

EVIDENCIAS A FAVOR DE QUE LA GOETHITA ES LA PRINCIPAL PORTADORA DE NIQUEL EN LOS HORIZONTES LATERITICOS DE LAS CORTEZAS FERRONIQUELIFERAS

EVIDENCES IN FAVOUR TO CONSIDER THE GOETHITE PHASE AS THE MAIN NICKEL-BEARING MINERAL IN FERRUGINOUS LATERITIC NICKEL ORES

ARTURO ROJAS PURON

E mail: artrojaspuron@ismm.edu.cu
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

RESUMEN: Las cortezas de intemperismo lateríticas del nordeste de Cuba constituyen fuentes de obtención de Ni. El vínculo de este metal con las fases minerales de hierro (goethita específicamente) en las menas oxidadas de las cortezas ferroniquelíferas, ha sido revelado por diversas investigaciones que se apoyan en análisis químicos y mineralógicos. En este artículo se conjugan, para perfiles de distinto grado de madurez, aspectos químicos, mineralógicos y físicos al nivel de perfil, de horizontes y de clase granulométrica. Los resultados mostraron una tendencia natural de concentración de las distintas fases minerales hacia determinada clase granulométrica. En el yacimiento Moa, tanto en perfiles maduros como inmaduros, la goethita se concentra en la clase granulométrica menor de 0,045 mm, la cual representa alrededor del 50 % en peso de los horizontes ocrosos para ambos tipos de perfil, y contiene como promedio 1,4 % de Ni.

Palabras clave: goethita, Ni, lateritas, grado de madurez, clase granulométrica.

ABSTRACT: The lateritic weathering crusts of the northeast of Cuba constitute sources of obtaining Ni. The relationship of this metal with the mineral phases of iron (goethite specifically) in the oxidized ores of the nickeliferous crusts has been revealed by diverse investigations ground in chemical and mineralogical analyses. In this paper they are conjugated, for profiles of different maturity degree, chemical, mineralogical and physical aspects at the level of profile, horizons and grain-sized class. The results showed a natural tendency of concentration of the different mineral phases towards certain grain-sized class. In the Moa deposit, as much in mature profiles as immature, goethite is concentrated in the grain-sized class smaller than 0,045 mm, which represents around 50 % in weight of the ochreous horizons for both types of profile, and contains 1,4 % of Ni.

Key words: goethite, Ni, laterites, maturity degree, grain-sized class.

INTRODUCCIÓN

En los estudios mineralógicos realizados sobre las cortezas de intemperismo ferroniquelíferas, ocupa un lugar importante el de las fases minerales portadoras de Ni. El conocimiento de la forma de existencia del Ni en las menas oxidadas y silicatadas, permite definir la estrategia metalúrgica para la recuperación más efectiva de este metal; en este sentido es necesario conocer, además de las características físicas del portador, su forma cristalológica, granulometría de concentración y el grado de retención del Ni en la red cristalina.

Se ha revelado en diferentes investigaciones (Schellmann, 1978; Kunhel et al., 1978; Rojas-Purón y Orozco, 1994; Carvalho Silva y de Oliveira, 1995) la vinculación del Ni con las fases minerales de hierro, sobre todo con la goethita, en las menas oxidadas de las cortezas ferroniquelíferas. Esto se sustenta fundamentalmente en análisis químicos y mineralógicos que emplean

diferentes técnicas analíticas. Ammon Chokroum (1972), al investigar las ferralitas de Nueva Caledonia, establece que el níquel puede encontrarse en compuestos amorfos, acumulados en las microfisuras o en la superficie de la serpentina y valora el comportamiento térmico de la hematita. Schellmann (1978) expone la distribución del Ni en granos de goethita empleando técnicas de microscopía electrónica. Nahon et al. (1982) valoran desde el punto de vista geoquímico perfiles lateríticos de Costa de Marfil ilustrando la distribución vertical del níquel a través del perfil. Voskresenskaia et al. (1987) determinan la asociación del níquel con diferentes fases, fundamentalmente de Fe y silicatos de Fe y Mg.

En relación con los minerales silicatados, los trabajos de Maksimovic (1966, 1975), Brindley y Hsien-Ming (1975), Springer (1974) y Brindley (1978), indican que se trata de una mezcla de silicatos de magnesio-níquel hidratados, con distancias interplanares de 7,3 Å, serie lizardita-nepouita, y 10,0 Å, serie kerolita-pimelita. En

perfiles lateríticos brasileños se han descrito filosilicatos portadores de níquel, como las cloritas, vermiculitas y esmectitas (Carvalho Silva y Oliveira, 1995).

En las últimas décadas se han empleado, de forma notable, técnicas de disolución y extracción selectiva para investigar la asociación de metales en las distintas fases minerales de los perfiles y suelos lateríticos, haciendo énfasis en los óxidos de hierro (Schwertmann y Cornell, 1991) para precisar la asociación de una serie de metales, entre ellos el Ni, con estos óxidos. Así, Rueda et al. (1992), empleando reactivos de disolución tipo EDTA y Citrato, definen al primero como más adecuado para el análisis de suelos; Ballestero et al. (1998) y Acebal (2000) valoran la influencia del Fe (II) y (III) en la cinética de disolución de la goethita por EDTA. Trolard et al. (1995), haciendo uso de métodos de extracción selectiva, realizan un estudio detallado de la asociación de varios metales con los óxidos de Fe en un perfil laterítico de Burkina Faso y concluyen que el Ni está muy asociado con los óxidos de hierro, especialmente con la goethita, pero no con los óxidos de Mn ni con las espinelas. Oorschot y Dekkers (2001) valoran minerales magnéticos (hematita y maghemita) en sedimentos de suelos empleando oxalato de amonio, y consiguen caracterizar estas fases y establecer ciertas diferencias entre la maghemita y la magnetita. En Cuba, Almaguer y Zamarsky (1993) estudian de la distribución del Fe, Ni y Co en los tamaños de granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de rocas ultrabásicas, y Almaguer (1994) caracteriza las partículas finas presentes en los ocre. Cordeiro et al. (1987) establecen una metodología de análisis químico de fases para determinar la asociación del Ni en las lateritas. Sin embargo, hasta la fecha, no se tienen referencias de investigaciones que conjuguen aspectos físicos, químicos y mineralógicos al nivel del perfil, de los horizontes y de clase granulométrica.

El objetivo de este artículo es caracterizar, desde el punto de vista físico, químico y mineralógico, horizontes y clases granulométricas de menas oxidadas, con la finalidad de profundizar en el conocimiento de las fases portadoras de Ni en las mismas.

GRADO DE MADUREZ DE LOS PERFILES LATERÍTICOS

En los perfiles lateríticos desarrollados sobre rocas básicas y ultrabásicas parcial o totalmente serpentinizadas, como ocurre en la región de Moa (Vera Yeste, 1979), se manifiestan regularidades químicas y mineralógicas como, por ejemplo, la existencia de una zonalidad química y mineralógica vertical a lo largo del perfil (Smirnov, 1982; Trescases, 1986).

Smirnov usa el término madurez para referirse a la evolución geológica de las cortezas de meteorización. Ideas relacionadas con la existencia de un determinado nivel evolutivo en los perfiles de alteración laterítica aparecen implícitas, aunque no declaradas, en trabajos de Nahon (1991), quien explica las variaciones mineralógicas y estructurales observadas en lateritas ferruginosas como

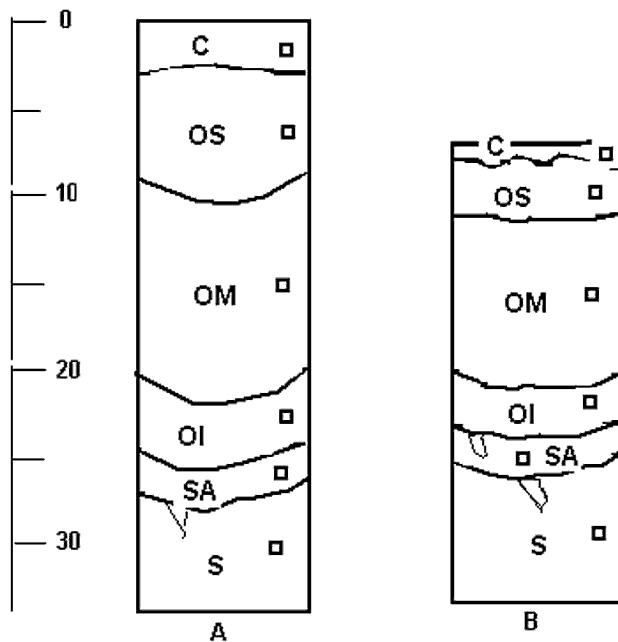
un cambio espontáneo y autónomo del sistema geoquímico del suelo sin la intervención periódica de factores externos. Él lo concibe como un fenómeno de autorganización, a partir de la definición expresada por Ortoleva et al. (1987).

En este artículo el grado de madurez se refiere a un término mineralógico-geoquímico que expresa el nivel evolutivo de un perfil laterítico bajo la óptica de la dinámica estadal de las cortezas de meteorización. Esto significa que cada perfil existe en un nivel evolutivo determinado por las características mineralógicas y rasgos tectónicos de la roca madre, y por las condiciones climáticas, topográficas y geomorfológicas imperantes en el sector donde se desarrolla la corteza, aspectos ya tenidos en cuenta por Golightly (1981) al explicar el desarrollo de las cortezas ferroniquelíferas.

En los depósitos lateríticos, atendiendo a su grado de madurez, se distinguen dos tipos de perfiles: maduros e inmaduros (Fig. 1). El grado de madurez determina no sólo las características químicas y mineralógicas, sino también las físicas del producto final de la meteorización: las lateritas.

Al abordar la problemática del níquel en las menas oxidadas, debe considerarse la influencia que pueda tener sobre su contenido en las fases minerales que lo con-

Profundidad (en metros)



- A: perfil maduro B: perfil inmaduro o poco maduro.**
- C: concreciones ferruginosas. OM: ocre medio.**
- OS: ocre superior. OI: ocre inferior.**
- : toma de muestra. SA: serpentinita alterada.**
- ▽ : material silicificado. S: serpentinita dura.**

Fig. 1. Perfiles esquematicos de alteracion lateritica.

tienen o sobre la abundancia de estas fases, el grado de madurez del perfil de alteración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron 118 muestras representativas de dos perfiles lateríticos completos del yacimiento Moa con distinto grado de madurez (P1, perfil maduro, y P2, perfil inmaduro). En cada horizonte se determinaron las características colorimétricas con un espectrofotómetro de luz visible SF-18, en el rango de procesamiento de 400 a 750 nanómetros.

La separación granulométrica por tamización (Fig. 2) permitió obtener, por vía húmeda, seis clases granulométricas: Cg1 (>1,6 mm); Cg2 (<1,6 y >0,83 mm); Cg3 (< 0,83 y > 0,417 mm); Cg4 (< 0,417 y > 0,074 mm); Cg5 (<0,074 y >0,045 mm) y Cg6 (<0,045 mm). Con imán de tipo Schoniev, se separaron las fracciones magnética, electromagnética y no magnética en cada clase granulométrica.

Mediante fluorescencia de rayos X (espectrómetro de fluorescencia de rayos X, marca Phillips 2400, con estándares apropiados) y espectroscopia de absorción

atómica (espectrofotómetro CDN-18), se determinó la composición química de las muestras representativas de cada horizonte del perfil y de las clases granulométricas.

La difracción de rayos X constituyó el método principal para la caracterización mineralógica. En el procesamiento de las muestras se empleó la metodología propuesta por Grin (1953), con goniómetro alemán del tipo HZG-4, según el régimen siguiente: un generador de alto voltaje, TUR-62M, 30-40 kV y 20 mA, con una radiación Co k-alfa, equipado con un monocromador de grafito con slit de divergencia fijo de un grado. Los difractogramas se obtuvieron según un barrido de 2 θ de 5 a 80 $^\circ$ con un incremento de 0,05 $^\circ$ para un tiempo de conteo de 20 segundos. Resultó útil para seleccionar las muestras el análisis a través del microscopio binocular (tipo Stereomikroskop Technival).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

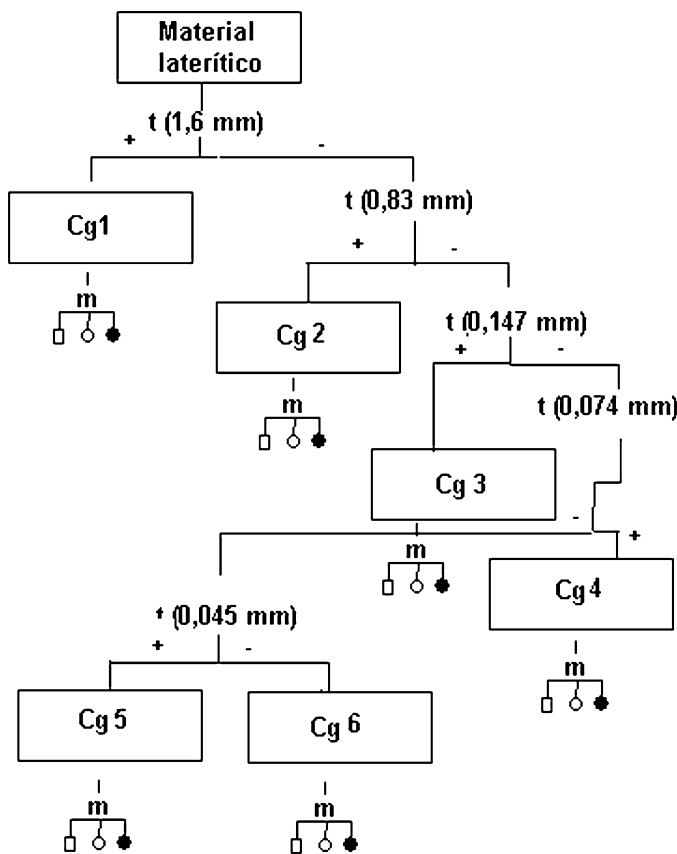
Colorimetría

Uno de los aspectos macroscópicos que caracteriza las cortezas de intemperismo es la coloración variable de sus horizontes, desde la roca poca alterada (serpentinita verdosa) hasta el material laterítico más intemperizado (concreciones ferruginosas pardas oscuras). Los horizontes serpentiniticos muestran una coloración clara con diferentes tonalidades, desde verdosas hasta carmelitas (tabla 1), la cual obedece a la presencia de los silicatos ferromagnesianos. En la medida que el material se enriquece en componente ferroso, la coloración se torna de amarillenta a amarillo pardusco hasta llegar a pardo oscuro. Se ha determinado que el tamaño de los cristales y el grado de cementación influye sobre la tonalidad del color (Schwertmann, 1993).

Bigham et al. (1991) exponen ideas sobre la relación entre la presencia de óxidos de Fe y el color del suelo, y consideran que hay cierta correspondencia del estado de oxidación del Fe con la transición de una coloración a otra. Torrent et al. (1983) relacionan el color de los suelos con el contenido de hematita presente en ellos. Por otra parte, Dobos et al. (1990) estudiaron el efecto del carbono orgánico, la temperatura, el tiempo y las condiciones de redox sobre el color de los suelos.

Scheinost y Schwertmann (2001) realizando mediciones colorimétricas a muestras de suelos y de minerales puros, llegan a identificar con gran exactitud los óxidos de hierro siguientes: goethita, hematita, lepidocrosita y maghemita. La goethita posee un color amarillo pardusco, que varía entre 7,3YR-1,6Y en el sistema Munsell. El predominio de goethita sobre otras fases minerales en el horizonte de ocre medio, determina el color amarillo pardusco del mismo.

Los ocres lateríticos exhiben una coloración que transiciona desde amarillo pardusco, pasando por pardo oscuro hasta un rojo oscuro. La gradación de color puede ser un indicador de la dirección que siguen los procesos de oxidación durante el intemperismo. De ser así, la coloración más clara (blanco-rojiza) que aparece en determinados sectores del yacimiento, permite prever la presencia de minerales no ferrosos, más bien silicatados y aluminicos,



- t : separación granulométrica (tamización).
- m: separación magnética (imán de Schoniev).
- : fracción magnética.
- : fracción electromagnética.
- : fracción no magnética.
- Cg 6 : clase granulométrica.

Fig. 2. Esquema de preparación de muestras.

TABLA 1. CARACTERISTICAS COLORIMETRICAS DE LOS PERFILES DE ALTERACION DEL YACIMIENTO MOA (SEGUN ROJAS PURON Y CRESPO, 1994)

PERFIL MADURO (P1)							PERFIL INMADURO (P2)						
Horizonte	Parámetros colorimétricos						Horizonte	Parámetros colorimétricos					
	Muestra	Cl	X	Y	Z	Color		Muestra	Cl	X	Y	Z	Color
C	C1a	19,75	36	34	30	Pardo oscuro.	C	C2a	19,80	36	34	30	Pardo oscuro.
	C1b	24,65	36	35	29	Pardo oscuro.		C2b	24,68	37	34	29	Pardo oscuro.
OS	OS1a	19,10	37	34	29	Pardo amarillento.	OS	OS2a	19,19	37	34	29	Pardo amarillento.
	OS1b	27,70	36	36	28	Pardo amarillento.		OS2b	27,84	37	35	28	Pardo amarillento.
OM	OM1a	20,50	37	36	27	Amarillo parduzco.	OM	OM2a	20,68	37	35	28	Amarillo parduzco.
	OM1b	27,70	38	35	27	Amarillo parduzco.		OM2b	27,73	38	35	27	Amarillo parduzco.
OI	OI1a	20,80	37	35	28	Amarillo parduzco.	OI	OI2a	20,82	37	34	29	Amarillo parduzco.
	OI1b	27,55	38	36	26	Amarillo parduzco.		OI2b	27,57	38	36	26	Amarillo parduzco.
SA	SA1a	42,77	33	34	32	Verde.	SA	SA2a	28,63	35	33	32	Carmelita pálido.
	SA1b	54,33	35	35	31	Verde claro.		SA2b	32,75	34	33	33	Carmelita pálido.
	SA1c	40,39	36	35	28	Carmelita.		SA2c	21,48	37	34	28	Blanco amarillento.
	SA1d	43,45	36	35	29	Carmelita.		SA2d	27,28	36	34	30	Blanco amarillento.
	SA1e	39,32	36	35	29	Carmelita.	S	S2a	24,20		32	36	Verde.
	SA1f	39,74	35	35	30	Verde.		S2b	27,39	32	34	33	Verde.
	SA1g	65,01	36	36	28	Verde claro.		S2c	29,54	33	34	32	Verde pálido.
	SA1h	79,24	33	35	31	Verde.		S2d	47,93		33	35	Verde.
S	S1	23,19	32	32	36	Verde oscuro.							
	S1	52,16	33	34	33	Verde.							

Cl: Claridad del color.
C: Concreciones ferruginosas.

OM: Ocre medio.
OI: Ocre inferior.

S: Serpentina inalterada.
X,Y,Z: Coordenadas colorimétricas.

OS: Ocre superior.
SA: Serpentina alterada.

como la caolinita y la gibbsita. De este modo la misma puede constituir una característica física de valor orientativo.

Al comparar la coloración del perfil maduro con el inmaduro (tabla 1), se observó un mayor contraste entre los horizontes inferiores (menas silicatadas) del perfil maduro respecto al inmaduro. Si partimos del hecho de que ambos perfiles no poseen diferencias litológicas notables, el contraste menos definido en la coloración de los horizontes del perfil inmaduro puede tomarse como indicativo de un ciclo inconcluso de intemperismo, donde la formación de los oxihidróxidos de Fe, Al, Mn no ha tenido lugar de forma completa.

Granulometría

La composición granulométrica de los perfiles maduro e inmaduro se expone en las tablas 2 y 3. De estos resulta-

dos se pudieron definir como de interés, de acuerdo al porcentaje en peso que representan, las clases granulométricas: Cg1(>1,6 mm), Cg4(>0,074 y <0,417 mm) y Cg6(<0,045 mm).

Las diferencias observadas en las características granulométricas de ambos perfiles (tablas 2 y 3) se atribuyen al grado de intemperismo diferente que poseen. En los horizontes de ocre del perfil maduro (tabla 2) se observó un porcentaje mayor de la clase granulométrica fina (Cg6) en relación con el perfil inmaduro. Es también característico del perfil maduro el buen desarrollo del horizonte de concreciones ferruginosas (C), en el cual la clase Cg1 está bien representada, mientras en el perfil inmaduro este horizonte posee poca cantidad de granos gruesos. Los horizontes lateríticos del perfil maduro exhiben mayor potencia y en ellos predomina la clase menor

TABLA 2. COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE PERFIL LATERÍTICO MADURO (P-1) DEL YACIMIENTO MOA (ROJAS PURÓN, 1994)

Zona u horizonte	Contenido en % en peso, según clases granulométricas					
	Cg1 (+ 1.6 mm)	Cg2 (- 1.6 + 0.83 mm)	Cg3 (- 0.83 + 0.417 mm)	Cg4 (- 0.417 + 0.074mm)	Cg5 (- 0.074 + 0.044 mm)	Cg6 (- 0.045 mm)
C	23,10	6,12	2,55	11,24	4,80	52,19
OS	8,40	4,69	5,42	8,06	10,19	63,23
OM	1,62	1,79	5,03	12,75	15,11	63,70
OI	1,40	3,04	3,94	24,65	40,29	26,67
SA	28,03	11,07	3,29	24,47	14,62	18,52

C: Concreciones ferruginosas. OS: Ocre superior. OM: Ocre medio. OI: Ocre inferior.
SA: Serpentina alterada.

TABLA 3.COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE PERFIL LATERÍTICO INMADURO (P-2) DEL YACIMIENTO MOA (ROJAS PURÓN, 1994)						
Zona u horizonte	Contenido en % en peso, según clases granulométricas					
	Cg1 (+ 1.6 mm)	Cg2 (- 1.6 + 0.83 mm)	Cg3 (- 0.83 + 0.417 mm)	Cg4 (- 0.417 + 0.074mm)	Cg5 (- 0.074 + 0.044 mm)	Cg6 (- 0.045 mm)
C	4,11	22,19	7,87	17,94	2,30	45,60
OS	1,04	7,42	16,55	25,42	2,27	47,30
OM	3,15	4,40	12,30	30,21	3,06	46,88
OI	3,20	6,66	11,23	27,65	19,11	32,15
SA	29,95	8,05	4,46	11,66	8,00	37,87

C: Concreciones ferruginosas. OS: Ocre superior. OM: Ocre medio. OI: Ocre inferior.
SA: Serpentinita alterada.

TABLA 4.COMPOSICIÓN QUÍMICA DE PERFIL LATERÍTICO MADURO (P-1) DEL YACIMIENTO MOA (ROJAS PURÓN, 1994)						
Componente	Contenido por horizontes (en %)					
	C	OS	OM	OI	SA	S
MgO	0,38	0,43	0,41	0,57	18,23	30,65
SiO ₂	1,23	1,61	1,89	1,80	27,25	36,74
Al ₂ O ₃	9,73	7,09	5,49	6,00	2,32	0,71
Fe ₂ O ₃	66,75	66,9	67,97	65,10	21,34	7,44
NiO	0,92	1,45	1,54	1,77	2,29	0,74
CoO	0,17	0,19	0,17	0,09	0,02	0,10
MnO	0,96	0,97	0,96	0,63	0,41	0,05
Cr ₂ O ₃	3,74	3,96	3,74	3,35	2,05	0,29

C: Concreciones ferruginosas. OS: Ocre superior. OM: Ocre medio. OI: Ocre inferior.
SA: Serpentinita alterada. S: Serpentinita dura.

TABLA 5.COMPOSICIÓN QUÍMICA DE PERFIL LATERÍTICO INMADURO (P-3) DEL YACIMIENTO MOA (ROJAS PURÓN, 1994)						
Componente	Contenido por horizontes (en %)					
	C	OS	OM	OI	SA	S
MgO	1,48	1,43	1,45	1,60	19,26	32,68
SiO ₂	5,31	5,68	5,97	6,07	31,52	38,68
Al ₂ O ₃	8,40	5,76	4,17	2,55	1,84	1,01
Fe ₂ O ₃	62,10	59,83	60,89	58,02	14,26	7,21
NiO	1,10	1,63	1,72	1,95	2,47	0,92
CoO	0,13	0,15	0,13	0,05	0,05	0,01
MnO	0,81	0,87	0,81	0,46	0,44	0,09
Cr ₂ O ₃	1,50	1,71	1,49	1,03	1,00	0,51

C: Concreciones ferruginosas. OS: Ocre superior. OM: Ocre medio. OI: Ocre inferior.
SA: Serpentinita alterada. S: Serpentinita dura.

TABLA 6. DATOS ROENTGENOMÉTRICOS DE LAS CLASES GRANULOMÉTRICAS FINAS (- 0,044 mm) EN LOS HORIZONTES LATERÍTICOS DEL YACIMIENTO MOA

1		2		3		4		5	
d (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀
								4,98	10
		4,87	28			4,86	41		
4,21	100	4,16	100	4,19	100	4,20	100	4,17	100
						3,37	22		
		2,82	54						
2,70	40	2,69	48	2,69	41	2,69	44	2,69	30
2,58	25			2,57	27				
2,56	25								
		2,51	35			2,51	38	2,49	20
2,44	70	2,43	70	2,44	88	2,44	64	2,45	30
						2,41	26		
2,25	27	2,24	25	2,25	30				
2,24	27								
2,19	27	2,18	28	2,19	28	2,19	40	2,19	20
2,11	10								
						2,04	13		
1,71	32	1,71	35			1,71	36	1,72	20
								1,56	20

1. Goethita pura.
2. Goethita con hematita y espinela.
3. Goethita pura.
4. Goethita con gibbsita.
5. Goethita patrón (tarjeta ASTM 17-536).
I/I₀: Intensidad relativa del reflejo difractométrico.
d (A°): Distancia interplanar.

de 0,045 mm (Cg1). Se observó, además, que en el inmaduro el horizonte de concreciones ferruginosas tiene poca potencia y la diferencia entre el contenido de las clases finas y gruesas (tabla 3) no es tan marcada como en el maduro.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Perfiles lateríticos

En los horizontes ocrosos del perfil maduro son característicos los altos valores de óxidos de hierro, aluminio y cromo, y bajos de los elementos móviles magnesio y el silicio (tabla 4) como consecuencia de una mayor intensidad de la intemperización que estos han sufrido. En el inmaduro, por el contrario, los valores de sílice y magnesio son significativos y los elementos residuales (Fe, Al y Cr), consecuentemente, disminuyen su contenido (tabla 5).

TABLA 7. DATOS ROENTGENOMÉTRICOS DE LAS CLASES GRANULOMÉTRICAS (- 0,83 + 0,074 mm) MAGNÉTICAS EN LOS HORIZONTES LATERÍTICOS DEL YACIMIENTO MOA

1		2		3		4		5	
d (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀
		12,09	15						
		5,01	16						
4,80	20	4,84	33	4,87	51	4,81	22		
		4,73	25			4,69	6,5		
				4,39	18				
		4,21	55	4,18	46				
						3,52	8,1		
2,94	54	2,96	33	2,95	31	2,95	27	2,96	30
		2,90	10						
2,77	18					2,79	8		
2,68	16	2,70	24	2,69	34				
		2,58	15						
2,49	100	2,52	100	2,49	100	2,51	100	2,53	100
		2,46	39						
		2,45	37	2,45	36				
2,41	20			2,39	12	2,41	15		
		2,19	15	2,20	17				
2,08	52	2,09	15	2,09	25	2,09	40	2,10	20
		2,05	19						
				1,80	10				
1,70	19			1,70	20	1,71	12	1,72	10
1,68	13								
1,61	18			1,60	32	1,61	75	1,62	30
1,48	63					1,48	19	1,49	40
								1,28	30
								1,09	10

1. Maghemita pura.
2. Maghemita con goethita.
3. Maghemita con goethita y gibbsita.
4. Maghemita con espinela.
5. Maghemita patrón (tarjeta 4 -755 ASTM).
I/I₀: Intensidad relativa del reflejo difractométrico.
d (A°): Distancia interplanar.

El comportamiento de la distribución del níquel difiere en ambos tipos de perfil. En los maduros, el horizonte de concreciones (zona de escombro) puede diferenciarse perfectamente desde el punto de vista químico, ya que el níquel se empobrece en el mismo. Esto no sucede así en los perfiles inmaduros, donde la zona de escombro aún tiene contenidos de NiO superiores a 1 %.

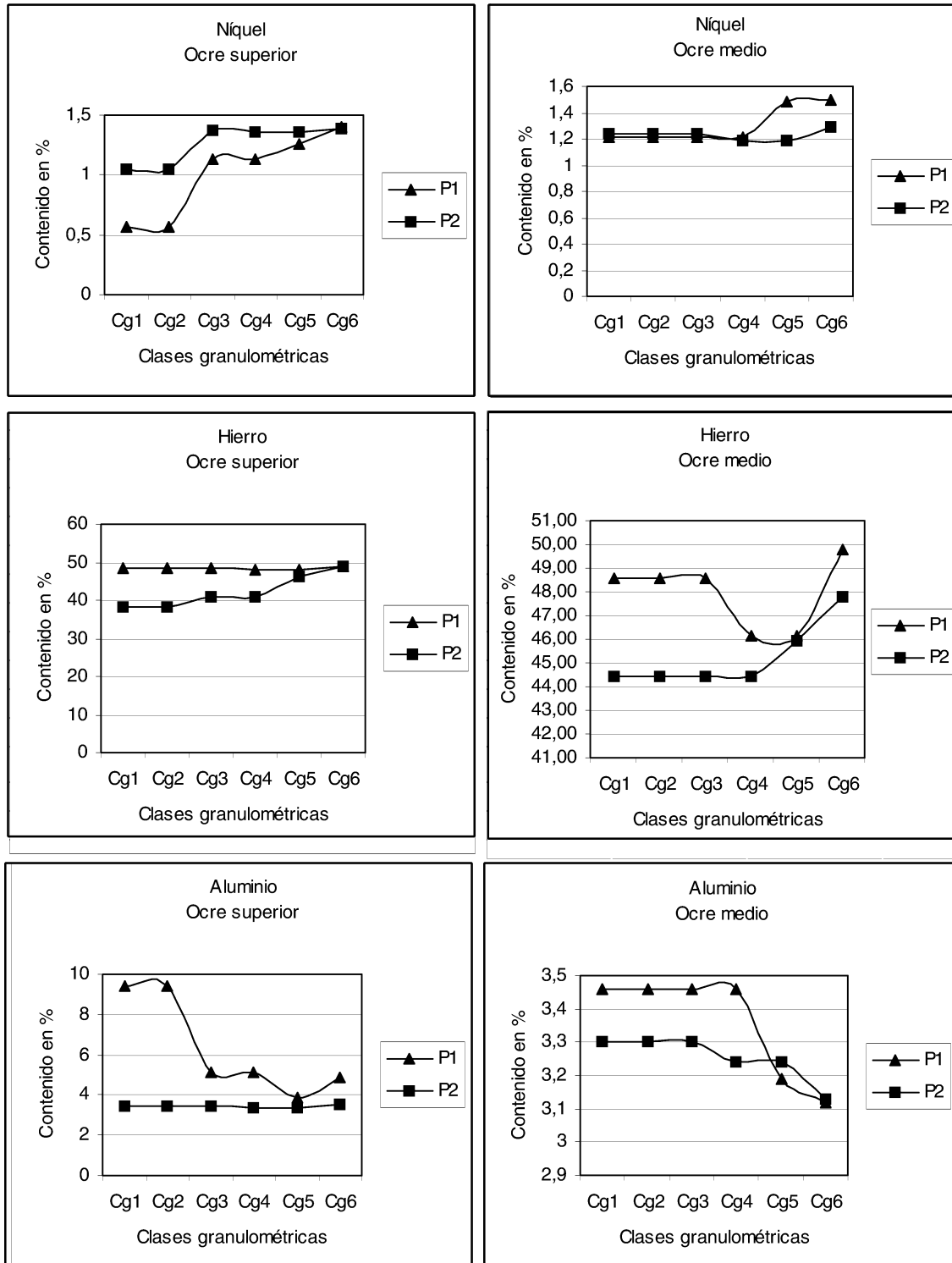


Fig. 3. Tendencia de concentracion de los metales segun clases granulometricas.

Clases granulométricas

En los horizontes de ocre se observó una tendencia de concentración de los principales elementos de interés (Ni, Fe, Co, Al y Mn) en determinadas clases granulométricas. Así, en el ocre medio y superior, el níquel y el hierro (Fig. 3) se concentran en la clase menor de 0,045 mm. En los perfiles inmaduros los contenidos de níquel son más altos en relación con el maduro, no siendo así para el hierro,

que posee los mayores contenidos en los perfiles maduros, pues este último es un macroelemento que refleja el grado de meteorización que ha alcanzado el perfil laterítico.

En los maduros, el aluminio (Fig. 3) se concentra en la clase Cg1-Cg2 de los ocre superiores, y en la Cg3-Cg4 de los ocre medios. En los inmaduros no se define una clase específica de concentración para este elemento,

TABLA 8. DATOS ROENTGENOMÉTRICOS DE LAS CLASES GRANULOMÉTRICAS FINAS (- 0,83 + 0,044 mm) ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS HORIZONTES LATERÍTICOS DEL YACIMIENTO MOA

1		2		3		4		5	
d (A°)	I/I ₀	D (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀	d (A°)	I/I ₀
						9,43	21		
4,86	100			4,87	100	4,87	100	4,85	100
4,36	61			4,37	35	4,38	35	4,37	50
4,30	33			4,33	40			4,32	30
				4,18	84	4,16	96		
		3,66	33			3,68	24		
3,56	12								
3,51	11								
3,34	12			3,36	19	3,36	24		
3,30	16							3,31	20
3,17	13			3,18	15	3,18	16		
3,10	7					3,12	6		
				2,96	19				
				2,70	38	2,70	61		
		2,68	100			2,68	58		
				2,57	25				
		2,50	36	2,51	49	2,51	56		
						2,47	60		
2,45	18			2,44	67	2,44	62	2,45	30
2,42	6			2,38	25	2,39	23	2,42	20
2,38	26							2,39	30
2,28	6			2,24	27	2,24	30		
2,24	9								
2,16	11	2,20	18	2,19	26	2,20	35		
				2,08	14				
2,04	29			2,05	15	2,05	19	2,04	20
1,99	13			1,99	15				
		1,83	28	1,80	20	1,79	16		
		1,69	27	1,71	28	1,69	15		
		1,59	11						
		1,48	14						
		1,45	25						

1. Gibbsite pura.
 2. Hematina.
 3. Gibbsite con goethita y maghemita.
 4. Gibbsite con goethita y hematina.
 5. Gibbsite patrón (tarjeta ASTM 7-324).
 I/I₀: Intensidad relativa del reflejo difractométrico.
 d (A°): Distancia interplanar.

sólo existe un ligero aumento de su contenido en el horizonte de ocre medio para la clase Cg3-Cg4.

El manganeso (Fig. 4) muestra un comportamiento parecido al del aluminio; se define mejor su clase granulométrica de concentración en los perfiles maduros, donde alcanza los contenidos más altos en la Cg3-Cg4 de los ocre medios. En los inmaduros la clase de concentración no se define tan claramente. Se reportan contenidos elevados en el horizonte de ocre medios para la clase Cg4-Cg5.

El comportamiento granulométrico del cobalto (Fig. 4) es muy similar en los ocre superiores y medios de perfiles maduros; se concentra en la clase Cg3-Cg4. Sin embargo, en los inmaduros alcanza sus mayores contenidos en la fracción Cg4-Cg5 de los ocre medios.

Se ha podido establecer que el cromo en la zona de ocre se concentra en la clase Cg3-Cg4, y en las concreciones lo hace en clases más gruesas (Cg2-Cg3). No se encontró una clase de concentración definida para el silicio y el magnesio, ni siquiera en aquellos perfiles de grandes espesores de laterita.

Mineralogía de las clases granulométricas

Se detectó que la clase Cg6 (<0,045 mm) es de carácter netamente electromagnético y casi monomineral, compuesta en su mayor parte de goethita (tabla 6). Las clases mayores de 0,045 mm están enriquecidas en fases de hematita, maghemita, espinelas y gibbsite. En la fracción magnética de la clase Cg3-Cg4 predomina la fase maghemita (γ Fe₂O₃) y de forma subordinada aparece cierta cantidad de goethita, hematita y gibbsite (tabla 7). Taylor y Schwertmann (1974) reportan la fase maghemita en estudios de suelos de ambientes parecidos o asociados con perfiles de alteración laterítica en Alemania.

En la fracción electromagnética de las clases Cg2 a Cg5 predominan las fases de hidróxidos de Al, sobre todo gibbsite, que aparece en ocasiones entremezclada físicamente con hematita y goethita (tabla 8). Los difractogramas reflejan el pico 4,86 A° característico de esta fase. Schwertmann et al. (2000) argumentan la existencia de la gibbsite a partir de la alteración de los hidrosilicatos arcillosos en un ambiente tropical. Lago y Volikov, en 1991, detectan este mineral en pulpas lateríticas de Moa.

FASES MINERALES PORTADORAS DE NÍQUEL EN EL YACIMIENTO MOA

En el yacimiento Moa las fracciones goethíticas son esencialmente portadoras de Ni (tabla 9) con contenidos algo elevados de Al. Esto delata la sustitución del Fe por el Al en la red cristalina de la goethita, fenómeno muy común entre los óxidos de Fe en un ambiente oxidante y en presencia de silicatos e hidróxidos de Al (Schwertmann et al., 2000; Schwertmann y Stanjek, 1998; Schwertmann y Carlson, 1994; Schulze y Schwertmann, 1984).

En los horizontes lateríticos del yacimiento, la goethita es la fase mineral principal portadora de Ni atendiendo a que es la de mayor contenido promedio de Ni y se concentra en una clase granulométrica que representa más

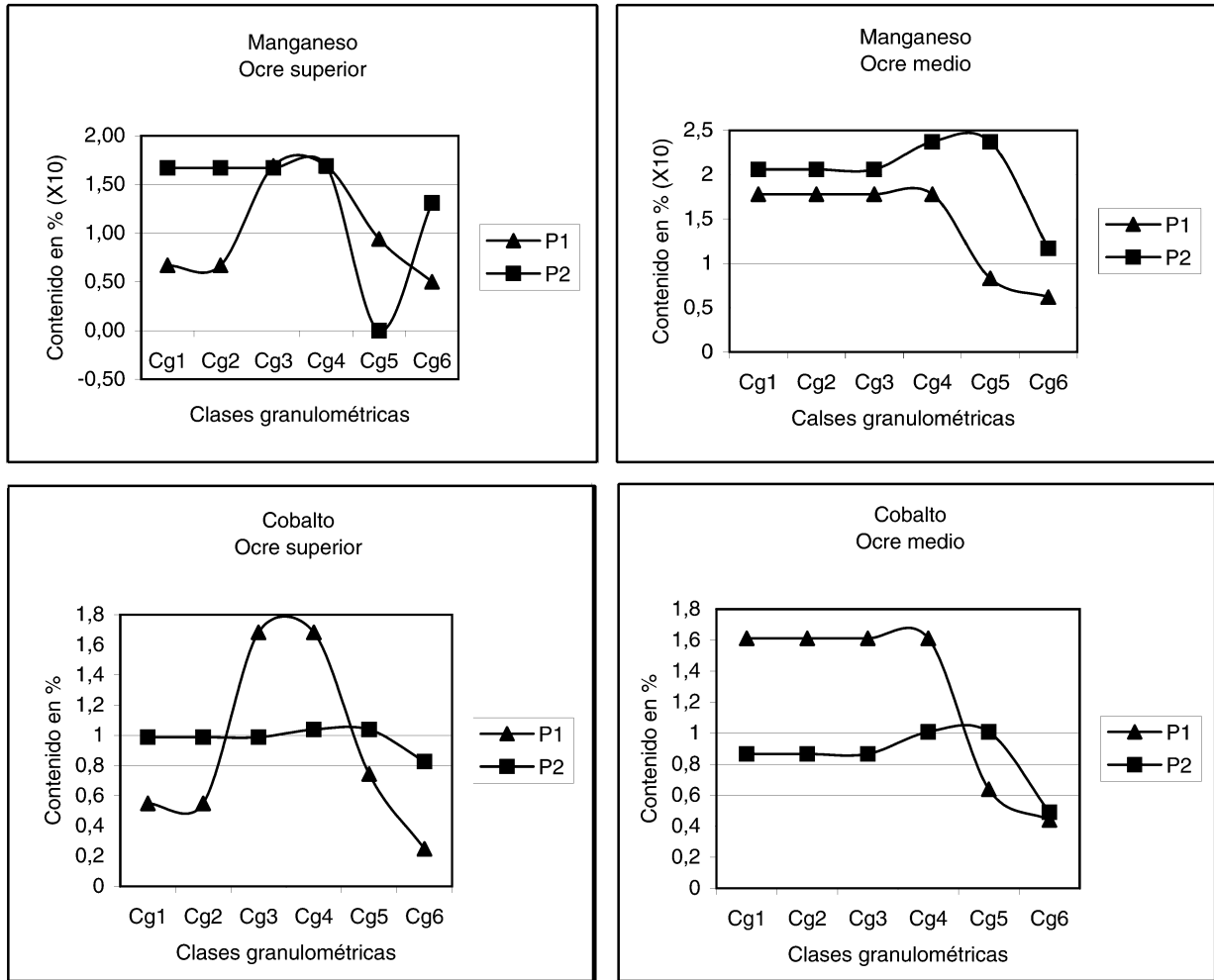


Fig. 4. Tendencia de concentracion de los metales segun clases granulometricas.

TABLA 9. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS FRACCIONES ENRIQUECIDAS EN GOETHITA, EN EL YACIMIENTO MOA, SEGÚN ROJAS PURÓN, 1994									
Fracción enriquecida	Muestra	Contenido del elemento en la fracción de enriquecimiento , en %							
		Ni	Co	Fe	Mn	Cu	Al	SiO ₂	Mg
En GOETHITA	G1	1,30	0,045	49,50	0,44	0,013	3,80	2,75	0,10
	G2	1,51	0,08	51,60	0,41	0,015	2,60	3,00	0,16
	G3	1,55	0,031	48,80	0,37	0,014	3,40	2,75	0,09
	G4	1,26	0,089	49,00	0,40	0,025	3,10	2,62	0,06
	G5	1,21	0,062	47,20	0,40	0,016	4,30	2,87	0,05
	G6	1,48	0,070	50,40	0,38	0,015	2,60	2,50	0,04
	G7	1,52	0,138	48,67	0,74	0,010	*	3,04	*

*No se determinó.

de 50 % en peso del horizonte de ocre medio (tabla 10); es así la fase más abundante.

Las cromoespinelas, junto con la maghemita, portan alrededor de 1,3 % de níquel (tabla 11) y tienden a concentrarse en el horizonte de ocre superior, pero se encuentran en poca cantidad (su contenido no supera 10 %).

La gibbsita y la hematita son consideradas fases minerales no portadoras de níquel (el contenido de este elemento en ellas es inferior a 1 %), aunque están íntimamente ligadas a las fases portadoras. El contenido de gibbsita en los horizontes superiores se encuentra entre 8 y 15 %. No obstante, la clase de concentración de esta fase llega a alcanzar en ellos 23 % en peso.

TABLA 10. RELACIÓN ENTRE QUIMISMO, MINERALOGÍA Y GRANULOMETRÍA EN LOS HORIZONTES LATERÍTICOS DEL YACIMIENTO MOA (ROJAS PURÓN, 1994)

Elemento químico	Forma mineral	Horizonte de concentración	Contenido del mineral (%)	Fracción de concentración	Contenido del elemento (%)
Ni	**	OM	**	Cg6 e.m.	0,7 a 1,51
Fe	goethita	OM - C	65 a 80	Cg6 e.m.	> 65
Mn	asbolanas	OS - C	2,5 a 3	Cg4	0,4 a 0,85
Cr	crooespinelas	OM - C	8 a 10	Cg34 m.	3 a 4
Si	***	S - SA	2,5 a 5	Cg24 e.m.	1,2 a 2,3
Al	gibbsita	C	8 a 15	Cg34 e.m.	5 a 13

Observaciones:
 Cg34 m.: Clase granulométrica (- 0,83 + 0,074 mm) magnética.
 Cg34 e.m.: Clase granulométrica (- 0,83 + 0,074 mm) electromagnética.
 Cg24 e.m.: Clase granulométrica (- 1,6 + 0,074 mm) electromagnética.

Cg4: Clase granulométrica (- 0,417 + 0,074 mm).
 Cg6 e.m.: Clase granulométrica (- 0,83 + 0,074 mm).
 ** No se detectan minerales oxidados propiamente de Ni.
 *** Básicamente sílice amorfa.

TABLA 11. CONTENIDO PROMEDIO DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES EN LAS FRACCIONES ENRIQUECIDAS DE LAS FASES MINERALES PORTADORAS DE NI (ROJAS PURÓN, 1994)

Fracción enriquecida en:	Contenido de Ni (%)	Promedio de Ni (%)	Contenido de Fe (%)	Promedio de Fe (%)	Contenido de Al (%)	Promedio de Al (%)
Goethita	1,21 a 1,55	1,404	47,20 a 51,60	49,31	2,60 a 4,30	2,829
Crooespinelas-maghemita	1,01 a 1,62	1,29	46,60 a 53,50	51,22	2,95 a 5,05	3,28
Gibbsita	0,70 a 1,08	0,818	38,90 a 45,30	42,61	5,40 a 8,50	7,26

CONCLUSIONES

- La concepción del grado de madurez de los perfiles lateríticos permite explicar la variabilidad de las características físicas, químicas y mineralógicas que exhiben distintos sectores del yacimiento.
- La coloración del horizonte de ocre medio responde a la abundancia en él de la fase goethita.
- La fase mineral principal portadora de Ni en los horizontes superiores del perfil laterítico del yacimiento Moa es la goethita (la que más abunda y contiene 1,4 % de Ni como promedio).
- La goethita se concentra en la clase granulométrica menor de 0,045 mm, la cual es netamente electromagnética y representa 53 % en peso del material laterítico de color amarillo pardusco.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi mayor agradecimiento a los técnicos de los laboratorios del Centro de Investigación de las Lateritas (CIL) y de la fábrica Pedro Sotto Alba por la realización de los análisis químicos. A Barbarita, mi esposa, por sus acertadas críticas al manuscrito original.

BIBLIOGRFÍA

- ACEBAL, S.G., A. MIJOVILOVICH, E.H. RUEDA, M. AGUIRRE Y C. SARAGOVÍ: "Iron oxide mineralogy of a mollisol from Argentina: a study by selective - dissolution technique, ray-x diffraction, and Mossbauer Spectroscopy", *Clays and clays minerals*, 48(3) : 322-330, 2000.
- ALMAGUER, A. Y V. ZAMARSKY: "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 y Geología* 10(2) : 17-24, 1993.
- ALMAGUER, A.: "Cortezas de intemperismo: algunas características de sus partículas finas", *Minería y Geología*, 12(1) :9-19, 1995.
- AMMON CHOKROUM, M.: Contribución a la valoración de la ferralitas níquelíferas de Nueva Caledonia, 170 pp., Univers, Nancy I., 1972.
- BALLESTEROS, M. C.; E. RUEDA Y M. A. BLESÁ: "The influence of iron (II) and (III) on the kinetics of goethite dissolution by EDTA", *J. Colloid Interface Sci.*, 201 :13-19, 1998.
- BIGHAM, J. M., S. E. HECKENDORN, W.F. JAYNES Y N.E. SMECK: "Stability of iron oxides in two soils with contrasting colors", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55 :1485-1492, 1991.
- BRINDLEY, G. W.: "The structure and chemistry of hydrous nickel containing silicate and aluminate minerals", *Bulletin du B.R.G.M.*, 3 :233-245, 1978.
- BRINDLEY, G. W. Y W. HSIEN-MING: "Compositions, Structures and Thermal behavior of nickel-containing mineral in the Lizardite-Nepouite Series", *Am. Mine.*, 60 : 863-871, 1975.
- CARVALHO SILVA, M. L. M. Y S. M. B. OLIVEIRA: "The Ni-bearing phases of

- the lateritic ore, Vermelho Deposit, Serra dos Carajas, Para", *Revista Brasileira de Geociencias*, 25(1) :69-78, 1995.
- CORDEIRO, C; J. COLLAZO Y N. VOSKRESENSKAYA: "Análisis Químico de Fases en Lateritas Cubanas", *Minería y Geología*, 3 : 53-62, 1987.
- DOBOS, R. F., E. J. CIOLKOSZ Y W. J. WALTMAN: "The effect of organic carbon, temperature, time and redox conditions on soil color", *Soil Sci.*, 150 : 506-512, 1990.
- GOLIGHTLY, J. P.: "Nickeliferous laterite deposits", *Econ. Geol.*, 75th An., Vol : 710-735, 1981.
- KUNHEL, R.A., H. J. ROORDA Y J. J. S. STEENSMAN: "Distribution and partition of elements in nickeliferous laterites", *Bulletin B.U.R.G.M.*, section II :191-206, 1978.
- LAGO, L. Y I. VOLIKOV: "Disminución en pulpa de los principales metales en el gaste de ácido en lixiviación", *Seminario Internacional de Lixiviación Ácida de los minerales lateríticos*, Moa, noviembre, 1991.
- MAKSIMOVIC, Z.: "Kerolite-pimelite series from Goles Mountain. Yugoslavia", in *Proceedings of the International Clay Conference*, 97-103, 1966.
- : "The isomorphous series Lizardite-Nepuoite", *Int. Geol. Review*, 17(9) :1035-1040, 1975.
- NAHON, D, ET AL.: "Lateritic weathering of ultramafic rocks and concentration of nickel in the western Ivory Coast", *Econ. Geol.*, 85 :1159-1175, 1982.
- NAHON, D.: "Self-organization in chemical lateritic weathering", *Geoderma* 51 :5 – 13, 1991.
- ORTOLEVA, P., E. MERINO, C. MOORE Y J. CHADAM: "Geochemical self-organization I: reactions – transport feedbacks and modelling approach", *Am. J. Sc.*, 287 :979-1007, 1987.
- OORSCHOT, H. M. Y M. J. DEKKERS: "Selective dissolution of magnetic iron oxides in the acid-ammonium oxalate/ferrous iron extraction method. Synthetic samples", *Geophysical Journal International*, 145(3) :740-748, 2001
- ROJAS PURÓN, L. A. Y G. OROZCO MELGAR: "Iniciación al estudio de las fases minerales portadoras de Ni en el horizonte limonítico del yacimiento Moa", *Minería y Geología*, 11(2) :11-15, 1994.
- RUEDA, E.; M. C. BALLESTEROS Y R. L. GRAS: "Dithionite as a dissolving reagent for goethite in the presence of EDTA and citrate. Application to soil analysis", *Clays and clay minerals*, 40(5) :575-585, 1992
- SHELLMANN, W.: "Behaviour of Nickel, Cobalt and Chromium in ferruginous lateritic Nickel Ores", *Bulletin du B.R.G.M.*, section 2, No. 3, 1978./ Schulze, D. G., y U. Schwertmann: "The influence of Al on iron oxides: X. Properties of Al-substituted goethites", *Clays Minerals*, 19, pp. 521 – 539. 1984.
- SCHWERTMANN Y CORNELL: *Iron oxides in the laboratory – preparation and characterisation*, 137 pp., VHC Publishers, Weinheim, 1991.
- SCHWERTMANN, U.: "Relations between iron oxides, soil color, and soil formation", *Soil Science Society of America, Special Publication*, No. 31, *Soil Color* : 51 – 69, 1993.
- SCHWERTMANN, U. Y L. CARLSON: "Aluminum influence on iron oxides: XVII. Unit cell parameters and aluminum substitution of natural goethites", *Soil Sci. Soc. Am. L.*, 58:256-261, 1994.
- SCHWERTMANN, U. Y H. STANJEK: "Stirring Effects on Properties of Al Goethite Formed from Ferrihydrite", *Clays and Clay Minerals*, 46(3) :317-321, 1998.
- SCHWERTMANN, U., JOSEF FRIEDL, HELGE STANJEK Y DARRELL SCHULZE: "The effect of Al on Fe oxides; XIX, Formation of Al-substituted hematite from ferrihydrite at 25 degrees C and pH 4 to 7. G", *Clays and Clay Minerals*, 48(2) :159-172, 2000.
- SMIRNOV, V. I.: *Geología de los yacimientos minerales*, Ed. Mir, Moscú, 1982.
- SPRINGER, G.: "Compositional and structural variation in garnierites", *Can. Min.*, Toronto, 12 (3) :381-388, 1974.
- TAYLOR, R. M. Y U. SCHWERTMANN: "Maghemite in soils and its origin I: properties and observations on soil maghemites", *Clays Minerals*, 10 : 289-298, 1974.
- TORRENT, J., U. SCHWERTMANN, H. FECHTER Y F. ALFAREZ: "Quantitative relationships between soil color and hematite content", *Soil Sci*, 136 :354-358, 1983.
- TRESCASES, J. J.: "Nickeliferous laterites: a review on the contribution of the last ten years", *Geol. Surv. India Mem.*, 120 : 51-62, 1986.
- TROLARD, F., G. BOURRIE, E. JEANROY, A. HERBILLON Y H. MARTIN: "Trace metals in natural iron oxides from laterites: A study selective kinetic extraction", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7):1285-1297, 1995.
- VERA YESTE, A.: *Introducción a los yacimientos de Ni Cubanos*, Ed. Orbe, La Habana, 1979.
- VOSKRESENSKAYA, N. T.: "Formas de presentarse el Ni en los minerales portadores de las menas silicatadas-oxidadas de Cuba", *Geoquímica* 2, 1987 (en ruso).