

Modelación descriptiva y de ley-tonelaje para pronosticar depósitos de cromitas en Cuba

Roberto Díaz Martínez¹ / rdmart@ismm.edu.cu

Tendai Njila¹ / tnjila@yahoo.es

Joaquín Proenza Fernández² / joaquin@ub.es

RESUMEN

La modelación descriptiva y de ley-tonelaje de los yacimientos minerales de cromitas podiformes de la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa permite pronosticar la posible existencia de otros depósitos en la región. El presente artículo expone el contenido de los atributos esenciales que describen las condiciones geológicas de formación de estos objetos geológicos y su utilidad como instrumento metodológico en el pronóstico de los recursos minerales. Se realiza una exposición de la formación de los yacimientos minerales de cromitas, resaltando aquellos juicios y esquemas que han marcado momentos de transformación cuantitativos y las consecuentes deducciones teóricas sobre las probabilidades de ocurrencia de depósitos cromíticos, con su estimada ley y tonelaje. Se hace la revisión, análisis y generalización de los fundamentos teóricos de la Metodología de las Tres Partes, utilizada para evaluar los modelos de leytonelaje, su aplicación, formatos y finalidades. Un componente esencial de la estimación de los recursos no descubiertos es el modelo de depósito mineral y los datos de ley-tonelaje asociados. El primero es útil en la planificación de la exploración y la evaluación de recursos al permitir identificar en el campo los depósitos y en los mapas geológicos las áreas donde hay posibilidad de ocurrencia. El segundo se emplea en la evaluación de recursos para pronosticar la probabilidad de diferentes combinaciones de ley y tonelaje que pueden ocurrir en depósitos no descubiertos; es útil además para decidir durante la exploración qué tipo de depósitos cumple con los objetivos económicos de una empresa de exploración.

PALABRAS CLAVE

Cromitas podiformes, modelo descriptivo, evaluación de recursos, ley-tonelaje.

Descriptive and grade -tonnage modelling to forecast chromite deposit in Cuba

ABSTRACT

This present investigation represents a descriptive and a grade and tonnage model for the known podiform chromite deposits in the Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt, with the objective of presenting a forecast on the possible existence of other deposits in the same region. The contents of the essential attributes are exposed, and these describe the geological conditions of formation of the mentioned deposits and their usefulness as a methodological instrument in the prediction of mineral resources; the formation of chromite deposits is presented, highlighting those aspects which have marked the moments of quantitative transformation and the consequent theoretical deductions on the probabilities of occurrence of chromite deposits, with their estimated grades and tonnages. A review is made on the fundamental aspects of THREE-PART resource assessment methodology which is applied in the evaluation of the grade and tonnage models. An essential component in the estimation of unknown resources is the creation of the mineral deposit model and the associated grade and tonnage data: the former is essential in exploration planning and evaluation of resources since it allows the identification of deposits in the field and perspective areas on geological maps, while the latter is employed in the evaluation of resources in order to estimate the probability of different combinations of grades and tonnages of unknown deposits that can occur in a given area. Also, it is useful in the exploration when making decisions on which mineral deposits comply with the economic objectives of an exploration company.

KEY WORDS

Podiform chromite, descriptive model, grade and tonnage model, resources evaluation.

INTRODUCCIÓN

Los trabajos dirigidos a establecer las potencialidades minerales de una región requieren de la estimación de los recursos desconocidos. El método de evaluación de los recursos, conocido como el proceso de evaluación de recursos minerales de British Columbia, Canadá, fue descrito por Kilby (1995) y Grunsky (1995), quienes se basaron en la Metodología de Evaluación de las Tres Partes, desarrollada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos.

Un componente esencial de la estimación de los recursos no descubiertos es la creación del modelo descriptivo del depósito mineral y los datos de ley-tonelaje asociados. La estimación cuantitativa de los recursos no descubiertos en una región dada se puede llevar a cabo sobre la base de estos modelos. Ariosa y Díaz-Martínez (2001) introducen la modelación descriptiva para los yacimientos ferroniquelíferos del nordeste de Cuba.

El objetivo de este trabajo es elaborar y presentar, por primera vez en Cuba, el modelo descriptivo y el de ley-tonelaje para los yacimientos de cromitas asociados a la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa (FOMB), facilitando con ello la estimación de los depósitos aun no descubiertos. El modelo descriptivo es útil para la planificación de la exploración y la evaluación de recursos ya que permite identificar las áreas donde existe posibilidad de ocurrencia de depósitos de cromitas, en tanto que el modelo de ley-tonelaje permite pronosticar la probabilidad de diferentes combinaciones de ley y tonelaje que pueden ocurrir en los depósitos no descubiertos en un área especificada dentro de la FOMB; además es útil durante la etapa de exploración ya que decide qué tipos de depósitos cumplen con los objetivos económicos de la empresa minera.

MARCO GEOLÓGICO DE LOS DEPÓSITOS DE CROMITAS

La isla de Cuba contiene los mayores afloramientos de rocas ofiolíticas de toda la región del Caribe (Khudoley y Meyerhoof, (1971). Estas rocas afloran en una franja discontinua de más de 1 000 km de longitud y un ancho que puede llegar a 30 km, en la parte norte de la isla (Fig. 1). El contexto geológico regional en que se desarrollan los yacimientos de cromitas es propio de un arco de isla con amplio desarrollo de rocas ultrabásicas serpentinizadas con características geoquímicas de zonas de suprasubducción. Los depósitos de cromitas más importantes de la isla se localizan en la porción norte oriental de Cuba, ocupada actualmente por la FOMB.

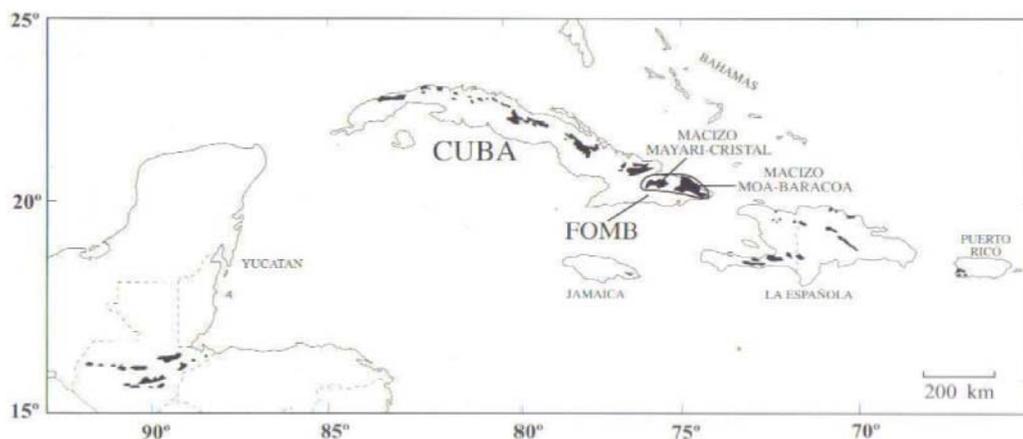


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del cinturón hiperbasítico cubano señalando la posición de la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa.

Según Iturralde-Vinent (1996) esta faja representa un cuerpo alóctono de forma tabular con una longitud de 170 km y un espesor que raramente sobrepasa los mil metros (Fig. 2). Ella se compone de dos macizos principales: Mayarí-Cristal y Moa-Baracoa (Proenza

et al., 1999). En opinión de varios investigadores (Fonseca *et al.*, 1985; Iturralde-Vinent, 1999; Proenza *et al.*, 1998) la FOMB está constituida, de la base al techo, por peridotitas con textura de tectonitas, acumulados ultramáficos, acumulados máficos, diques de diabasas (?) y por secuencias efusivo-sedimentarias.

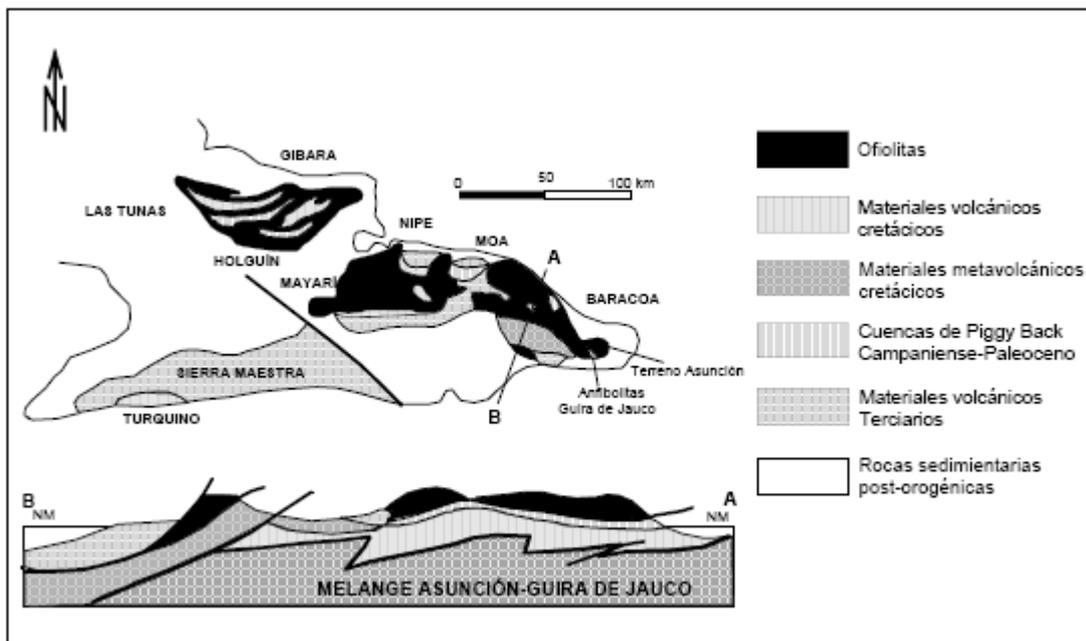


Figura 2. Esquema geológico simplificado de Cuba oriental (tomado de Iturralde-Vinent, 1996, modificado por los autores).

Las ofiolitas se encuentran cabalgando las rocas vulcanosedimentarias del arco de isla cretácico, estas últimas cubiertas transgresivamente por secuencias flyschoides y olistostrómicas de edad Maestrichtiense a Paleoceno.

Las secuencias mantélicas y de acumulados de la FOMB se han datado como Jurásico-Cretácico temprano y las rocas vulcanosedimentarias como Hauteriviense (?) - Campaniense (?) (Iturralde-Vinent, 1996).

Los depósitos de cromita pueden ser agrupados en tres distritos mineros de acuerdo a la composición química de la cromita: distrito Moa-Baracoa (cromitas ricas en Al), distrito Sagua de Tánamo (cromitas ricas en Al y en Cr) y distrito Mayarí (cromitas ricas en Cr). Las cromitas pobres en Cr (ricas en Al y Ti) se localizan en la denominada *Moho Transition Zone* (MTZ), la cual se compone de harzburgitas, peridotitas impregnadas (con plagioclasa y clinopiroxeno), sills y diques de gabro. Por el contrario, las cromitas ricas en Cr (pobres en Al y Ti) están encajadas en harzburgitas y dunitas representativas de sectores relativamente profundos del manto. Las cromitas ricas en Al se han formado a partir de un magma de afinidad de basaltos de cuenca de *back arc* (BABB), mientras que las cromitas ricas en Cr lo hicieron a partir de un magma análogo a una boninita.

Distrito Moa-Baracoa

El distrito Moa-Baracoa contiene más de 100 depósitos de cromitas de grado refractario (Ostroumov *et al.*, 1986; Fonseca *et al.*, 1992). Los principales cuerpos de cromitas presentan formas lenticulares y se ubican en la MTZ, aunque se han descrito pequeñas capas de cromititas en los niveles de gabros (bandeados) con texturas cumulosos (Torres, 1987). También existen pequeños cuerpos brechoides de cromititas incluidos en diques tardíos de pegmatoides gabroicos. Los principales cuerpos de cromititas son concordantes con la foliación y alineación de las peridotitas encajantes (Guild, 1947; Kravchenko y Vázquez, 1985; Fonseca *et al.*, 1992; Proenza, 1997). La mayoría de los depósitos son de pequeño tamaño, aunque cuatro de ellos: Amores, Loro, Yarey, Piloto (excluyendo Merceditas) tienen reservas estimadas superiores a 100 000 t. Otros

depósitos (Cayo Guam, Potosí) tienen una larga historia de explotación, de ellos se han extraído más de 30 000 t. En la Figura 3 se muestran algunos de los depósitos de cromita del distrito Moa-Baracoa (Amores, Cayo Guam y Potosí).

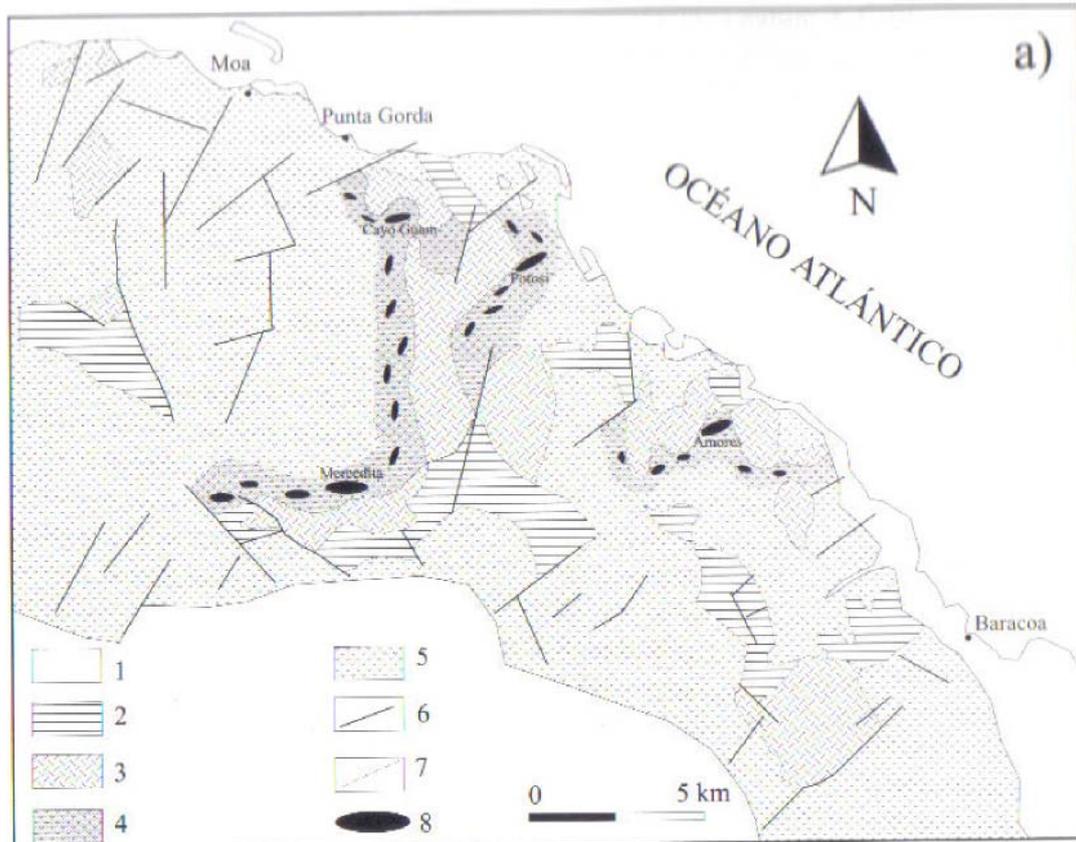


Figura 3. Mapa geológico (adaptado a partir de Nagy *et al.*, 1976) y localización de los principales depósitos de cromita del distrito Moa-Baracoa. 1) Rocas sedimentarias post-orogénicas, 2) Rocas volcánicas cretácicas, 3) Gabro, 4) La Moho Transition Zone (harzburgitas, dunitas, peridotitas "mpregnadas, sills de gabro diques de gabros y pegmatoides gabroicos, 5) Harzburgitas y dunitas, 6) Falla, 7) Contacto tectónico, 8) Depósito de cromita.

Distrito Sagua de Tánamo

El distrito de Sagua de Tánamo se encuentra en el extremo más oriental del Macizo Mayarí-Cristal. En esta zona la secuencia ofiolítica se caracteriza por el predominio de niveles de peridotitas, los cuales presentan un alto grado de alteración a la serpentinita. La estructura de la zona es compleja y representa una típica zona de *melange* en la cual están presentes los mantos de ofiolitas. Según Murashko y Lavandero (1984) en este distrito existen 35 depósitos de cromita, de los cuales 10 son de tipo metalúrgico y el resto de tipo refractario. Los cuerpos de cromititas se caracterizan por ser lentes de pequeño tamaño; sus dimensiones oscilan, aproximadamente, entre 30 y 40 m de longitud, 10 a 20 m de anchura y entre 1 y 3 de espesor (Murashko y Lavandero, 1989). Según Kravchenko y Vázquez (1985) en este distrito se observan relaciones tanto concordantes como discordantes entre la orientación de los cuerpos de cromititas y la pseudoestratificación y la foliación de las peridotitas encajantes. Todos los cuerpos de cromititas están asociados a niveles donde las dunitas están intercaladas con harzburgita, pero los cuerpos suelen tener una envolvente dunítica. Estas peridotitas presentan un alto grado de alteración y están prácticamente transformadas a serpentinitas. Todos los depósitos del distrito Sagua de Tánamo se explotaron entre 1930 y 1940; en la actualidad no se explota ninguno. Rupertina, Negro Viejo y Santa Isabel (Fig. 4) son algunos de los depósitos de este distrito.

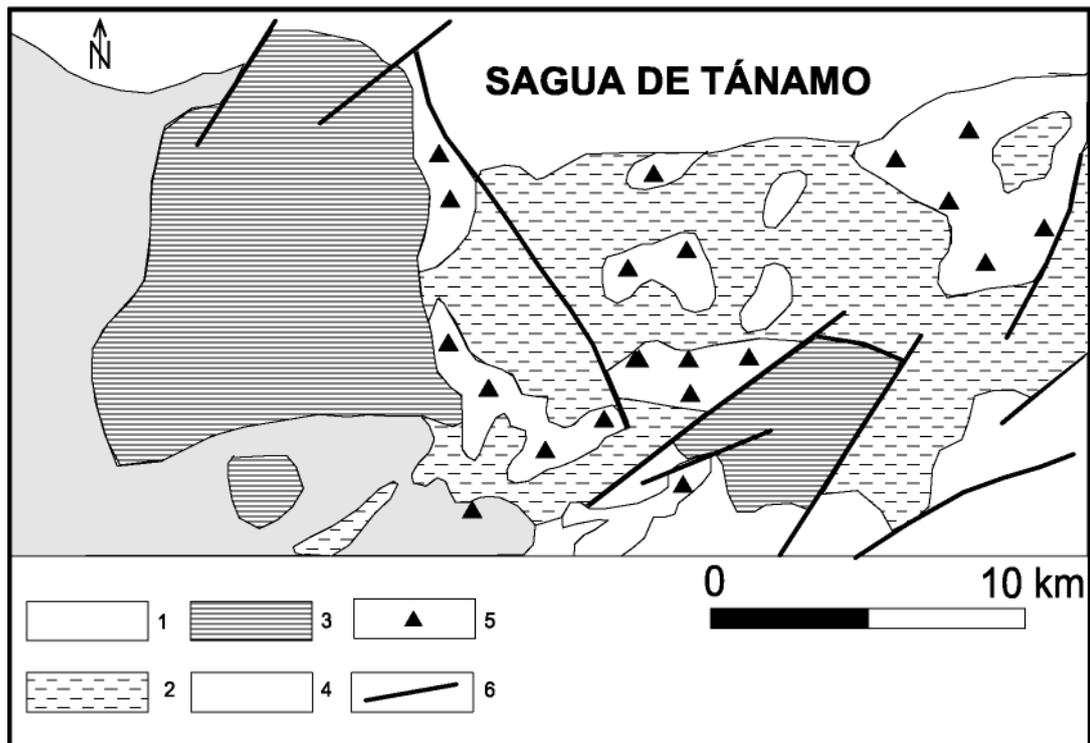


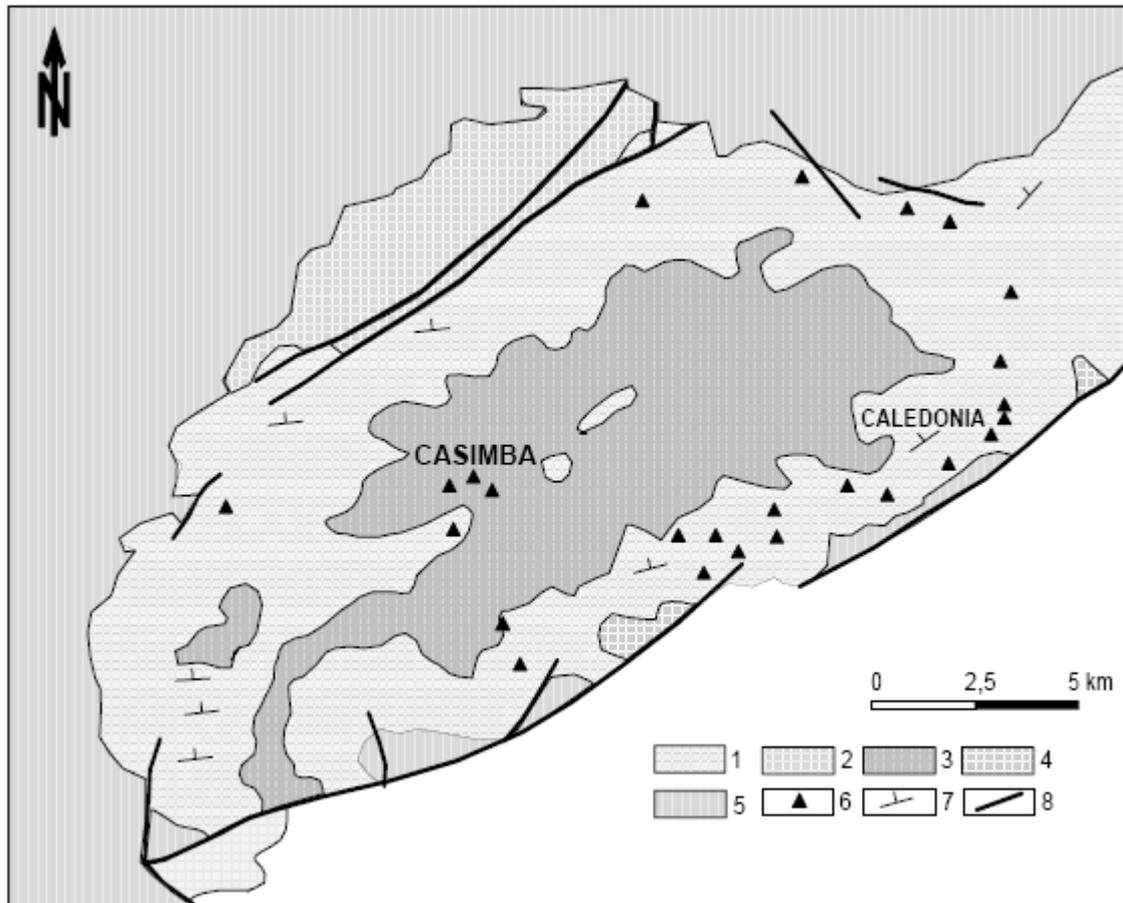
Figura 4. Mapa geológico esquemático y localización de los principales depósitos de cromita del distrito Sagua de Tánamo (adaptado a partir de Kravchenko y Vázquez, 1985). 1) harzburgitas, 2) zona de mélangé ofiolítico, 3) rocas volcánicas cretácicas, 4) rocas sedimentarias postorogénicas, 5) depósitos de cromitas, 6) fallas.

Distrito Mayarí

Se localiza en la parte occidental del Macizo Mayarí-Cristal. En él existen 7 yacimientos importantes: dos con más de 200 000 t y los otros con no menos de 10 000 t. Además se han descrito 32 indicios minerales sobre los cuales se abrieron 19 minas de las que se extrajeron alrededor de 500 000 t de mineral (Lavaut *et al.*, 1994). La mineralización de cromita se vincula a espesores continuos de dunitas encajadas en harzburgitas y a ciclos de alternancias de dunitas y harzburgitas. Según el mapa de Adamovich y Chejovich (1964), los depósitos de cromita se disponen en una zona de dirección noreste. La pseudoestratificación de las rocas

ultrabásicas y de gran parte de los cuerpos minerales presenta un rumbo hacia el noreste y un buzamiento hacia noroeste (Murashko, 1966).

En la Figura 5 se muestra la distribución de cromititas en el distrito Mayarí, señalando la ubicación de los depósitos Casimba y Caledonia.



5. Mapa geológico esquemático y localización de los principales depósitos de cromita del distrito Mayarí (adaptado a partir de Kravchenko y Vázquez, 1985). 1) harzburgitas y dunitas, 2) gabros y diques de diabasas, 3) lateritas, 4) rocas volcánicas, 5) rocas sedimentarias, 6) depósitos de cromitas, 7) foliación, 8) fallas.

METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MODELOS DESCRIPTIVO Y DE LEY TONELAJE

Los modelos que se presentan en este trabajo tienen dos componentes principales: 1) los rasgos descriptivos que caracterizan los depósitos en términos geológicos y 2) las distribuciones de ley-tonelaje de los depósitos ya conocidos.

La elaboración del modelo descriptivo de los yacimientos de cromitas asociados a la FOMB se fundamentó en la Guía para la elaboración de Perfiles Geológicos Descriptivos de Yacimientos Minerales, de Lefebure y Ray (1995).

Los datos fueron recogidos en una base de datos que incluye más de 42 depósitos de cromitas pertenecientes a los tres distritos mineros de la FOMB. Esta base de datos se elaboró a partir de los resultados aportados por numerosos trabajos de diploma, tesis de maestría y tesis de doctorado, así como publicaciones recientes.

Existen dos tipos principales de modelos de ley-tonelaje: los que utilizan los tonelajes y leyes de muestras o bloques dentro de los depósitos y los que usan los tonelajes y leyes de depósitos enteros como muestras (Singer, 1993). El primer tipo de modelo es utilizado para el análisis de reservas de menas y la valoración económica dentro de los depósitos, mientras que el segundo es utilizado para el análisis y comparación de grupos de depósitos no descubiertos. En el presente trabajo se utilizó precisamente el segundo, ya que el objetivo del trabajo fue estimar los depósitos no descubiertos.

Los modelos de ley-tonelaje fueron desarrollados por Singer, Mosier y Menzie (1993) basados en los modelos de ley-tonelaje elaborados

por Cox y Singer (1986), Mosier y Page (1988) y Bliss (1992). Estos tipos de modelos son útiles en la evaluación cuantitativa de los recursos y en el planeamiento de la exploración.

La construcción del modelo de ley-tonelaje comprendió tres pasos:

Paso 1: Se procedió a identificar los depósitos de cromitas ya explorados. Se identificaron 42 depósitos de cromitas con leyes y tonelajes conocidos.

Paso 2: Se agruparon las leyes medias de cromita, así como los tonelajes de cromitas calculados a la ley de corte (*cut-off*) más bajo disponible. Con estos datos se realizó el cálculo estadístico (Tabla 1) de los depósitos analizados en el modelo.

Tabla 1. Estadística resumida de los depósitos de cromitas analizados en el modelo.

Parámetros	Tonelaje	Ley
Mínimo	2.676694	1.390051
Primer cuartile	3.569115	1.470439
Median	4.30103	1.528531
Promedio	4.29444 1	1.545663
Tercer cuartile	5.178296	1.54682
Máximo	5.807082	1.761326
Varianza	0.787527	0.007068
Desviación Estándar	0.887427	0.084074
Error Estándar	0.136933	0.012973
Curtosis	-0.95254	0.111983
Moda	4	1.546543
Suma	180.3665	64.56888
Nivel de Confianza (80.0%)	0.178361	0.016898
Skewness (Asimetría)	-0.18079	0.755632
Cuenta	42	42
N/A	16	16

Todos los datos usados en el modelo representaron la misma unidad en la muestra, puesto que su mezcla a partir de depósitos y distritos mineros o de producciones antiguas y estimados de recursos recientes producen distribuciones bimodales o al menos no

lognormales que pueden introducir correlaciones entre las variables que son resultado de las unidades de muestras mezcladas.

Paso 3: Ploteo de los datos. Para el tonelaje y la mayoría de las leyes, es necesaria una transformación logarítmica. La finalidad del ploteo y de la estadística es determinar si los datos contienen poblaciones múltiples (Singer, 1993).

La Figura 6 muestra una matriz *scatterplot* de datos de ley vs tonelaje, transformados a logarítmicos de base 10. Este ploteo es generalmente una manera conveniente de comprobar interacciones entre variables. En los procedimientos de la valoración de recursos, objetos geológicos y tonelajes no deben ser correlacionables. La aplicación de métodos como el de la matriz *scatterplot* y los métodos de regresión pueden ser muy útiles en la comprobación del grado de correlación. En esta figura se puede ver que hay una correlación pobre entre las variables. Este fue rectificado por métodos de regresión.

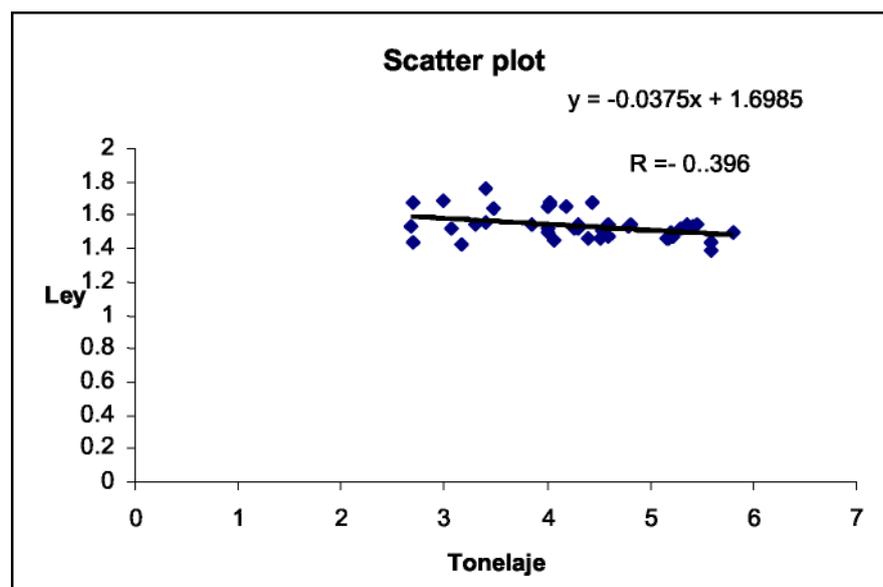


Figura 6. Gráfico de ley vs tonelaje.

El modelo de Ley-tonelaje se fundamentó en los trabajos de Cox y Singer (2003), los cuales exponen los aspectos contenidos en los mismos.

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE DEPÓSITOS DE CROMITAS NO DESCUBIERTOS EN LA FOMB

Una vez obtenido el modelo descriptivo y de ley-tonelaje de los yacimientos de cromitas se procedió a la estimación de la cantidad de depósitos aun no descubiertos en la FOMB mediante la aplicación de Metodología de las Tres Partes. Esta metodología fue propuesta por Singer (1993) y consiste en: 1) la delimitación de las áreas según los tipos de depósitos utilizando criterios geológicos; 2) la estimación de los tamaños de depósitos no descubiertos utilizando el modelo de Ley-Tonelaje; y 3) la estimación de la cantidad de los depósitos no descubiertos. A continuación se presenta la explicación de cada paso.

Parte I: Delimitación de las áreas

Para lograr la consistencia, se delimitan las áreas en regiones donde la geología permite la existencia de uno o más depósitos de cromitas. Estas áreas, denominadas trazados permisibles, se basan en los criterios geológicos derivados de los modelos de depósitos que son basados en los estudios de los depósitos conocidos dentro del área de estudio o más común fuera de esta. Se define los límites de los trazados permisible de manera que la probabilidad de ocurrencia de depósitos fuera del área de estudio sea despreciable, o sea, menos de 1 en 100 000 hasta 1 en 1 000 000.

Para la obtención de los trazados permisibles primeramente se delimitaron las áreas atendiendo a criterios litológicos y tectónicos. Más del 95 % de las áreas dentro de los trazados permisibles fueron ocupadas por peridotitas. Las áreas delimitadas solamente muestran aquellos depósitos de cromitas cuyas leyes y tonelajes se conocen (Fig. 7). Las manifestaciones, puntos de mineralización y denuncios de cromitas no se señalaron.

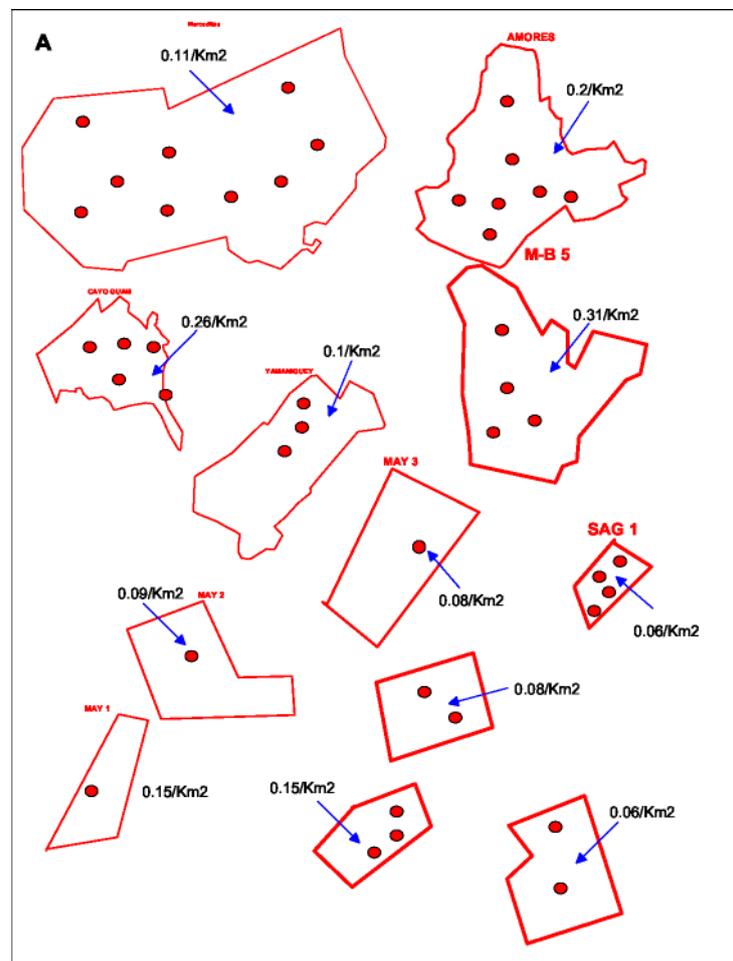


Figura 7. Delimitación de las áreas permisibles para la existencia de un depósito de cromitas en el distrito Mayarí -Baracoa en la FOMB. Los números representan la cantidad de depósitos por kilómetro cuadrado (densidad de depósitos).

Una vez delimitadas las 12 áreas o trazados permisibles se confeccionó el histograma representado en la Figura 8, donde se refleja la frecuencia del número de depósito por kilómetro cuadrado.

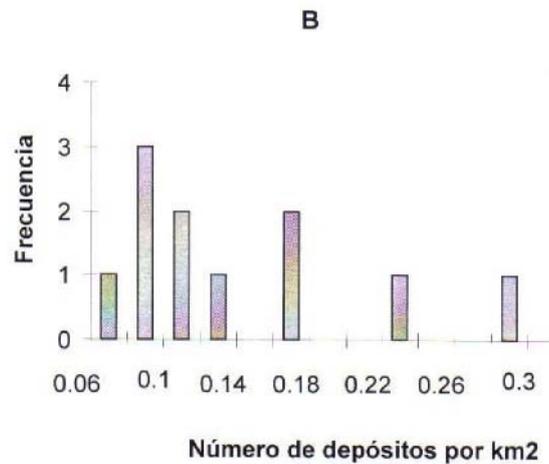


Figura 8. Histograma derivado de las densidades de depósitos (Número de depósitos por kilómetro cuadrado).

El cálculo de superficie de los 12 trazados permisibles se realizó automáticamente mediante un proceso de digitalización de mapas geológicos a escala 1:50 000 y 1:25 000. Se empleó el Golden Software Didger versión 3. Las densidades de depósitos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Áreas delimitadas y densidades de depósitos utilizadas en los modelos que se presentan en este trabajo. Los nombres refieren la localidad y sus depósitos cercanos.

Sectores	Áreas delimitadas		Depósitos de cromitas		Densidad (c/a)
	km ² (a)	Logaritmo	Cantidad (c)	Logaritmo	
Amores	34,66849	1,539935	7	0,845098	0,201912
Yamanigüey	30,02976	1,477552	3	0,477121	0,099901
Cayo Guam	18,87161	1,275809	5	0,69897	0,264948
Merceditas	77,50772	1,889345	9	0,954243	0,116117
M-B-5	12,84	1,108667	4	0,60206	0,31
Mayarí 1	6,530855	0,81497	1	0	0,153119
Mayarí 2	10,44873	1,019064	1	0	0,095705
Mayarí 3	13,08338	1,11672	1	0	0,076433
Mayarí 4	25,77	1,411138	2	0,30103	0,08
Mayarí 5	19,48941	1,289799	3	0,477121	0,15393
Mayarí 6	34,31578	1,535494	2	0,30103	0,058282
SAG-1	62,16541	1,793549	4	0,60206	0,064344
TOTAL			42		

Parte II: Estimación de los tamaños de depósitos no descubiertos

La parte crítica de la exploración de depósitos minerales y de la evaluación cuantitativa de los recursos minerales es la estimación de los tamaños de depósitos no descubiertos. Típicamente, este problema se discute empleando modelos de ley-tonelaje porque la fuente mayor de la variación de los tamaños de los posibles depósitos puede ser atribuida a las diferencias entre los tipos de depósitos (Singer y Kouda, 1999). En la evaluación cuantitativa de las Tres Partes se usan típicamente los modelos de ley-tonelaje previamente construidos, a no ser que los depósitos locales difieran de manera significativa de los que están en el modelo general. Estos modelos tienen una forma de distribución de frecuencia de los tonelajes y leyes medias de depósitos muy bien explorados de cada tipo. Ellos sirven como modelos para tonelajes y leyes de depósitos no descubiertos del mismo tipo ocurriendo en un marco geológico similar. Por diseño, estos modelos están enfocados en la distribución de leyes y tonelajes de depósitos minerales no descubiertos que la ocurrencia de los minerales.

Parte III: Estimación de la cantidad de depósitos probables

La tercera parte es la estimación de un número fijo, pero no conocido, de depósitos de cada tipo que existe en las áreas delimitadas. Hasta que no se perfora extensivamente el área en consideración, no se puede saber con certeza este número fijo, que puede ser cualquier número incluyendo cero. En la evaluación cuantitativa por el Método de las Tres Partes, los estimados del número de depósitos representan explícitamente la probabilidad (o un grado de confianza) de que un número fijo pero no conocido de

depósitos no descubiertos existe en el área delimitada. Estos estimados reflejan tanto la incertidumbre de lo que pueda existir y una medida de lo favorable para la existencia de un tipo de depósito. La incertidumbre se muestra por el rango de los estimados del número de depósitos asociado al rango de 90% a 10% o de 90% a 1%: una diferencia grande significa una incertidumbre grande. Lo favorable puede ser representado por el estimado del número de depósitos asociado a un nivel de probabilidad dado o por el número de depósitos esperado.

Consistencia de la evaluación cuantitativa de las tres partes

Para una estimación y evaluación subjetiva de depósitos minerales, debe haber una consistencia entre los modelos y el número de depósitos. En estos análisis, los estimados son consistentes internamente cuando las áreas trazadas son consistentes con los modelos descriptivos, los modelos de ley-tonelaje son consistentes con los depósitos conocidos en el área, y los estimados del número de depósitos son consistentes con los modelos de ley-tonelaje. Los prejuicios pueden ser introducidos a estos estimados por un modelo de ley-tonelaje erróneo o por falta de consistencia entre los estimados del número de depósitos y el modelo ley-tonelaje. La combinación de modelos de ley-tonelaje con los estimados del número de depósitos es fundamental en la traducción de los análisis de recursos por el geólogo en un lenguaje que un economista pueda entender. Por estas razones, la determinación de una densidad de un depósito mineral requiere definiciones no ambiguas de lo que es un depósito y cuáles son las reglas para la delimitación.

MODELO DESCRIPTIVO Y DE LEY-TONELAJE DE LOS YACIMIENTOS DE CROMITAS DE LA FAJA OFIOLÍTICA MAYARÍ-BARACOA

El modelo descriptivo se presenta siguiendo el formato de Lefebure y Ray (1995) modificado por los autores de este trabajo. El de ley-tonelaje se presenta según el formato de Cox y Singer (2003) del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

MODELO DESCRIPTIVO

Nombre: *Cromitas Podiformes*

Sinónimos: Cromitas tipo alpino, cromitas de asociación ofiolítica.

Productos y subproductos: Cr (puede contener elementos del grupo de platino (EGP) Os, Ir y Ru).

Ejemplos:

En Cuba: Merceditas, Amores, Loro, Yarey, Piloto, Cayo Guam, Caridad, Rupertina, Albertina, Guarina y Potosí.

En otros países: Castle Mountain Nickel (082ESE091) y Scottie Creek (092INW001) (Canadá); Guleman ore field (Turkey); Distrito Kalimash – Kukes-Tropoje, Bulquize y Distrito Todo Manco – Baternesh (Ofiolitas de Mirdita, Albania); Ofiolitas de Tiébaghi y Massif du Sud (Nueva Caledonia), Acoje y Masinloc-Coto (Zambales range/ophiolite, Luzon, Filipinas); Batamshinsk, Stepninsk, Tagashaisai y Main SE ore fields (Macizo Kempirsai, Urals del Sur, Rusia); Las Minas Xeraivado y Skoumtsa (Vourinos ophiolite, Grecia); Semail ophiolite (Oman); Troodos, Chipre; Los depósitos Luobusa, Donqiao, Sartohay, Yushi, Solun, Wudu y Hegenshan (China) todos mayores que 1,5 Mt.

Características geológicas

Descripción resumen: Depósitos de cromitas podiformes de forma tabular o lenticular dentro de las rocas ultramáficas ofiolíticas.

Escenario tectónico: Ambiente geodinámico intraoceánico de suprasubducción en la zona de transición entre la zona axial del arco volcánico y una cuenca trasera de arco (back arc basin); es el más favorable para explicar la mayoría de los rasgos geoquímicos y texturales de las cromitas de la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa.

Ambiente deposicional / escenario geológico: Las cromitas del distrito Moa-Baracoa, ricas en Al y Ti, se formaron a partir de magmas generados por tasas reducidas de fusión parcial, con afinidad de basaltos de cuenca de back arc (BABB). En cambio, las cromitas del distrito Mayarí, ricas en Cr y pobres en Ti, se formaron a partir de magmas generados por tasas altas de fusión parcial, con afinidad boninitica.

Edad de la mineralización: Cretácico Superior (Campaniense)-Paleoceno Inferior.

Tipos de rocas encajantes / tipos de rocas asociadas: Dunitas y harzburgitas en los distritos Moa-Baracoa y Mayarí y peridotitas serpentizadas en el distrito Sagua de Tánamo.

Forma del yacimiento: Los principales cuerpos de cromitas presentan formas lenticulares y tabulares. También existen pequeños cuerpos brechoides de cromitas incluidos en diques tardíos de pegmatoides gabroicos. Los principales cuerpos de cromitas son concordantes con la foliación y alineación de las peridotitas encajantes. La mayoría de los depósitos son de pequeño tamaño.

Textura/estructura: La textura masiva constituye más del 90% de las cromititas. Dentro de las texturas masivas se pueden diferenciar el tipo compacto y el tipo con cristales alotriomorfos, también suelen desarrollar texturas de pull apart; otras texturas prevalentes son pseudoclasticas, bandeadas, diseminadas (poco común), nodular, miloniticas y cataclásticas.

Mineralogía de las menas (principal y subordinada): Los minerales principales de las menas son: cromita y olivino. En menores proporciones están presentes anfíboles, clinopiroxenos y plagioclasas. Estas fases se distribuyen de manera particular en los lentes de cromititas. También se puede apreciar la presencia de uvarovita, minerales del grupo del platino (MEGP), minerales del grupo de la epidota (saussurita), rutilo (raramente ilmenita).

Alteración: En la etapa de serpentización se produce el reemplazamiento parcial del olivino por minerales del grupo de las serpentinas, mientras que la cromita no sufre ningún tipo de alteración. En la etapa de ferricromitización-cloritización se produce el reemplazamiento de la cromita por ferricromita y la serpentina por clorita.

Controles de las menas: En el distrito Moa-Baracoa los cuerpos de cromitas se ubican en la zona de transición manto-corteza, en el Distrito Mayarí en la zona de las tectonitas mantélicas, mientras que en el Distrito Sagua de Tánamo en una zona de melange.

Modelo genético: Las cromititas se formaron en un contexto de suprasubducción a partir de magmas generados por fusión parcial inducida por la deshidratación de la placa subducente. Estos magmas migran mediante flujo poroso a través de las peridotitas mantélicas y modifican su composición de forma progresiva a lo largo de la columna de percolación por reacciones entre el magma intersticial y la peridotita (Proenza *et al.*, 1998).

Tipos de yacimiento asociados: No tienen.

Comentarios: Las ofiolitas con afinidad a la zona de suprasubducción de un manto harzburgítico parecen ser los únicos tipos de ofiolíticas con depósitos económicos de cromitas refractarias.

Guías de exploración

Rasgos y características geoquímicas: Cr con contenidos elevados de Al, TiO₂, MgO.

Características geofísicas: Anomalías gravimétricas.

Otras guías de exploración: Se encuentran en rocas formadas cerca o dentro de las ofiolitas de la zona de transición mantocorteza y en la parte superior de las tectonitas mantélicas.

Factores económicos

Ley y tonelaje: La ley está en el rango de 20 a 60% de Cr₂O₃ y son una función de la textura de la cromita, o sea, la cantidad de cromita en relación a la serpentinita de ganga. Los tonelajes son variables, con un rango entre varios miles y varios millones de toneladas.

Limitaciones económicas: La estructura compleja y la distribución irregular de las cromitas aportan dificultades para la exploración de estos depósitos.

Usos finales: El ferrocromo (65-70% de Cr) y la estellita (aleación de Cr con Co y Mo o V) son dos productos de gran demanda industrial. Actualmente se usa para hacer aceros inoxidable, ya que su presencia confiere al acero resistencia, tenacidad, dureza, así como resistencia a la corrosión, oxidación, abrasión, ataque químico, paso de la corriente y descomposición a temperaturas altas.

Además de la industria metalúrgica, que consume más del 50% de la producción mundial del Cr, se utiliza cerca del 40% en la refractaria (revestimiento de hornos) y 10% en la química (tintes, curtientes, lixiviadores, colores y agentes oxidantes). El 75% del cromo se emplea en la industria de hierro y acero.

Importancia: Las cromitas asociadas a los complejos ofiolíticos son la única fuente del tipo refractario (min. 25% Al₂O₃: min. 60% Cr₂O₃ + Al₂O₃: máx. 15% FeO). Una fuente importante de menas de cromitas metalúrgicas (45-60% Cr₂O₃: Cr/Fe = 2.8-4.3).

Referencias

- Albers, J. P. (1986): Descriptive Model of Podiform Chromite; in Mineral Deposit Models,
- Cox, D.P., and Singer, D.A., eds., (1986): Mineral deposit models: U.S. Geological Survey Bulletin 1693, 379 p.
- Cox, D.P. and Singer, D.A. (1990): Descriptive and grade-tonnage models for distal disseminated Ag-Au deposits; a supplement to U.S. Geological Survey Bulletin 1693: U. S. Geological Survey, Open-File Report 90-282, 7 p.
- Grunsky, E. C. (1995): Grade-Tonnage Data from Mineral Deposit Models, en Geological Fieldwork 1994, BC-MEMPR Ed., Paper 1995-1, pp 417-423.
- Proenza, J, A., Melgarejo, J.C., Gervilla, F., Lavaut, W., Revé, D., Rodríguez, G. (1998). Cromititas podiformes en la Faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). Acta Geológica Hipánica, v. 33. No. 1-4, p. 153-177.
- Proenza J.A. (1997): Mineralización de cromita en la faja ofiolítica Mayarí – Baracoa (Cuba): Ejemplo del yacimiento Mercedita. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, 227p.

Singer, D.A., Page, N.J. and Lipin, B.R. (1986): Grade and Tonnage Model of Major Podiform Chromite; in Mineral Deposit Models, Cox, D.P. and Singer, D.A., Editors, U.S. Geological Survey, Bulletin 1693, pages 38-44.

Singer, D.A. and Page, N.J. (1986):: Grade and Tonnage Model of Minor Podiform Chromite; in Mineral Deposit Models, Cox, D.P. and Singer, D.A., Editors, U.S. Geological Survey, Bulletin 1693, pages 34-38.

MODELO DE LEY-TONELAJE DE DEPÓSITOS DE CROMITAS EN LA FAJA OFIOLÍTICA MAYARÍ-BARACOA

Comentario: El modelo de Ley-Tonelaje utilizado en este trabajo es el que contempla el tonelaje y la ley de cada depósito de cromita como muestra única (Singer, 1993) y que además dichos valores son los calculados antes de la puesta en explotación de cada yacimiento mineral. Se consideró además que todos los distritos son geológicamente similares y tienen el mismo modelo descriptivo.

Depositos: 42 depósitos de cromitas en toda la FOMB contaban con datos de ley y tonelaje.

Tonelaje: La Figura 9 representa los tonelajes estimados a partir de la curva teórica (curva sinuosa) de los valores de tonelajes transformados a logaritmos de base 10. Para proporciones de depósitos de 10, 50 y 90 % corresponden 1.2, 20 y 252 miles de toneladas.

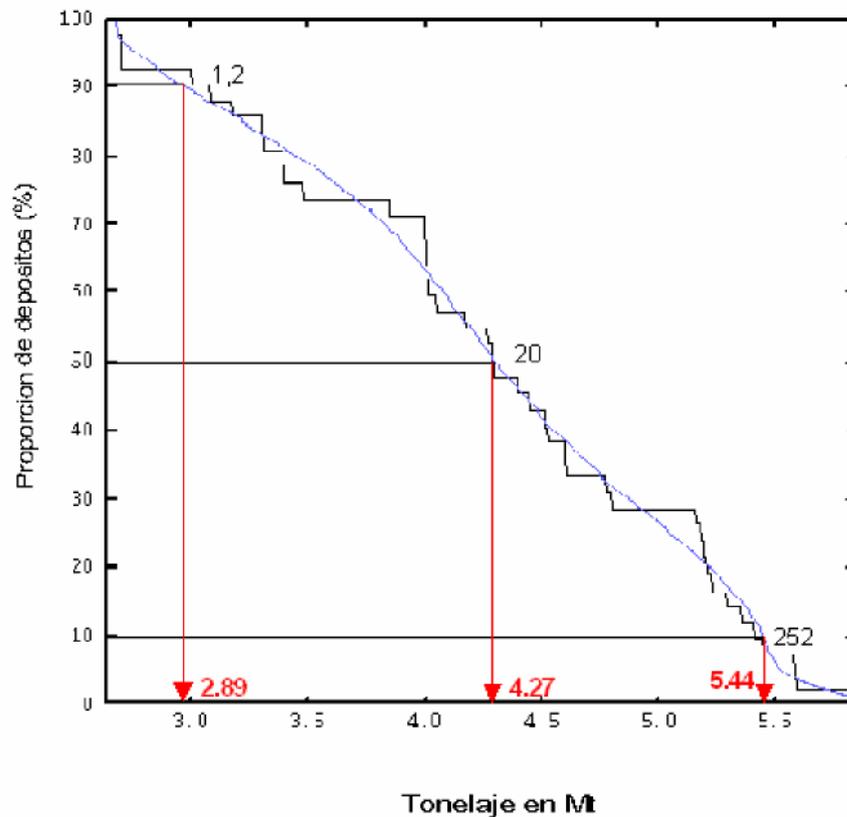


Figura 9. Valores de tonelajes transformados a logaritmos de base 10. Los valores 2.89, 4.27 y 5.44 corresponden a 1.2, 20 y 252 Mt respectivamente.

Leyes: La Figura 10 representa las leyes estimadas a partir de la curva teórica (curva sinuosa) de los valores de las leyes transformadas a logaritmos de base 10. Para proporciones de depósitos de 10, 50 y 90 % corresponden 28, 38 y 47 % respectivamente.

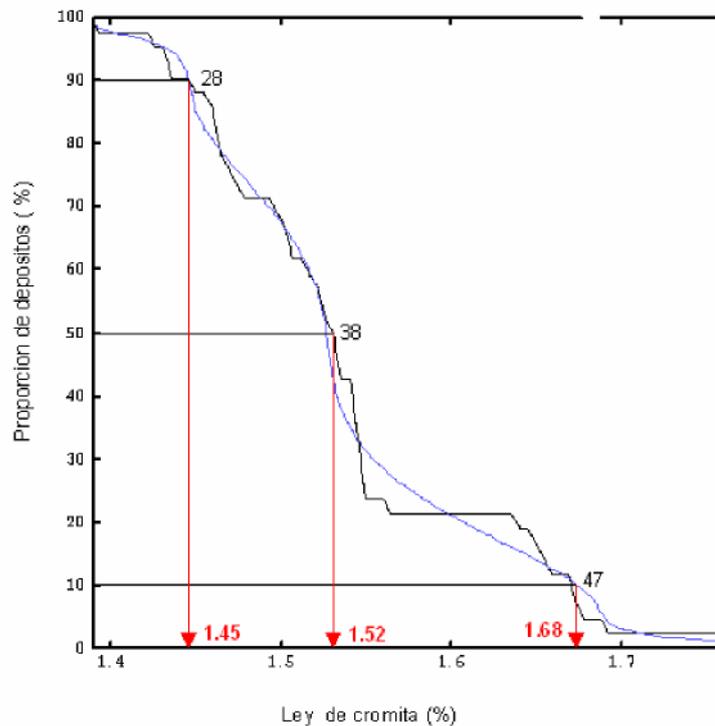


Figura 10. Valores de ley transformados a logaritmos de base 10. Los valores 1.45, 1.52 y 1.68 corresponden a 28, 38 y 47 % respectivamente.

ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE DEPÓSITOS DE CROMITAS NO DESCUBIERTO EN LA FAJA OFIOLÍTICA MAYARÍ-BARACOA

La primera parte de este pronóstico tuvo que ver con el proceso de delimitación de las áreas, obteniéndose 12 trazados permisibles con valores de densidades entre 0.06 y 0.31. El valor más frecuente encontrado fue 0.1 con tres (ver Fig. 8).

La segunda parte de la estimación de depósitos según la metodología empleada es la estimación de los tamaños de depósitos no descubiertos. Esto se logra empleando el modelo de ley-tonelaje. Los estimados de tonelajes a los percentiles 90, 50 y 10 son 1.2, 20 y 252 mil tonelajes respectivamente; mientras que las leyes

porcentuales a estos percentiles son 28, 38 y 47 respectivamente (ver Fig. 9 y 10).

La tercera parte consistió en la estimación de un número fijo, pero no conocido, de depósitos de cromitas que existe en las áreas delimitadas. Vale destacar que no existen métodos únicos para hacer estimaciones del número de depósitos no conocidos. En algunas situaciones, es posible considerar las densidades de depósitos como la probabilidad de que un depósito ocurre dentro de un área dada (por ejemplo en un kilómetro cuadrado). No se aplicó este procedimiento porque requiere la asunción de que pueda haber uno y solo un depósito en un área dada. En este trabajo se hace la estimación del número de depósitos empleando el gráfico que se muestra en la Figura 11. La misma muestra una clara relación positiva entre la cantidad de depósitos y el área de las rocas ultramáficas. Se puede hacer los estimados de depósitos de cromitas usando el logaritmo del área de las rocas ultramáficas en el eje x, el límite inferior, línea de regresión y el límite superior. Desde el eje x hasta:

- El límite inferior: estimado de número de depósitos a 90%.
- La línea de regresión: estimado de número de depósitos a 50%.
- El límite superior: estimado de número de depósitos a 10 %.

El coeficiente de correlación es distinto a 1 ($r=0.72$), así como la pendiente de la línea de regresión ($b= 0.7486$). Una pendiente de 1 significaría que al duplicar el área permisible, el número de estimados de depósitos también se duplicará, o sea, la razón de los números de depósitos contra el tamaño del área permisible sería independiente del tamaño del área permisible. Así, si la pendiente se iguala a 1, entonces la razón de los números de depósitos contra

el tamaño del área permisible provee un estimado no prejuiciado para cualquier área dada. El hecho de que la pendiente es distinta a uno significa que hay un prejuicio en la estimación del número de depósitos.

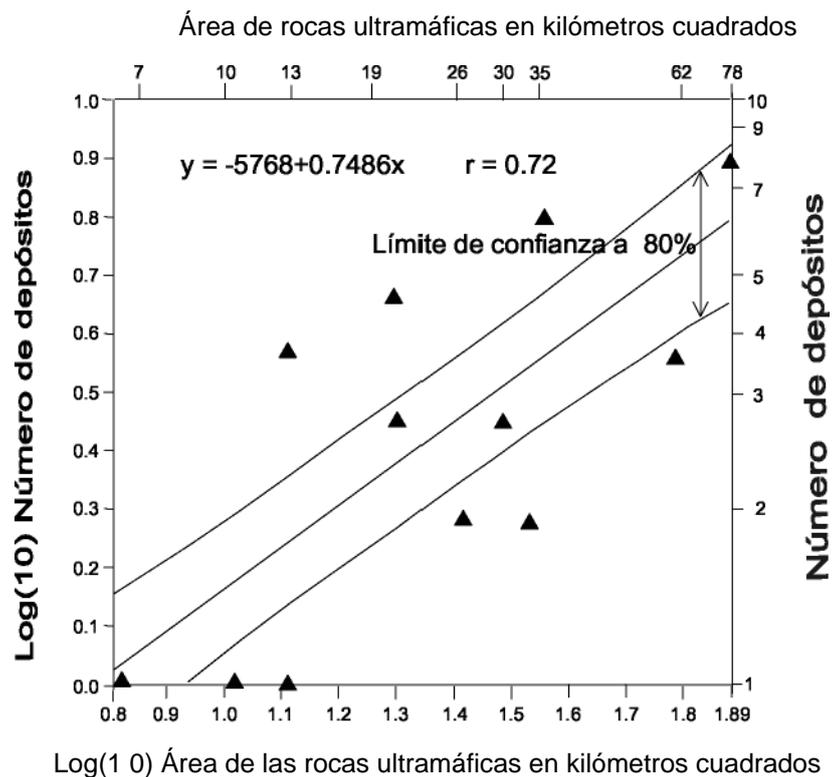


Figura 11. Número de depósitos de cromitas en 12 áreas delimitadas en la FOMB vs áreas de rocas ultramáficas con la línea de regresión y los límites de 80 % de confianza para puntos individuales.

CONCLUSIONES

Esta investigación representa un valioso instrumento metodológico para la sistematización de la información geológica sobre los depósitos minerales de cromitas asociadas a la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa de Cuba, permitiendo la elaboración del modelo descriptivo, el de ley-tonelaje y el de probabilidad de ocurrencia de depósitos de cromitas. Estos modelos se utilizan en la actualidad

para la prospección, exploración y evaluación del potencial minero de los territorios.

Se generaliza la información geológica relacionada con la formación de los yacimientos de cromitas asociados a complejos ofiolíticos, su evaluación cuantitativa y estimación de depósitos de cromitas no conocidos y la modelación de yacimientos minerales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMOVICH, A.F., CHEJOVICH, V. D.** (1964). Principales características de la geología y de los minerales útiles de la región nordeste de la provincia de Oriente. *Revista tecnológica*, 2: 14-20.
- ARIOSIA-IZNAGA, J.D. Y DÍAZ-MARTÍNEZ, R.** (2001). Modelos de yacimientos minerales: tipologías y aplicaciones. *Minería y Geología*, XVIII (2): 3-14.
- BLISS, J.D., EDITOR** (1992): Developments in Mineral Deposit Modelling; U.S. Geological Survey, Bulletin 2004, 168 pages.
- COX, D.P.** (1995): The development and use of mineral deposits models in the United States Geological Survey Mineral deposit modeling. *GAC*, Special Paper 40 :15-30.
- COX, D.P. AND SINGER, D.A.** (1990): Descriptive and grade-tonnage models for distal disseminated Ag-Au deposits; a supplement to U.S. Geological Survey Bulletin 1693: U. S. Geological Survey, Open-File Report 90-282, 7 p.
- COX, D.P., AND SINGER, D.A., (EDS)** (1986): Mineral deposit models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693, 379 p.
- FONSECA, E., SLADKEVICH, V., SANTA CRUZ, M., MORALES, A., RODRÍGUEZ, R., CAPOTE, C., NAVARRETE, M., GRACÍA, I.** (1992). Geología de los yacimientos cromíticos con evaluación pronóstico. Informe final tema 401-12, Unidad Minera Punta Gorda, Moa, Cuba.

- FONSECA, D. E; ZELEPUGIN, V. N Y HEREDIAEN** (1985): Structure of the ophiolite association of Cuba. *Geotectonic*, 19.
- GRUNSKY, E. C. (ED)**.(1995): Grade-Tonnage Data form Mineral Deposit Models, in Geological Fieldwork 1994, BC-MEMPR., Paper 1995-1, pp 417-423,.
- GUILD, P.W.** (1947): Petrology and structure of the Moa Chromite District, Oriente province, *Cuba.Amer. Geophys. Union*, 28 :218-150.
- ITURRALDE VINENT** (1996): Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. IGCP Project 364 Special contribution n 1.
- ITURRALDE VINENT** (1998) : Synopsis de la constitución geológica de Cuba. *Acta geológica Hipánica*, 33 : 9-56.
- KILBY, W.E,** (1995): The Mineral Potential Project: An Overview; B.C. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, in Geological Fieldwork 1994, Grant, B. and Newell, J.M., Editors, Paper 1995-1.
- KRAVCHENKO, G.G., VÁZQUEZ, S.O.** (1985). Estructura y perspectiva cromíferas de algunas regiones de los macizos ultrabásicos de Cuba. *Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 10 :37-55.
- LAVAUT, W., MEDINA, A., ACOSTA, J., GUERRA, M., FIGUEREDO, D.** (1994). Investigaciones geólogo-geofísicas actuales del macizo ofiolítico Sierra de Nipe: un sistema para el pronóstico y prospección de cromitas metalúrgicas. Resúmenes del Segundo Congreso Cubano de Geología y Minería. Santiago de Cuba, p. 108.
- LEFEBURE, D.V. AND RAY, G.E.** (1995): Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume I – Metallic and Coal; B.C. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Open File 1995-20, 136 pages.
- MOSIER, D.L., AND PAGE, N.J.** (1988): Descriptive and grade-tonnage models for volcanogenic manganese deposits in ocean environments- A modification: *U. S. Geological Survey Bulletin* 1811, 28p.
- MURASHKO, V.I.**(1966). Cromititas de la isla de cuba. CN.F.G. La Habana, Cuba.

- MURASHKO, V.I., LAVANDERO, R.M.**, (1989). Chromite in the hyperbasite belt of Cuba. *International Geology Review*, 31, 90-99.
- OSTROUMOV, M., R. RODRÍGUEZ, A. CHIRINO Y R. LOZANO**, (1986): Características de la composición química de las cromoespinelas cubanas por el análisis de rayos X", *Minería y Geología*, 4 (1): 31-43.
- PROENZA, J. A., MELGAREJO, J.C., GERVILLA, F., LAVAUT, W., REVÉ, D., RODRÍGUEZ, G.** (1998). Cromititas podiformes en la Faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). *Acta geológica Hipánica*, 33(1-4) :153-177.
- PROENZA, J.A., GERVILLA, F., MELGAREJO, J.C.** (1999): La Moho Transition Zone en el Macizo Ofiolítico Moa-Baracoa: un ejemplo de interacción magma/peridotita. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 12(3-4):309-327.
- PROENZA, J.** (1997): Mineralizaciones de cromitas en la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). Ejemplo del yacimiento Merceditas. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, 227p.
- SINGER, D.A., AND KOUDA, RYOICHI**, (1999): Examining risk in mineral exploration: *Natural Resources Research*, v. 8, no. 2, p. 111-122.
- SINGER, D.A.** (1993): Basic Concepts in Three-part Quantitative Assessments of Undiscovered Mineral Resources; *Non-renewable Resources*, Volume 2, Number 2, pages 69-81.
- SINGER, D.A., MOSIER, D.L. AND MENZIE, W.D.** (1993): Digital Grade and Tonnage Data for 50 Types of Mineral Deposits, Macintosh Version; U.S. Geological Survey, Open File Report 93-280, 1 disk, 52 files.
- SINGER, D.A. AND PAGE, N.J.** (1986):: Grade and Tonnage Model of Minor Podiform Chromite; in *Mineral Deposit Models*, Cox, D.P. and Singer, D.A., Editors, U.S. Geological Survey, Bulletin 1693, pp 34-38.
- SINGER, D.A., PAGE, N.J. AND LIPIN, B.R.** (1986): Grade and Tonnage Model of Major Podiform Chromite; in *Mineral Deposit Models*, Cox,

D.P. and Singer, D.A., Editors, U.S. Geological Survey, Bulletin 1693, pp 38-44.

TORRES, M (1987): Características de la asociación ofiolítica de la región norte de Moa – Baracoa y su relación con el arco volcánico del cretácico. Trabajo de Diploma, ISMM. Cuba.