

- Navarro, H.: *Estructura geológica y geología económica de la Cántera Bárcena*, Informe inédito (Compañía Minera PUCARA S.A.-Minera TEA), Córdoba, República Argentina, 1973.
- Porto, J.C.; R.I. FERNÁNDEZ y M.H. CARRIÓN: «Calizas y dolomitas de la Formación Puncoviscana S.I.», en: *El Ciclo Pampeano en el noroeste Argentino*, serie Correlación Geológica, no. 4, pp. 37-52, Univ. Nac. de Tucumán (UNT), San Miguel de Tucumán, Argentina, 1990.
- Rayces, E.C.: *El yacimiento cuprífero «Chorro»*, Departamento Tumbaya, provincia de Jujuy, 4ta Jornada Geol. Arg., Actas I, pp. 485-508, Buenos Aires, Argentina, 1969.
- Scanavino, R. y M. Guichón: «Observaciones geológicas en la Quebrada de Santuyo, Volcán (Dpto. Tumbaya) (Jujuy)», rev. *Mus. La Plata* (nueva serie), vol. 7, pag. 39-50, Buenos Aires, Argentina, 1972.
- Shapiro, L.: *Simple field method for determination of phosphate rocks*, Amer. Min., vol. 37, pp. 341-352, USA, 1952.
- Slansky, M.: *Repartition et possibilités de concentration de l'uranium dans les phosphates sédimentaires. Uranium Deposits in Africa*, Geology and Exploration, OIEA, pp. 239-249, Vienna, Austria, 1979.
- Spalletti, L.A.: *Paleoambientes sedimentarios en secuencias silicoclásticas*, Asoc. Geol. Arg., serie B. Didáctica y Complement, no. 8, pp. 175, Buenos Aires, 1980.
- Steel, R.J.: *Coarsening-upward cycles in the alluvium of Hornelen Basin (Devonian) Norway: Sedimentary response to tectonic events*, Geol. Soc. Am. Bull., vol. 88, no. 8, pp. 1124-1134, 1977.

- Sureda, R.; M. Galisky; P. Argañaraz y J. Daroca: «Aspectos metalogenéticos del noroeste Argentino (provincias de Salta y Jujuy)», rev. *Capricornio I*, pp. 39-95, Univ. Nac. de Salta (UNSA), República Argentina, 1986.
- Sureda, R. y M.A. Gallisky: *La metalogenia del norte Argentino: Criterios para la elaboración del mapa metalogénico de Salta y Jujuy*, 10mo Congr. Geol. Arg. San Miguel de Tucumán, Actas I, pp. 51-55, 1987.
- Terrones, A.J.: «La potencialidad de los recursos minerales de América Latina», rev. *Asoc. Arg. de Geol. Econom.*, vol. 3, pp. 22-83, Buenos Aires, 1984.
- Toselli, A.J. y K. Weber: *Anquimetamorfismo en rocas del paleozoico inferior del noroeste Argentino. Valor de la cristalinidad de Illita como índice*, Acta Geol. Lilloana, vol. 16, no. 1, pp. 187-200, San Miguel de Tucumán, República Argentina, 1982.
- Toselli, A.J.: «Determinación preliminar del grado metamórfico en base a la cristalinidad de Illita en algunas localidades del noroeste Argentino», rev. *Inst. Ccias. Geol. Jujuy*, vol. 4, pp. 19-26, Univ. Nac. de Jujuy (UNJu), San Salvador de Jujuy, República Argentina, 1981.
- : «Metamorfismo del ciclo Pampeano», en: *El ciclo Pampeano en el noroeste Argentino*, serie Correl. Geol., no. 4, pp. 181-197, Univ. Nac. de Tucumán (UNT), Argentina, 1990.
- Turner, J.C.: *Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y Adyacencias*, Bol. Acad. Nac. Cienc. Córdoba, vol. 41, no. 2, pp. 163-169, Córdoba, República Argentina, 1960.
- Turner, J.C. y R. Mon: «Cordillera oriental», en: *2do Simposio de Geol. Reg. Argentina J.C. Turner*, Actas I, pp. 13-56, Ed. Acad. Nac. Cienc. Córdoba, República Argentina, 1979.

MOA

La ciudad del níquel

LE OFRECE
LA POSIBILIDAD
QUE Ud. ESPERA

Características geoquímicas de la mineralización cromífera del yacimiento Cayo Guam, Moa, Holguín, Cuba (Primera Parte)

Dr. C. José Nicolás Muñoz Gómez

Instituto Superior Minero Metalúrgico. Las Coloradas. Moa. Holguín. Cuba

INTRODUCCIÓN

El yacimiento Cayo Guam está localizado en el angosto valle del río del mismo nombre; el campo menífero está integrado además, por el yacimiento Cromita y pequeñas manifestaciones minerales tales como: Narcizo, Las Deltas y otras de menor importancia.

En la década de los cuarenta el área fue estudiada por Thayer (1942)²⁰ y Guild y Albear (1947)⁹, años más tarde los yacimientos cromíferos se investigaron por Kenarev y Murashko (1963)¹², Dzuberá (1974)⁵ y más recientemente por E. Fonseca *et. al.* (1991)⁶; C.V. Guerra *et. al.* (1995)⁹ y J.N. Muñoz Gómez (1997)¹⁷.

El yacimiento se localiza desde el punto de vista geológico en las litologías cumulativas ultramáficas muy próximas a los cúmulos máficos; petrológicamente las rocas ultramáficas están integradas por: harzburgitas serpentinizadas, dunitas enstatíticas y dunitas serpentinizadas, el complejo cumulativo gabroide está representado por gabros normales, gabros olivínicos, troctolitas y noritas. (E. Fonseca *et. al.*, 1991)⁶ y (C.V. Guerra *et. al.*, 1995)⁹. En sentido general las litologías ultramáficas se presentan estratificadas y la mayoría de los cuerpos minerales, en forma de lentes, son concordantes con las litologías encajantes. En cambio, los diques de gabro-pegmatitas son cortantes a las litologías presentes, así como a la mineralización cromífera, siendo los mismos más abundantes en los cuerpos minerales cromíferos, tal como había sido señalado por Guild (1947)⁹, Thayer (1942)²⁰ y Muñoz Gómez (1995)¹⁸. La mineralización cromífera está rodeada por dunitas y dunitas serpentinizadas las que localmente transicionan a dunitas enstatíticas y a harzburgitas serpentinizadas. Thayer (1942)²⁰ y Guild (1947)⁹ habían coincidido en la presencia de texturas planas, destacando que las mismas son paralelas a la foliación de las peridotitas. La composición química de la mineralización cromífera es muy similar entre los cuerpos minerales, por lo que a consideración de Thayer (1942)²⁰ y de Guild (1947)⁹ se trataba de un solo cuerpo mineral lentiforme que fue cortado y desplazado por fallas, como sucede con el cuerpo mineral Franklin, cuerpo casi isométrico, podiforme, completamente limitado por fallas. (P. Guild y J.F. Albear, 1947)⁸.

La mineralización cromífera masiva en los cuerpos minerales se acompaña de sulfuros tales como: piritita, calcopiritita y millerita, como ha sido expuesto por E. Fonseca *et. al.* (1991)⁶. También se han identificado fases de mineralización de los elementos del grupo del platino, representado en la serie isomórfica laurita-erlichmanita (V.V. Distler, H.J. Falcón, J.N. Muñoz Gómez, M. Campos Dueñas, 1989)⁴ y (J.N. Muñoz Gómez *et. al.*, 1991)¹⁷.

En el artículo se recogen las principales características geoquímicas del yacimiento Cayo Guam. Su objetivo fundamental es analizar el comporta-

RESUMEN: En el presente artículo, se recogen las principales características geoquímicas de la mineralización cromífera en el área del yacimiento Cayo Guam, Moa. En esta primera parte se exponen los resultados geoquímicos de la mineralización cromífera de las menas masivas que conforman el yacimiento Cayo Guam propiamente dicho e incluye las espinelas cromíferas masivas de las manifestaciones: Cromita y Narcizo. Se estudiaron las relaciones geoquímicas entre los componentes principales: Cr₂O₃, Al₂O₃, FeO, MgO y los microcomponentes, fundamentalmente con los contenidos de titanio, en forma de dióxido de titanio (TiO₂) y del FeO y su incidencia en las consideraciones genéticas de la mineralización cromífera en este campo mineral. Se demuestra el carácter podiforme de la mineralización cromífera. Finalmente, se relacionan los principales resultados geoquímicos, los cuales se publicarán completamente en la segunda parte del trabajo.

ABSTRACT: In the present paper, the first part, includes the main geochemistry characteristic of the massive chromite spinels from the Cayo Guam chromite ore deposit; besides it was studied the massive ore chromite spinels from "Cromita" and "Narcizo" outcrops, near the Cayo Guam ore deposit. It was studied the main relations between the oxides, i.e. Cr₂O₃, Al₂O₃, FeO, MgO content. In detail were analyzed the TiO₂ and FeO content. Refractory chromites ores (44,5 - 35,6 wt% Cr₂O₃; 29,5 - 21,2 wt% Al₂O₃) are typically podiform chromite. The geochemistry of accessory chrome spinels in various peridotites and mafic cumulates will be included in the second part of the work.

miento y papel de los elementos químicos que conforman la celda unidad de la espinela cromífera, así como las implicaciones que en el orden genético se derivan del estudio geoquímico de la mineralización cromífera en el campo mineral del yacimiento. Mediante la caracterización geoquímica de la mineralización cromífera se ha podido argumentar el carácter o tendencia genética de las menas cromíferas en el campo mineral del yacimiento Cayo Guam. Asimismo se ha obtenido un determinado número de resultados geoquímicos que contribuyen a un mayor conocimiento del área de estudio.

Con el empleo de la microscopía electrónica de barrido se determinó la composición química de las espinelas cromíferas, la que se expresa en óxidos de los elementos químicos que integran la celda unitaria del mineral.

Las espinelas cromíferas analizadas se distribuyen en:

- Espinelas cromíferas masivas.
- Espinelas cromíferas accesorias en litologías de los complejos máficos y ultramáficos:
 - Accesorias en harzburgitas.
 - Accesorias en gabros y troctolitas.

En el presente trabajo se exponen los resultados de los estudios realizados a las espinelas cromíferas masivas.

Espinelas cromíferas masivas

La composición química de las espinelas cromíferas masivas del yacimiento Cayo Guam se estudió a través de microscopía electrónica de barrido (Tabla 1).

TABLA 1. Valores de los contenidos en por ciento en peso de los componentes principales de las espinelas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam», Moa. [Análisis por microsonda electrónica de barrido]

Óxidos	Valor máximo	Valor mínimo	Valor medio	Rango
Cr ₂ O ₃	44,5	35,58	40,75	8,92
Al ₂ O ₃	29,51	21,16	26,98	8,35
MgO	17,2	8,27	14,93	8,93
FeO	28,97	12,6	15,99	16,37
TiO ₂	1,26	0,06	0,29	1,2
MnO	0,3	0,14	0,21	0,16
NiO	0,3	0	0,13	0,3

Macrocomponentes

Las menas masivas presentan un contenido de Cr₂O₃ que varía entre 44,5 y 35,8 % con un valor promedio de 40,75 % y rango estadístico restringido de 8,92 %, por lo que atendiendo a su contenido se ubican entre los yacimientos cromíticos podiformes, comparándose de esta forma con los yacimientos de Nueva Caledonia, Filipinas y Troodos en Chipre (Tabla 2). Por su contenido en por ciento de Cr₂O₃ las menas masivas se clasifican para uso refractario, conclusión enunciada por vez primera por Thayer, refiriéndose así al yacimiento Cayo Guam: «... The ore consists of massive coarse-grained chromite containing 38 at 39,5 percent of Cr₂O₃, and having a Cr:Fe ratio of 2,6 to 2,8... this ore is in great demand for refractories...» (T.P. Thayer, 1942)¹⁸.

El contenido de Al₂O₃ varía entre 29,5 % (valor máximo) y 21,16 % (valor mínimo) con un promedio de 26,98 % y un rango estadístico muy limitado de 8,35 unidades. Estos contenidos corroboran aún más el carácter refractario de las menas cromíferas del yacimiento Cayo Guam, así como su carácter de génesis podiforme en cuanto a los contenidos de alúmina, que de acuerdo con los criterios de Thayer, varían entre 6,0 % y 35,0 % (T.P. Thayer, 1964)²¹.

La relación existente entre los contenidos de Cr₂O₃ y Al₂O₃ muestran una dependencia lineal inversa, que unido a bajos contenidos de Fe₂O₃ es una de las características utilizadas para delimitar el carácter podiforme o estratiforme de la mineralización cromífera, tal como ha sido demostrado por otros investigadores, entre ellos Augé y Maurizot (1995)¹. Este aspecto se analizará más adelante empleando relaciones catiónicas. Se ha corroborado estadísticamente que los contenidos entre el Cr₂O₃ y Al₂O₃ mantienen una relación inversa al mostrar un coeficiente de correlación de: - 0,541 31. Esta dependencia verifica el carácter podiforme de la mineralización cromífera del yacimiento Cayo Guam.

Atendiendo a los contenidos de FeO % (expresado el FeO % como hierro total dada las características de los análisis de microscopía electrónica de barrido, donde se incluyen los contenidos de Fe₂O₃ %), las menas cromíferas masivas del yacimiento Cayo Guam poseen valores máximos de 28,79 % y un valor mínimo de 12,6 %, por lo que presenta un rango estadístico elevado con: 16,37 y un valor medio calculado de 15,98 %. Por sus contenidos de FeO las menas cromíferas masivas tienen un carácter dual con relación a su génesis (podiformes o estratiformes). Thayer había determinado un valor máximo del FeO = 15,0 % para las menas masivas de los cuerpos podiformes asociados a los complejos ofiolíticos alpinos (T.P. Thayer, 1969)²⁰. En el caso específico del yacimiento de Cayo Guam el valor medio calculado es superior al establecido por Thayer.

TABLA 2. Valores medios de las menas masivas de varios yacimientos de génesis podiforme. (*) Valores tomados de M. Leblanc y A. Nicolas (1992)¹⁴. () Valores tomados de D. Greenbaum (1977)¹⁰. (***) Valores del autor J.N. Muñoz Gómez (1997)¹⁹. Todos los valores en por ciento en peso. [Análisis por microsonda electrónica de barrido]**

Yacimientos cromíferos	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	TiO ₂	MnO	Total
Tiébaghi-N. Caledonia*	58,39	11,15	14,3	15,57	0,11	0,13	99,65
Anna-Madelaide N. Cal.*	51,42	19,53	13,68	14,65	0,03	0,5	99,81
Poum-N. Caledonia *	60,14	9,56	18,1	10,93	0,02	0,76	99,51
Poum-N. Caledonia *	29,57	39	12,64	18,07	0,25	0,34	99,87
Acoje-Filipinas *	54,93	13,15	19,75	11,42	0,21	0,17	99,63
Coto-Filipinas *	35,79	32	14,86	16,53	0,32	0,15	99,65
Troodos-Chipre **	54,5	14,15	12,26	14,2	0,19	0,13	95,43
Cayo Guam-Cuba ***	40,75	26,98	15,99	14,93	0,29	0,21	99,13
Potosí-Cuba ***	39,98	22,83	22,09	13,01	1,06	0,27	99,24
Amores-Cuba ***	36,17	27,32	17,76	18,26	0,24	0,19	99,94
Mercedita-Cuba ***	38,43	29,14	14,53	16,54	0,28	0,26	99,18

De los contenidos de FeO en las menas masivas del yacimiento Cayo Guam se puede afirmar que existe una ligera tendencia a las características de menas estratiformes. Los valores de FeO determinados en este yacimiento son inferiores a los obtenidos en las menas del yacimiento Potosí (Tabla 2). Por último, entre los macrocomponentes, se incluyen los contenidos de MgO, los cuales varían entre 17,2 % (valor máximo) y 8,27 % (valor mínimo), con un valor medio de 14,93 % y un rango estadístico de 8,23 (Tabla 1). Atendiendo a los contenidos de MgO en las menas masivas del yacimiento Cayo Guam, este se ubica dentro de los intervalos de otros yacimientos de menas podiformes, como en el caso del yacimiento Anna-Madelaide en Nueva Caledonia, citado por Leblanc y Nicolas (1992)¹⁴. Se ha podido establecer una baja correlación entre los contenidos de Cr₂O₃ % y MgO % (coeficiente de correlación: 0,045 625), aunque hay muestras específicas en las que se demuestra una correlación inversa, dado el hecho de que al producirse un incremento de Cr₂O₃ tiene lugar una disminución en el contenido de MgO.

Entre las relaciones de los macrocomponentes se destacan las presentadas entre los contenidos de MgO y FeO, los cuales, como ha sido señalado, ocupan las mismas posiciones en la celda unidad de las espinelas cromíferas (posición: X²⁺), por lo que ambos elementos, y por ende sus óxidos, aumentan y disminuyen sus contenidos de forma inversa, lo que permite además identificar a las espinelas cromíferas. Un resultado similar se obtiene al utilizar la relación catiónica: Fe²⁺-Mg²⁺ (Figuras 3 y 4).

Al realizarse el análisis estadístico para ambos óxidos se obtuvo una correlación inversa muy alta (coeficiente de correlación: - 0,914 41 y coeficiente de covarianza: - 9,551 59). La situación antes expuesta se analizará con mayor profundidad en el análisis de la distribución geoquímica de los cationes bivalentes y trivalentes en la celda unidad de las espinelas cromíferas.

Es de suma importancia entre las relaciones de los macrocomponentes, analizar el comportamiento de la alúmina, expresado en los contenidos de Al₂O₃ en relación con los contenidos de MgO y FeO. En la relación entre los contenidos de Al₂O₃ y MgO se manifiesta una correlación positiva (coeficiente de correlación: 0,613 449) que aunque no es un valor alto sí se manifiesta su carácter de dependencia lineal.

En varias muestras se corrobora lo anteriormente expuesto. En cambio, al efectuar un análisis similar entre los contenidos de Al₂O₃ y FeO se manifiesta una correlación inversa entre ambos contenidos (coeficiente de correlación negativa, no muy alto: - 0,545 25). Los datos expuestos anteriormente muestran un comportamiento dual del origen primario de las menas cromíferas masivas del yacimiento Cayo Guam. Por una parte, el carácter podiforme se demuestra en los contenidos de Al₂O₃, acotados a los valores permisibles; en cambio, los contenidos de FeO, tal como se analizó anteriormente, apoyan una génesis primaria con tendencias similares a las menas masivas que se asocian a intrusiones estratiformes (T.P. Thayer, 1964)²¹.

Microcomponentes

Entre los microcomponentes de las espinelas cromíferas masivas del yacimiento Cayo Guam debemos mencionar los contenidos de MnO, NiO y TiO₂ (Tabla 3). Los valores han sido expresados en por ciento en peso del óxido correspondiente, en por ciento en peso del metal y en ppm (g/t), lo cual facilita la interpretación geoquímica y los análisis estadísticos. Los contenidos de MnO % en las espinelas cromíferas masivas de este yacimiento oscilan entre 0,30 % (valor máximo) y 0,14 % (valor mínimo), siendo 0,21 % el valor medio calculado, los cuales no son significativos al compararse con otros yacimientos cromíferos (Tabla 2).

Del análisis estadístico se comprobó que prácticamente no existe correlación lineal entre los contenidos de Cr_2O_3 % y MnO % (coeficiente de correlación: -0,042 32). Al parecer el comportamiento geoquímico del mangane-

so, en el proceso de cristalización de las espinelas cromíferas tiende a elevar su concentración a expensas de los cationes bivalentes en la celda unidad, no ubicándose en la posición de los cationes trivalentes.

TABLA 3. Contenidos de los microcomponentes en las espinelas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam», Moa. [Análisis por microsonda electrónica de barrido]

Muestra	TiO_2 %	Ti (%)	Ti (ppm)	NiO %	Ni (%)	Ni (ppm)	MnO %	Mn (%)	Mn (ppm)
1-64	0,227	0,17	700	0,125	0,098 2	982,25	0,196	0,151 8	1 517,824
1-34	0,254	0,15	500	0,2	0,157 2	1 571,6	0,19	0,147 1	1 471,36
1-59	0,28	0,17	700	0,16	0,125 7	1 257,3	0,22	0,170 4	1 703,68
1-28	0,3	0,18	1 800	0,05	0,039 3	392,9	0,3	0,232 3	2 323,2
3-52	0,08	0,05	500	0,19	0,149 3	1 493	0,17	0,131 6	1 316,48
3-54	0,06	0,04	400	0,19	0,149 3	1 493	0,19	0,147 1	1 471,36
1-82	0,41	0,25	2 500	0,04	0,031 4	314,32	0,25	0,193 6	1 936
sp-117	0,125	0,07	700	0,2	0,157 2	1 571,6	0,2	0,154,9	1 548,8
sp-115	0,092	0,06	600	0,22	0,172 9	1 728,8	0,18	0,139 4	1 393,92
sp-118	0,325	0,19	1 900	0,15	0,117 9	1 178,7	0,26	0,201 3	2 013,44
sp-119	0,402	0,24	2 400	0,16	0,125 7	1 257,3	0,19	0,147 1	1 471,36
sp-35	0,39	0,23	2 300	0	0	0	0,14	0,108 4	1 084,16
sp-11	0,12	0,07	700	0	0	0	0,24	0,185 9	1 858,56
sp-47	1,26	0,76	7 600	0	0	0	0,28	0,216 8	2 168,32
sp-116	0,08	0,05	500	0,3	0,235 7	2 357,4	0,18	0,139 4	1 393,92

La conclusión anterior es demostrable a través del análisis estadístico (Tabla 4), de esta forma los contenidos de MnO presentan correlación negativa con respecto a los contenidos de MgO y NiO , no obstante poseen correlación positiva con relación a los contenidos de FeO y TiO_2 , es decir que desde el punto de vista geoquímico la mayor o menor concentración del manganeso en las espinelas cromíferas masivas se produce a expensas de la disminución del NiO y MgO o del incremento del FeO y TiO_2 , respectivamente.

TABLA 4. Coeficientes de correlación de los contenidos de MnO % con respecto a los óxidos de los metales bivalentes y trivalentes, menas masivas, yacimiento «Cayo Guam», Moa

Óxidos	FeO %	NiO %	TiO_2 %	MnO %	MgO %	Cr_2O_3 %	Fe_2O_3 %	Al_2O_3 %	-
MnO %	0,783 9	-0,473 6	0,484 5	1,0	-	-0,042 3	-	-0,657 0	1,0
					0,722 8				

TABLA 5. Coeficientes de correlación de los contenidos de NiO % con respecto a los óxidos de los metales bivalentes y trivalentes de las espinelas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam», Moa

Óxidos	FeO %	NiO %	TiO_2 %	MnO %	Cr_2O_3 %	Fe_2O_3 %	Al_2O_3 %	NiO %
TiO_2 %	0,463 3	0,530 37	-0,568 1	-0,473 6	-0,313 6	-	-0,657 0	1,0

Son significativos los valores negativos de los coeficientes de correlación del hierro y el manganeso con relación al níquel, ya que dichos metales condicionan los contenidos del níquel en la estructura de la celda unidad de la espinela cromífera. Por otra parte, se comprueba una dependencia positiva entre los contenidos de níquel y los de magnesio, llegándose a la conclusión de que en las espinelas cromíferas al aumentar los contenidos de magnesio, se incrementan los de níquel. Se incluye además, la relación inversa con respecto a los contenidos de aluminio, en otras palabras, las espinelas cromíferas refractarias son menos níquelíferas en la misma medida en que aumentan los contenidos de Al_2O_3 .

En los microcomponentes de las espinelas cromíferas se localizan los contenidos de TiO_2 . El comportamiento geoquímico del titanio y de su óxido en las espinelas cromíferas, así como en las litologías de los complejos ofiolíticos, se utiliza como importante indicador petrogenético y geoquímico. Así, se ha establecido el contenido de $\text{TiO}_2 = 0,25$ % ($\text{Ti} = 1 496,75$ ppm) como valor límite para poder discriminar el origen primario de las espinelas cromíferas. En las espinelas cromíferas asociadas a las intrusiones estratiformes (Stillwater Complex, Montana, USA y Bushveld Complex, África del Sur) los contenidos de TiO_2 % están por encima del 0,25 %, en cambio, las espinelas cromíferas de los com-

plejos ofiolíticos (Nueva Caledonia, Troodos, Chipre, Filipinas, etc.) el contenido de TiO_2 en las espinelas cromíferas es inferior al valor de 0,25 %. En ese sentido, al estudiar las espinelas cromíferas podiformes Leblanc señala: «le titane est un élément mineur des chromites ophioliques (en général moins de 0,25 % TiO_2), les chromites des complexes stratiformes sont en moyenne plus riches (0,3 à 1,5 % TiO_2) et tendent à s'enrichir en fer, manganèse et vanadium» (M. Leblanc and A. Nicolas 1992)¹⁴.

Las espinelas cromíferas masivas del yacimiento Cayo Guam presentan contenidos de TiO_2 en el intervalo: $0,06 < \text{TiO}_2 < 1,26$. Casi la mitad de las muestras estudiadas presentan contenidos superiores a 0,25 % de TiO_2 . De los resultados obtenidos se llega a la conclusión de que las espinelas cromíferas masivas de este yacimiento manifiestan un carácter dual con relación a su génesis, incluso muestran cierta tendencia a un origen estratiforme. El comportamiento geoquímico del titanio en las menas masivas se expresa en forma de Ti^{4+} en cristales idiomórficos y en descomposición de soluciones sólidas (textura laminar) en el seno de las espinelas cromíferas masivas. Además, el titanio también puede existir en forma de ulvoespinela (Fe_2TiO_4) en la celda cristalográfica de la espinela cromífera, dado el alto contenido del dióxido de titanio (Tabla 6).

TABLA 6. Coeficientes de correlación de los contenidos de TiO_2 en relación a los óxidos de los metales bivalentes y trivalentes en las espinelas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam», Moa

Óxidos	FeO %	NiO %	MnO %	MgO %	Cr_2O_3 %	Fe_2O_3 %	Al_2O_3 %	TiO_2 %
TiO_2 %	0,463 3	-0,568 0	0,484 5	-0,604 7	0,208 8	-	-0,562 8	1,0

Como puede valorarse el TiO_2 presenta coeficientes de correlación positivos con el FeO y MnO , lo cual se traduce en que los contenidos de TiO_2 se incrementan o disminuyen en proporción directa a los contenidos de FeO y MnO ; por otra parte, en las posiciones bivalentes los valores de NiO y MgO presentan coeficientes de correlación inversa (valores negativos), siendo el coeficiente del magnesio mayor que el del níquel. En este caso los contenidos de TiO_2 varían inversamente proporcional al contenido de los óxidos de níquel y de magnesio. En el caso de los óxidos de los metales trivalentes, existe correlación positiva con el Cr_2O_3 (aunque baja) y negativo con los valores del Al_2O_3 .

Las relaciones entre los contenidos de Cr_2O_3 y TiO_2 se recogen gráficamente, donde las muestras se distribuyen en dos campos bien diferenciados: podiformes $\text{TiO}_2 < 0,25$ % y estratiformes $\text{TiO}_2 > 0,25$ % (Figura 1 y 2).

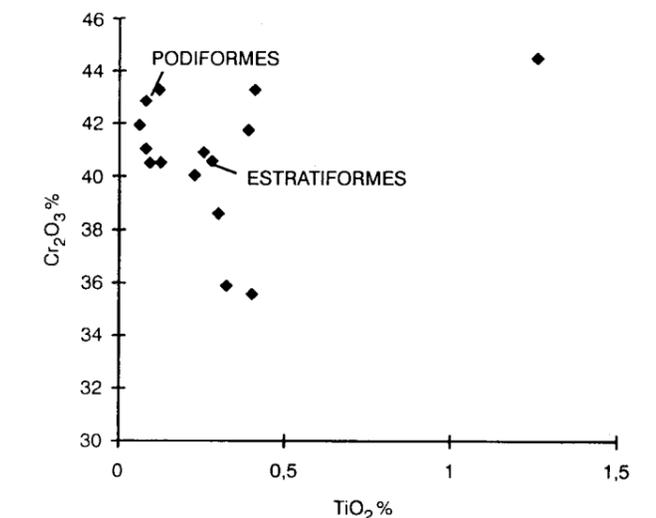


FIGURA 1. Diagrama de dispersión entre los contenidos de Cr_2O_3 % y TiO_2 % en las espinelas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam», Moa.

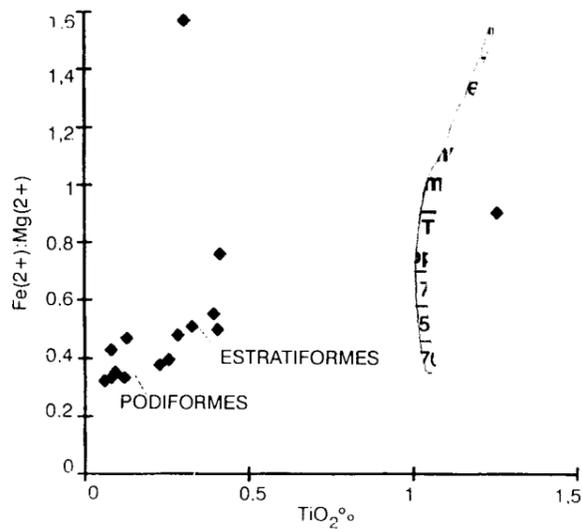


FIGURA 2. Diagrama de dispersión entre los contenidos de TiO_2 % y la relación geoquímica $\text{Fe}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$ en las menas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam», Moa.

A partir de los resultados analíticos de microscopía electrónica de barrido, fue factible obtener el número de cationes (bivalentes y trivalentes) en la celda cristalográfica unidad de la espinela cromífera. Al contar con dichos resultados se calcularon diferentes relaciones geoquímicas y se obtuvieron las fórmulas cristalquímicas de cada muestra investigada. En las espinelas cromíferas del yacimiento Cayo Guam se analizó la relación entre los valores de los cationes bivalentes $\text{Fe}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$, esta relación nos permite discriminar, de una forma similar a los contenidos de TiO_2 , el origen primario de las espinelas cromíferas. Thayer (1964)²¹, Dickey (1975)³, Leblanc (1983)¹³ y Boudier y Nicolas (1995)² han demostrado que los valores de la relación geoquímica $\text{Fe}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$ varían en un intervalo muy limitado para las menas cromíferas podiformes asociadas a los complejos ofiolíticos (0,40 - 0,45) y en un intervalo más amplio cuando se trata de las menas cromíferas estratiformes (0,50 - 1,59).

En ese sentido los valores determinados para las menas cromíferas masivas del yacimiento Cayo Guam muestran un valor medio de 0,543 3 con valores máximos de 1,57 y mínimos de 0,32. Como puede valorarse, los resultados obtenidos para las menas masivas incluyen los valores de las menas podiformes y estratiformes, incluso con cierta tendencia a estas últimas.

Los cationes bivalentes ocupan la posición $[\text{X}^{2+}]$ en la estructura de la celda cristalquímica unidad en las espinelas cromíferas, y teóricamente la suma de ambos cationes, de ocuparse todas las posiciones, sería un valor máximo de ocho cationes bivalentes, según ha estudiado en detalle Irvine (1965)¹¹. En realidad las posiciones catiónicas bivalentes representadas por Fe^{2+} y Mg^{2+} pueden ser sustituidas por cationes bivalentes tales como: Zn^{2+} , Ni^{2+} y Mn^{2+} debido a la similitud de las dimensiones de los radios atómicos de los cationes. En el caso específico de las menas masivas del yacimiento Cayo Guam

los valores de los cationes de Mg^{2+} son superiores en línea general al número de cationes de Fe^{2+} , lo cual se puede valorar por las fórmulas cristalquímicas y en las Tablas 7 y 8, respectivamente.

TABLA 7. Número de cationes bivalentes en la celda cristalográfica unidad de las espinelas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam», Moa

Muestras	Ni^{2+}	Fe^{2+}	Mg^{2+}	Mn^{2+}	ΣX^{2+}
m-1-64	0,024	2,19	5,81	0,039	8,063
m-1-34	0,038	2,26	5,74	0,037	8,075
m-1-59	0,03	2,59	5,41	0,044	8,074
m-1-28	0,011	4,89	3,11	0,066	8,077
m-3-52	0,037	2	6	0,035	8,072
m-3-54	0,036	1,94	6,06	0,039	8,075
m-1-82	0,008	3,45	4,55	0,052	8,06
m-sp-117	0,038	2,74	5,85	0,04	8,668
m-sp-115	0,043	2,07	5,93	0,037	8,08
m-sp-118	0,03	2,7	5,3	0,053	8,083
m-sp-119	0,031	2,66	5,34	0,039	8,07
m-sp-36	0	2,85	5,15	0,028	8,028
m-sp-11	0	2	6	0,049	8,049
m-sp-47	0	3,8	4,2	0,06	8,06
m-sp-116	0,044	2,4	5,6	0,037	8,081

TABLA 8. Número de cationes trivalentes en la celda cristalográfica unidad de las espinelas cromíferas del yacimiento «Cayo Guam», Moa

Muestras	Ti^{3+}	Cr^{3+}	Al^{3+}	Fe^{3+}	ΣY^{3+}
m-1-64	0,041	7,48	7,92	0,6	16,041
m-1-34	0,045	7,63	7,87	0,5	16,045
m-1-59	0,05	7,69	8,15	0,16	16,05
m-1-28	0,058	7,71	7,04	1,25	16,058
m-3-52	0,014	8,07	7,33	0,6	16,014
m-3-54	0,011	7,84	7,45	0,71	16,011
m-1-82	0,076	8,41	7,26	0,33	16,076
m-sp-117	0,022	7,59	7,82	0,59	16,022
m-sp-115	0,017	7,67	7,59	0,74	16,017
m-sp-118	0,059	6,78	8,22	1	16,059
m-sp-119	0,073	6,76	8,22	1,03	16,083
m-sp-36	0,069	7,91	8,33	0	16,309
m-sp-11	0,022	8,16	7,24	0,6	16,022
m-sp-47	0,24	9,09	6,44	0,47	16,24
m-sp-116	0,015	7,85	7,97	0,18	16,015

Como consecuencia de ocupar las posiciones (X^{2+}) en la estructura de las espinelas cromíferas, los valores de los cationes (Mg^{2+} y Fe^{2+}), manifiestan una elevada correlación inversa (coeficiente de correlación: -0,98254), por lo que al aumentar o disminuir un catión, aumenta y disminuye el otro respectivamente, tal como se visualiza gráficamente (Figuras 3 y 4). Esta representación gráfica nos permite además, identificar desde el punto de vista mineralógico, a las espinelas cromíferas mediante el empleo del cálculo del número de cationes de la celda cristalquímica de cada muestra, así queda corroborado en la Figura 4.

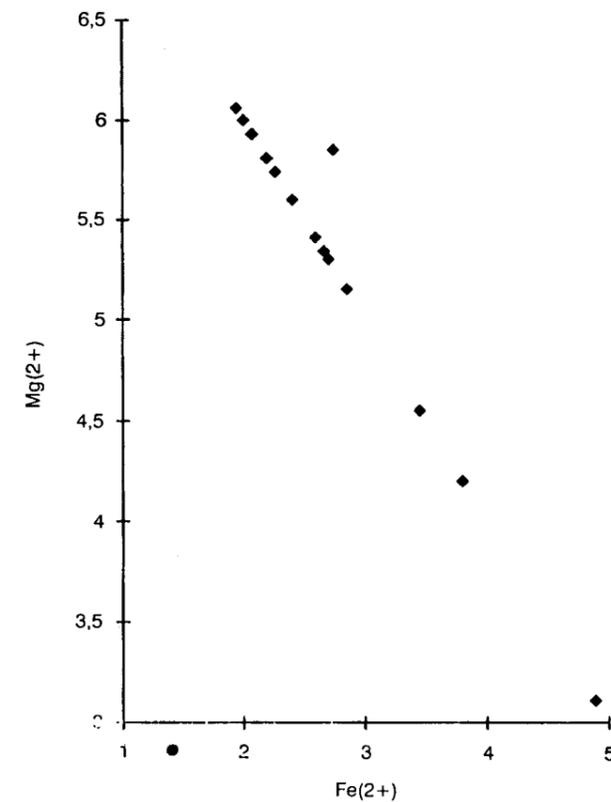
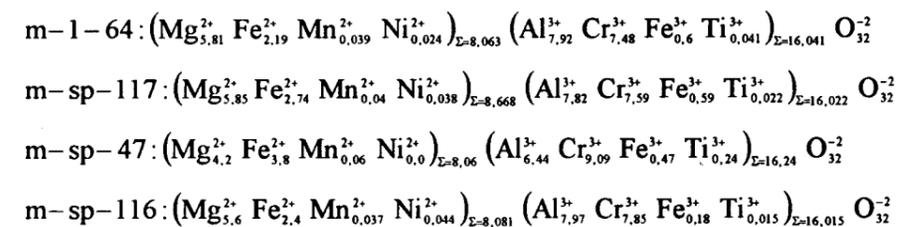


FIGURA 3. Diagrama de dispersión entre el número de cationes bivalentes (Mg^{2+} y Fe^{2+}) en la celda cristalográfica unidad de las espinelas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam», Moa.



Los cationes trivalentes en la celda cristalográfica de la espinela cromífera están representados por los cationes: Al^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} , los cuales ocupan estequiométricamente la posición $[\text{Y}^{3+}]$, completando un total de diez y seis cationes, según ha sido demostrado por Irvine (1965)¹¹ y más recientemente por Leblanc y Ceuleneer (1992)¹⁵. Los ligeros incrementos se deben a los contenidos de titanio y de vanadio (Ti^{3+} y V^{3+}), estos se ubican en la posición de los cationes trivalentes (Figura 5).

Del análisis de las tablas donde se exponen los números de cationes bivalentes y trivalentes de las muestras de espinelas cromíferas masivas investigadas, así como de las fórmulas cristalquímicas expuestas, se destacan los valores de los números de cationes de Cr^{3+} y Al^{3+} , con valores muy próximos entre ellos, en cambio, los cationes Fe^{3+} y Ti^{3+} manifiestan valores muy bajos, raramente alcanzan los valores de la unidad. Estas rela-

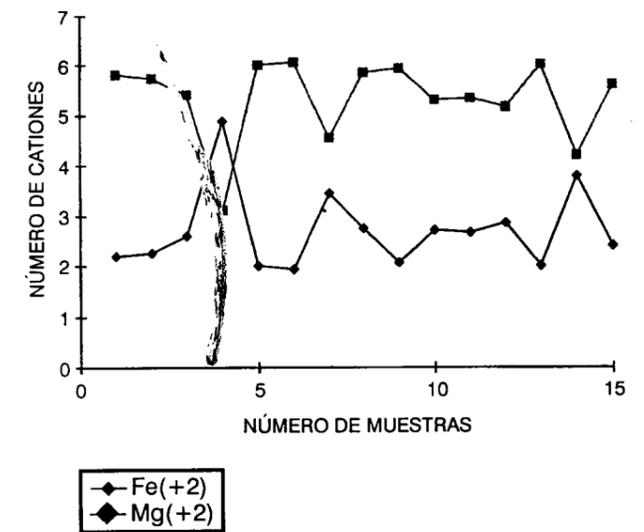


FIGURA 4. Diagrama comparativo entre los números de cationes bivalentes Mg^{2+} y Fe^{2+} en la celda cristalográfica unidad de las espinelas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam», Moa.

Seguidamente se recogen a manera de ejemplos cuatro muestras de espinelas cromíferas masivas y se exponen las fórmulas cristalquímicas de sus respectivas celdas unitarias:

Los cationes trivalentes en la celda cristalográfica de la espinela cromífera están representados por los cationes: Al^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} , los cuales ocupan estequiométricamente la posición $[\text{Y}^{3+}]$, completando un total de diez y seis cationes, según ha sido demostrado por Irvine (1965)¹¹ y más recientemente por Leblanc y Ceuleneer (1992)¹⁵. Los ligeros incrementos se deben a los contenidos de titanio y de vanadio (Ti^{3+} y V^{3+}), estos se ubican en la posición de los cationes trivalentes (Figura 5).

Finalmente, se analizó la relación geoquímica: $\# \text{Cr} = \text{Cr}^{3+} / (\text{Cr}^{3+} + \text{Al}^{3+})$ y $\# \text{Mg} = \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ la que ha sido empleada por numerosos investigadores, entre ellos, M. Leblanc y A. Nicolas (1992)¹⁴; F. Boudier y A. Nicolas (1995)¹¹. La relación geoquímica permite analizar la ubicación de las espinelas cromíferas masivas en función del número de cationes bivalentes y trivalentes en los campos de las menas cromíferas podiformes o estratiformes.

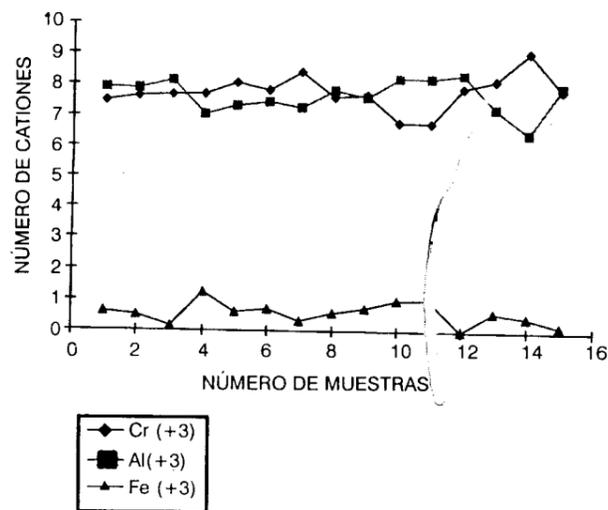


FIGURA 5. Diagrama de variación entre número de cationes trivalentes en las celdas cristalógicas de las espinelas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam, Moa».

En las menas cromíferas masivas del yacimiento Cayo Guan el #Cr presenta un valor medio de 0,51 y un intervalo de $0,45 < \#Cr < 0,59$ situándolas como menas de bajo contenido de cromo ($\#Cr = 0,45$) y alto contenido de aluminio, hasta espinelas cromíferas con alto contenido de cromo ($\#Cr = 0,59$) y bajo contenido de aluminio (Figura 6).

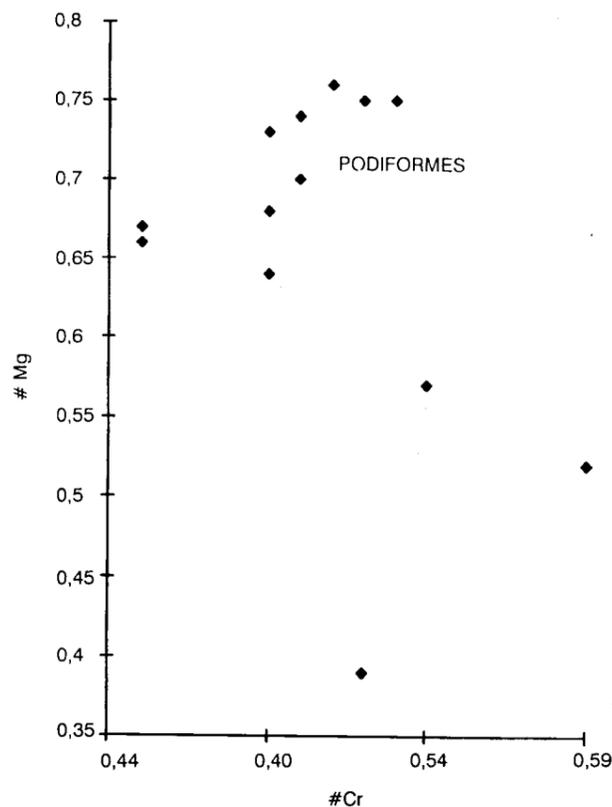


FIGURA 6. Diagrama de dispersión entre las relaciones geoquímicas $\#Cr = Cr^{3+} / (Cr^{3+} + Al^{3+})$ y $\#Mg = Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$ en las menas cromíferas masivas del yacimiento «Cayo Guam», Moa.

La relación #Mg manifiesta un valor medio de 0,67, lo cual verifica el alto contenido relativo de magnesio en las espinelas cromíferas masivas del yacimiento Cayo Guam (ver fórmulas cristalógicas). La relación geoquímica presenta un amplio intervalo: $0,39 < \#Mg < 0,76$, en el que se incluyen espinelas cromíferas con bajo contenido de magnesio ($\#Mg = 0,39$) y alto contenido de hierro, hasta muestras con alto contenido de magnesio ($\#Mg = 0,76$) y bajo contenido de hierro.

En sentido general, y según el área que abarcan los dos intervalos analizados (Figura 6), la mayoría de las muestras se ubican en la zona de las menas cromíferas asociadas a complejos ofiolíticos.

Una vez más, queda demostrado también el carácter refractario de las menas del yacimiento Cayo Guam al utilizar la relación geoquímica #Cr y #Mg, tal como ha sido expuesto por J. F. Lewis et al. «the refractory segregated high alumina chromites from the Moa-Baracoa area show a wide range in composition. In fact, this composition, in terms of both #Cr and #Mg, is much wider than for high Al-chromites in any other part of the world» (J.F. Lewis et al., 1996)¹².

Principales resultados geoquímicos

- Desde el punto de vista geoquímico se demuestra el carácter podiforme de las menas masivas del yacimiento Cayo Guam, asociadas a los complejos ofiolíticos, no obstante, se comprueba en relación con los contenidos de FeO % y TiO₂ % cierta tendencia hacia el campo de las espinelas cromíferas asociadas a intrusiones estratiformes, lo que se demuestra en las relaciones: Cr₂O₃ % - TiO₂ % y Fe²⁺: Mg²⁺: TiO₂ %.
- Utilización, por primera vez en el estudio de la mineralización cromífera, de los contenidos de TiO₂ como indicador petrogenético y geoquímico, lo que ha facilitado argumentar el carácter genético de la mineralización cromífera en el yacimiento Cayo Guam.
- Cálculo de varias relaciones geoquímicas, las que han facilitado el análisis del comportamiento de los macro y microcomponentes en las espinelas cromíferas y sus relaciones mutuas, a la vez que contribuyen a establecer criterios geoquímicos sobre la génesis de la mineralización cromífera, entre ellas: cálculo del número de cationes bivalentes y trivalentes en la celda cristalográfica unidad de la espinela cromífera, $\#Cr = Cr^{3+} / (Cr^{3+} + Al^{3+})$, $\#Mg = Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$, Fe²⁺: Mg²⁺, entre otras.
- Mediante el estudio de la mineralización cromífera se ha corroborado el carácter refractario de las menas cromíferas del yacimiento Cayo Guam, estableciéndose, junto a otros yacimientos de la región de Moa-Baracoa, como las menas más refractarias que se hayan explotado en el mundo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUGÉ, T. and P. MAURIZOT: *Stratiform and alluvial platinum mineralization in the New Caledonia ophiolite complex. The Canadian Mineralogist*, vol. 33, pp. 1023-1045, 1995.
- BOUDIER, F. and A. NICOLAS: «Nature of the Mohotransition zone in the Oman ophiolite», *Journal of Petrology*, vol. 36, no.3, pp. 777-796, 1995.
- DICKEY, J.S. Jr.: «A hypothesis of origen for podiform chromite deposits», *Geochimica et cosmochimica Acta*, vol. 39, pp.1061-1074, 1975.
- DISTHER, V.V.; H.J. FALCÓN; J.N. MUÑOZ GÓMEZ y D.M. CAMPOS: *Disulfuros de rutenio, osmio, rodio y otros minerales platiníferos en los macizos hiperbasíticos de Cuba oriental*, Academia de Ciencias de Cuba, 1989 (inédito).
- DZUBERA, A.: *Informe sobre la evaluación geólogo-minera de los yacimientos de extracción histórica*, Empresa Geólogo - Minera de Oriente, 1974.
- FONSECA, E. et al.: *Informe final sobre el tema 401-12: Geología de los yacimientos cromíticos con evaluación pronóstica*, Academia de Ciencias de Cuba, 1991.
- FONSECA, E.; V.M. ZELEPUGUÍN y M. HEREDIA: «Particularidades de la estructura asociación ofiolítica en Cuba», en: *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, no. 9, pp. 31-46, 1989.
- GUILD, P.M.; D.E. FLINT y J.F. ALBEAR: «Petrology and structure of the Moa chromite district, Oriente province, Cuba», en: *U.S. Geological Survey*, vol. 28. no. 2, pp. 218-246, 1947.
- GUERRA, C.V. y M. NAVARRETE: *Informe sobre los resultados de los trabajos de generalización de la información geológica sobre cromitas refractarias de la región Moa-Baracoa y delimitación de las áreas perspectivas en los flancos de yacimientos explotados*, Empresa Cromo-Moa, Moa, Cuba, 1995 (inédito).
- GREENBAUM, D.: «The chromitiferous rocks of the Troodos ophiolite complex, Cyprus», *Economic Geology*, vol. 72, pp. 1175-1194, 1977.
- IRVINE, T. N.: «Chromian spinels as petrogenetic indicator», *Canadian Journal of Earth Science*, vol. 2, no. 6, pp. 648-671, 1965.
- KENAREV, V. y V.Y. MURASHKO: *Informe sobre los trabajos de prospección y exploración geológica de los yacimientos de cromitas: Delta II, Narcizo I - II y Melba*, Empresa Geólogo-Minera de Oriente, 1963.
- LEBLANC, M. and J.F. VIOLETTE: «Distribution of aluminium-rich and chromium-rich chromite pods in ophiolites peridotites», en: *Economic Geology*, vol. 78, pp. 293-301, 1983.
- LEBLANC, M. and J. NICOLAS: «Les chromites ophiolitiques», *Chron. rech. min.*, no. 57, pp. 3-25, 1992.
- LEBLANC, M. and J. CEULENER: «Chromite crystallization in the multicelular magma flow: evidence from a chromitite dike in the Oman Ophiolite», en: *Lithos*, vol. 27, pp. 231-257, 1992.
- LEWIS, J.F.; J.N. MUÑOZ GÓMEZ; J.C. LABRADA GÓMEZ and P. GENYONG: *Mineralogy and petrology of the Potosi and Cayo Guam ophiolite rocks and associated podiform chromite deposits*, 30th International Geological Congress, Beijing, pp. 1-16, R. P. China, 1996.
- MUÑOZ GÓMEZ, J.N. et al.: *Acerca de la presencia de los elementos del grupo del platino asociados al complejo ofiolítico en el noroeste de Cuba*, Seminario Internacional de Lixiviación Ácida de Minerales Lateríticos, Resúmenes, pp. 21, Moa, Holguín, Cuba, 1991.
- MUÑOZ GÓMEZ, J.N.: «Las paragénesis minerales del yacimiento Potosí y su sucesión genética», *Revista Minería y Geología*, vol. XII, no. 3, pp. 23-31, Moa, Holguín, Cuba, 1995.
- : *Geoquímica y mineralogía de la mineralización cromífera asociada al complejo ofiolítico en la región de Moa-Baracoa, Cuba*, Tesis Doctoral, Dpto. de Geología, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 1997.
- THAYER, T.P.: «Chrome resources of Cuba», en: *U. S. Geological Survey Bulletin*, 1942.
- : «Principal features and origin of podiform chromite deposits and some observations on the Guleman-Sodirag district, Turkey», en: *Economic Geology*, vol. 59, pp. 1497-1524, 1964.
- : «Podiform chromite deposits», en: *Economic Geology*, monograph 4, pp. 132-146, 1969.

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTRÓNICA

Dpto. de Mecánica

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO