

Caracterización y Concentración de Muestras de Arenas de Caldera, Región de Atacama

L. Valderrama ¹; R. Poblete ², C. Contreras ²

1. Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Atacama

2. Departamento de Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama

Resumen

Este trabajo presenta los resultados de la caracterización realizada a muestras de arenas de playas del sector de Caldera de la Región de Atacama. Los estudios realizados a estas muestras tuvieron como principal objetivo evaluar la composición mineralógica y las propiedades inherentes a los minerales y ganga, tales como la asociación de los minerales, composición química y mineralógica de las especies presentes, como también, un posible proceso de concentración para estas arenas negras. El análisis mineralógico indicó que los principales constituyentes son cuarzo, feldespato, ilmenita, titanita, rutilo y trazas de circonita, monacita y wolframita. Los análisis químicos indicaron que la ley de alimentación es de 1,8% TiO_2 . El análisis de titanio en las mallas 0,600; 0,425; 0,300; 0,212; 0,150; 0,106; 0,075 y -0,075 mm, fue de 0,8%; 0,7%; 0,70%; 1,2%; 3,1%; 7,8%; 19,9% y 18,1% de TiO_2 respectivamente. En base a la distribución de titanio se procedió a retirar el material mayor que 0,300 mm, por lo cual la ley de TiO_2 se incrementa a 3,8 %. En las pruebas de concentración gravitacional fueron estudiados los ángulos de inclinación de la mesa entre 2,5° y 6,5°. Las pruebas fueron realizadas haciendo pasar la muestra de arenas por la mesa Wilfley con un ángulo de inclinación de 2,5°. Los concentrados y mixtos obtenidos fueron repasados en la mesa previo a una molienda (93% bajo 0,212 mm), para liberar las partículas útiles, con un ángulo de inclinación de 6,5°. Los resultados de estas pruebas indican que se puede obtener un concentrado con una ley TiO_2 de 51,4% y una recuperación de 21,4%.

Palabra claves: arenas de mar, ilmenita, concentración gravitacional

Abstract

This work presents the results of the characterization made to sand samples belonging to beaches located in Caldera in the Atacama region. The studies that were done to those samples had as a main goal the evaluation of the mineralogical composition and the inherent properties of the minerals and the gangue, such as the association of the minerals, the chemical and mineralogical composition of the species that were present, and also a possible concentration process for these black sands. On one hand, the mineralogical analysis indicated that the main components are quartz, feldspar, ilmenite, titanite, rutile and small amounts of circonite, monacite and wolframite. The chemical analysis, on the other hand, indicated that the feed grade is 1.8% of TiO_2 . The titanium analysis in the meshes 0.600; 0.425; 0.300; 0.212; 0.150; 0.106; 0.075; and -0.075 mm was 0.8%; 0.7%; 0.70%; 1.2%; 3.1%; 7.8%; 19.9% y 18.1% of TiO_2 respectively. According to the titanium distribution, the material over 0.300 mm was taken away, then the TiO_2 grade increased up to 3.8%. In the gravitational concentration tests, slope angles of the table between 2.5° and 6.5° were studied. The tests were done by passing the sand sample through the table Wilfley with a slope angle of 2.5°. The concentrates and middling obtained were re-treated on the table before milling (93% under 0.212mm), to let the useful particles free with a slope angle of 6.5°. These tests indicated that it is possible to obtain a concentrate with a TiO_2 grade of 51.4% and a recovery of 21.4%.

Keywords: sand beaches, ilmenite, gravitational concentration

1. Introducción

El titanio es un elemento abundante en la corteza terrestre, siendo excedido sólo por otros ocho elementos (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K y Mg). Existen numerosos minerales de titanio, sin embargo sólo unos pocos están en volúmenes y concentraciones explotables económicamente.

Los minerales que contienen titanio son la Ilmenita, Rutilo, Anatasa, Brookita, Pseudo-Brookita, Perowsita, Pirofanita y la Titanita.

La ilmenita es un titanato ferroso de fórmula FeTiO_3 y la relación entre el hierro y el titanio varía por el contenido de óxido férrico, que puede deberse en gran parte a pequeñas inclusiones de hierro oligisto, pudiendo ser reemplazado el hierro ferroso por Mg o Mn. Se encuentra generalmente en filones y grandes masas como un producto de la segregación magnética, asociada con magnetita, rutilo, circón y monacita.

El rutilo es un dióxido de titanio, TiO_2 ; normalmente contienen hierro, pudiendo llegar éste a 10%. El rutilo se haya en granitos, pegmatitos graníticos, esquistos micáceos, calizas metamórficas y dolomita; se encuentra también como material accesorio en rocas y filones de cuarzo, presentándose con frecuencia en cristales delgados que penetran en éste; se encuentra en considerables cantidades en las arenas negras, asociado con magnetita, circón y monacita.

La titanita cuya fórmula química es $\text{CaTiO}(\text{SiO}_4)$, es otro mineral de titanio y su composición es CaO 28,6%; TiO_2 40,85%; SiO_2 30,6%, pudiendo contener hierro en pequeñas cantidades. La titanita o esfena es un mineral accesorio bastante común en las rocas ígneas, hallándose en los granitos, granodioritas, dioritas, sienitas y sienitas nefelíticas también en cristales de tamaño considerable, incrustados en las rocas metamórficas; esquistos cloríticos y calizas cristalinas. Corrientemente está asociada a la clorita y en otras ocasiones lo está con menas de hierro, piroxeno, anfíbol, circón, apatita, feldespato y cuarzo. Especies similares a la titania son la benitoita, que es un silicato azul de titanio y calcio, asociada a la neptunita; también la astrofilita, enigmatita, lamprofilita, ramsayta, formatita que son silicatos de titanio poco frecuentes, los que se hayan

asociados a rocas alcalinas. Las características principales de la titanita son: dureza 5 – 5,5; peso específico 3,4 – 3,55 g/ cm^3 ; brillo resinoso o diamantino; color gris, pardo, verde, amarillo o negro; transparente o traslúcido.

La ilmenita es separada del rutilo, si es necesario por métodos magnéticos, pudiéndose en algunos casos usar el concentrado primario, sin separarlo, en la fabricación de pigmento de dióxido de titanio por el proceso de cloruración.

Por ejemplo, en el depósito de Tahawus, Nueva York, la roca de ilmenita – magnetita que contiene aproximadamente 18% de TiO_2 , se lleva inicialmente a una granulometría de menos 28 mallas ASTM por medio de chancadores de mandíbulas y molinos de barras. En la siguiente etapa se usan separadores magnéticos de baja intensidad para separar la parte magnética de la no magnética, que contiene ilmenita y ganga, y posteriormente concentrada en mesa vibratorias, luego es secada y reconcentrada mediante un separador magnético en seco para así obtener un concentrado final de 85,5% de ilmenita, equivalente a 45% de TiO_2 aproximadamente. La fracción magnética es sinterizada constituyéndose así en un material adecuado para ser usado como alimentación a un alto horno.

En ocasiones, cuando se presenta en el mineral de titanio una íntima asociación de ilmenita-hematita, ésta no puede romperse por métodos mecánicos, por lo cual el mineral después de la etapa de molienda es mezclado con carbón coque y alimentado a hornos de arco eléctrico, para así obtener separadamente hierro y una escoria que contiene aproximadamente 70% de TiO_2 , la cual es posteriormente tratada para la obtención de pigmento de dióxido de titanio.

Los concentrados de titanio contienen generalmente además de TiO_2 , elementos tales como Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, MgO, ZrO_2 y tierras raras, según sea el tipo de mineral de la cual se obtuvo el concentrado.

Los métodos de extracción y beneficio dependen del tipo de depósito en que se encuentra el mineral de titanio. En los depósitos de arenas titaníferas éstas son tratada por métodos de concentración gravitacional, vía húmeda, por lo cual se pueden usar espirales, conos, elutriadores o

jigs, con el objeto de producir un concentrado primario de mineral, del cual se pueden separar diversos tipos de minerales comerciales, usando una combinación de técnicas de separación en seco, mediante separadores magnéticos o electrostáticos de alta intensidad de campo, a veces en conjunto con equipos de concentración gravitacional en seco o en húmedo.

Los yacimientos más importantes de titanio, en forma de mineral original, se encuentran en Canadá, Brasil, EE.UU., Japón, Portugal, China, Nueva Zelandia, México, Groenlandia, Suecia, Noruega, Finlandia, Rusia, Sudáfrica, India, Australia, Sierra Leona, Madagascar y Alemania (5). En Australia se encuentran depósitos de arenas minerales a lo largo de toda la costa este y oeste del país. La explotación de estos yacimientos hace de éste país el principal productor de minerales de titanio en el mundo.

El principal uso del titanio se encuentra en la fabricación de pigmentos, donde se usa en la forma de dióxido de titanio finamente pulverizado. También es ampliamente usado en la industria del papel y en la industria del caucho y plásticos. Debido a su elevada resistencia mecánica, bajo peso específico y una sobresaliente resistencia a la corrosión, hace que sea de gran aplicación en la industria aeronáutica y aeroespacial, especialmente en aplicaciones militares (misiles, cohetes, cápsulas espaciales, aviones de alta velocidad, etc). Un uso especial y creciente se encuentra en la cirugía de huesos, debido tanto a su bajo peso como a su fuerza y especialmente a su completa resistencia a los fluidos corporales.

Chile posee una extensa zona de playas marítimas que se extienden de Arica a Magallanes y que contiene importantes contenidos de titanio en forma de rutilo e ilmenita en Huaco y La Serena y en relaves de flotación de cobre en El Teniente, Chuquicamata y Salvador (8).

Los minerales que contienen las arenas negras presentan composiciones diversas, se aprecian en aureolas dejadas por las olas o en las manchas que se producen en las dunas costeras por acción del viento [9]. Estas partículas, por su alta densidad, se fueron juntando en los lechos de los ríos y finalmente en las playas de nuestro litoral marítimo. Estos minerales de Fe-Ti-O están asociados, en sus lugares de asentamiento con otros

minerales también de alta densidad como ser circón, metales nobles, minerales de tungsteno, niobio, tantalio, cromo, monacita y minerales radiactivos.

Generalmente los depósitos de arena titaníferas que contienen menos de 1% de dióxido de titanio pueden ser explotados económicamente, sobre todo si el principal mineral que contienen es el rutilo, por otra parte, los depósitos de roca que contienen TiO_2 son comercialmente explotables si tienen una ley sobre 17% de TiO_2 .

La ilmenita es separada del rutilo, si es necesario por métodos magnéticos, pudiéndose en algunos casos usar el concentrado primario, sin separarlo, en la fabricación de pigmento de dióxido de titanio por el proceso de cloruración.

Este trabajo tiene como objetivo presentar los resultados de la caracterización química, granulométrica y mineralógica de las arenas de playas del sector de Caldera de la Tercera Región, como también un posible proceso de concentración para estas arenas negras. Las pruebas de concentración gravitacional fueron realizadas en una mesa Wilfley variando el ángulo de inclinación de esta. Los resultados muestran que es posible concentrar estas arenas con leyes y recuperaciones aceptables.

2. Metodología

El procedimiento experimental usado en este estudio fue dividido en dos etapas: la primera etapa consistió en la toma y la clasificación por tamaño, mediante análisis granulométrico en húmedo de la muestra. El material fue clasificado en húmedo en tamices ASTM de abertura de 0,600 mm, 0,425 mm, 0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm, 0,075 mm y - 0,075 mm.

En la etapa siguiente todas las fracciones granulométricas obtenidas fueron molidas y analizadas químicamente por técnicas de espectrometría de fluorescencia de rayos X. Los análisis mineralógicos fueron realizados a través de la conjugación de técnicas de microscopía óptica de polarización por luz transmitida, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y microscopía electrónica. En estos análisis fueron usados los siguientes equipos, microscopio óptico marca Zeiss, fluorescencia de rayos X por medio de un espectrómetro Siemens SRS 3000 con radiación de excitación de Rh,

difracción de rayos X en un equipo Siemens D 5000 con radiación de Cu y microscopio electrónico de barrido marca Jeol 5410, resolución máxima 4 nanómetro en modo SEI..

Las pruebas de concentración gravitacional fueron realizadas en una mesa Wilfley de laboratorio que encuentra en las dependencias del Departamento de Metalurgia de la Universidad de Atacama.

Los estudios por medio de líquidos densos fueron realizados para lograr separar las especies pesadas de las livianas. Este método esta basado en la separación de minerales de diferentes densidades por medio de la inmersión de ellos en un líquido, cuya densidad efectiva está entre un valor intermedio entre los minerales livianos y los pesados, de tal manera que unos quedaran flotando (float), que tienen una densidad menor que la del medio y la otra que se hunde (sink), cuya densidad es mayor que la del medio.

La pruebas de separación densimétrica fueron realizadas al concentrado primario molido a la fracción bajo la malla 0,300 mm mediante la utilización de líquidos densos (diometano, $\rho = 3,31 \text{ g/cm}^3$).

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis químico de la arena

La tabla 1 muestra la composición química de la muestra de arena del sector de Caldera. Se puede observar que la muestra presenta una ley de titanio de 1,8% y una ley bastante alta de silicio de 41,8 %.

Tabla 1. Composición química de la arena

Elem	SiO ₂	CaO	Fe	TiO ₂	Zr
(%)	41,8	19,5	1,4	1,8	0,05

3.2. Análisis granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico de la muestra estudiada con sus respectivas leyes son presentadas en la tabla 2.

Se puede observar en la tabla que relacionando la distribución granulométrica con el análisis químico de las arenas se puede observar que en las mallas mas finas existe un incremento en la ley de TiO₂. En el tamaño

0,075 mm la ley de titanio alcanza un máximo de 18,1% TiO₂.

Tabla 2: Distribución por fracción granulométrica

Aber (mm)	Peso (%)	Ley (%)			
		TiO ₂	Fe	SiO ₂	CaO
0,600	17,3	0,8	1,2	39,3	21,8
0,425	21,8	0,7	1,0	40,2	21,7
0,300	24,0	0,7	0,8	38,8	23,0
0,212	15,9	1,2	0,8	40,5	20,5
0,150	12,7	3,1	1,7	49,4	13,6
0,106	6,6	7,8	3,8	49,3	9,5
0,075	1,6	19,9	10,2	34,6	8,8
-0,075	0,1	18,1	14,2	34,8	6,7

El análisis granulométrico indica que cerca del 64% de la masa esta retenida en la malla 0,300 mm, con una ley de TiO₂ sobre esta malla es de 0,73%, lo que estas fracciones contienen cerca del 25 % del total del TiO₂ contenido en la muestra. El material bajo 0,300 mm la ley de TiO₂ se incrementa a 3,8% y representa el 75% del titanio de la muestra.

Esto indica que en un proceso de concentración se debería incluir una etapa de clasificación con el objetivo de extraer todo el material mayor a 0,300 mm, lo que produciría una preconcentración de la arenas, aumentando la ley a 3,8% y rechazando el 64% del material alimentado. Esto reduciría las etapas de chancado y molienda de la futura planta concentradora.

3.3. Separación por medios denso

La tabla 3 muestra las especies pesadas y las livianas que fueron obtenidas en las pruebas realizadas con el concentrado primario. La masa del material flotado obtenido en la muestra fue de 9,6 g y la del material hundido de 13,7 g.

Tabla 3: Análisis químico de la prueba de líquidos denso.

Producto	TiO ₂	Fe	SiO ₂	CaO
Flotado	18,4	13,9	27,6	12,0
Hundido	39,1	29,1	8,4	2,9

3.4. Composición Mineralógica

La composición mineralógica fue determinada a partir de los datos obtenidos por difracción de rayos X, microscopia óptica y electrónica de barrido y los análisis químicos de los productos obtenidos en la separación de los minerales mediante líquidos densos.

El análisis en el microscopio electrónico de barrido confirma la mineralogía existente de los minerales de titanio predominantemente asociado al cuarzo y feldespato.

La figura 1 y 2 muestran las microfotografías de partículas típicas de minerales de titanio y de sus espectros obtenidos, ellas corresponden a partículas de ilmenita y titanita, presente en las muestras de arenas.

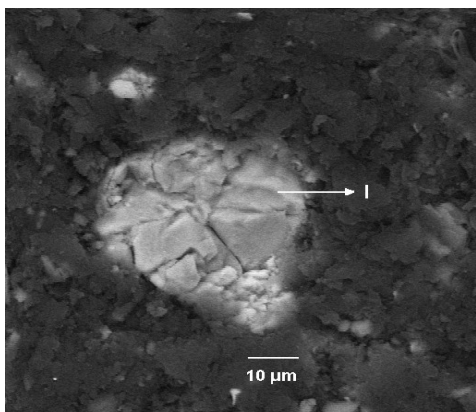


Figura 1: Microfotografía indicando la presencia de ilmenita (I)

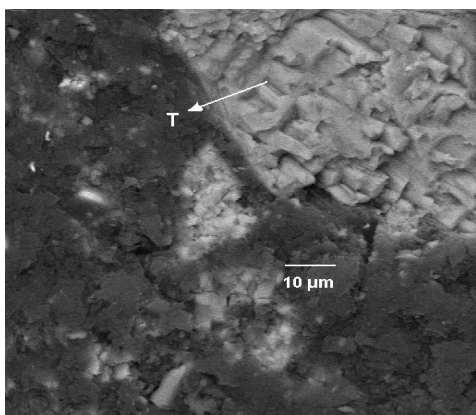


Figura 2: Microfotografía indicando la presencia de titanita (T)

La muestra de arena está constituida por cuarzo, feldespato, magnetita, hematina, ilmenita, titanita y rutilo. Como minerales a

escala de trazas fueron detectados monacitas, circonita, wolframita y scheelita.

3.5. Pruebas de concentración gravitacional

El equipo de concentración gravitacional utilizado en la separación de arena de playa fue una mesa Wilfley de laboratorio. Para la separación de arena en la mesa concentradora, debido a las características de la muestra hacen que la concentración sea visualmente bien manejable, es decir que las fracciones pesadas y livianas son fácilmente observables.

Fueron realizadas pruebas de concentración en la mesa manteniendo constante el flujo de alimentación, consumo de agua, longitud y frecuencia del movimiento, y la forma de los riffles, y solo se varió el ángulo de inclinación de la mesa, y fueron estudiados los ángulos de 2,5° y 6,5°.

La primera prueba consistió en pasar el material a través de la mesa Wilfley con un ángulo de inclinación de 2,5°, donde fueron obtenidos concentrados, mixtos y relaves los cuales fueron secados pesados y analizados químicamente.

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de concentración gravitacional usando un ángulo de inclinación de 2,5°.

Se observa que la ley de TiO_2 en el concentrado se incrementa a 14,9% con una recuperación de 79,4 % y un mixto que tiene una ley de 1,8% con una recuperación de 15,1%.

Tabla 4: Concentración de la arena en la mesa Wilfley (inclinación 2,5°).

Producto	Peso (%)	TiO_2 (%)	Fe (%)	SiO_2 (%)	Rec. (%)
Conc.	24,6	14,9	10,7	38,4	79,4
Mixto	37,8	1,8	1,5	57,3	15,1
Relave	37,6	0,7	0,9	52,5	5,5
Alim.	100,0	4,5	3,6	47,3	100

Los concentrados y los mixtos obtenidos en esta prueba fueron molidos a un tamaño de 93% menor a 0,212 mm y repasados en la mesa misma con un ángulo de inclinación de

6,5°, con el objetivo de aumentar la ley de titanio.

En la tabla 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos cuando fue usado un ángulo de inclinación de 6,5°, tanto para los concentrados y mixtos obtenidos en la prueba anterior.

En la tabla 5, se observa que la ley de TiO_2 en el concentrado obtenido al someter a relimpieza el concentrado rougher se alcanza una ley de 51,4% con una recuperación de 21,4 % y el mixto obtenido tiene una ley de 46,4% y una recuperación de titanio de 43,5%.

En la misma tabla también se puede observar que el contenido de SiO_2 en el concentrado es muy bajo (6%), con respecto a la ley de este compuesto en la alimentación. También se debe hacer notar que la alta ley de titanio en el concentrado, lo hace un producto comerciable.

Tabla 5: Resultados de la limpieza del concentrado rougher de la mesa Wilfley (inclinación 6,5°).

Producto	Peso (g)	TiO_2 (%)	Fe (%)	SiO_2 (%)	Rec. (%)
Conc.	45,5	51,4	29,4	6,0	21,4
Mixto	102,3	46,4	22,6	12,1	43,5
Relave	488,2	7,9	4,4	49,2	35,1
Alim.	692,0	14,9	10,7	38,4	100,0

En la tabla 6 se muestra los resultados obtenido al someter a relimpieza el mixto obtenido en la etapa rougher.

Se puede observar que con este material se obtiene un concentrado con una ley de 16,9%

Las pruebas de concentración gravitacional usando un ángulo de inclinación de 2,5°, permiten obtener concentrado con ley de TiO_2 de 14,9% y recuperación de 79,4 %. Al someter a relimpieza el concentrado rougher se alcanza una ley de 51,4% con una recuperación de 21,4 %. La reconcentración de los mixtos obtenidos en la etapa anterior permite obtener un concentrado de 16,9% de TiO_2 y un mixto de 3,3%

de TiO_2 con una recuperación de 48,4 %, como también un mixto que tiene una ley de 3,3% y una recuperación de titanio de 23,7%.

Tabla 6: Resultados de la limpieza del mixto rougher obtenido en la mesa Wilfley (inclinación 6,5°).

Producto	Peso (g)	TiO_2 (%)	Fe (%)	SiO_2 (%)	Rec. (%)
Conc.	55,2	16,9	10,3	34,9	48,4
Mixto	136,6	3,3	2,1	56,8	23,7
Relave	799,3	0,7	0,7	65,2	27,8
Alim.	991,1	1,8	1,5	57,3	100,0

4. Conclusiones

De los resultados obtenidos con la muestra de arenas negras del sector de Caldera se puede concluir lo siguiente:

La muestra presenta una ley de titanio de 1,8% y de silicio de 41,8 %. La distribución granulométrica y el análisis químico de la arenas muestran que en las granulometrías mas finas existe un aumento en la ley de TiO_2 . Para el tamaño - 0,075 mm la ley de titanio alcanza un valor de 18,1% TiO_2 .

Extrayendo el material sobre 0,300 mm la ley de TiO_2 se incrementa a 3,8% y representa el 75% del titanio de la muestra.

Las arenas están constituidas por cuarzo, feldespato, magnetita, hematina, ilmenita, titanita y rutilo, a escala de trazas fueron detectados monacitas, circonita, wolframita y scheelita.

5. Referencias

Arias P. Alternativas metalúrgicas para el tratamiento de arenas titaníferas. Tesis Universidad Técnica del Estado, P. 3-37, 1977
Cui Z., Liu Q., Etsell T.H. Magnetite properties of ilmenite, hematite and oilsands minerals after roasting. Mineral Engineering. N°15, p. 1121-1129, 2002.
Casali A., Vallebuona G., Montecinos C., Girardi S. Rutilo: Mercado y factibilidad de su

recuperación desde relaves de flotación. Proyecto FONDECYT N°1191, 1991.

Fuller D. Arenas negras o ferrotitaníferas en Chile, una nueva perspectiva en minería metálica submarina. Universidad Técnica Federico Santa María; Informe presentado a la Compañía Minera del Pacífico. 1998.

Fuller D. Titanio en Chile. Minería Chilena, Año 22, N° 251, p. 157-161, 2002.

Olguín D. Flotación de rutilo desde relaves de yacimiento de cobre porfídicos nacionales. Memoria de Ingeniero Metalurgista, Universidad de Santiago de Chile, 1984.

Clernett T. Mineralogical and textural constraints on mineral processing of the Koivusaarenne ilmenite ore, Sälviä, western Finland. Int. J. Miner. Process. 57 (1999) 153-165.

Aguilera M. Concentración de elementos de tierras raras y minerales de titanio. Trabajo de Titulación. Universidad de Atacama, 2004.

Baltar, C. y Cunha, A. Aproveitamento de finos de Ilmenita por flotação com Succinamato. Anais del XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Florianópolis, Brasil, p. 51-58, 2004.

Fan, X. y Rowson, N. The effect of $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ on ilmenite flotation. Minerals Engineering, vol. 13, Nº 2, p. 205-215, 2000.

www.ga.gov.au/education/minerals/ilmenite.html