

POSIBILIDADES DE SUBPRODUCTOS EN LA MINERIA DEL HIERRO EN CHILE

FERNANDO HENRIQUEZ

Depto. de Minas. Fac. Ingeniería. U. Técnica del Estado.

RESUMEN

Las posibilidades de subproductos en yacimientos chilenos de hierro asociados a magmatismo (Franja Ferrífera de la cordillera de la Costa y en la cordillera de los Andes), analizadas desde un punto de vista teórico, se pueden enfocar de dos maneras: la mineralogía de las menas de hierro y el contenido de elementos que por sustitución pueden entrar en la estructura de estos minerales.

Hecho este análisis teórico, se concluye que las posibilidades de subproductos en este tipo de yacimientos son: a) Titanio, en la forma de minerales de titanio; b) Apatita; c) Cromo, molibdeno, cobalto, zinc, galio y vanadio, por reemplazo en la estructura de magnetita y/o hematita y d) Tierras raras, torio, uranio y vanadio, por reemplazo en la estructura de apatita.

Se propone un esquema de programa de investigación de posibles subproductos y su recuperación económica, en la minería del hierro chilena.

ABSTRACT

The by-products possibilities of Chilean iron ore deposits associated with magmatic processes (the Coast Range Iron Belt and in the Andean Cordillera) are discussed from two theoretical points of view: the iron ore mineralogy and elements that may enter by substitution within the crystal structure of these minerals.

It is concluded that the by-products possibilities on this type of iron ore deposits are: a) Ti as titanium minerals; b) Apatite; c) Cr, Mo, Co, Zn, Ga, and V, within the magnetite and/or hematite crystal structure and c) Rare earths, Th, U and V within the crystal structure of apatite.

It is proposed a general research program to study possible by-products and its profitable treatment in the Chilean iron mining industry.

INTRODUCCION

El desarrollo tecnológico de los últimos años ha permitido, cada vez más, un aprovechamiento integral de los productos y subproductos que pueden encontrarse en menas determinadas. Es por todos bien conocida la obtención de subproductos en la minería del cobre, sobre todo la que tiene relación con yacimientos del tipo pórfidos cupríferos. Sin embargo las posibilidades que presentan los yacimientos de hierro, en cuanto a subproductos, han sido poco estudiadas y menos divulgadas.

Es el objetivo del presente trabajo, analizar las posibilidades teóricas que pueden presentar los yacimientos de hierro, para un posible mejor aprove-

chamiento de los recursos en ellos contenidos. Este análisis teórico involucra los yacimientos asociados a magmatismo, que en Chile corresponden a aquellos actualmente en explotación y los que presentan mayores posibilidades económicas a corto y mediano plazo. El alcance de este estudio excluye a aquellos del sur de Chile, asociados a procesos sedimentarios, ya que su origen se enmarca dentro de un ambiente geológico diferente y presentan perspectivas económicas de explotación a más largo plazo.

Dentro de este análisis teórico, no se considerará la factibilidad técnico-económica de recupera-

ción de estos posibles subproductos en Chile, por no contarse con información suficiente en este aspecto, en los yacimientos chilenos. Esta factibilidad técnico-económica ha sido probada, sin embargo, en varios yacimientos en el mundo.

Se incluyen algunas recomendaciones prácticas, factibles a relativamente corto plazo y de bajo costo, para el mejor conocimiento del potencial total de los yacimientos de hierro chilenos.

CONSIDERACIONES BASICAS

Ya se ha mencionado que sólo se considerarán las posibilidades de subproductos en los yacimientos chilenos asociados a magmatismo. Ellos se ubican tanto en la cordillera de la Costa (Franja Ferrífera entre los 26° y 32° S), como en la cordillera de los Andes (El Laco) (Ruiz y otros, 1965).

El ambiente físico-químico de formación de estos yacimientos ha sido muy poco estudiado, por lo que es difícil, *a priori*, señalar directamente las posibilidades de subproductos, que en gran medida dependen de las condiciones de formación y al mismo tiempo el estudio de éstos ayudan al esclarecimiento de dichas condiciones. Es debido a esta realidad que al presente sólo se puede hacer un planteamiento teórico de las posibilidades de subproductos, que en definitiva dependen de las con-

diciones físico-químicas específicas del ambiente geológico en el que se originaron estos yacimientos.

Un planteamiento teórico se puede enfocar desde dos puntos de vista básicos; la mineralogía de las menas de hierro y el contenido de elementos en trazas o en cantidades mayores en estos minerales. De esta forma se pueden visualizar dos fuentes posibles de subproductos: contenido en cantidades menores de minerales importantes, posibles de recuperar económicamente y, contenido de algunos elementos de importancia económica, en cantidades menores, pero significativas, en los minerales comunes de menas y ganga, también posibles de recuperar.

MINERALOGIA DE LOS YACIMIENTOS DE HIERRO ASOCIADOS A MAGMATISMO

Los minerales descritos en yacimientos de hierro chilenos, incluyen magnetita, hematita, ilmenita, pirita, apatita, actinolita, granate, escapolita, turmalina, clorita, etc. (Ruiz y otros, 1965, Park, 1972 y Bookstrom, 1977). De ellos, los que sin duda se presentan en mayores cantidades, corresponden a magnetita, hematita y apatita.

La magnetita, óxido primario más importante en estos yacimientos, pertenece al grupo de las espinelas ($M M_2 O_4$), de la clase óxidos, cuyos miembros comúnmente se señalan como óxidos dobles $M^{++}O \cdot M_2^{+3}O_3$, donde la razón $M^{++}O_3$ es esencialmente 1:1, siendo M^{++} uno o más de los metales divalentes Fe^{++} , Mg, Zn, Ni y M^{+3} es uno o más de los metales trivalentes Al, Fe^{+3} , Cr, Mn. Ti^{+4} puede entrar en la estructura por sustitución en pareja y se puede presentar en cantidades substanciales en los miembros ricos en Fe. La estructura de las espinelas es compleja en detalle, correspondiendo básicamente a una celda cúbica de caras centradas, conteniendo $8(M^{++}M_2^{+3}O_4)$, con

los átomos de oxígeno en un arreglo de empaquetamiento cúbico cerrado. Los ocho átomos de metales divalentes coordinan cada uno a cuatro átomos de oxígeno, en un arreglo tetraédrico, y los 16 átomos de metales trivalentes, coordinan cada uno a 6 átomos de oxígeno en un arreglo octaédrico. La estructura total es unida a través de átomos de oxígeno que se coordinan con un átomo divalente y tres átomos trivalentes (una descripción más detallada se puede encontrar, por ej. en Lindsley, 1976).

En el sistema $FeO - Fe_2O_3 - TiO_2$, la magnetita forma una serie de solución sólida con la ulvoespinela ($Fe_2 TiO_4$) (Elsdon, 1975). La introducción de Ti en la estructura de la magnetita determina un aumento en las dimensiones de la celda desde "a" = 8,396 Å (Fe_3O_4) a "a" = 8,53 Å ($Fe_2 TiO_4$). Esta variación de la dimensión de la celda con la composición, ha permitido establecer una curva, en la que es posible determinar el contenido en Ti de la serie,

en base al parámetro "a".

La hematita es otro de los óxidos de hierro comunes y abundantes en los yacimientos chilenos. La mayor parte de esta hematita es de carácter secundario, resultados de la oxidación de magnetita. Se ha descrito hematita primaria, pero al parecer en cantidades menores. Este mineral forma parte del grupo de la hematita (M_2O_3), en la clase óxidos, siendo hexagonal (trigonal). La estructura corresponde a un arreglo de los átomos de oxígeno en un empaquetamiento cerrado, con capas paralelas al plano basal de la estructura. Los átomos de metal se disponen entre estas capas, coordinando cada uno de ellos seis átomos de oxígeno. Sólo dos tercios de los espacios disponibles son ocupa-

dos con cada átomo de metal, coordinando tres átomos de oxígeno de la capa superior y otros tres de la inferior, lo que determina un arreglo octaédrico (para mayor detalle ver, por ej. Lindsley, 1976).

En el sistema $FeO - Fe_2O_3 - TiO_2$, la hematita forma una serie de solución sólida con la ilmenita ($Fe Ti O_3$). Al igual que en el caso de la serie magnetita-ulvoespinela, las dimensiones de la celda aumentan con el contenido de Ti.

La apatita por si misma tiene importancia económica. Pertenece a la clase fosfatos y los minerales del grupo de la apatita no presentan variaciones de importancia mineralógica-económica.

VARIACIONES EN LA COMPOSICION QUIMICA

La entrada de elementos trazas en la estructura de un mineral está determinada por varios factores, entre ellos los más importantes son: temperatura, presión, propiedades físicas de los elementos y ambiente químico. Las propiedades físicas de los elementos más determinantes son: valencia, radio de los iones y naturaleza de sus enlaces químicos. Las reglas que gobiernan la entrada de elementos trazas en un mineral y el comportamiento de estos elementos durante la diferenciación magmática han sido investigados por Goldschmidt (1937, 1954), Ahrens (1952, 1953), Shaw (1953), Ringwood (1955), Taylor (1965) y Nockolds (1966). El comportamiento de los elementos trazas cuando sustituyen a los elementos principales, está determinado por las reglas establecidas por Goldschmidt. De acuerdo a ellas, los elementos con igual radio iónico e igual carga se puede sustituir mutuamente, siendo tolerable diferencias hasta de un 15% en el radio iónico. Si los iones tienen igual tamaño pero diferentes cargas, de preferencia se incorporará en la estructura cristalina aquel con mayor carga. Si las cargas son iguales, pero difieren en radio iónico, de preferencia se incorporará el de menor radio. Estas reglas de Goldschmidt son funcionalmente aplicables a elementos que presentan enlaces iónicos dominantes. Si prevalece el enlace covalente, los elementos muestran cierta desviación del comportamiento esperado de acuerdo a las reglas de Goldschmidt.

Los óxidos y fosfatos presentan enlace híbrido, en el cual prevalece el iónico, por lo que en ellos

son aplicables las reglas de Goldschmidt. La tabla 1, muestra las relaciones de radios iónicos de varios elementos, en relación a los iones de hierro

TABLA 1. Radios iónicos de elementos (en Å). Se indican solamente aquellos cercanos a los valores de Fe^{+2} y Fe^{+3} (según Taylor, 1965).

Cationes	Radio iónico (Å)
Si^{+4}	0,42
Al^{+3}	0,51
Ga^{+3}	0,62
Cr^{+3}	0,63
Fe^{+3}	0,64
Mg^{+2}	0,66
Ti^{+4}	0,68
Ni^{+2}	0,69
Mo^{+4}	0,70
Sn^{+2}	0,71
Co^{+2}	0,72
Cu^{+2}	0,72
Zn^{+2}	0,74
V^{+3}	0,74
Fe^{+2}	0,75
Mn^{+2}	0,80
Ca^{+2}	0,99
Sr^{+2}	1,18
Pb^{+2}	1,20
Ag^{+}	1,26
Ba^{+2}	1,34

El contenido de elementos en magnetita y he-

matita ha sido investigado fundamentalmente por Frietsch (1970), en relación a génesis de yacimientos de hierro. A continuación se resumen los resultados de dicha investigación, solamente para aquellos elementos que pueden presentar interés económico, como subproductos y que además se concluyen de la tabla 1.

La magnetita y hematita primaria pueden contener cantidades significativas en los siguientes elementos:

Cromo. se asocia con Fe^{+3} y alcanza contenidos máximos en magnetitas relacionadas con rocas básicas y ultrabásicas (hasta 5.400 ppm).

Titanio. forma más enlaces iónicos con el oxígeno que con el hierro y se concentra en las primeras etapas de la cristalización fraccionada, de modo que las magnetitas que se asocian a intrusivos básicos y ultrabásicos, son siempre ricas en titanio (hasta 30% TiO_2). También se han encontrado cantidades relativamente altas (hasta 7,4% TiO_2) en magnetitas asociadas a intrusivos intermedios.

Molibdeno. se encuentra en magnetita, reemplazando a Fe^{+3} , encontrándose los valores más altos en intrusivos ácidos (hasta 150 ppm).

Cobalto. en magnetitas de menas de hierro, pre-

senta valores relativamente altos (hasta 500 ppm), en especial en yacimientos neumatolíticos de contacto.

Zinc. es alto en magnetitas de menas neumatolíticas de contacto (hasta 900 ppm).

Vanadio. reemplaza a Fe^{+3} . Las magnetitas titaníferas son más ricas en vanadio que otras. Los valores más altos (hasta 14.000 ppm) se presentan en magnetitas asociadas directamente a magmatismo. En yacimientos tipo neumatolítico de contacto, los valores son relativamente altos.

Galio. se presenta en cantidades de hasta 500 ppm.

Las apatitas han sido estudiadas por Frietsch (1974), en relación al contenido de elementos en ellas y su génesis, con los siguientes resultados, en cuanto a lo que se refiere a posibles subproductos.

El calcio de la apatita puede ser parcialmente reemplazado por tierras raras (hasta un 11%), siendo las más comunes cerium, neodim y en algunos casos ytrium. El contenido de tierras raras normalmente no excede de un 2%. También entran en la estructura de la apatita, torio y uranio, siendo el contenido de ellos más alto en apatitas de origen sedimentario que ígneo. El fósforo de la apatita puede ser reemplazado por vanadio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las posibilidades de subproductos en la minería del hierro, en general requieren de un buen conocimiento geológico mineralógico de los yacimientos y/o prospectos. Es así que para yacimientos de distintos orígenes, las posibilidades también son diferentes.

En el caso de los yacimientos de hierro chilenos, asociados a magmatismo, el origen ha sido interpretado como: hidrotermal, metasomático de contacto, magmático y como removilización de yacimientos sedimentarios pre-existentes (Geijer, 1931; Ruiz y otros, 1965; Park, 1972; Bookstrom, 1977). Estas diferentes hipótesis, en opinión del autor, tienen esta variabilidad debido a un conocimiento insuficiente, orientado a estos propósitos, de los yacimientos.

Las diferentes posibilidades generales de subproductos en yacimientos asociados a magmatismo se pueden resumir, de lo expuesto anteriormente, en las siguientes:

a) Titanio. como ilmenita como solución sólida en

hematita, como ulvoespinela y como solución sólida en magnetita.

b) Apatita. por si sola puede constituir un subproducto importante, económicamente

c) Cromo, molibdeno, cobalto, zinc, galio y vanadio. dentro de la estructura de la magnetita o hematita.

d) Tierras raras, torio, uranio y vanadio dentro de la estructura de apatita.

Es posible entonces apreciar que los subproductos pueden presentarse en forma de especies mineralógicas, como parte de serie de solución sólida o bien en cantidades significativas dentro de la estructura de los minerales más abundantes en un yacimiento de hierro.

En la actualidad, en otros países, se aprovechan como subproductos, en yacimientos geológicamente similares a los chilenos minerales de titanio, apatita y vanadio en magnetitas y tierras raras, torio y uranio en apatitas.

Esta breve visión de alternativas de subproductos en la minería del hierro, permite establecer las siguientes recomendaciones, validas para los yacimientos chilenos aquí considerados:

1. En una serie de muestras representativas de los diferentes yacimientos y prospectos, realizar:
 - a) Análisis de difracción de rayos X y estudio microscópico, con el objeto de identificar todas las especies presentes, su abundancia relativa, distribución de tamaño y relaciones texturales.
 - b) Separar por métodos convencionales de laboratorio (magnético, líquidos pesados), las diferentes especies.
 - c) En las especies mineralógicas separadas, efectuar análisis de fluorescencia de rayos X (cualitativo y cuantitativo) y análisis de espectrografía óptica. Esto con el propósito

de poder identificar la gama de elementos químicos presentes y su abundancia relativa.

- d) Las especies que muestren contenidos importantes de algún elemento, estudiarlas mediante microsonda, para establecer la forma y distribución de esos elementos.

2. Si los resultados de los estudios anteriores presentasen valores significativos en cuanto a especies minerales y/o elementos, sería recomendable estudiar la distribución mineralógica de los elementos en el yacimiento específico.
3. Junto con la recomendación anterior, comenzar a estudiar la factibilidad tecnológica (en laboratorio) de recuperación de las especies mineralógicas y/o elementos.
4. Finalmente, realizar un estudio de factibilidad técnico-económica para el aprovechamiento de los posibles subproductos.

REFERENCIAS

- AHRENS, L.H. 1952. The use of ionization potentials. *Geochem. et Cosmoch. Acta.* 2, 155 - 169
- AHRENS, L.H. 1953. The use of ionization potentials. *Geochem. et Cosmoch. Acta.* 3, 1 - 29.
- BOOKSTROM, A.A. 1977. The use magnetite deposits of El Romeral, Chile. *Econ. Geol.* 72, 1101 - 1130.
- ELSDON, R. 1975. Iron-titanium oxide minerals in igneous and metamorphic rocks. *Miner. Sci. Engng.* 7, 48 - 70.
- FRIETSCH, R. 1970. Trace elements in magnetite and hematite mainly from northern Sweden. *Sver. Geol. Und., Ser. CNR 646, Arsbok 64 NR3*, 136 p.
- FRIETSCH, R. 1974. The occurrence and composition of apatite with special reference to iron ores and rocks in Northern Sweden. *Sver. Geol. Und., Ser. CNR 694, Arsbok 68 NR1*, 49 p.
- GEIJER, P. 1931. The iron ores of the Kiruna Types. *Sver. Geol. Und. Ser. C. NR 367, Arsbok, NR4*.
- GOLDSCHMIDT, V.M. 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *Jour. Chem. Soc.* 655 - 673.
- GOLDSCHMIDT, W.H. 1954. *Geochemistry*. Oxford Univ. Press, London, 130 p.
- LINDSLEY, D.H. 1976. The Crystal Chemistry and structure of oxide minerals as exemplified by the Fe-Ti oxides. In: Rumbler III, D., ed., *Oxides Minerals*, *Min. Soc. Amer. Schort Course notes*, 3 L1 - L60.
- NOCKOLDS, S.R. 1966. The Behaviour of some elements during fractional crystallization of magma. *Geoch. et Cosmoch. Acta.* 30, 267 - 278.
- PARK, C.F. 1972. The iron ore deposits of the Pacific Basin. *Econ. Geol.* 67, 339 - 349.
- RINGWOOD, A.E. 1955. The principles governing trace element distribution during magmatic crystallization. Part I. The influence of electronegativity. *Geoch. et Cosmoch. Acta.* 7, 189 - 202.
- RUIZ, C.; AGUIRRE, L.; CORVALAN, J. KLOHN, C.; KLOHN, E. y LEVI, B. 1965. *Geología y Yacimientos Metalíferos de Chile*. Inst. Invest. Geológicas, Santiago-Chile, 306 p.
- SHAW, D.M. 1953. The Camouflage principle and trace-element distribution in magmatic minerals. *Jour. Geol.* 61, 142 - 151.
- TAYLOR, S.R. 1965. The application of trace element data to problems in petrology. In *Physics and Geochemistry of the Earth* 6, 133 - 213. Pergamon Press, Oxford.