

# MINERALOGIA Y SUCESION PARAGENETICA DE LAS MENAS CROMIFERAS DEL YACIMIENTO POTOSI, MOA, HOLGUIN, CUBA

## MINERALOGY AND PARAGENETIC SEQUENCE OF CHROMITIC ORES FROM POTOSÍ DEPOSIT, MOA, HOLGUÍN, CUBA

**JOSE NICOLAS MUNOZ GOMEZ**

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

**RESUMEN:** En el trabajo se exponen los resultados de las investigaciones mineralógicas efectuadas en las cromititas propiamente dichas del yacimiento Potosí, localizado al este del municipio holguinero de Moa, así como en las menas cromíferas diseminadas, las espinelas cromíferas en los diques de gabro-pegmatitas y los minerales accesorios a la mineralización principal.

En las investigaciones desarrolladas se incluyeron diferentes métodos de microscopía de menas —dispersión de la capacidad de reflejo, isotropía-anisotropía, microdureza, reflejos internos— y análisis de microscopía electrónica de barrido, lo que permitió una alta precisión en la identificación de las fases minerales principales y minerales accesorios.

Entre los resultados alcanzados se debe destacar la presencia de minerales del grupo del platino: a) fases de bisulfuros de rutenio (Ru<sub>2</sub>S) y osmio (Os<sub>2</sub>S); b) rutilo; c) sulfuros magmáticos primarios, en correspondencia con los análisis isotópicos efectuados por Proenza (Proenza, 1998), representados por: pentlandita, pirrotina, calcopirita y millerita, y d) sulfuros típicos del proceso de serpentinización del complejo ofiolítico con la existencia de mackinawita y heazlewoodita. Se exponen en detalle las paragénesis minerales identificadas y su orden cronológico de segregación.

**Palabras clave:** cromititas, complejo ofiolítico, gabro-pegmatitas, microscopía de menas, paragénesis.

**ABSTRACT:** This article exposes results of researches developed on chromitite ore deposit Potosí, located to the east of Moa, Cuba, and in the dissemination of chrome ores, the spinels chromite in the dike of gabro-pegmatites and the minerals connected to the principal mineralization.

In the investigations developed different methods of ore microscopy were included —the dispersion of the capacity of reflection, isotropy-anisotropy, microhardness, internal reflection— and analysis of scanning electron microscopy; which permitted a high of accuracy of the identification of the main mineralogical phases and connecting minerals.

The main results of this work were: a) platinum group minerals: it represent by sulfides phases of ruthenium and osmium: Ru<sub>2</sub>S - Os<sub>2</sub>S; b) rutile: TiO<sub>2</sub>; c) magmatic sulfides minerals: pentlandite, pyrrhotite, chalcopyrite and millerite, agreeable with isotopic analyses, performed by Proenza (Proenza, J., 1998) and d) tipic sulfides of serpentinization process: mackinawita and heazlewoodite. Ending, the minerals paragenetic sequence in chronological order are showed.

**Key words:** spinels chromite, ophiolitic complex, gabro-pegmatites, ore microscopic, paragenetic sequence.

### INTRODUCCIÓN

Las investigaciones sobre la mineralogía de las cromititas comenzaron en la década de los años 70, por Kenarev (1966). Investigaciones posteriores se desarrollaron por Muñoz y Campos (1992), Muñoz Gómez (1995, 1997) y Proenza (1998).

El yacimiento de menas cromíferas Potosí se localiza en el curso superior del río Yamanigüey, al este del municipio holguinero de Moa. Desde el punto de vista geológico este yacimiento se enmarca dentro del complejo ofiolítico serpentinizado, muy próximo del contacto de los complejos máficos y ultramáficos de la asociación ofiolítica (Lewis, 1996; Muñoz Gómez, 1997; Proenza, 1998).

Las investigaciones mineralógicas desarrolladas en el área del yacimiento estuvieron dirigidas a la identificación de las fases mineralógicas siguientes: espinelas

cromíferas, rutilo, bisulfuros de rutenio y osmio; sulfuros magmáticos primarios (Proenza, 1998): pentlandita, pirrotina, calcopirita, millerita; sulfuros típicos del proceso de serpentinización del complejo ofiolítico: mackinawita, heazlewoodita.

El objetivo de este trabajo es mostrar las paragénesis minerales correspondientes a los diferentes tipos de mineralización presentes en el área del yacimiento Potosí y el orden cronológico de sucesión de las mismas. Se exponen las fases minerales principales y algunas de los minerales accesorios; en ese orden se recogen: espinelas cromíferas y rutilo.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron alrededor de 45 muestras de menas del yacimiento Potosí, una cifra similar de los diques de gabro-

pegmatitas y 30 muestras de litologías ultramáficas y máficas encajantes al yacimiento.

La identificación de las fases minerales principales y los minerales accesorios se llevó a cabo a través de dos métodos:

- Microscopía óptica: Se incluyeron varios métodos tradicionales de identificación (capacidad de reflejo, dispersión de la capacidad de reflejo, anisotropía, isotropía, reflejos internos, microdureza). Se utilizaron los microscopios: JENAPOL-U y JENALAB de la Carl Zeiss de Jena. Microdurómetro: PMT-3: LOMO-San Petersburgo y Microespectrofotómetro: FMV-4001 de la Carl Zeiss de Jena.
- Microscopía electrónica de barrido: Se aplicó para la identificación de las fases principales y minerales accesorios; se utilizó JEOL-733 con el haz de electrones: 2 OsL $\alpha$ 1; 3Ir $\alpha$ 1; 4RuL $\alpha$ 1; 15SK $\alpha$ 1; 6CaK $\alpha$ 1; 7K $\alpha$ 1; 8FeK $\alpha$ 1 y 9 CrK $\alpha$ 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación de las fases mineralógicas

Las diferentes fases minerales identificadas son: espinelas cromíferas, rutilo, laurita-erlichmanita, pentlandita, calcopirita, millerita, pirrotina, heazlewoodita, mackinawita. A manera de ejemplo se expone la identificación de dos minerales: espinelas cromíferas y rutilo.

Espinela cromífera: Se incluyen espinelas cromíferas masivas, diseminadas, en diques de gabro-pegmatitas, accesorias en las litologías del complejo ultramáfico serpentinizado y en litologías del complejo máfico.

Parámetros ópticos

Color: gris, gris claro.

Birreflexión: Muy raramente se localizan muestras en que se manifiesta débil birreflexión anómala, de forma probable relacionada con procesos tectónicos de dinamometamorfismo que hayan afectado las espinelas cromíferas.

Relación con la luz polarizada elíptica: En todos los ensayos se manifiesta la isotropía, característica típica de las espinelas cromíferas.

Reflejos internos: Estos se muestran ocasionalmente, sobre todo en los bordes de agregados independientes; se observan con mayor desarrollo si se emplean líquidos de inmersión; se presentan con matices desde el pardo al carmelita oscuro, carmelita-rojizo, y se destacan mejor en las zonas de microfracturas.

Capacidad de reflejo: Se determinaron valores entre 10%-12%, se obtuvo un valor mínimo de 10,4% ( $\lambda = 700$  nm), uno máximo de 12,8% ( $\lambda = 620$  nm) y un valor medio de 11,4%; seguidamente se relacionan los valores obtenidos:

A partir de los datos de la capacidad de reflejo (R%), se obtuvo la curva de dispersión de la capacidad de reflejo (tabla 1) en comparación con la curva patrón de la espinela cromífera, tal como se representa gráficamente en la figura 1.

Dureza y microdureza

Todos los ensayos realizados, tanto los de dureza Mohs como los de microdureza Vickers (tabla 2), se encuen-

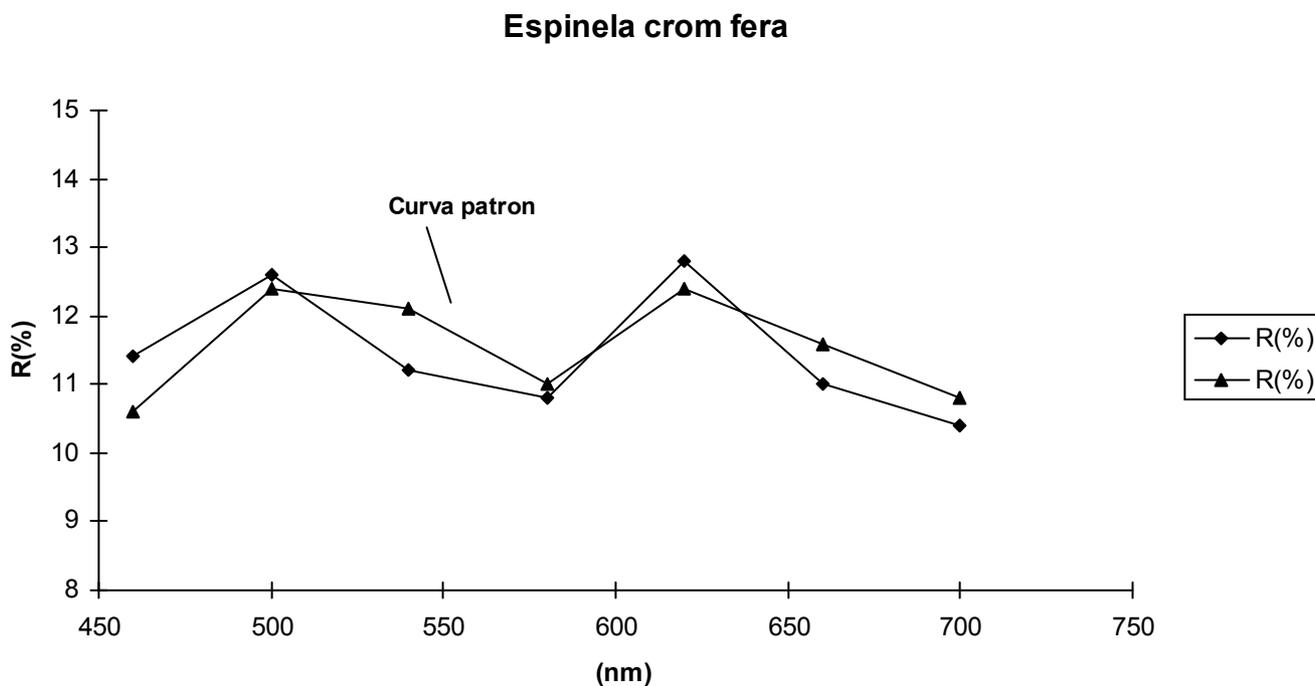


Fig. 1. Curva de dispersion de la capacidad de reflejo de la espinela cromifera en comparacion con la curva patron (valores medios de Ramdorh y Uyténbogaardt) (Ramdorh, P.; 1980) y (Uyténbogaardt, W.; 1971).

**TABLA 1. CAPACIDAD DE REFLEJO (R%) DE LA ESPINELA CROMIFERA**

$\lambda$ (nm)	R(%)(*)	$\lambda$ (nm)(**)	R(%)
460	11,4	460	10,6
500	12,6	500	12,4
540	11,2	540	12,1
580	10,8	580	11,0
620	12,8	620	12,4
660	11,0	660	11,6
700	10,4	700	10,8

(\*) Muestra m-36-a. (\*\*) Datos de la curva patron [Valores medios de Ramdohr y Uytendogaardt]. (Ramdohr, P., 1980), (Uytendogaardt, W., 1971). Todas las determinaciones realizadas por el microespectrofotometro FMV-4001. Todas las determinaciones de la capacidad de reflejo (R%) estan referidas al patron internacional de silicio puro (Si=99,9999%) [ $\lambda=486$ (nm), R=39,4%;  $\lambda=551$ (nm), R=36,6%;  $\lambda=589$ (nm), R=35,2%;  $\lambda=656$ (nm), R=34,0% ].

**TABLA 2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MICRODUREZA VICKERS (VHN) EN LA ESPINELA CROMIFERA DE LAS MENAS MASIVAS DEL YACIMIENTO POTOSI, MOA**

No. de Ensayos	VHN (kg/mm <sup>2</sup> )
1	1893,41
2	1765,36
3	1924,50
4	1871,55
5	1798,24
6	1786,52
7	1852,16
8	1759,55
9	1827,44
10	1835,48

Muestras: PS-6; PS-10; PS-12; PS-18; PS-24a; PS-36a-b; PS-38e; PS-41a; PS-43a-b. (\*) Todos los ensayos realizados por el microduremetro PMT-3 (t= 15 seg.; P=100 g).

tran dentro de los intervalos internacionales para la espinela cromifera, citados por Uytendogaardt (1971). De acuerdo al análisis estadístico el valor máximo es de 1 924 kg/mm<sup>2</sup>, el mínimo de 1 759,5 kg/mm<sup>2</sup> y el medio de 1 831,4 kg/mm<sup>2</sup>.

Muñoz Gómez y Campos Dueñas (1992) publicaron algunos resultados de microscopía electrónica de barrido para las espinelas cromíferas masivas de Potosí. Los resultados de este trabajo corroboran la identificación precisa de las espinelas de Potosí (tabla 3).

Rutilo TiO<sub>2</sub>: El mineral se encuentra en el seno de las espinelas cromíferas masivas o en los sistemas de microagrietamiento de las menas, así como en las espinelas cromíferas que se localizan en los diques de gabro-pegmatitas, por lo que se deduce que antes de cristalizar el fundido cromítico se segregaron cristales

idiomórficos de rutilo de forma acicular, el cual por su carácter primario, es denominado rutilo-I, y en el caso de los rutilos segregados en los sistemas de microagrietamiento de las espinelas cromíferas, son denominados como rutilo-II, de formación evidentemente posterior.

Los cristales de rutilo-I se manifiestan bien formados, aciculares, con dimensiones que oscilan entre 45-50  $\mu$ m (micrones) hasta 2,6 mm; raramente se presentan cristales xenomórficos. En algunas secciones pulidas se identificaron finísimas agujas de rutilo-I dispersas en el seno de los agregados cromíticos, sin orientación predominante; las dimensiones de las agujas varían entre los primeros micrones de longitud (de 5 hasta 10 micrones) y se interpretan como una variedad de las texturas de descomposición de soluciones sólidas entre las espinelas cromíferas (componente principal) y el rutilo-I (componente secundario).

**TABLA 3. RESULTADOS ANALITICOS DE LAS MENAS CROMIFERAS MASIVAS DEL YACIMIENTO POTOSI. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (INSTITUTO DE GEOLOGIA DE LOS YACIMIENTOS MINERALES, GEOQUIMICA, PETROLOGIA Y MINERALOGIA DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE LA EX-URSS, MOSCU)**

Muestras	FeO %	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	MnO %	MgO %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	NiO %	Total %
P-36-a	18,4	44,94	1,93	0,27	12,81	23,37	0,08	101,8
P-36-b	18,66	42,45	0,54	0,31	14,56	23,14	0,11	99,77
P-36-c	18,99	42,62	0,44	0,24	14,08	23,43	0,1	99,9
P-36-d	18,89	41,14	0,58	0,12	14,56	24,58	0,15	100,02
P-40-2a	27,51	38,01	1,86	0,18	11,01	19,9	0	98,47
P-40-2b	26,25	38,73	1,64	0,18	10,94	20,62	0	98,36
P-40-2c	26,44	38,38	1,68	0,38	10,9	20,33	0	98,11
P-40-2d	27,61	37,78	1,2	0,32	11,49	20,21	0	98,61
P-40-2e	25,47	38,49	1,35	0,29	11,45	21,11	0	98,16
P-40-3	28,17	38,29	2,24	0,37	10,85	18,88	0	98,8
P-45-1-1	18,52	39,84	0,27	0,27	15,19	25,84	0	99,93
P-45-1-2	18	39,02	0,41	0,28	15,23	26,36	0	99,3
P-45-1-3	17,9	39,76	0,34	0,26	14,96	26,09	0	99,31
P-45-2-2	18,49	40,31	0,35	0,35	14,21	25,88	0	99,59

**TABLA 4. VALORES DE LA CAPACIDAD DE REFLEJO (R%) DEL RUTILO EN EL ESPECTRO VISIBLE**

$\lambda$ (nm)	R(%)(*)	$\lambda$ (nm)	R(%)(**)
460	20,4	460	21,6
500	19,9	500	20,4
540	20,1	540	22,6
580	19,3	580	18,4
620	19,8	620	21,2
660	22,4	660	24,5
700	21,7	700	22,2

(\*)Muestra: PS-30b. (\*\*) Datos de la curva patron (valores medios de Besmertnaya, Picot y Vjalsov, citados en Ramdorh) (Ramdorhr, P., 1980).  
 (\*)Todas las determinaciones con el microespectrofotometro MFV-4001.

**TABLA 5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MICRODUREZA VICKERS (VHN) DE RUTILOS EN LAS MENAS CROMIFERAS MASIVAS. YACIMIENTO POTOSI\***

No. de Ensayos	VHN ( kg/mm <sup>2</sup> )
1	1 854,1
2	1 236,62
3	1 324,25
4	1 328,64
5	1 434,62
6	916,8
7	1 084,35
8	1 185,62
9	976,18
10	1 423,77

Muestras: PS-6; PS-10; PS-12; PS-18; PS-24a; PS-36a,b; PS-44a; PS-43a,b.  
 \*Todos los ensayos realizados con el microdurometro PMT-3 (t=15 seg; P=100g).

); la mencionada textura fue reportada por primera vez en investigaciones desarrolladas por P. Ramdorh y Sch-niederh6lm (Ramdorh, P., 1980). La existencia del rutilo se identific6 a trav6s de las t6cnicas mineragr6ficas tradicionales y por microsonda electr6nica de barrido.

**Par6metros 6pticos**

Color: Gris claro (m6s claro que el gris de la espinela crom6fera).

Birreflexi6n: No se manifiesta.

Relaci6n con la luz polarizada el6ptica: No se manifiesta, debido al enmascaramiento que le producen los intensos reflejos internos.

Reflejos internos: Intensos, se manifiestan en toda la superficie del mineral, rojos, naranjas y pardos oscuros.

Capacidad de reflejo: Valores entre 22,4% ( $\lambda = 660$  nm) y 19,3% ( $\lambda = 580$  nm), que representan los valores m6xi-

mos y m6nimos. Los obtenidos por el microespec-trof6tometro se exponen en la tabla 4, mientras que la curva de dispersi6n asociada a ellos se grafica en la figura 2.

**Microdureza**

En el caso del rutilo (tanto el rutilo-I como el rutilo-II), no fue posible realizar la medici6n de la dureza Mohs en las muestras, debido a las dimensiones peque1as de los cristales del mineral; es por ello que s6lo se exponen los resultados de los ensayos de microdureza Vickers (VHN) (tabla 5).

El valor medio calculado es de  $VHN_{100} = 1 276,49$  kg/mm<sup>2</sup>, el m6ximo de  $VHN_{100} = 1 854,10$  kg/mm<sup>2</sup> y el m6nimo de  $VHN_{100} = 916,80$  kg/mm<sup>2</sup>; todos los valores calcula-

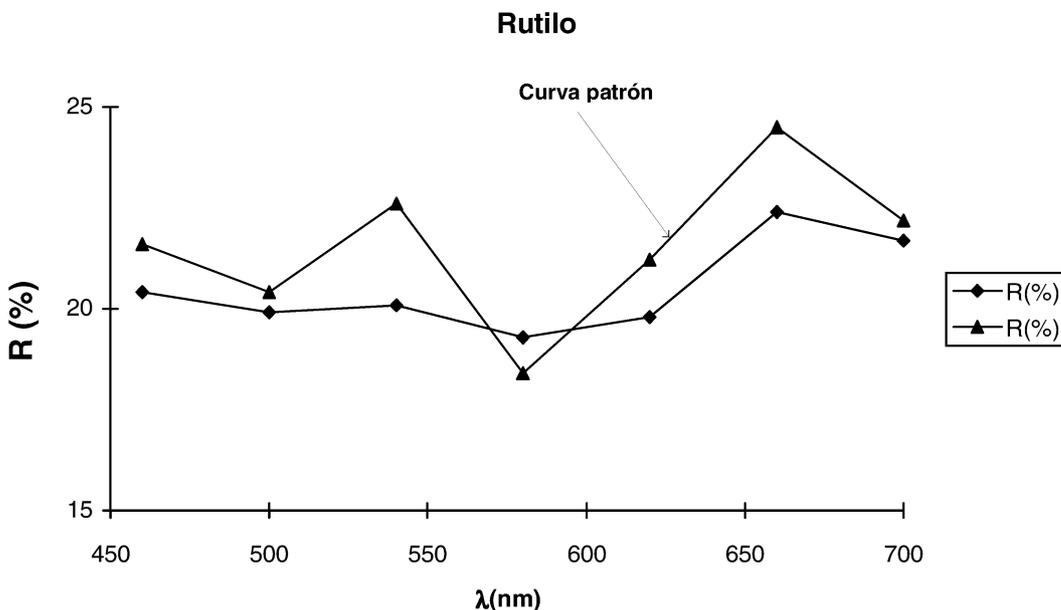


Fig. 2. Curva de dispersi6n de la capacidad de reflejo del rutilo en las menas cromiferas del yacimiento Potos , en comparaci6n con la curva patron (valores medios de Besmertnaya, Picot y Vjalsov, citados en Ramdorh) (Ramdorhr, P.; 1980).

**TABLA 6. RESULTADOS ANALITICOS DE MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO EN RUTILO: I-II EN ESPINELAS CROMIFERAS DEL YACIMIENTO POTOSI**

Muestra	FeO%	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	MnO%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO%	Total
P - 32	1,4	0,75	96,25	-	0,35	0,40	99,15
P - 40 - 1	0,19	0,27	99,21	-	0,21	-	99,98
P - 40 - 2	0,21	2,62	99,62	-	0,19	-	100,20

Análisis realizados en el Instituto de los Yacimientos Minerales, Geoquímica, Petrología y Mineralogía de la Academia de Ciencias de la ex-URSS.

dos, con excepción del ensayo No.6 ( $VHN_{100} = 916,80 \text{ kg/mm}^2$ ), se encuentran en los rangos internacionalmente reconocidos, tales como los publicados por Uytendogaard y Burque (1971) y por Ramdorhr (1980).

#### Microscopía electrónica de barrido

La identificación del rutilo existente en las menas cromíferas masivas del yacimiento Potosí, se realizó por microscopía electrónica de barrido; se ensayaron tres muestras, cuyos resultados se exponen en la tabla 6.

Desde el punto de vista mineralógico, se destaca la importancia de los resultados analíticos, los que corroboran la existencia del rutilo libre en las menas cromíferas masivas del yacimiento Potosí y en las espinelas cromíferas en los diques de gabro-pegmatitas. Del tratamiento ulterior de esos resultados se elaboraron las fórmulas cristaloquímicas de la celda unidad para cada una de las tres muestras ensayadas (Muñoz Gómez y Campos Dueñas, 1992).

Fórmulas cristaloquímicas correspondientes a los ensayos de microscopía electrónica de barrido

Muestra: P-32 -  $(Fe_{0,02}Cr_{0,005}Mg_{0,01}Al_{0,01}Ti_{0,962})_{\Sigma=1,040}O_{2,01}$  (\*)

Muestra: P-40-1 -  $(Fe_{0,002}Cr_{0,001}Al_{0,002}Ti_{0,995})_{\Sigma=1,0}O_{2,001}$  (\*)

Muestra: P-40-2 -  $(Fe_{0,003}Cr_{0,018}Mn_{0,005}Al_{0,002}Ti_{0,972})_{\Sigma=1,0}O_{2,01}$  (\*\*)

Las muestras marcadas [\*] y [\*\*] representan a cristales de rutilo-I y rutilo-II respectivamente.

#### PARAGÉNESIS MINERALES

La amplia diversidad de minerales metálicos (fundamentalmente sulfuros, rutilo y fases platiníferas), asociados a las menas masivas del yacimiento Potosí y a las espinelas cromíferas de los diques de gabro-pegmatitas, así como la distribución espacial de los minerales y sus vínculos genéticos, se ha identificado y establecido un determinado número de paragénesis donde se agrupan los minerales en correspondencia con las condiciones físico-químicas y geológicas de formación.

Con anterioridad se han publicado paragénesis minerales identificadas en el yacimiento Potosí (Muñoz Gómez y Campos Dueñas, 1992; Muñoz Gómez, 1995 y Lewis et al., 1996). Esos resultados fueron analizados y procesados a la luz de nuevos criterios geoquímicos, mineralógicos, genéticos y de la distribución espacial de las paragénesis en el yacimiento Potosí, lo cual ha permitido

una revalorización de las paragénesis minerales. Se identificaron y se establecieron así cuatro paragénesis principales denominadas: A - B - C - D (Fig. 3).

Paragénesis - A - Fase inicial de cristalización de la espinela cromífera

En la paragénesis denominada - A - se incluyen los minerales acompañantes a las espinelas cromíferas masivas que se formaron en el proceso inicial de diferenciación magmática del complejo ultramáfico y en el inicio de la cristalización de los agregados cromíticos.

Las paragénesis se exponen siguiendo el orden de segregación de los minerales que las conforman.

Paragénesis - A<sub>1</sub> -:

- espinela cromífera - I -  $(Fe, Mg)(Fe, Al, Cr)_2O_4$
- laurita-erlichmanita - I -  $RuS_2 - OsS_2$
- platino nativo - Pt

Las fases platiníferas identificadas y representadas en la serie isomorfa laurita-erlichmanita ( $RuS_2 - OsS_2$ ), se encuentran localizadas en el seno de las espinelas cromíferas masivas, por lo que esta fase de minerales del grupo del platino se segregaron con anterioridad a la cristalización de los agregados cromíferos; en ese sentido, refiriéndose a las características de la laurita-erlichmanita, señaló Disther... en las secciones pulidas, los minerales se encuentran en forma de pequeños granos aislados muy pequeños (del orden de 1 a 5 micrones) y raramente alcanzan las primeras decenas de micrones. Los granos mas grandes tienen dimensiones del orden de los 50 micrones. Los minerales se destacan por poseer altos valores de la capacidad de reflejo en relación con las cromoespinelas. Generalmente los cristales están constituidos por una sola fase distinguiéndose por la forma idiomórfica, tabular o laminar de sus cristales... p. 22 (Disther et al., 1989).

En la paragénesis - A<sub>1</sub> - se incluye la existencia de platino nativo, reportada por Kenarev (1966), en forma de descomposición de solución sólida, lo que constituye una particularidad de la mineralización platinífera en las menas cromíferas masivas del yacimiento Potosí, al estar presente fases de los elementos: Ru - Ir - Os (laurita-erlichmanita) y fase de los elementos: Pt - Rh - Pd (platino nativo).

Además, existen los sulfuros magmáticos primarios (Proenza, 1998), en el seno de las espinelas cromíferas, sin considerar la formación de las soluciones sólidas con la fase platinífera explicada anteriormente, por lo que se

incluye una paragénesis independiente con predominio de sulfuros de hierro, níquel, cobre y laurita-erlichmanita-II en textura laminar con calcopirita-I y pentlandita-I, la cual queda representada como sigue:

Paragénesis - A<sub>2</sub> -:

- espinela cromífera - I (Fe, Mg)(Fe, Al, Cr)<sub>2</sub> O<sub>4</sub>
- pirrotina - I Fe<sub>1-x</sub> S
- calcopirita - I CuFeS<sub>2</sub>
- pentlandita - I - (Fe, Ni)<sub>8</sub> S<sub>9</sub>
- laurita-erlichmanita - II - RuS<sub>2</sub> - OsS<sub>2</sub>

Si se consideran ambas paragénesis, las menas cromíferas del yacimiento Potosí incluyen en su seno las fases platiníferas existentes en soluciones sólidas y en sulfuros magmáticos primarios, por lo que la paragénesis general quedaría conformada por:

Paragénesis - A<sub>3</sub> -:

- espinela cromífera - I -(Fe, Mg)(Fe, Al, Cr)<sub>2</sub> O<sub>4</sub>
- laurita-erlichmanita - I - RuS<sub>2</sub> - OsS<sub>2</sub>
- platino nativo - Pt
- pirrotina - I - Fe<sub>1-x</sub> S
- calcopirita - I - CuFeS<sub>2</sub>
- pentlandita - I - (Fe, Ni)<sub>8</sub> S<sub>9</sub>
- laurita-erlichmanita - II - RuS<sub>2</sub> - OsS<sub>2</sub>

Durante el proceso de cristalización de las espinelas cromíferas masivas y mediante mecanismos similares de la segregación de fases idiomórficas de la serie laurita-erlichmanita, pero a un intervalo de temperaturas más bajas, se formaron cristales idiomórficos de rutilo, así como también algunas texturas típicas de descomposición de soluciones sólidas en texturas laminar y emulsionadas en la masa de los agregados cromíferos, las que se manifiestan discontinuamente (Muñoz Gómez, J. N., 1988). La paragénesis está representada por:

Paragénesis - A<sub>4</sub> -:

- espinela cromífera - I - (Fe, Mg)(Fe, Al, Cr)<sub>2</sub> O<sub>4</sub>
- rutilo - I - TiO<sub>2</sub>

Paragénesis - B - Fase final de cristalización y agrietamiento de la espinela cromífera

En la paragénesis - B - se recogen los minerales metálicos asociados a las espinelas cromíferas, de génesis posterior a los que constituyen la paragénesis - A -; los minerales están localizados en los sistemas de microagrietamiento de los agregados cromíferos. En la paragénesis se incluye el olivino, el cual se asocia directamente a los agregados de espinelas cromíferas. En una primera etapa se formó el rutilo-II y luego sulfuros magmáticos primarios de hierro, cobre y níquel. La paragénesis - B - está representada por:

Paragénesis - B<sub>1</sub> -:

- espinela cromífera - I - (Fe, Mg)(Fe, Al, Cr)<sub>2</sub> O<sub>4</sub>
- olivino - (Mg, Fe)<sub>2</sub> SiO<sub>4</sub>
- rutilo - II - TiO<sub>2</sub>

El resto de los minerales en las microgrietas de las

espinelas cromíferas masivas quedan incluidos en la paragénesis siguiente:

Paragénesis - B<sub>2</sub> -:

- espinela cromífera - I - (Fe, Mg)(Fe, Al, Cr)<sub>2</sub> O<sub>4</sub>
- laurita-erlichmanita - II - RuS<sub>2</sub> - OsS<sub>2</sub>
- pentlandita - II - (Fe, Ni)<sub>8</sub> S<sub>9</sub>
- pirrotina - II - Fe<sub>1-x</sub> S
- calcopirita - II - CuFeS<sub>2</sub>
- pirita - I - FeS<sub>2</sub>
- millerita - I - NiS
- crisotilo - (Mg, Ni, Al)<sub>6</sub> Mg<sub>9</sub> (Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>8</sub>
- antigorita - Mg<sub>6</sub> (Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>8</sub>
- enstatita - (Mg, Fe)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>

La existencia de la fase platinífera (RuS<sub>2</sub> - OsS<sub>2</sub>) en asociación con los sulfuros de hierro, níquel y cobre se manifiesta en forma de solución sólida, similar a la analizada anteriormente (Paragénesis - A -), pero en este caso, la segregación y cristalización y la correspondiente descomposición de la solución sólida es posterior, ya que las mismas se ubican en los sistemas de microagrietamiento de los agregados cromíferos. En esta paragénesis hay un desarrollo diferenciado en la abundancia de sulfuros: los más frecuentes son la pirrotina y pirita, y le siguen en ese orden, la calcopirita y en menor grado la pentlandita y millerita.

Paragénesis - C - Fase de serpentinización de los complejos máficos y ultramáficos

En la paragénesis - C - se asocian los minerales formados durante el proceso final de segregación y cristalización de las espinelas cromíferas masivas. Es de destacar que la característica esencial de esta paragénesis es la presencia de sulfuros formados durante el proceso de serpentinización de los complejos máficos y ultramáficos, y la formación de minerales del grupo de la serpentina, esencialmente crisotilo y antigorita a expensa del olivino y otros minerales ferromagnesianos, los que se presentan en forma de relictos debido a la intensidad de los procesos de serpentinización.

A criterios de P. Ramdohr, la existencia de mackinawita y de heazlewoodita, corrobora el proceso de serpentinización en los complejos máficos y ultramáficos, incluyendo además, la formación de magnetita secundaria a expensas del olivino y en condiciones de alto nivel del potencial del oxígeno; en ese sentido Ramdohr expone: ... during the alteration of olivine to serpentine only small part of the iron enters into the serpentine, the rest forms a network of magnetite... (p. 932) (Ramdohr, 1980). La existencia en esta paragénesis de heazlewoodita, mackinawita y minerales serpentiniticos, asociada a las espinelas cromíferas masivas, permite establecer desde el punto de vista geoquímico una removilización general del hierro, níquel y cobalto en el complejo ultramáfico serpentinizado.

Paragénesis - C -

- Espinela cromífera - I - (Fe, Mg)(Fe, Al, Cr)<sub>2</sub> O<sub>4</sub>

- Olivino -  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
- Pentlandita - II -  $(\text{Fe,Ni})_8\text{S}_9$
- Laurita -  $\text{RuS}_2$
- Erlichmanita - II -  $\text{OsS}_2$
- Heazlewoodita -  $\text{Ni}_3\text{S}_2$
- Mackinawita -  $\text{FeS}$
- Pirita - II -  $\text{Fe}_2\text{S}$
- Magnetita -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- Crisotilo -  $(\text{Mg, Ni, Al})_6\text{Mg}_9(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$
- Antigorita -  $\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$
- Enstatita -  $(\text{Mg, Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$
- Anortita -  $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$

Paragénesis - D - Fase de emplazamiento de los diques de gabro-pegmatitas

La paragénesis - D - está vinculada espacial y genéticamente con los diques de gabro-pegmatitas y en interrelación con las menas cromíferas masivas; dada sus particularidades y su yacencia, los diques de gabro-pegmatitas constituyen la litología más joven en el área de estudio, al ser cortantes con todas las litologías existentes. Las espinelas cromíferas-II existentes en los diques de gabro-pegmatitas, presentan estructuras brechoides y se encuentran dispersas y fragmentadas en la masa de los diques de gabro-pegmatitas; los fragmentos tienen dimensiones desde los primeros milímetros hasta 40-70 centímetros, ocasionalmente mayores. Los fragmentos están englobados en anortita o en piroxenos (enstatita), o en ambos silicatos, lo que corrobora que la presencia de las espinelas cromíferas en los diques de gabro-pegmatitas no fueron cristalizadas, a partir del fundido gabroide; contribuye a la afirmación anterior la estructura brechoide ya mencionada, de los agregados cromíticos. No obstante, se demuestra a través de la composición química, diferencias substanciales entre las espinelas cromíferas que se localizan en los diques de gabro-pegmatitas con las cromíferas masivas y con las cromíferas diseminadas.

Los sulfuros están presentes en los diques de gabro-pegmatitas; entre los más comunes se encuentran la calcopirita-III, pentlandita-III y en menor grado pirita-III y millerita-II. La pentlandita es idiomórfica con cristales bien desarrollados, que en ocasiones alcanzan hasta 1,5 centímetros. Es común observar en la superficie de las muestras óxidos e hidróxidos de hierro en los diques de gabro-pegmatitas, lo que indica el desarrollo de procesos supergénicos con la alteración de los sulfuros de hierro, níquel, cobre y minerales del grupo de la serpiente -crisotilo y antigorita-. En las espinelas cromíferas que yacen en los diques de gabro-pegmatitas, se localizan cristales de rutilo tanto en fases independientes, como en los sistemas de microagrietamiento de los agregados cromíferos.

De acuerdo con el análisis realizado, la paragénesis - D - está integrada por la composición mineralógica siguiente:

Paragénesis - D -

- Espinela cromífera - II -  $(\text{Fe, Mg})(\text{Fe, Al, Cr})_2\text{O}_4$
- Olivino -  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
- Pentlandita - III -  $(\text{Fe,Ni})_8\text{S}_9$
- Calcopirita - III -  $\text{CuFeS}_2$
- Pirrotina - III -  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$
- Laurita-erlichmanita - III -  $\text{RuS}_2 - \text{OsS}_2$
- Pirita - III -  $\text{Fe}_2\text{S}$
- Millerita - II -  $\text{NiS}$
- Rutilo- I -  $\text{TiO}_2$
- Rutilo - II -  $\text{TiO}_2$
- Anortita -  $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$
- Enstatita -  $(\text{Mg, Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$
- Crisotilo -  $(\text{Mg, Ni, Al})_6\text{Mg}_9(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$
- Antigorita -  $\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$

#### ORDEN CRONOLÓGICO DE FORMACIÓN DE LAS PARAGÉNESIS MINERALES

El orden cronológico de formación de las paragénesis minerales existentes en las menas cromíferas masivas del yacimiento Potosí, donde se incluyen los agregados cromíferos en los diques de gabro-pegmatitas, está estructurado en el orden cronológico de formación de las paragénesis minerales (Paragénesis: A-B-C-D, Fig. 3), en estrecha relación con los estadios o fases de mineralización y los eventos geólogo-estructurales de carácter regional que sirvieron de control a las condiciones fisicoquímicas en las cuales se formaron los minerales identificados.

No obstante, el orden cronológico de formación de las paragénesis siguen un orden en el tiempo geológico, en el proceso de segregación de los minerales que las conforman, desde la paragénesis - A - hasta la paragénesis - C -. La paragénesis - D -, que incluye los diques de gabro-pegmatitas, y los minerales asociados se emplazaron en la fase final de segregación de las litologías máficas y ultramáficas y su edad se corresponde en el tiempo geológico con la paragénesis - C -. Lo anterior queda expuesto en la Fig. 3 que representa el orden cronológico de formación de las paragénesis minerales del yacimiento Potosí. En ese sentido, las fases o estadios de mineralización tienen correspondencia espacial y genética con las paragénesis minerales, y recogen todos los eventos geológicos que conllevaron a la formación de los cuerpos minerales cromíticos y su posterior complicación mineralógica.

Paragénesis - A -

La fase de cristalización inicial de la espinela cromífera, desarrollada durante el proceso de diferenciación magmática en la antigua corteza oceánica, en correspondencia con los criterios de Coleman (Coleman, R. G.; 1977), se efectuó a altas temperaturas, alrededor del intervalo 1 500 -1 200 °C, en la zona de transición manto-corteza, lo que caracteriza su ubicación espacial

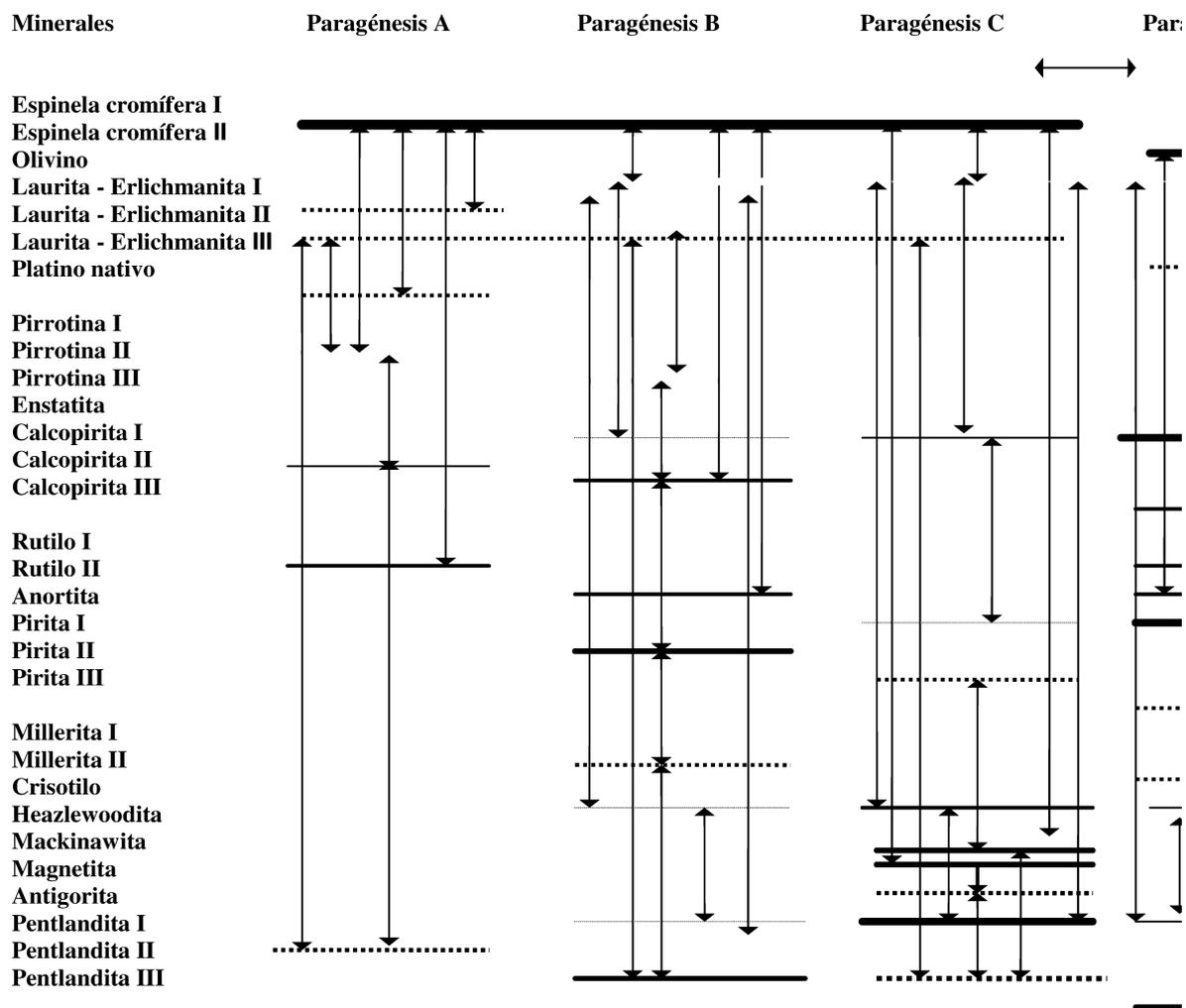


Fig. 3. Orden cronológico de formación de las paragénesis minerales. Yacimiento Potos , Moa, Holgu n, Cuba.

(Proenza, 1998); cristalizaron en primer lugar los minerales de las fases del grupo de platino, dado su alto grado de fusión, criterio sustentado por varios autores, entre ellos Cabri (Cabri, J. L., 1981), inmediatamente después cristalizó el rutilo-I en sus diferentes formas de existencia. Un incremento sostenido del contenido relativo del azufre primario en el fundido cromítico, permitió la cristalización de sulfuros magmáticos primarios de hierro, níquel y cobre.

Las condiciones físico-químicas y el sostenido decremento de la temperatura permitieron la cristalización idiomórfica de los minerales del grupo del platino y el rutilo, así como la existencia de texturas de descomposición de soluciones sólidas en sus diferentes variedades (laminar y de emulsión, las más difundidas) entre los agregados cromíferos y el rutilo.

El grado de fugacidad del azufre incrementado hacia el final de la fase de mineralización, queda demostrado en la composición mineralógica de la paragénesis - A - con la presencia de los sulfuros magmáticos primarios, en correspondencia con los análisis isotópicos efectuados por Proenza (Proenza, 1998); estas consideraciones han sido publicadas con anterioridad (Disther, V. V.; Falcon, H. J.; Muñoz Gómez, J. N.; Campos Dueñas, M.; 1989)

(Muñoz Gómez, J. N. y Campos Dueñas, M.; 1992) (Muñoz Gómez, J.N.; 1995) (Proenza, 1998).

Paragénesis - B -

En el proceso cronológico de cristalización de los minerales se continúa con la formación de los minerales desarrollados en los sistemas de microagrietamiento de los agregados cromíticos; en este estadio o fase de mineralización se produce la cristalización de las menas cromíferas, en las cuales se desarrollan texturas metamórficas debido a los efectos del dinamometamorfismo a que fueron sometidas; estos procesos quedan bien impregnados en los agregados cromíferos a causa de la alta dureza de las espinelas cromíferas.

En la fase silicatada se segregaron simultáneamente el olivino y la espinela cromífera. En los sistemas de agrietamiento cristalizan el rutilo - II, los sulfuros magmáticos y la serie isomórfica de laurita-erlichmanita - II, en descomposición de soluciones sólidas con la pirrotina - II y la pentlandita - II. La existencia de los sulfuros de hierro, níquel, cobre, osmio y rutenio sirve de fundamento para asegurar que el papel activo del azufre se mantuviera relativamente alto hacia las postrimerías del estadio de mineralización.

### Paragénesis - C -

El siguiente estadio o fase de mineralización (Fase de Serpentinización de los Complejos Máficos y Ultramáficos), representado en la paragénesis - C -, vincula las formaciones mineralógicas desarrolladas durante el proceso de serpentinización de los complejos máficos y ultramáficos del corte teórico del complejo ofiolítico. Los minerales típicos representados son: heazlewoodita, mackinawita, magnetita secundaria y minerales serpentiniticos. Los minerales formados durante esta paragénesis están vinculados a las espinelas cromíferas masivas (espinelas cromíferas - I).

### Paragénesis - D -

La fase emplazamiento de los diques de gabro-pegmatitas, están representados por la presencia de minerales petrogénicos, fundamentalmente anortita y piroxenos (enstatita), de acuerdo con la nomenclatura actual (Morimoto, 1988), así como por la mineralización sulfurosa y la existencia de minerales hipergénicos (óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso) y de la corteza de intemperismo. Se incluyen, además, los surgidos por la alteración secundaria de las espinelas cromíferas: kammerita, eskolaíta, uvarovita y mariposita.

Se destaca la presencia de espinelas cromíferas brechoide denominada en el esquema cronológico de los minerales como espinela cromífera - II, incorporada a los diques de gabro-pegmatitas al penetrar por zonas de fallas cortantes a los cuerpos cromíferos; el carácter diseminado y anguloso de sus fragmentos así lo verifica. El proceso completo de formación de los minerales se representa en el Orden Cronológico de Formación de las Paragénesis Minerales del yacimiento Potosí. (Fig. 3)

Constituye un aporte a la mineralogía de la mineralización cromífera y a la metalogenia endógena de la región de Moa-Baracoa, la elaboración, por primera vez, del Orden Cronológico de Formación de las Paragénesis Minerales.

### CONCLUSIONES

- Se corroboró la presencia de minerales del grupo del platino, asociados a las espinelas cromíferas, a los sulfuros magmáticos primarios en los sistemas de microagrietamiento y en los diques de gabro-pegmatitas, representados por los sulfuros de rutenio y de osmio en la serie isomórfica laurita-erlichmanita y emulsión de platino nativo.
- La existencia del dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), en forma de rutilo, en las menas cromíferas masivas del yacimiento Potosí y en los diques de gabro-pegmatitas, constituye una particularidad en la composición mineralógica de las menas cromíferas en la región Moa-Baracoa y se distingue por sus contenidos del resto de los yacimientos cromíferos podiformes cubanos y extranjeros.
- La identificación y establecimiento de cuatro paragénesis minerales asociadas a la mineralización cromífera del yacimiento Potosí, es un aporte al co-

nocimiento científico de la mineralogía de las cromititas y a la metalogenia endógena en la región de Moa-Baracoa, y es el primer yacimiento de espinelas cromíferas del país donde se han establecido.

- La existencia de sulfuros magmáticos primarios - pirrotina-pentlandita-calcopirita y en menor grado millerita, demuestran una alta concentración del níquel y el cobre y una elevada actividad geoquímica asociada a la mineralización cromífera que se extiende hasta los diques de gabro-pegmatitas, indicando que el proceso de cristalización de la espinela cromífera se desarrolló muy próximo al complejo cumulativo máfico, en los cuales el comportamiento geoquímico del níquel y del cobre es mayor, así como la fugacidad del azufre en comparación con el complejo ultramáfico.

### BIBLIOGRAFÍA

- CABRI, J. L.: Platinum groups elements: mineralogy, geology and recovery, Special vol. 23, pp. 267, Ed. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, CIM, Ottawa, 1981
- COLEMAN, R. G.: Ophiolites: Ancient oceanic lithosphere?, pp. 240, Minerals-Rocks Ser. 12, New York Springer, 1977.
- Disther, V. V., H. J. Falcón, J. N. Muñoz Gómez, D. M. Campos: "Disulfuros de rutenio, osmio, rodio y otros minerales platiníferos en los macizos hiperbasálticos de Cuba Oriental", Academia de Ciencias de Cuba (Inédito), 1989.
- KENAREV, V.: "Características mineralógicas del yacimiento Potosí", Rev. Tecnológica, IV :3-6, 1966
- LEWIS, J. F., J. N. Muñoz Gómez, J. C. LABRADA GÓMEZ AND P. GENYONG: "Mineralogy and petrology of the Potosí and Cayoaguam ophiolite rocks and associated podiform chromite deposits", 30<sup>th</sup> International Geological Congress, Beijing, R. P. China, pp. 1-16, 1996
- MORIMOTO, N.: "Nomenclature of pyroxenes", American Mineralogist, 73 :1113-1123, 1988.
- MUÑOZ GÓMEZ, J. N.: Estructuras de las menas, 55 p., Editorial ENPES, Ciudad de La Habana, 1988.
- : "Las paragénesis minerales del yacimiento Potosí y su sucesión genética, Moa, Holguín, Cuba", Minería y Geología, XII (3) :23-31, 1995.
- : "Geoquímica y mineralogía de la mineralización cromífera asociada al complejo ofiolítico en la región de Moa-Baracoa, Moa, Holguín, Cuba", Tesis de Doctorado, ISMM de Moa, Departamento de Geología, 167 pp., 1997.
- MUÑOZ GÓMEZ, J. N. Y M. CAMPOS DUEÑAS: "Las paragénesis minerales en las menas cromíferas del yacimiento Potosí, Moa", Minería y Geología, IX (3) :3-13, 1992.
- PROENZA, J.: "Mineralización de cromitas en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa, Cuba. Ejemplo del yacimiento Mercedesita", Tesis de Doctorado, ISMM de Moa, Departamento de Geología, 227 pp., 1998.
- RAMDORHR, P.: The ore minerals and their intergrowths, 2 ed., Oxford, 2 vol., Pergamon Press, RFA, 1980.
- UYTENBOGAARDT, W. AND E. A. J. BURKE: Tables for Microscope Identification for ore minerals, 428 pp., Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1971.