimiento Punta Gorda coexisten perfiles lateríticos constituidos por horizontes propiamente arcillosos no niquelíferos (con menos de 0,69 % de NiO) y perfiles de horizontes esmectíticos–cloríticos niquelíferos (entre 1,07 % y 1,59 % de NiO), lo cual es atípico en un depósito de tipo oxidado.
- Los perfiles arcillosos presentan un buen desarrollo del horizonte saprolítico, básicamente caolinítico, en paragénesis con esmectita y

talco. La presencia de caolinita puede tener dos fuentes de origen: una por meteorización de cierta cantidad de feldespatos (plagioclasa-Ca) que parece ser la forma predominante, y otra diagenética, a partir de esmectitas (montmorillonita).

- En Punta Gorda las saprolitas esmectíticas (Sm) y las cloríticas (Chl) se diferencian químicamente, presentando las primeras mayor contenido de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), y contenidos variables de magnesio; en tanto las segundas son netamente ferrosas, con menos sílice y alúmina, y un contenido más homogéneo de magnesio.
- La paragénesis de esmectitas y cloritas (Sm-Chl) en los horizontes saprolíticos se interpreta como la transformación del componente esmectítico (Sm) a clorítico (Chl) mediante un proceso de meteorización progresiva en estos sistemas lateríticos.
- La distribución diferenciada del níquel en los perfiles arcillosos (caoliníticos) -no niquelíferos- y los esmectíticos -niquelíferos- permite orientar el proceso de beneficio de las menas para el proceso Caron.

6. REFERENCIAS

- Aiglsperger, T., Proenza, J. A., Lewis, J. F., Labrador, M., Svojka, M., Rojas-Purón, A., Longo, F., & Ďurišová, J. (2016). Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*, 73, 127-147. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.10.010>.
- Altschuler, Z. S., Dwornik, E. J., & Kramer, J. (1963). Transformation of montmorillonite to kaolinite during weathering. *Science*, 141: 148-152.
- Aquino, K. A., Arcilla, C. A., Schardt, C., & Tupaz, C. A. J. (2022). Mineralogical and Geochemical Characterization of the Sta. Cruz Nickel Laterite Deposit, Zambales, Philippines. *Minerals* 2022, 12, 305. <https://doi.org/10.3390/min12030305>.
- Beaufort, D., Baronnet, A., Lanson, B., & Meunier, A. (1997). Corrensite: A single phase or a mixed-layer phyllosilicate in the saponite-to-chlorite conversion series? A case study of Sancerre-Couy deep drill hole (France). *American Mineralogist*, 82, 109-124.
- Besnus, Y., Fusil, G., Janot, C., Pinta, M. & Sieffermann, G. (1975). Characteristics of some weathering products of chromatic ultrabasic rocks in Bahia State, Brazil: nontronites, chlorites and chromiferous talc. In: Proceedings of the International Clay Conference (Mexico), pp. 27-34. Applied Publishing, Illinois.
- Brand, N. W., Butt, C. R. M., & Elias, M. (1998). Nickel laterites: classification and features. *AGSO J Australian Geol Geoph*, 17, 81-88.

- Butt, C. R. M., & Cluzel, D. (2013). Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites. *Elements*, 9, 123–128.
- Camuti, K. S. & Riel, R. G. (1996). Mineralogy of the Murrin Murrin nickel laterites. In: Grimsey E. J. & Neuss I. eds. Nickel '96, Mineral to Market, pp. 209–210. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Special Publication 6/96.
- Colin, F., Noack, Y., Trescases, J. J. & Nahon, D. (1985). L'alte'ration late'ritique de'butante des pyroxé'nites de Jacuba, Niquelandia (Bresil). *Clay Minerals*, 20, 93–113.
- Degen, T., Sadki, M., Bron, E., König, U., & Nénert, G. (2014). The HighScoresuite. *PowderDiff*, 29, S13–S18.
- Domenech, C., Galí, S., Villanova-de Benavent, C., Soler, J. M., & Proenza, J. A. (2017). Reactive transport model of the formation of oxide-type ni-laterite profiles (Punta Gorda, Moa Bay, Cuba). *Mineralium Deposita*, 52(7), 993–1010.
- Elert, K., Pardo, E. N., Rodriguez-Navarro, C. (2015). Mineralogical evolution of di- and trioctahedral smectites in highly alkaline environments. *Clays and Clay Minerals*, 63(6), 414–431.
- Elias, M. (2002). *Nickel laterite deposits – a geological overview, resources and exploitation*. Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, Hobart, Special Publication 4, pp 205–220.
- Fernández-Martínez, L. (2020). *Modelo de la distribución espacial del material amenífero en la base minera de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara*. Tesis Doctoral de la Universidad de Moa, Departamento de Geología. 100 p.
- Freyssinet, P., Butt, C.R.M., Morris R.C., Piantone, P. (2005) Ore-forming processes related to lateritic weathering. In: Hedenquist JW, Thomson JFH, Goldfarb RJ, Richards JP (eds), *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 681–722.
- Galí, S., Proenza, J. A., Labrador, M., Melgarejo, J. C., Tauler, E., Muñoz-Gómez, N., Rojas-Purón, A., & Orozco-Melgar, O. (2006). Caracterización mineralógica de los perfiles laterítico tipo óxido: yacimiento Punta Gorda (Cuba Oriental). *Macla*, 6, 197–199.
- Gaudin, A., Decarreau, A., Noack, Y., & Grauby, O. (2005). Clay mineralogy of the nickel laterite ore developed from serpentinitised peridotites at Murrin Murrin, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 52, 231–241.
- Gleeson, S. A., Butt, C. R. M., & Elias, M. (2003). Nickel laterites: A Review. *SEG Newsletter*, 54, 11–18.
- Ito, A., Otake, T., Maulana, A., Sanematsu, K., Sufriadin, I.A. & Sato, T. (2021). Geochemical constraints on the mobilization of Ni and critical metals in laterite deposits, Sulawesi, Indonesia: A mass-balance approach. *Resource Geology*, 1–28. <https://doi.org/10.1111/rge.12266>.

- Iturralde-Vinent, M. (1996). Introduction to Cuban geology and geophysics. Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba. Miami, Florida. *Int. Geol. Correl. Programme*, 364, 3–35.
- Lavaut-Copa, W. (1998). Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba oriental. *Minería y Geología*, 15, 9–16.
- Lavaut-Copa, W. (2018). A Geological Classification for the Rocks of Weathering. *Petroleum Science and Engineering*, New York (USA), 2(1), 1–6. doi: 10.11648/j.pse.20180201.11. ISSN: 2640-4516.
- Liu, P., Wei, K., Chen, Z., Yuanzhi, T., Wancang, Z., Yuanfeng, C., Jingong, C., & Junfeng, J. (2020). Hydrothermal synthesis of chlorite from saponite: Mechanisms of smectite-chlorite conversion and influence of Mg²⁺ and Al³⁺ supplies. *Applied Clay Science*, 184, 105357. ISSN 0169-1317.
- Marchesi, C., Garrido, C. J., Godard, M., Proenza, J. A., Gervilla, F., & Blanco-Moreno, J. (2006). Petrogenesis of highly depleted peridotites and gabbroic rocks from the Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt (eastern Cuba). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(6), 717–736.
- Marsh, E. E. & Anderson, E. D. (2011). Ni–Co laterite deposits. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2011, 1259, 1–9.
- Meng, J., Xiaoyang, L., Benxian, L., Juncheng, Z., Daqian, H., Jiuhua, C., & Weiguang, S. (2018). Conversion reactions from dioctahedral smectite to trioctahedral chlorite and their structural simulations. *Applied Clay Science*, 158, 252–263. ISSN 0169-1317. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.05.010>.
- Murakami, T., Sato, T. & Inoue, A. (1999). HRTEM evidence for the process and mechanism of saponite-to-chlorite conversion through corrensite. *American Mineralogist*, 84(7–8), 1080–1087. <https://doi.org/10.2138/am-1999-7-810>
- Nahon, D., Colin, F. & Tardy, Y. (1982). Formation and distribution of Mg, Fe, Mn-smectites in the first stages of the lateritic weathering of forsterite and tephroite. *Clay Minerals*, 17, 339–348.
- Oliveira, S. M. B., de Moya-Partini, C. S., & Enzweiler, J. (2001). Ochreous laterite: a nickel ore Punta Gorda, Cuba. *Journal South American Earth Science*, 34, 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105357>.
- Proenza, J., Melgarejo, J., Gervilla, F., & Solé, J. (1999). Los niveles de gabros bandeados en el macizo ofiolítico Moa-Baracoa (Cuba); gabros característicos de cumulos de ofiolitas de zona de suprasubducción. *Minería y Geología*, 16(12), 5–12.
- Pushcharovsky, Y. (1988). Mapa geológico de la República de Cuba: Havana, Cuba/Moscow, USSR: Academy of Sciences of Cuba and Academy of Sciences of USSR, scale 1:250 000.
- Putzolu, F., Abad, I., Balassone, G., Boni, M., & Mondillo, N. (2020b). Ni-bearing smectites in the Wingellina laterite deposit (Western Australia) at nanoscale:

- TEM-HRTEM evidences of the formation mechanisms. *Applied Clay Science*, 196, 105753. ISSN 0169-1317. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105753>.
- Putzolu, F., Abad, I., Balassone, G., Boni, M., Cappelletti, P., Graziano, S. F., Maczurad, M., Mondillo, N., Najorka, J., & Santoro, L. (2020a). Parent rock and climatic evolution control on the genesis of Ni-bearing clays in Ni-Co laterites: New inferences from the Wingellina deposit (Western Australia). *Ore Geology Reviews*, 120.
- Rojas-Purón, A., Rômulo-Simões, A., & Orozco-Melgar, G. (2012). Identificación mineralógica de los óxidos de manganeso del yacimiento laterítico Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 28(1), 1-26. ISSN 1993 8012.
- Terrero-Reynosa, J. (2010). *Caracterización geoquímica y mineralógica del cuerpo silicatado en el sector septentrional del yacimiento Punta Gorda, Moa*. Tesis de maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Yang, H. & Shau, Y. (1991). The altered ultramafic nodules from Mafu and Liutsu, Hsinchuhsien, Northern Taiwan with particular reference to the replacement of olivine and bronzite by saponite. *Special Publication of the Central Geological Survey*, 5, 39–58.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores

ARP: conceptualización del estudio mineralógico presentado, en el muestreo y descripción de muestras, en la preparación de muestras para las determinaciones químicas y mineralógicas por DRX. En la versión inicial y final del manuscrito del artículo. **RSA**: determinaciones e interpretaciones de los registros mineralógicos por DRX; revisión de la versión inicial del original. **LFM**: reconocimiento de los afloramientos en el campo, muestreo de la colección principal de muestras, revisión de la versión final del artículo. **ASM**: determinaciones e interpretaciones de los registros mineralógicos por DRX, y definición de la mineralogía de las muestras.

ORCID

ALRP, <https://orcid.org/0000-0002-9880-6744>

RSA, <https://orcid.org/0000-0002-3026-5523>

LFM, <https://orcid.org/0009-0005-7134-8500>

ASM, <https://orcid.org/0009-0003-4095-401X>

Recibido: 15/09/2024

Aceptado: 04/12/2024