

ELEMENTOS DE LAS TIERRAS RARAS, ELEMENTOS DEL GRUPO DEL PLATINO Y OTROS RAROS Y DISPERSOS: PRINCIPALES TIPOS GENÉTICOS DE DEPÓSITOS Y POSIBLES ÁREAS DE PROSPECCIÓN EN EL TERRITORIO NACIONAL. Parte I

Xiomara Cazañas Díaz, Jorge Luis Torres Zafra, Waldo Lavaut Copa, José Antonio Alonso Pérez, Angélica Isabel Llanes, Rosa Cobas Botey

En el presente documento se ofrece una breve información acerca de las generalidades, principales minerales, usos, tipos genéticos de depósitos que se localizan en el mundo, contenido de borde de las menas y posibles modelos de yacimientos que se reportan a nivel mundial para los elementos de las tierras raras (ETR), grupo del platino (EGP) y otros raros y dispersos (ERD) que pudieran identificarse en el país, a fin de proponer los trabajos geológicos futuros que deben ejecutarse para avanzar en el conocimiento geológico de estas materias primas, las que constituyen objetivos estratégicos esenciales para alcanzar el desarrollo industrial sostenible del país.

Palabras clave: Tierras raras, elementos raros y dispersos, elementos grupo del platino

RARE EARTH ELEMENTS, THE PLATINUM GROUP AND OTHER RARE AND DISPERSED ELEMENTS: MAIN GENETIC TYPES OF DEPOSITS AND POSSIBLE AREAS OF PROSPECTION IN THE NATIONAL TERRITORY. Part I

Xiomara Cazañas Díaz, Jorge Luis Torres Zafra, Waldo Lavaut Copa, José Antonio Alonso Pérez, Angélica Isabel Llanes, Rosa Cobas Botey

This document provides brief information about the generalities, main minerals, uses, genetic types of deposits located in the world, edge content of the ores and possible models of deposits that are reported worldwide for the rare earth elements (ETR), platinum group (EGP) and other rare and dispersed (ERD) species that could be identified in the country, in order to propose the future geological work to be carried out to advance the geological knowledge of these raw materials, which are essential strategic objectives for the sustainable industrial development of the country.

Keywords: Rare earths, rare and dispersed elements, platinum group elements

INTRODUCCIÓN

Los elementos de las tierras raras (ETR), en ocasiones también llamados metales de las tierras raras, constituyen un grupo de 15 elementos metálicos, conocidos en Química Inorgánica como grupo de los lantánidos, que presentan propiedades químicas muy similares entre sí. También suelen incluirse otros dos elementos, equivalentes ligeros del lantano (La), pertenecientes todos al grupo III de la Tabla Periódica: el escandio (Sc) y el itrio (Y). Estos elementos, por su pertenencia al grupo III, presentan propiedades químicas y físicas afines a las de tierras raras propiamente dichas. Los lantánidos (tierras raras *sensu strictu*) son los elementos cuyo número atómico va del 57 al 71 y todos se encuentran en la naturaleza, aunque el prometio (Pm), no tiene ningún isótopo de larga vida o estable y debido a ello este sólo se encuentra en cantidades insignificantes (Castor y Hedrick, 2006).

El interés en estos elementos ha crecido exponencialmente en los últimos tiempos, debido a su creciente uso en la industria de la alta tecnología, los que los hace insustituibles para el desarrollo de la sociedad actual y futura. La identificación de todas las posibles fuentes de aporte de elementos de las tierras raras es, por tanto, un reto, pues cada día se amplían las posibilidades de hallazgo en nuevos tipos de depósitos (no convencionales), aumentando las posibilidades de que se detecten concentraciones de interés económico en el país.

1. Generalidades sobre los elementos de las Tierras Raras (ETR)

Debido a su similitud química, las tierras raras pueden sustituirse con

facilidad unas por otras, y estar presentes diferentes elementos en un mismo mineral. Esto dificulta la obtención de un metal específico en su estado químicamente puro. La separación individual de los elementos de las tierras raras fue un desafío difícil para los químicos de los siglos XVIII y XIX. No fue hasta el siglo XX en que se logró la identificación de todos ellos.

El término “tierra rara” se utiliza comúnmente en las Ciencias de la Tierra, sin embargo, este término se asocia más con la rareza de los minerales donde estos se aislaron originalmente que con su presencia en rocas y depósitos minerales.

En realidad, las tierras raras son abundantes en la corteza terrestre y son, por ejemplo, más abundantes que la plata (Ag) y tan abundantes como el cobre (Cu) y el plomo (Pb) (Harben, 2002; USGS, 2002).

Por su parte, Taylor and Mc Lennan (1985) plantearon que la abundancia cortical de las tierras raras varía en un amplio rango, desde el cerio (Ce), más abundante con 33 ppm, hasta el lutecio (Lu), cuya concentración es de 0.3 ppm. No obstante, por sus características geoquímicas, ellas forman depósitos con concentraciones industriales mucho menores que el cobre (Cu) y la plata (Ag).

Otro factor que incide en la percepción de escasez de las tierras raras fue la persistencia, durante muchas décadas, de bajos precios de estos elementos, producto de los pocos esfuerzos realizados en la exploración de sus depósitos minerales. La crisis de precios en el periodo 2010 – 2011, generada por la limitación de las exportaciones por parte de China, indujo un gran esfuerzo exploratorio a escala mundial, cuya consecuencia fue el descubrimiento de docenas de nuevos depósitos en diferentes partes

del planeta. A esto se suma la apertura de nuevas capacidades de producción fuera de China, traducidas en un significativo decrecimiento de los precios. Esta combinación de menores precios y mayor oferta, hará que en los próximos años solo aquellos depósitos que produzcan concentrados de ETR a bajos costos, a partir de menas de alta ley, mineralogía favorable y oficio en la compleja tecnología de procesamiento de menas (y productos reciclados) podrán sobrevivir. En tal sentido, el desarrollo del yacimiento gigante "Tomtor", en el norte de Siberia (Rusia) y la confirmación de recientes reportes de depósitos aparentemente grandes y de alta ley en la República Popular Democrática de Corea, podría perturbar marcadamente los precios actuales de las ETR. En ese caso, sólo unos pocos de los más de 200 proyectos de exploración de ETR que existen en todo el mundo, serán capaces de permanecer en un mercado cada vez más competitivo.

Por lo expuesto, cabe esperar una ulterior contracción de la oferta, al disminuir la producción en respuesta a los bajos precios, cumpliéndose de este modo el conocido ciclo de retroalimentación producción – precios en la economía minero-metalúrgica mundial (Wellmer y Dalheimer, 2012).

Otro elemento en la economía de las tierras raras es el carácter acoplado de su producción. Esto significa que, por un lado, los precios de las ETR individuales (cerio, samario, lantano, etc.) varían mucho de un metal a otro, dependiendo tanto de su disponibilidad geológica como de la demanda tecnológica. Por el otro, el grupo completo de las ETR aparece como un

todo único en menas y depósitos minerales, sin poder ser explotadas de forma individual. Esto da lugar a un desbalance entre la oferta y demanda de las diferentes tierras raras en el mercado, y con ello, las correspondientes fluctuaciones de precios. Por tanto, la producción total de ETR depende de los metales de alta demanda (y por ende de alto precio). Estos "elementos directores" son el europio (Eu) y terbio (Tb) que se utilizan en la fabricación de televisores, el neodimio (Nd) y praseodimio (Pr), usados en magnetos permanentes.

Las tierras raras son comúnmente divididas en ligeras (LREE, por sus siglas en inglés) que van desde el lantano hasta el europio, y pesadas (HREE, por sus siglas en inglés) que va desde el gadolinio hasta el lutecio. Esta división, de uso común en la literatura especializada, tiene trascendencia económica, pues las HREE, con menor relación oferta /demanda, son las de más alto precio total (el resultante de la suma de los precios de todas las tierras raras pesadas) que las ligeras (LREE).

Los minerales que con mayor regularidad se asocian con las tierras raras son los fosfatos, e incluyen: monacita, xenotima, ningyoita, florencita y rhabdofhana, comunes en rocas metamórficas y graníticas. El segundo lugar en abundancia lo ocupan los carbonatos de tierras raras: bastnaesita-(Ce), parisita-(Ce), synchisita-(Ce) y lantanita (La), ampliamente desarrollados en carbonatitas y frecuentemente acompañados por óxidos de ETR, tales como: cerianita, knopita, fergusonita y aeschinita (ver tabla 1).

Tabla No 1. Principales minerales de rendimiento económico de los ETR (fuente: Castor and Hedrick, 2006; British Geological Survey, 2010).

Mineral	Formula global	Contenido aproximado ETR (%)
Aeschnita-(Ce)	(Ce,Ca,Fe,Th)(Ti,Nb) ₂ (O,OH) ₆	32
Alanita-(Ce)	(Ce,Ca,Y) ₂ (Al,Fe ³⁺) ₃ (SiO ₄) ₃ OH	38
Apatito	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	19
Bastnaesita-(Ce)	(Ce,La)(CO ₃)F	75
Brannerita	(U,Ca,Y,Ce)(Ti,Fe) ₂ O ₆	9
Britholita-(Ce)	(Ce,Ca) ₅ (SiO ₄ ,PO ₄) ₃ (OH,F)	32
Eudialita	Na ₄ (Ca, Ce) ₂ (Fe ²⁺ , Mn, Y, Zr) Si ₈ O ₂₂ (OH, Cl) ₂ (?)	9
Euxenita-(Y)	(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti) ₂ O ₆	24
Fergusonita - (Ce)	(Ce, La, Nd)NbO ₄	53
Gadolinita-(Ce)	(Ce,La,Nd,Y) ₂ Fe ²⁺ Be ₂ Si ₂ O ₁₀	60
Kainosita-(Y)	Ca ₂ (Y,Ce) ₂ Si ₄ O ₁₂ CO ₃ .H ₂ O	38
Loparita	(Ce,La,Na,Ca,Sr)(Ti,Nb)O ₃	30
Monacita-(Ce)	(Ce,La,Nd,Th)PO ₄	65
Parisita-(Ce)	Ca(Ce.La) ₂ (CO ₃) ₃ F ₂	61
Xenotima	YPO ₄	61
Yttrocerita	(Ca,Ce,Y,La)F ₃ .nH ₂ O.	53
Huanghoita-(Ce)	Ba, Ce (CO ₃) ₂ F.	39
Cebaita-(Ce)	Ba ₃ Ce ₂ (CO ₃) ₅ F ₂	32
Florencita-(Ce)	CeAl ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₆	32
Synchisita-(Ce)	Ca(Ce,La)(CO ₃) ₂ F	51
Samarskita-(Y)	(Y, Ce, U, Fe ³⁺) ₃ (Nb,Ta,Ti) _s O ₆	24
Knopita	(Ca,Ti,Ce ₂)O ₃	No se dispone

Nota: Los contenidos de ETR listados corresponden a la relación: (masa atómica del ETR/ masa molecular de cada fórmula mineral x 100), muy diferente al contenido del ETR presente en la roca (mena), el cual se utiliza para la evaluación económica de un depósito particular.

Frecuentemente los ETR se obtienen como subproducto del enriquecimiento o beneficio tecnológico de otros metales. Por ello, las pautas económicas y el tipo de minería que se emplea la dictan la ley y la distribución espacial de los componentes útiles principales (Cu o Fe, por ejemplo). Los métodos más económicos consisten en minería superficial y cantera a cielo abierto, en los depósitos cercanos a la superficie, o combinado (superficial y subterráneo), en una misma mina, que se extiende en un rango más amplio de profundidad.

1.2 Usos de las Tierras Raras

En los últimos tiempos se ha incrementado de manera acelerada y creciente el uso por parte de la industria moderna de los metales puros y compuestos a base de tierras raras. Se ha creado tal dependencia que la lista de artículos de uso cotidiano que contienen tierras raras es casi interminable, no concibiéndose el desarrollo actual y futuro de la sociedad sin la participación de estos elementos.

Para que se tenga una idea más elocuente de lo expuesto, una moderna turbina de 3 MW, por ejemplo, lleva como parte integral de sus elementos

metálicos componentes entre 300 a 600 kg de ETR (Nd + Pr). Un automóvil convencional contiene en sus agregados cerca de 0,5 kg de ETR y uno de tipo híbrido (combustible - eléctrico) requiere de 20 kg - 30 kg. Los móviles celulares usan 1 g de ETR cada uno, al igual que los semiconductores fosfóricos, emisores de luz de baja potencia, a los que ahora comienzan a incorporarse los de alta potencia, llamados, estos últimos, a sustituir las luminarias incandescentes públicas por otras de menor consumo energético por cantidad unitaria de luz y con mayor durabilidad, así como en medicina (tomografía magnética).

En una publicación reciente, la Cámara Minera del Perú (CAMIER), a través del Enlace Minería (2015)⁵, presenta un esquema con las principales esferas de aplicación y usos generales de las ETR, las cuales se subdividen en siete grandes grupos (figura 1).

En la tabla 2 por su parte, se presentan los compuestos químicos (óxidos, nitruros, aleaciones, compuestos de coordinación y sales orgánicas) en que los ETR se utilizan en el momento actual en diversas aplicaciones principalmente la electrónica, cerámica y en médica respectivamente.



Figura 1. Diagrama general que señala los principales usos y aplicaciones generales de los ETR Fuente: Cámara Minera del Perú, Enlace Minería, 2015⁵, <http://www.camiper.com/>

Tabla No. 2. Aplicaciones de los ETR en sus diferentes compuestos químicos; Fuente: Cámara Minera del Perú, Enlace Minería (2015)⁵; <http://www.camiper.com/>

Aplicaciones	Compuesto químico de TR que emplea(n)	Otros compuestos que se también utilizan
Cerámicas Tenaces	Si ₃ N ₄ / SiACON / ZrO ₂ / AlN	Y ₂ O ₃ , R ₂ O ₃
Pulido de Vidrio	CeO ₂	
Absorbentes de Neutrones	EuB ₆ / Gd ₂ O ₃	
Conductores iónicos	ZrO ₂ / CeO ₂	Y ₂ O ₃ / Pr, Gd
Sensores de Oxígeno	ZrO ₂	Y ₂ O ₃ / R ₂ O ₃
Conductores electrónicos	LaCrO ₃	
Termistores	BaTiO ₃	

Resistores	RBa ₆	
Magnetos resistentes	La _{1-x} Ca _x MnO ₃	
Superconductores	RBa ₂ Cu ₃ O ₇	
Recubrimientos en aleaciones	Fe-Cr-Al	Y
Agentes de Contraste en RM	Gd(DOTA) / Gd(DPTA)	
Aplicaciones en Medicina:		
Ensayos inmunológicos	Criptatos de ETR	
Agentes antocoagulantes	3 Sulfoisonicotinato de Nd	
Agentes antiinflamatorios	Complejos de ETR	
Agentes antimicrobianos	Nitrato de Ce-sulfadiazina de Ag	

1.3 Precios de los ETR

En la tabla 3 se muestran los precios de algunos óxidos individuales de TR (\$/Kg, FOB China), los que se comercializan como compras grandes y un grado de pureza mínimo del 99 % (Industrial Minerals and Rocks, 2014)¹³.

En dicha tabla se observa que los mayores precios recaen como se mencionó anteriormente en los elementos “directores del mercado”, como lo son el Eu, Dy conjuntamente con el Pr.

Tabla No. 3. Precios de algunos óxidos de TR; Fuente: Industrial Minerals and Rocks, Junio- 2014)¹³

TR ₂ O ₃	Precio (\$/Kg)
Óxido de Cerio (CeO ₂)	4.65 - 4.90
Óxido de Disproso (Dy ₂ O ₃)	365 - 400
Óxido de Europio (Eu ₂ O ₃)	800 - 950
Óxido de Lantano (La ₂ O ₃)	4.75 - 5.00
Óxido de Neodimio (Nd ₂ O ₃)	65 - 70
Óxido de Praseodimio (Pr ₂ O ₃)	170 - 185
Óxido de Samario (Sm ₂ O ₃)	4.75 - 6.00

Nota: Grado de pureza mínima 99%, compras grandes, precio FOB China, (\$/kg)

El precio del Nd, que llegó a superar los 450 UDS/kg en el año 2011, a principios del 2015 era de 80 USD/kg. El del disproso, que alcanzó 3500 USD/kg en el 2011, a inicios del 2015 estaba a 500 USD/kg. El del Tb, a inicios del 2015, estaba en 650 USD/kg.

1.4 Tipos genéticos de depósitos de ETR que se localizan en diferentes regiones del mundo

El Servicio Geológico Británico (2010)² clasifica los depósitos minerales que contienen tierras raras en: (1) *Primarios*, relacionados con rocas

ígneas y procesos hidrotermales; (2) *Secundarios*, donde las tierras raras se concentran por procesos sedimentarios y de intemperismo. Esta clasificación incluye todos los tipos genéticos de depósitos identificados. Dentro de los depósitos primarios, dicho Servicio Geológico separa los siguientes:

1.4.1 - Depósitos de ETR que se vinculan a carbonatitas

Se asocian con rocas ígneas ricas en carbonatos (de origen magmático), en zonas alcalinas con grandes fallas. El tonelaje varía desde unas cuantas decenas de miles de toneladas hasta

algunos cientos de millones de toneladas y la ley de 0,1 % a 10 % de ETR. Ejemplos de ellos son Mountain Pass y Iron Hill (USA); Bayan Obo (el mayor depósito del mundo), China; Okurusu (Namibia); Amba Dongar (India); Barrado e Itapirapua (Brasil).

1.4.2 - Depósitos de ETR que se relacionan con rocas ígneas alcalinas y pegmatitas

Se asocian con rocas ígneas que contienen abundantes minerales alcalinos y están enriquecidas en tierras raras pesadas. El tonelaje, lo típico es que estén entre 100 y 1000 millones de toneladas. La ley es variable, pero lo más frecuente es que sean inferiores al 5 % de ETR. Por ejemplo, Thor Lake (Canadá) reporta 64,2 millones de toneladas de recursos y 1,96 % de ETR. Otros ejemplos son Llimaussaq (Groenlandia); Kivina y Lovozero (Rusia); Starge Lake (Canadá); Weishan (China); Brockman (Australia); Pajarito Mountain (USA).

1.4.3 - Depósitos de ETR-Fe, asociados a óxidos de Fe - Cu - Au

Constituyen depósitos de Cu – Au (cobre - oro) ricos en óxidos de Fe y diversos en forma y tamaño. Según la ley y tonelaje, los del tipo Olympic Dam poseen recursos estimados en el orden de los 25 millones a 1,100 millones de toneladas con una ley de 0.1 % - 0,5 % de ETR. Ejemplo de estos depósitos además del Olympic Dam (Australia) son: Prominent Hill y Ernest Henry (Australia); Sue-Dianne (Canadá) y Salobo (Brasil). Los del tipo óxidos de Fe – P – ETR (hierro – fósforo-elementos de la tierras raras) Tipo Kiruna tienen desde 0,1 hasta 0,7 % de ETR, siendo esencialmente depósitos de Fe magnetítico, de los que normalmente no se recuperan los ETR. Por su tamaño pueden ir desde 20 hasta 2000 millones de toneladas de mena. Ejemplos son Kiirunavaara y Luossavaara (Suecia); El Laco, El

Romeral y Manto Verde (Chile); Choghart, Chador Malu y Esfordi (Irán).

1.4.4 - Depósitos hidrotermales Tipo Vetas de Th (torio) – ETR

En estos depósitos es típica la presencia de cuarzo, fluorita, vetas polimetálicas y pegmatitas de diverso origen. En ellos, la ley y tonelaje es, por lo general, inferior al millón de toneladas de mena. En raras ocasiones superan el millón de toneladas de mena, aunque pueden alcanzar hasta los 50 millones de toneladas. La ley generalmente oscila entre 0,4 y 4,0 % de ETR y muy raramente alcanza el 12 %. En el depósito Lemhi Pass (USA) existen recursos aproximados de 39 millones de toneladas de mena, con 0.51% de ETR (Orris y Grauch, 2002)²¹. Ejemplo de este tipo de depósito son Karonge (Burundi); Naboomspruit y Steenkampskraal (República Sudafricana); Lemhi Pass, Bokan Mountain, Captain Mountain y Laughlin Peak (USA); Hoidas Lake (Canadá) y Maoniuping (R. P. China).

Otro modelo de depósito primario, es el de skarn de ETR. Su contenido va de 0,5 a 10 % de ETR, con recursos de mena del orden de las 100 000 toneladas. Ejemplos de este tipo de depósito son Mary Kathleen (Australia); Saima (R. P. China); Skye (Escocia).

Un último modelo de depósito endógeno de ETR reportado en la literatura es el metamórfico de ETR en gneiss migmatítico, ejemplificado por el depósito Music Valley, California (USA).

En los depósitos secundarios, los ETR se concentran como resultado de los procesos sedimentarios y de intemperismo. El Servicio Geológico del Reino Unido distingue dentro de ellos los siguientes tipos:

1.4.5 - Depósitos de Placer (génesis marina)

Constituyen acumulaciones de minerales pesados resistentes al intemperismo, concentrados por los procesos acumulativos costeros a lo largo o cerca de los litorales actuales. Según la ley y tonelaje, este tipo de depósito presenta una variabilidad muy alta, tanto en su masa de mena como en la ley de ETR presente. Así, la masa de mena oscila desde decenas de millones hasta 300 millones de toneladas y en su mayoría contienen monacita (en concentraciones inferiores al 0,1% en peso). Por ejemplo, el yacimiento Jangardup (Australia), se reportan recursos ascendentes a 30 millones de toneladas de mena, con 0,046 % de monacita (Orris y Grauch, 2002)²¹. Ejemplo de depósitos de este tipo son: Eneabba, Jangardup, Capel y WIM 150 (Australia); Green Cove Springht (USA); Richards Bay (República Sudafricana) y Chavara (India).

1.4.6 - Depósitos de Paleo-Placer (placer fósil)

Constituyen depósitos en rocas consolidadas y cementadas (paleo - placer), que inicialmente fueron rocas fragmentarias como arena, grava y conglomerado, entre otros. Ellos se localizan a lo largo de la línea de la costa o cercano a ella. Según el modelo de ley y tonelaje, su masa de mena oscila entre 10 millones de toneladas y 100 millones de toneladas, con una ley de 0,1% de ETR. Ejemplos de este tipo son los depósitos Elliot Lake (Canadá) y Bald Mountain (USA).

1.4.7 - Depósitos Lateríticos

Lo conforman aquellos depósitos superficiales, formados como resultado de la intensa meteorización química, bajo la acción de climas tropicales y subtropicales, de rocas ígneas enriquecidas en ETR. Por su ley y tonelaje, sus recursos alcanzan desde unas cuantas decenas de miles de

toneladas hasta algunos cientos de millones de toneladas, con leyes (contenidos) que varían entre 0,1 % y 10 % de ETR. Un caso representativo de este modelo de depósito es el yacimiento Mt Weld (Australia), con recursos aproximados de 12,24 millones de toneladas de mena y ley promedio de 9,7% de ETR. Ejemplos de estos depósitos son Mount Weld (Australia); Arajá (Brasil) y Kangankunde (Malawi).

1.4.8 – Depósitos arcillosos de ETR

Lo constituyen aquellos depósitos de arcillas, superficiales y poco profundos, que se forman por la meteorización de granitos y rocas ígneas alcalinas (como las sienitas). El intemperismo tropical y subtropical sobre estas rocas produce un proceso de enriquecimiento en tierras raras, inicialmente dispersas en las rocas mencionadas, que tiende a privilegiar la acumulación de las tierras raras pesadas (HREE) e Ytrio (Y) con respecto a las tierras raras ligeras. Este enriquecimiento se relaciona con el desarrollo de procesos físico-químicos de adsorción de estos elementos por parte de minerales arcillosos, como el caolín y la halloysita. En este tipo de depósito, la zona intemperizada puede, sobre la base de su mineralogía, se divide usualmente por capas. El contenido de total de tierras raras en esta clase de depósito oscila entre 0,065 % y 1,5 % y la masa de mena varía normalmente entre 50 mil toneladas y 1 millón toneladas, aunque puede ser mayor.

A pesar de su baja ley, ellos son objeto de explotación debido a su valioso contenido de tierras raras pesadas y a que su explotación y procesamiento es más simple que el requerido para los demás tipos de depósitos, dada su vecindad a la superficie y naturaleza no consolidada. Los mismos son explotados por minería a cielo abierto, sin operaciones de voladuras o molienda compleja, factores estos que

reducen considerablemente los costos de extracción. Ejemplos de este tipo de depósito son Longnan y Xunwu (R. P. China).

1.4.9. Fosforitas ricas en ETR

El Servicio Geológico de Australia reconoce, además de los anteriores, un modelo de fosforitas ricas en ETR. Estos depósitos se desarrollan en la periferia de paleocuenas marinas someras, hospedados en secuencias sedimentarias (de calizas, limolitas, areniscas y conglomerados) y se caracterizan por presentar contenidos de La y Ce superiores a los 100 g/t. El depósito Korella (Australia), por ejemplo, presenta recursos inferidos de 4,2 millones de toneladas de mena con 746 g/t promedio de Y, dentro de 8,3 millones de toneladas de materia prima útil (fosforita), delimitadas por un contenido de boro del 20 % de P_2O_5 . Aunque estos depósitos solo presentan contenidos promedios del orden de los cientos de g/t de ETR, en la actualidad están en fase de desarrollo innovadoras tecnologías de procesamiento a bajo costo para extraer ETR del ácido fosfórico (H_3PO_4) y fosforo-yeso (mezcla de fluorapatito + $CaSO_4 \cdot 2H_2O$), las que, de concretarse, podrían impactar de modo profundo el mercado mundial de ETR (Christmann 2014)⁴. Otros ejemplos de este tipo de modelo son los depósitos Schevchenko (Kazajistán) y Zhijin (China).

1.5 Posibles modelos de depósitos a detectarse en Cuba

Las mayores perspectivas para el hallazgo de depósitos de tierras raras (ETR) en Cuba se presentan en la región Ciego - Camagüey - Las Tunas. Ello se debe al hecho de que esta es la

única región del país donde las rocas ígneas y volcánicas alcalinas son relativamente abundantes, estando íntimamente asociadas, como parte de un sistema intrusivo - volcánico complejo, con rocas calcoalcalinas.

1.5.1 Vetas de Th – ETR

Pueden contener Pb, Ag, Ba (en forma de barita) y Au. Constituyen depósitos formados por sistemas de vetas estructuralmente controlados, comúnmente asociados con complejos intrusivos de rocas alcalinas y peralcalinas, así como de carbonatitas. Las vetas de torio - ETR generalmente ocurren en un anillo exterior, alrededor de las rocas alcalinas, pero pueden localizarse fuentes de metales dentro de los cuerpos intrusivos.

Los depósitos consisten en vetas tabulares, usualmente de grano fino, comúnmente están manchadas con óxidos de Fe ± óxidos de Mn. Las zonas mineralizadas, con un número variable de vetas, pueden tener hasta 2150 m de largo y 75 m de ancho, pudiéndose extender por el buzamiento hasta 300 m o más. Ejemplo en Cuba son las manifestaciones Embarque y Tres Antenas (La Catuca), situadas ambas en la mitad oriental de la región Ciego - Camagüey - Las Tunas.

La manifestación Embarque (figura 2) consiste en un sistema de zonas mineralizadas de (carbonatos ferruginosos vetas cuarzosas y cuarzo – carbonatadas) con 100 a 280 m de longitud por el rumbo y espesores entre 2 y 5 m. El contenido reportado de tierras raras oscila entre 0,1 y 0,6 % (0,1 - 0,6 % de La y 0,1 - 0,5 % de Ce), además de hasta 2 g/t de Au y entre 0,6 y 1 % de Cu.

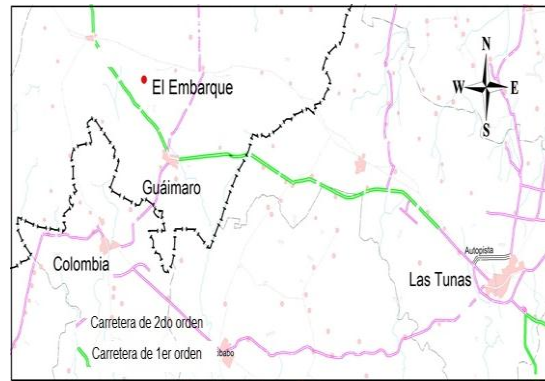


Figura 2. Mapa de ubicación de la manifestación "Embarque" (X: 442 900 Y: 273 300; Sistema de Coordenadas Cuba-Sur)

La manifestación Tres Antenas (anteriormente nombrada La Catuca, figura 3) presenta dos zonas con intensas anomalías gamma espectrométricas aéreas de Th. La Asociación Internacional Geominera SA – Joutel Resources Ltd. realizó aquí trabajos geoquímicos, detectándose la presencia de anomalías de Y, La y Au en suelo y de La, Ce, Sm, Eu e Yb

(varios elementos de las tierras raras) en roca. También se perforaron diez pozos, los que localizaron mineralización aurífera de interés en skarn y sienitas (contenidos entre 0,2 y 0,9 g/t de Au), el cual alcanza hasta 6 g/t de Au y 23 g/t de Ag en una veta de cuarzo de 2,3 m de espesor, también interceptada por la perforación.

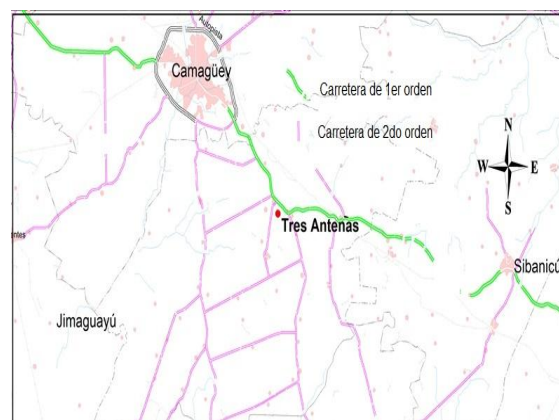


Figura 3. Mapa de ubicación de la manifestación "Tres Antenas" en la provincia Camagüey (X: 398 375 Y: 291 375; Sistema de Coordenadas Cuba-Sur)

1.5.2. Óxidos de Fe – P – ETR Tipo Kiruna (Fe, posible ETR)

Se encuentran en ambientes sub-volcánicos, localizados dentro estructuras paleo-volcánicas y cuerpos intrusivos. Tanto las secuencias de rocas encajantes como las menas pueden estar atravesadas por diques.

Los cuerpos intrusivos relacionados con la mineralización, generalmente porfíricos, abarcan un amplio rango de composición química y litológica, desde máfica hasta félsica y alcalinas, siendo los de composición diorítica los más comunes. Estas rocas pueden estar regionalmente metamorfozadas.

Los depósitos consisten en cuerpos tabulares, lenticulares, y vetiformes, concordantes o discordantes. A veces se presentan también brechas mineralizadas. Los cuerpos minerales pueden alcanzar los 4 km de longitud y 2 km por el buzamiento, con un espesor del orden de los 90 m (Laznicka, 2010)¹⁶. En ocasiones pueden presentar forma de domo. En general, la forma es controlada por la configuración del cuerpo intrusivo y del sistema de fracturas presentes (Hou *et al.*, 2010)¹². Por el estilo de mineralización, los cuerpos minerales pueden ser estratoligados, de reemplazamiento (masivo y/o diseminado), de *stockwork* o presentar rasgos de exoskarn. Como ya se indicó, raramente se recuperan los ETR de este tipo de depósito, cuyo componente útil (producto) principal es el Fe, el cual se encuentra en forma de magnetita y, en menor medida, de hematites, por lo que suelen constituir

menas metalúrgicas de alta calidad. Un posible ejemplo cubano de este modelo podría ser la manifestación de Fe magnetítico Palo Seco I (figura 4), situado en la parte oriental de la región Ciego – Camagüey – Las Tunas. El contenido de Fe oscila entre 12,19 y 54,3 %, con 0,08 a 0,86 % de P. Estos datos son los suministrados por el único pozo perforado en esta manifestación hasta el momento. Este pozo, a pesar de estar ubicado, de acuerdo con la geofísica, en la periferia del cuerpo mineral, atravesó un total de 90,1 m de mena magnetítica con contenidos de Fe superiores al 20 % (contenido de borde con el que están evaluados los depósitos de skarn de Fe magnetítico del distrito mineral Hierro Santiago), sin lograr alcanzar el límite inferior del cuerpo mineralizado. A juzgar por el tamaño e intensidad de la anomalía magnética asociada y por los resultados del pozo, este depósito podría tener un tamaño considerable.



Figura 4. Mapa de ubicación de la manifestación Palo Seco 1 (X: 449 322 Y: 273 648; Sistema de Coordenadas Cuba-Sur)

1.5.3 Depósitos arcillosos de ETR

Pueden ser localizados en cortezas de intemperismo sobre rocas félsicas y alcalinas. No hay ejemplo identificado en Cuba hasta ahora. Por sus características geológicas, las regiones de Cuba donde pudieran encontrarse son las de Ciego – Camagüey – Las Tunas y la Isla de la Juventud. Este tipo de depósito, como ya se señaló, son depósitos arcillosos, superficiales y

poco profundos, que se forman por la meteorización de granitos (generalmente de tipo continental) y rocas ígneas alcalinas. El primer tipo de roca fuente es el que se supone presente en la Isla de la Juventud (se requiere de investigaciones que confirmen esta suposición), en tanto el segundo tipo de roca fuente (rocas ígneas alcalinas) es el que se presenta en la región Ciego – Camagüey – Las Tunas.

1.5.4 ETR en gneiss migmatítico

Este tipo de roca hospedera de mineralización ETR está reportado en Isla de la Juventud. Sin embargo, no existe hasta el momento estudio alguno sobre sus posibilidades para la presencia de depósitos de ETR ni se conoce de manifestación alguna de mineralización de ETR. Esta interrogante se encuentra estrechamente relacionada con la señalada en el acápite anterior en relación con la necesidad de determinar si los granitos presentes en esta región de Cuba son de afinidad continental (el llamado tipo "S" en la literatura especializada).

1.5.5 Fosforitas ricas en ETR

Depósitos de fosforitas con contenidos de interés de Σ ETR en Cuba son el yacimiento de fosforita "Trinidad de Guedes" en la provincia de Matanzas (figura 5), "Meseta Roja" y en menor medida "Loma de Candela", ambos ubicados en la provincia de Mayabeque (figuras 6 y 7). No debe descartarse una nueva evaluación de estos elementos en el yacimiento de fosforitas residuales "La Pimienta" en la provincia de Pinar del Río (figura 8), asociado a cuerpos de menas de baja

ley de P_2O_5 y al depósito de colas producto del beneficio de las menas ricas de P_2O_5 durante la década de 1970-1980.

En relación con lo anterior cabe destacar que, como resultado de la confección del Mapa Pronóstico para roca fosfórica a escala 1: 500 000, realizado por el IGP en la década de los años 1980 y 1990 (Mederos, 1980¹⁸; Mederos *et al.* 1991¹⁹), se reportó que en el depósito "Meseta Roja", existen recursos de rocas fosfóricas sedimentarias marinas, cuyos contenidos de ETR se encuentran en el orden de los cientos de g/t (como Σ ETR), donde predominan fundamentalmente el ytrio (Y), cerio (Ce), lantano (La) y neodimio (Nd), asociados con el principal mineral portador fósforo en ambos depósitos: el carbonato-fluorapatito (CFA). Del mismo modo, en el yacimiento sedimentario marino "Trinidad de Guedes", ubicado en la provincia de Matanzas, se obtuvieron contenidos del mismo orden para estos elementos. En la tabla 4 se muestran los contenidos de ETR (contenidos individuales de algunas tierras raras y suma total de las 15 tierras raras) determinados en los distintos tipos lito-geológicos de rocas fosfóricas de ambos depósitos.

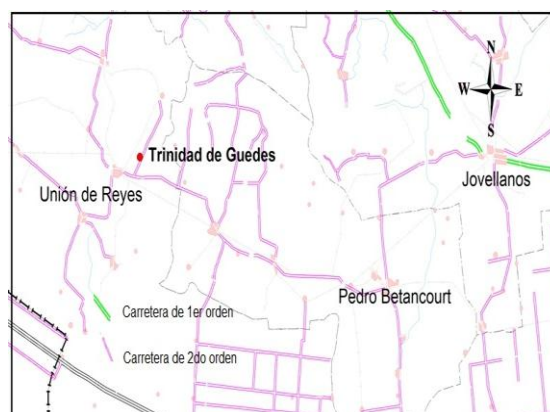
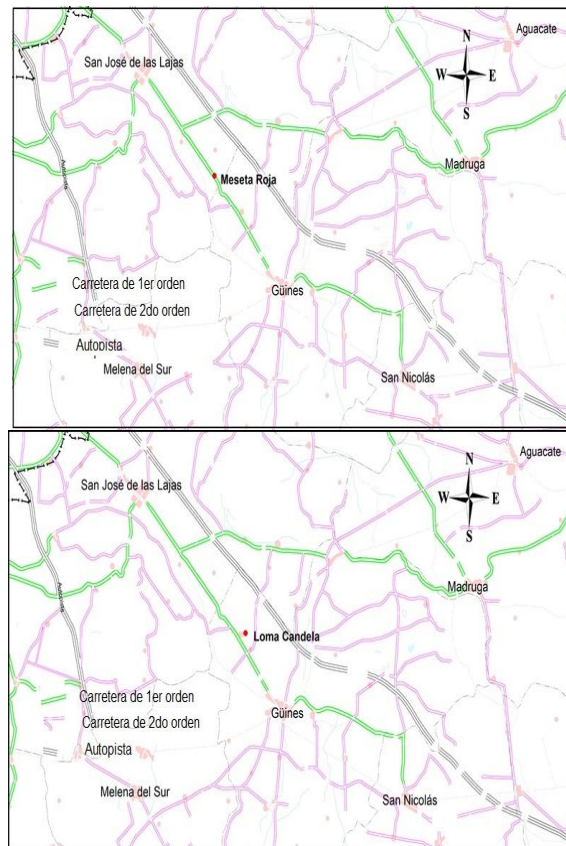


Figura 5. Mapa de ubicación del yacimiento de roca fosfórica sedimentario-marina "Trinidad de Guedes" muy cerca al poblado de Unión de Reyes en la provincia de Matanzas (X: 446 941 Y: 330 444; Sistema de Coordenadas Cuba-Norte)



Figuras 6 y 7. Mapa de ubicación de los yacimientos de rocas fosfóricas sedimentario-marinas “Meseta Roja” y “Loma Candela”, cercanos al poblado de Güines provincia de Mayabeque (X: 388 500 Y: 341 750; Sistema de Coordenadas Cuba-Norte)

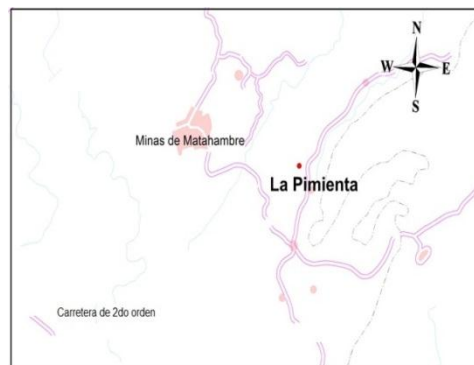


Figura 8. Mapa de ubicación del yacimiento de rocas fosfóricas redepositadas “La Pimienta” en el Municipio Minas de Matahambre, provincia de Pinar del Río (X: 220 150 Y: 308 300; Sistema de Coordenadas Cuba-Norte)

Tabla No. 4. Contenidos promedios de tierras raras presentes en rocas fosfóricas de Meseta Roja (provincia Mayabeque) y Trinidad de Guedes, en la provincia de Matanzas (Mederos, 1980, Mederos et al. 1991)^{18,19}

MUESTRA	% P ₂ O ₅	g/t Σ ETR	g/t Y	g/t Ce	g/t La	g/t Nd
MR (III)	4,14	420	140	22	36	18
MR (II)	13,24	1200	530	110	150	23
MR (I)	23,30	1300	830	101	140	27
TG-IV	6,28	300	96	65	47	30
TG-III	9,88	400	104	66	52	49
TG-II	26,5	1100	465	113	148	84

Nota: MR – Depósito “Meseta Roja”. Tipos lito-geológicos: III (granular calcárea, bajo P₂O₅), II (granular calcárea, contenido medio P₂O₅), I (conglomerado fosfórico). **TG – Yacimiento Trinidad de Guedes.** Tipos lito-geológicos: IV (granular calcárea, bajo en P₂O₅), III (granular calcárea, contenido medio en P₂O₅) y II (granular arcillosa, altos contenidos promedios de P₂O₅).

1.5.6 Lateritas

No hay ejemplo de depósito conocido hasta ahora. Las mejores opciones radican en las cortezas desarrolladas sobre la sección máfica de la asociación ofiolítica (gabros bandeados y efusivos oceánicos), particularmente en lo que se refiere al Sc (escandio).

1.6 Zonas favorables para la localización de depósitos de ETR en Cuba

Por sus características geológicas, las regiones que presentan mayores perspectivas son Ciego – Camagüey – Las Tunas, particularmente su mitad oriental, caracterizada por un desarrollo relativamente importante del magmatismo alcalino, y el Macizo Metamórfico Isla de la Juventud, donde además de un intenso metamorfismo regional, se presume la presencia de granitos tipo “S”, originados en eventos orogénicos de colisión, reconocidos por la literatura especializada como buenos portadores, en forma dispersa, de estos metales, particularmente en el caso de

las tierras raras pesadas, por lo que constituyen la roca madre ideal para la formación de depósitos del tipo arcilloso de ETR. Por otro lado, los depósitos conocidos de fosforita tienen como seria limitante que son de pequeño tamaño.

1.7 Posibilidades de encontrar depósitos de ETR de interés económico en Cuba.

En los grandes depósitos endógenos (primarios) las tierras raras son extraídas como subproducto o producto acompañante de la minería y metalurgia del hierro, el cobre y el oro (productos principales). Este es el caso de Bayan Obo (R. P. China), el mayor depósito de ETR del mundo, donde los ETR (5 % – 6 % de ETR total en menas) son un producto acompañante del hierro (Lehmann, 2014). Esto permite, en esos casos, bajar un tanto el contenido de borde. Sin embargo, para los depósitos donde los ETR constituyen el producto principal, en virtud de los precios actuales y de su comportamiento futuro esperado, este

parámetro técnico – económico (contenido de borde) es muy exigente, teniendo valores altos (5 % - 7 % de ETR total).

A título de ejemplo ilustrativo de las condiciones técnico económicas de los yacimientos productores de ETR en el mundo, Mountain Pass (USA), un depósito de ETR asociado a carbonatitas, entró en producción en el 2013, tras una inversión de 1 400 millones de USD en minería y tecnología de procesamiento representativo de lo más avanzado en el mundo, con una producción anual entre 13 mil y 19 mil toneladas de óxidos de ETR. Se trata de una mina a cielo abierto con reservas ascendentes a 18 millones de toneladas de mena, con un contenido de borde del 5 % de ETR y un contenido medio del 8 % de ETR, siendo mucho mayores sus recursos geológicos. Otro ejemplo es el proyecto Mount Weld (Australia), con reservas ascendentes a 24 millones de toneladas de mena, con ley promedio de 7,9 % de ETR. La mina, a cielo abierto, fue inicialmente proyectada para operar con un contenido de borde del 2,5 %. Sin embargo, el comportamiento de los precios ha obligado a modificar el contenido de borde, elevándolo a 4 - 7 %, con la correspondiente reducción de las reservas (Lehmann, 2014).

En el caso de las vetas de Th – ETR, el único modelo de depósito endógeno de ETR posible de encontrar en Cuba, los depósitos pertenecientes a este modelo en el mundo raras veces superan el millón de toneladas de mena y su ley generalmente oscila entre 0,4 y 4,0 % de ETR. Esto, unido a lo expuesto en párrafos anteriores, permite concluir que las posibilidades de encontrar depósitos endógenos de interés económico en el país son extremadamente bajas.

Las perspectivas de recuperación de ETR a partir de menas fosforíticas

dependen mucho del desarrollo, exitoso o no, de una tecnología económica de extracción de ETR y del tamaño del yacimiento objeto de evaluación, máxime si se tiene en cuenta la depresión que produciría en los precios la introducción en otras partes del mundo de tal tecnología, ya que su aplicación en los grandes yacimientos de fosforita en Marruecos, Sahara Occidental y los Estados Unidos, podrían hacer bajar aún más los precios de las ETR. En vista de todo lo anterior y del pequeño tamaño de los depósitos cubanos de fosforita, se considera altamente improbable que la extracción de ETR en Cuba a partir de fosforita pueda ser económica.

En conclusión, sólo unos pocos proyectos, apoyados en depósitos de gran tamaño, alta ley de ETR y/o bajo costo, entre los más de 200 proyectos de exploración de REE desarrollados en años recientes en todo el mundo serán capaces de sobrevivir en un mercado cada vez más competitivo (Lehmann, 2014). En estas condiciones, resultan muy bajas las probabilidades de encontrar en el país depósitos de ETR que, por su tamaño y características, puedan constituir una fuente económica de ETR. Esto no significa que la temática de los ETR no sea digna de investigación en Cuba, sino que debe ser abordada con una percepción correcta y realista de los posibles resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Alonso A; Saito A, Takashi Y. 1991. Distribución de elementos secundarios en menas cubanas y productos de su procesamiento industrial. Memorias del II Simposio Internacional de Minería y Metalurgia, MINIMETAL 91, Tomo II, pag. 703-711, Palacio de Convenciones, 20-22 Noviembre, La Habana, Cuba.
- British Geological Survey. 2010. Commodities Profiles. Compiled by Abigail Walters and Paul Lusty with the

- assistance of Claire Chetwyn and Amanda Hill, *www.Minerals UK.com*
- Castor S.B., Hedrick J.B. 2006. Rare Earths Elements. In: Kogel J.E, Trivedi N.C., Barker J.M.; Krukowski S.T. *Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets, and uses*, 7th edition, SME. p. 1568.
- Castor S.B.; Hedrick J.B. USGS Minerals Commodity. 2015. United States Geological Survey. Compiled, www.usgs.gov
- Christmann. 2014. A forward look into rare earth supply and demand: a role for sedimentary phosphate deposit? 2nd International Symposium on "Innovation and Technology in the Phosphate Industry", Procedia Engineering, in print.
- CAMIER.2015. Cámara Minera del Perú. Enlace Minería <http://www.camiper.com/>
- Dill H. G. Dill. 2010. The chessboard classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology. *Earth-Science Reviews*, Volume 100, Issues 1–4.
- Distler V.V.; Kriasko V.V.; Sansdomerskaya S.M.; Botova M.M.; Sviechkova V.V.; Nikolskaya N.M.; Eschenova Z.A.; Bielovsov G.E.; Falcón J.; Campos M.; Muñoz N.; Rodríguez J.; Guardado R.; Rodríguez A.; Cabrera R.; Fonseca E.; Rodríguez D.; Guerra I.; López I.; Ávila E. 1989. Información de la presencia de EGP en lateritas y cromitas de Cuba. Instituto de Geología de los yacimientos minerales, Petrografía, Mineralogía y Geoquímica, Academia de Ciencias de la URSS, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, Instituto de Geología y Paleontología, Ministerio de la Industria Básica, Cuba, Empresa del níquel "Pedro Soto Alba", Moa, Cuba, Empresa Minera Holguín, Moa, Cuba, 45p.
- Gervilla, F.; Proenza, J.A.; Frei, R.; González-Jiménez, J.M.; Garrido, C.J.; Melgarejo, J.C.; Meibom, A.; Díaz-Martínez, R.; Lavaut, W. 2005. Distribution of platinum-group elements and Os isotopes in chromite ores from Mayarí-Baracoa Ophiolite Belt (eastern Cuba). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 150, 589–607p.
- González, R.; Chang, A; García, M; Molina, R. 1999. Proyecto reconocimiento geológico para oro en los sectores Ferrolana y Caridad. Inédito.
- González- Jiménez, J.M.; J.A. Proenza; F. Gervilla; J.C. Melgarejo; J.A. Blanco-Moreno; R. Ruiz-Sánchez; W.L. Griffin. 2011. High-Cr and high-Al chromitites from the Sagua de Tánamo district, Mayarí-Cristal ophiolitic massif (eastern Cuba): Constraints on their origin from mineralogy and geochemistry of chromian spinel and platinum-group elements. *LITHOS*-02396, 21p.
- Harben P. W. 2002. *Industrial Minerals Handbook*, 4th edition, Rare Earths Minerals and Compounds.
- Hou Z.; Tian S.; Xie Y.; Yang Z.; Yin S; Yi L.; Fei H.; Zou T.; Bai and Li X. 2010. The Himalayan Mianning – Dechang REE Belt associated with carbonatite-alcaline complexes, eastern indo-asian collision zone, SW China. *Ore Geology Review*. 36, 65-89 p. *Industrial Minerals and Rocks*. 2014, Junio.
- Jorgenson, J. D. y M. W. George. 2005. Indium. Mineral Commodity Profile. Open-File Report 2004-1300. 20 p.
- Lazarenkov, V. G.; I. N. Tikhomirov; A. Ya. Zhidkov; I. V. Talovina. 2005. Platinum Group Metals and Gold in Supergene Nickel Ores of the Moa and Nicaro Deposits (Cuba). *Lithology and Mineral Resources*, Vol. 40, No. 6, 2005, 521–527p. Translated from *Litologiya i Poleznyel skopaemye*, No. 6, 2005, pp. 600–608. Original Russian Text Copyright © 2005 by Lazarenkov, Tikhomirov, Zhidkov, Talovina.
- Laznicka, P. 2010. *Giant Metallic Deposits. Future Sources of Industrial Metals*. Second edition. Springer- Verlag Berlin Heidelberg 2006, 2010: 961 p. ISBN 978-3-642-12404-4 e-ISBN 978-3-642-12405-1.DOI 10.1007/978-3-642-12405-1.
- Lehmann T. 2014. Economic geology of rare-earth elements in 2014: a global perspective. *European Geologist* 37: 21 – 24p.
- Mederos P. 1980. Regularidades de distribución y composición sustancial de las fosforitas de la región Güines–Pipián (yacimiento "Meseta Roja"), Tesis doctoral, Moscú.
- Mederos P y otros.1991. Mapa Pronóstico para rocas fosfóricas 1: 500 000 y

- estudio de la composición sustancial. Proyecto de Investigación, código 401-10, IGP, MINBAS, U.G.M.
- Montejo-Serrano E; Pérez M y otros. 2008. Investigaciones Polimetálicas Castellanos, Informe de Investigación, Archivo ICT- CIPIMM.
- Moss, R.L.; E. Tzimas; H. Kara; P. Willis; J. Kooroshy. 2011. Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. JRC Scientifics and Technical Reports. JRC 65592. ISBN 978-92-79-20698-6. ISSN 1018-5593 doi: 10.2790/35600
- Orris G. J; Grauch R. I. 2002. Rare earth element mines, deposits, and occurrences. US Geol. Survey Open-File Report 02-189: 1-174p.
- Pérez E.; Pimentel H.; Pardo M.; Lugo R.; Viltres R.; García M.; González V.; Pérez J.; Prieto O.; Ayala T.; Gálvez F.; Barroso A.; Pérez A.; Carrero A. 1998. Interpretación tectono-estructural de los datos geofísicos en la región Ciego de Ávila- Camagüey-Las Tunas. Informe inédito.
- Prichard, H., Neary, C., Potts, P.J. 1986. Platinum Group Minerals in the Shetland Ophiolite. In: Gallagher, M.J., Ixer, R.A., Neary, C.R., Prichard, H.M. Ed. Metallogeny of Basic and Ultrabasic Rocks. The institution of Mining and Metallurgy, London, U.K, pp. 395–414p.
- Proenza, J.A.; Gervilla, F.; Melgarejo, J.C.; Bodinier, J.L. 1999. Al- and Cr-rich chromitites from the Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt (Eastern Cuba): consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotites in suprasubduction mantle. *Economic Geology* 94, 547–566 p.
- Taylor S.R., and Mc Lennan S.M. 1985. The continental crust: its composition and evolution: Blackwell, Oxford. USA Academy of Sciences. 2007. Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy
- USGS Minerals Commodity . 2002. United Stated Geological Survey. Compiled by Hedrick J.B, www.usgs.gov
- U.S. Geological Survey. 2015.a. Gallium. Mineral Commodity Summaries.
- U.S. Geological Survey. 2015.b. Germanium. Mineral Commodity Summaries.
- U.S. Geological Survey. 2016. Germanium. Mineral Commodity Summaries.
- Wellmer F.W, Dalheimer M. 2012. The feedback cycle as regulator of past and future mineral supply. *MineraliumDeposita*47: 713-729. DOI: 10.1007/s00126-012-0437-0.
- Woodhouse, M., A. Goodrich, R. Margolis, T. L. James, M. Lokanc, R. Eggert. 2013. Supply-Chain Dynamics of Tellurium, Indium, and Gallium Within the Context of PV Manufacturing Costs. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 3, (2): 833 – 837.
- Zhou, M.F.; Keays, R.R.; Kerrich, R.W. 1998. Controls on platinum-group elemental distributions of podiform chromitites: a case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 677–688.
- KPMG. 2015. Commodity insights Bulletin June 2015 Platinum.

ANEXOS

Anexo No 1.

**Precios metales menores Febrero 2016
SMM Shanghai Metals Market**<http://www.metal.com/metals/minor-metals/prices>

Elemento - Precio mínimo - precio máximo - precio promedio - moneda/unidad de medida

Galio:

Gallium (≥99.99%)	760 - 860	810	RMB/kg
High Purity Gallium (6N)(99.9999%)China	1,100 - 1,200	1,150	RMB/kg
High Purity Gallium (6N)(99.9999%)FOB	255 - 265	260	USD/kg
High Purity Gallium (7N)(99.9999%)China	1,300 - 1,400	1,350	RMB/kg
High Purity Gallium (7N)(99.9999%)FOB	288 - 300	294	USD/kg

Germanio:

Germanium Ingot (50Ω/cm)	8,200 - 9,300	8,750	RMB/kg
Germanium Dioxide (99.999%) China	6,300 - 6,800	6,550	RMB/kg
Germanium Dioxide (99.999%) FOB (USD/kg)	1,420 - 1,450	1,435	USD/kg

Indio:

Indium (≥99.99%)	1,300 - 1,350	1,325	RMB/kg
Crude Indium (≥99%) China	1,150 - 1,200	1,175	RMB/kg

Wolframio:

Tungsten Powder (-200 mesh,-300 mesh,-400 mesh)	255 - 280	267.5	RMB/Kg
Tungsten Carbide Powder (-200 mesh)	253 - 278	265.5	RMB/kg
Crude Indium (≥99%) China	1,150 - 1,200	1,175	RMB/kg

Niobio:

Niobium (≥99%)	600 - 650	625	RMB/kg
----------------	-----------	-----	--------

Renio:

Rhenium (99.99%)	42,000 - 52,000	47,000	RMB/kg
------------------	-----------------	--------	--------

Zirconio:

Zirconium Sponge (≥99%)	170 - 185	177.5	RMB/kg
-------------------------	-----------	-------	--------

Cadmio:

#0 Cadmium Ingot&Bar (≥99.995%)	7,800 - 8,300	8,050	RMB/mt
#1 Cadmium Ingot&Bar (≥99.99%)	7,300 - 7,800	7,550	RMB/mt

Elementos de Tierras Raras:

Oxide ((Nd ₂ O ₃ +Pr ₆ O ₁₁)/TREO≥75.0%)	262,000 - 265,000	263,500	RMB/mt
---	-------------------	---------	--------

Dysprosium Oxide (Dy ₂ O ₃ /TREO 99.5-99.9%) RMB/kg	1,350 - 1,400	1,375
Erbium Oxide (Er ₂ O ₃ /TREO 99.5-99.9%) RMB/mt	195,000 - 200,000	197,500
Gadolinium Oxide (Gd ₂ O ₃ /TREO 99.5-99.9%) RMB/mt	73,000 - 76,000	
Lanthanum Oxide (La ₂ O ₃ /TREO 99.5-99.9%) RMB/mt	9,600 -	
Neodymium Oxide (Nd ₂ O ₃ /TREO 99.0-99.9%) RMB/mt	245,000 - 255,000	250,000
Praseodymium Oxide (Pr ₆ O ₁₁ /TREO 99.0-99.9%) RMB/mt	305,000 - 315,000	310,000
Samarium Oxide (Sm ₂ O ₃ /TREO 99.5-99.9%) RMB/mt	12,000 - 13,000	
Cerium Oxide (CeO ₂ /TREO 99.5-99.9%) RMB/mt	9,600 - 10,700	
Terbium Oxide (Tb ₄ O ₇ /TREO 99.95-99.99%) RMB/kg	2,350 - 2,500	2,425
Yttrium Oxide (Y ₂ O ₃ /TREO 99.995-99.999%) RMB/mt	27,000 - 28,000	27,500
Europium Oxide (Eu ₂ O ₃ /TREO 99.95-99.99%) RMB/kg	550 - 600	575
Antimonio:		
#2 antimony ingot (Sb≥99.65% Bi≤100ppm) RMB/mt	33,500 - 34,500	34,000
#2 Antimony Ingot (≥99.65%) RMB/mt	32,500 - 33,500	33,000
#1 Antimony Ingot (≥99.85%) RMB/mt	34,500 - 35,500	35,000
#0 Antimony Ingot (≥99.91%) RMB/mt	35,500 - 36,500	36,000
Antimonous Oxide (≥99.50%) China RMB/mt	30,000 - 31,000	30,500
Antimonous Oxide (≥99.50%) China prices trend		
Antimonous Oxide (≥99.50%) FOB(USD/mt) USD/mt	7,661 - 7,823	7,742
Antimonous Oxide (≥99.80%) China RMB/mt	31,000 - 32,500	31,750
Antimonous Oxide (≥99.80%) FOB(USD/mt) USD/mt	7,823 - 7,984	7,903.5
Estibina (concentrado de antimonio):		
Stibnite Concentrate (Sb≥55%) RMB/mt(metal content)	24,000 - 25,000	24,500
Stibnite Concentrate (Sb50%-60%) Imported RMB/mt(metal content)	24,500 - 25,500	25,000
Stibnite Concentrate (Sb40%-50%) Imported RMB/mt(metal content)	22,500 - 23,500	23,000
Stibnite Concentrate (Sb30%-40%) Imported RMB/mt(metal content)	20,200 - 22,200	21,20

Nota: no conocemos a qué moneda corresponde la sigla RMB

Anexo No. 2 GLOSARIO DE TÉRMINOS

ETR: Elementos de las tierras raras
EGP: Elementos del grupo del platino
MPG: Metales del grupo del platino
ERD: Elementos raros y dispersos
La: Elemento químico Lantano
Sc: Elemento químico Escandio
Y: Elemento químico Itrio
Pm: Elemento químico Prometio
Ce: Elemento químico Cerio
Ag: Elemento químico Plata
Cu: Elemento químico Cobre
Pb: Elemento químico Plomo
Li: Elemento químico litio
W: Elemento químico wolframio
Lu: Elemento químico Lutecio
Eu: Elemento químico europio
Tb: Elemento químico terbio
Nd: Elemento químico neodimio
Pr: Elemento químico praseodimio
Fe: Elemento químico hierro
P: Elemento químico fósforo
Au: Elemento químico oro
Th: Elemento químico torio
Zn: Elemento químico zinc
Sc: Elemento químico escandio
U: Elemento químico uranio
Ga: Elemento químico galio
Ge: Elemento químico germanio
Nb: Elemento químico niobio
Ta: Elemento químico tántalo
Pb: Elemento químico plomo
Sb: Elemento químico antimonio
Mo: Elemento químico molibdeno
Ru: Elemento químico rutenio
Rh: Elemento químico rodio
Pd: Elemento químico paladio
Pt: Elemento químico platino
Os: Elemento químico osmio
Se: Elemento químico selenio
Sb: Elemento químico antimonio
As: Elemento químico arsénico
Hg: Elemento químico mercurio
Ir: Elemento químico iridio
CFA: Carbonato-fluorapatito
LREE: Elementos químicos de las tierras raras ligeras
HREE: Elementos químicos de las tierras raras pesadas
ppm: Unidad de masa expresada en partes por millón (equivalente a 10^{-4} %; 1g/t; 1mg/kg)
ZSS: Zona de supra - subducción
Carbonatitas: Rocas ígneas ricas en carbonatos, que en proporción mayor del 50 % es de origen magmático.

WIDIA: Carburo de wolframio o carburo de tungsteno. Compuesto cerámico formado por wolframio y carbono con composición química de W_3C hasta W_6C , el que debido a su elevada dureza, se usa en la fabricación de maquinarias y utensilios para trabajar el acero. De esta característica también recibe el nombre de «vidia» (en alemán widia, como abreviatura de wiedziamant (como el diamante”).

USA: Estados Unidos de América

USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos

RPD: República Popular de Corea

TG: Trinidad de Guedes (nombre del depósito de fosforitas ubicado en Unión de Reyes, Matanzas).

MR: Meseta Roja (nombre del depósito de fosforitas ubicado en la región Güines-Pipián, Mayabeque).

Granitos tipo I y tipo S: Son granitos que en cada caso se originan de más de una fuente.

SEDEX subtipo Selwyn: Se refiere al modelo de depósito mineral Exhalativo Sedimentario. Este es el modelo de formación de los depósitos minerales de Pb – Zn (Au) Santa Lucía y Castellanos de Pinar del Río. Originados en una cuenca similar a la Selwyn de Canadá.

VMS silicoclástico máfico: Se refiere al modelo de depósito mineral Volcanogénico de Sulfuros Masivos hospedado en rocas silicoclásticas y relacionado con un magmatismo máfico. Este es el modelo de formación del depósito La Unión I – II y Juan Manuel en Pinar del Río.

Vetas de W: Se refiere al modelo de depósito mineral de vetas de Wolframio. Este es el modelo de formación del depósito de W Lela, el que se localiza en la Isla de Juventud.

Fe - Ni - Co (con Sc) en lateritas: Se refiere al modelo de depósitos de hierro – níquel – cobalto supergénico laterítico, presentes en Cuba, el que contiene cantidades de escandio (Sc). Yacimientos Punta Gorda y San Felipe.

MVT: Se refiere al modelo de depósito mineral Valle del Mississippi. Ejemplo de este tipo de depósito en Cuba lo constituyen Carlota y Guachinango en la Sierra de Guamuhaya, Cuba Central.

GM Centro – Empresa Geominera Centro

Cromititas ofiolíticas: Se refiere al modelo de depósito mineral de las cromitas presentes en Cuba, que pueden contener cantidades de EGP.

Dunitas negras: Se refiere al modelo de depósito mineral de dunitas negras conteniendo cantidades de EGP

Cu - Ni orogénico: Se refiere al modelo de depósito mineral del tipo Cu - Ni orogénico, que también puede contener EGP

Cu - Mo Porfírico: Se refiere al modelo de depósito mineral del tipo Cu - Mo Porfírico, el que también puede contener EGP

Cu - Co hospedado en sedimentos: Se refiere al modelo de depósito mineral del tipo Cu - Co hospedado en sedimentos, el que también puede contener EGP

Gossan: Sombrero de hierro. Estos se forman por la oxidación de menas sulfurosas en la superficie y pueden concentrar metales pesados, entre los que se incluyen EGP, ETR y Au.

AC de la URSS: Academia de Ciencias de la extinta Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/63.pdf>