

25

209



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**GEOLOGIA, PROSPECCION Y ASPECTOS ECONOMICOS DE  
LOS YACIMIENTOS MINERALES DE TIERRAS RARAS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO GEOLOGO**

**P R E S E N T A :**

**LAZARO IGNACIO RODRIGUEZ ARVIZU**



1990

**TRABAJOS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## CONTENIDO

- I. INTRODUCCION
  - 1.1. Panorama mundial
  - 1.2. Historia en México de las tierras raras
  - 1.3. Las tierras raras
    - 1.3.1.) Elementos de tierras raras
    - 1.3.2.) Propiedades químicas y físicas
  - 1.4. **Minerales de tierras raras**
    - 1.4.1.) **Características de los principales minerales de tierras raras**
      - a) Fosfatos
      - b) Silicatos
      - c) Fluor-carbonatos
      - d) Haluros
      - e) Oxidos
  - 1.5. Geoquímica de los elementos de tierras raras
  
- II. **CLASIFICACION DE LOS YACIMIENTOS DE TIERRAS RARAS**
  
- III. **MODELO DE LOS YACIMIENTOS DE TIERRAS RARAS**
  - III.1. **Yacimientos de tierras raras de origen sedimentario**
    - III.1.1.) **Rocas sedimentarias de ambientes epicontinentales**
    - III.1.2.) **Rocas sedimentarias detríticas; continentales y marginales**
      - a) De playa
      - b) Placeres fluviales
      - c) Placeres eluviales
      - d) Depósitos fósiles de placer
  - III.2. **Yacimientos de tierras raras de origen plutónico**
    - III.2.1.) Rocas plutónicas alcalinas
  - III.3. Otros ambientes geológicos

- III.3.1.) Las pegmatitas
- III.3.2.) Yacimientos de fluorita
- III.3.3.) Yacimientos de skarn
- III.3.4.) Rocas ultramáficas serpentinizadas de complejos ofiolíticos

#### IV. LA PROSPECCION DE LAS TIERRAS RARAS

- IV.1. Guías para la prospección de tierras raras
  - IV.1.1.) Guías fisiográficas
  - IV.1.2.) Guías mineralógicas
  - IV.1.3.) Guías litológicas
  - IV.1.4.) Guías tectono-estructurales
- IV.2. Métodos analíticos de prospección de las tierras raras
  - IV.2.1.) Métodos volumétricos
  - IV.2.2.) Métodos ópticos
  - IV.2.3.) Análisis de activación neutrónica
  - IV.2.4.) Análisis de disolución isotópica-espectroscopía de masas
  - IV.2.5.) Espectrómetro de emisión de plasma inductivamente conectado

#### V. METODOS DE EXPLOTACION

#### VI. BENEFICIO

#### VII. USOS

#### VIII. ESTUDIO DE MERCADO

- VIII.1. Introducción
- VIII.2. Producción
- VIII.3. Consumo
- VIII.4. Comercio internacional

- VIII.5. Precios
- VIII.6. Reservas mundiales
- VIII.7. Perspectivas para México y el mundo

## IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## BIBLIOGRAFIA

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCION**

## I. INTRODUCCION

Desde épocas remotas el hombre ha utilizado los recursos no renovables para su beneficio. Actualmente el crecimiento de la población y el gran desarrollo industrial provocan una demanda, cada día mayor, de los recursos no renovables; este es aún mayor en los países altamente desarrollados que generalmente no son autosuficientes, principalmente en minerales estratégicos.

Así, los diversos campos al frente de la tecnología moderna, tales como la aeronáutica, la superconductividad y la informática se basan en la creación de nuevas aleaciones. Las industrias petroquímica y siderúrgica necesitan de nuevos elementos que, hasta ahora, tenían un uso mínimo.

Hoy se vive una etapa de transición, donde la fase de la investigación pasa a la aplicación industrial, por lo que es necesario no dejar atrasar al sector minero; en este terreno, México posee, probablemente, entre sus reservas naturales sin explotar algunos de estos metales tales como el Berilo, Galio, Torio, Germanio, Litio, Niobio, Tantalio, Vanadio, Titanio, Zircón y Tierras Raras (T.R.).

El presente trabajo está encaminado a la clasificación, modelos y prospección de yacimientos con posibilidades de contener tierras raras (T.R.) en México; así mismo, tiene el propósito de hacer conciencia, en los encargados a todos los niveles, de la industria minera de que deben elaborar planes de exploración y explotación mucho más enérgicos que los actualmente realizados para estos elementos.

### I.1. Panorama mundial

El grupo de elementos de T.R. o grupo de los lantánidos (elementos de

transición interna), fueron descubiertos a partir del elemento cerio (Ce) por Berzelius Jacob y Wilhelm Hisinger en 1803 (Enciclopedia Británica, 1974), desde entonces y hasta 1947 cuando se descubrió el último elemento de T.R. se sigue estudiando a este grupo de elementos; estado en la naturaleza, propiedades físicas y químicas, ocurrencia, ambiente de formación, usos, etc.

Así algunos depósitos asociados a tierras raras han sido mencionados; "las carbonatitas de Kaiserstuhl, Alemania en 1846 (Stanton, 1972), posteriormente en la India (Bose, 1884), Escandinavia en el área de Fen en Telemark (Hogbom, 1895) " (1). El principal yacimiento de T.R. en carbonatitas fue descubierto con un contador geiger en Mountain Pass California, E.U.A. en 1949 (Anónimo, 1950).

En Africa también se presentan carbonatitas tales como las vetas de Karonge con bastnaesita al SE de Bujumbura en la república de Burundi, las cuales fueron abandonadas en 1979.

En Araxá, Brasil se presentan suelos enriquecidos en T.R. como producto del intemperismo de complejos alcalinos y carbonatitas

En China los depósitos de T.R. se alojan en cuerpos mineralizados en Fe en el distrito de Nei Mongool al norte de China.

Desde 1952-1959 y 1962-1963 se trabajaron vetas no carbonatíticas entre los poblados de Cape Town y River Orange en la república de Sudáfrica.

Otros yacimientos de gran importancia son las concentraciones de placer que han sido los principales recursos de elementos de T.R. desde 1965. Dichos yacimientos se localizan en Brasil, India, E.U.A., Malasia, aunque el mayor potencial son los de Australia.



En Australia se han explotado las arenas con minerales pesados, principalmente, ilmenita aunque el rutilo, zircón, leucoxeno y monacita son obtenidos como subproductos. Los trabajos mineros son reportados desde 1956, en la bahía de Geographe al sur oeste de Australia, en Eneabba a 250 km al norte de Perth desde 1974. Así, los principales recursos de monacita en Australia se presentan en la costa oeste del área de Midlands al norte de Perth.

Con lo que respecta a Brasil, los depósitos de monacita fueron descubiertos en bancos de arena en Alcobaca, estado de Bahía. Los mayores depósitos ocurren a lo largo de la costa desde Río de Janeiro hasta Canavieiras.

En la India, el principal yacimiento de placer ocurre al sur, en las áreas de Manavala Kurichi en Tamil Nadu y en la región de Chavara, del estado de Kerala.

E.U.A. ha extraído monacita en forma esporádica de sus depósitos fluviales en el estado de Cleveland, Nueva Carolina. Los yacimientos de Cove Springs y Boulougne al norte de Florida (garnar, 1981) proveían elementos de T.R. puesto que en 1978 se agotó la reserva de Boulougne y en 1980 Cove Springs se cerró. (Neary y Highley, 1984) (Ver Fig. 1.1.)

Por otro lado, otro potencial de elementos de T.R. lo constituyen los yacimientos de la apatita; los de origen marino (basados en la producción de ácido fosfórico) que contienen entre 110 y 1550 ppm de óxidos de T.R. (Robinson, 1948). Otra característica en rocas sedimentarias fosfatadas es que están enriquecidas en ytrio y empobrecidas en cerio, lo que refleja la composición del agua marina. (Altschuler, 1967; Altschuler, 1980).

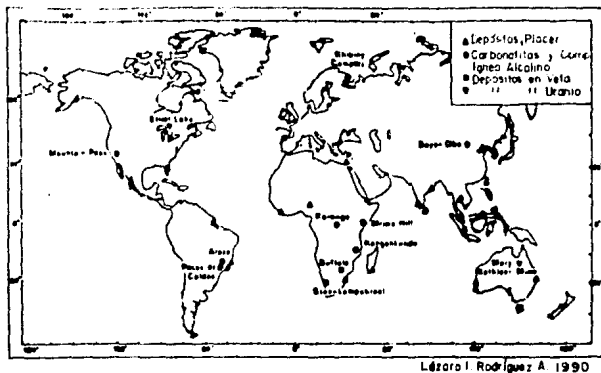


Fig. 1.1. Localización de los principales depósitos de T.R. en el mundo.

## 1.2. Historia en México de las tierras raras

Entre los pioneros en el descubrimiento de minerales de T.R. en México está Martínez B. J.J., quien presentó en su tesis (1955) un reconocimiento geológico de la región pegmatítica de Telixtlahuaca, Oaxaca y mencionó la ubicación de éstas en un plano anexo.

Para 1959, de la Peña Porth indicó la existencia de allanita en las pegmatitas de Telixtlahuaca con altas concentraciones de T.R. El carácter económico de esta misma localidad, es posteriormente, menospreciado por González R. (1965) pues menciona que se "necesitaría un número mayor de pegmatitas de las ya conocidas". En 1975 dos tesis, Carrillo M. y Nieto E. realizaron un estudio bibliográfico de T.R. en México, enfocando su trabajo desde un punto de vista metalúrgico.

Por otro lado, en ese mismo año, Cepeda D. L. y Ortega F. dedicaron sus trabajos a T.R.; el primero sospecha de la presencia de carbonatitas en el complejo

alcalino de la sierra de San Carlos, Tamaulipas; mientras que el segundo, sugiere que algunos cuerpos de calcita y silicatos en la zona de Acatlán, Puebla, pudieran corresponder a carbonatitas o calizas transportadas y parcialmente asimiladas, lo cual en 1982, Elías H. M. lo refutó.

En 1980 el Consejo de Recursos Minerales (C.R.M.) investigó las anomalías de T.R. del Cerro de Chile y Sierra de los Ajos, Sonora, donde se encontró monacita en depósitos de talud al pie de intrusivos graníticos. En este año, el ingeniero Morales acompañó al Dr. Spruill R. de la Universidad de Carolina del Norte en un muestreo enfocado a tierras raras del cual, hasta la fecha, se desconocen los resultados.

Al siguiente año (1981) Gómez C. A. a través del C.R.M. llevo a cabo un programa de exploración regional de los minerales de T.R. para determinar los ambientes en donde suelen presentarse. Concluye que las prospecciones deben enfocarse, principalmente, a las rocas fosfóricas de Baja California por su alto tonelaje y su asociación con las T.R., así como a las unidades litológicas con fosforita en México. En segundo término, se deben dirigir las prospecciones a la búsqueda de carbonatitas, skarns de Fe y a las pegmatitas.

Elías H. M. (1985) en la revista de GEOMIMET y a través del C.R.M. mencionó que en el área de el Picacho, Tamps., aflora un complejo que guarda cierta asociación con rocas carbonatíticas; observó diques con contenido de lantánidos dentro de agregados granulares de monacita. Por estas mismas fechas Nieto O. J. hizo un resumen de las T.R. en carbonatitas, en donde compiló toda la información acerca de las tierras raras en éstas rocas (Facultad de Ingeniería, UNAM).

En 1985 Elías H. M. escribió un artículo en la Gaceta Mineralógica de

la Sociedad Mineralógica Mexicana A.C. (S.M.M, de A.C.) sobre los ambientes geológicos de las T.R. donde resume en forma sencilla a estos y cita algunos ejemplos mundiales, así como la posibilidad de tenerlos en México.

Recientemente (1989) el mismo Elías H. M., en el tercer simposium sobre geología regional, mencionó la mineralización de T.R. en el área de el Picacho, su petrogénesis y concentraciones de Ti, Zr, Y y Nb.

### **1.3. Las tierras raras**

#### **1.3.1) Elementos de tierras raras.**

Los elementos de T.R. son conocidos como el grupo de los lantánidos que van desde el lantano (número atómico, 57) hasta el lutecio (número atómico, 71); se incluye al ytrio (número atómico, 39), así como al escandio (número atómico, 21) porque es químicamente similar al ytrio y a los lantánidos, pero se diferencia en su ocurrencia (Spencer S. S, 1982).

Las tierras raras fueron primeramente divididas en 3 subgrupos por el químico Berzelius por los años 1800's (Spencer S. S., op. cit.); sin embargo, actualmente se manejan dos subgrupos de acuerdo con sus propiedades:

- Subgrupo de las T.R. ligeras o del cerio (lantano-europio).
- Subgrupo de las T.R. pesadas o del ytrio (ytrio, gadolino-lutecio).

El subgrupo del cerio está constituido por los elementos más abundantes y son:

lantano	número atómico	57
cerio	" "	58
praseodimio	" "	59
neodimio	" "	60
prometio	" "	61
samario	" "	62
europio	" "	63

Mientras que el subgrupo del ytrio más el gadolinio está conformado por:

gadolinio	número atómico	64
terbio	" "	65
dysprosio	" "	66
holmio	" "	67
erbio	" "	68
tulio	" "	69
ytterbio	" "	70
lutecio	" "	71

Existen otros autores que mencionan un tercer grupo, el cual es una combinación de los dos anteriores. La tabla 1.1. ilustra lo anterior.

De acuerdo con el número cuántico, a los subniveles u orbitales y a que " los electrones entrarán primero al subnivel de menor energía " (Ander P. y Sonnessa A, 1978) se tiene que la configuración de cada elemento de las tierras raras es la siguiente:

T A B L A 1.1

ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS			
L I G E R O S		P E S A D O S	
ELEMENTOS	SIMBOLO	ELEMENTO	SIMBOLO
Lantano	(La)	Gadolinio	(Gd)
Cerio	(Ce)	Terbio	(Tb)
Praseodimio	(Pr)	Dysprosio	(Dy) Sc <sup>a</sup> Th <sup>a</sup>
Neodimio	(Nd)	Holmio	(Ho)
Prometio	(Pm)	Erbio	(Er)
Samario	(Sm)	Tulio	(Tm)
Europio	(Eu)	Yterbio	(Yb)
		Lutecio	(Lu)
		Ytrio	(Y)

\* Se incluyen, pero no son T.R.

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
Facultad de Ingeniería

57	$1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^6 4S^2 3D^{10} 4P^6 5S^2 4D^{10} 5P^6 6S^2 5D^1$
58	[Xe] $6S^2 4F^2$
59	[Xe] $6S^2 4F^3$
60	[Xe] $6S^2 4F^4$
61	[Xe] $6S^2 4F^5$
62	[Xe] $6S^2 4F^6$
63	[Xe] $6S^2 4F^7$
64	[Xe] $6S^2 4F^7 5D^1$
65	[Xe] $6S^2 4F^9$
66	[Xe] $6S^2 4F^{10}$
67	[Xe] $6S^2 4F^{11}$
68	[Xe] $6S^2 4F^{12}$
69	[Xe] $6S^2 4F^{13}$
70	[Xe] $6S^2 4F^{14}$
71	[Xe] $6S^2 4F^{14} 5D^1$

PRINCIPIOS DE QUIMICA. Ander P. y Sonnessa A., 1978.

Así, por la configuración electrónica de los elementos de tierras raras, éstos se conocen como el bloque f (Fig.1.2.)

ALCALINOS Y ALCALINO-TERREOS		TRANSICION										REPRESENTATIVOS					
		Sc															
		Y															
		La															
			LANTANIDOS (f) Y ACTINIDOS														
		Co	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		

Fig.1.2. Tabla periódica de Bohr. (A. Domínguez, 1974)

### I.3.2.) Propiedades químicas y físicas

Las propiedades químicas y físicas de los elementos de T.R. son muy semejantes, se observan pequeñas diferencias; lo cual es el reflejo de sus arreglos electrónicos, por esta razón se mencionarán sus propiedades a nivel de grupo.

#### - Propiedades químicas

Carrillo y Nieto (1979) sugieren " que a excepción del cerio, casi todos los compuestos de importancia de T.R. contienen iones trivalentes y que el samario, europio e yterbio forman compuestos divalentes; los cuales son agentes activos de reducción y se oxidan por la acción del aire en solución acuosa ".

Los elementos de T.R. forman compuestos con los acetatos; carbonatos; los haluros tales como, los fluoruros, cloruros, bromuros, ioduros, hidruros (con

menor importancia en aplicaciones), nitratos, oxalatos y fosfatos; así como también con sulfatos, óxidos e hidróxidos.

La basicidad aumenta del número atómico 71 (lutecio) con un valor de pH de 6.3 al número atómico 57 (lantano) con un pH de 8.3, lo cual resulta muy favorable para su tratamiento metalúrgico, pues por lo general, se utilizan ácidos para su obtención, aunque la calcinación es otra vía importante para su tratamiento (Tabla 1.2).

T A B L A 1.2

COMPUESTOS DE T.R.	METODO UTILIZADO PARA SU PREPARACION
ACETATOS	ácido acético
CARBONATOS	carbonato de sodio
BALUROS:	
Fluoruros	ácido fluorhídrico
Cloruros	ácido clorhídrico
Ioduros y Bromuros	poca importancia (son difíciles de preparar)
Hidruros	Calcinación, ácidos-álcalis
Nitratos	ácido nítrico
Oxalatos	ácido oxálico u oxalato de amonio
Fosfatos	ácido ortofosfórico
SULFATOS	ácido sulfúrico
OXIDOS	calcinación
HIDROXIDOS	solución de hidróxido de sodio, potasio o amonio

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
Facultad de Ingeniería



## - Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los elementos de T.R., como anteriormente se mencionan, son producto del arreglo electrónico de estos, los cuales se resumen en; peso atómico, tamaño, radio iónico (Å), estado de oxidación, electronegatividad, punto de fusión y ebullición (°C), y densidad a 20°C (gr/cm<sup>3</sup>), entre otros. Estas propiedades se resumen en la tabla siguiente:

ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS																
Número atómico	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
Peso atómico	138.91	—————					Aumenta					————— → 174.97				
Tamaño	1.69	—————					Tiende a Disminuir					————— → 1.56				
Radio iónico (Å)	1.061	—————					Disminuye					————— → 0.85				
Edo. oxidación	+3			Se conserva casi Igual (varía de +2+3+4)								+3				
Electronegatividad	1.08	—————					Tiende a Aumentar					————— → 1.14				
Punto de fusión (°C)	921	—————					Tiende a Aumentar					————— → 1,663				
Punto de ebullición (°C)	3,457					No es Uniforme					1,395					
Densidad a 20°C (gr/cm <sup>3</sup> )	6.14	—————					Tiende a Aumentar					————— → 9.84				

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
Facultad de Ingeniería

Las propiedades son importantes en la preparación y tratamiento metalúrgico para la obtención de T.R..

En la tabla 1.3 se muestran algunas propiedades físicas macroscópicas de los principales minerales que contienen elementos de T.R. y como asociados ytrio y torio.

T A B L A 1.3

(Principales Minerales que contiene T.R.)

PROPIEDADES FÍSICAS				
MINERAL	SISTEMA DE CRISTALIZACIÓN	COLOUR	P.E.	DUREZA
Bastnasita	Hexagonal *	parda rojizo transparente amarillo o pardo	4.9-5.2 5.2*	4-4.5 4.5*
Monacita	Monoclínico	amarillo a pardo rojizo	4.9-5.5	5.0-5.5
Xenotimo	Tetraogonal	amarillo pálido * a pardo verdoso	4.4-5.1	4 - 5
Cerita	Ortorrómico	parda a gris negro	4.9*	5.5*
Eusinita	Seud- Ortorrómico	negro	4.7-5	5.5-6.5
Gadolinita	Monoclínico	parda- blanco *	4-4.5 4.4*	6.5-7 6.7*

Datos obtenidos: Carrillo y Nieto 1975, Rodríguez Arvizu *et al.*, 1990  
 Facultad de Ingeniería  
 \* Spencer S. Shannon, 1975.

#### 1.4. Minerales de tierras raras

En la naturaleza los minerales comunes formadores de roca presentan muy bajas concentraciones de T.R. mientras que aproximadamente 200 minerales contienen, en cantidades menores, más de 0.01% de éstas. Los minerales que contienen T.R. como esenciales y mayores son alrededor de 70 especies (Clark A., 1984), de los cuales 20 minerales son los que se presentan en mayor abundancia.

En la tabla 1.4 se muestran los principales minerales que contienen T.R..

T A B L A 1.4

ESPECIE MINERAL	SISTEMA DE CRISTALIZACION	FORMULA
OXIDOS:		
Esquinita	Ortorr6mbico	(Ce, Ca, Fe, Th)(Ti, Nb) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
<u>Brannerita</u>	Hexagonal	(U, Ca, Ce)(Ti, Fe) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Ceritanita	C6bico	(Ce <sup>4+</sup> , Th)O <sub>2</sub>
Cerotungstita	Monocl6nico	Ce W <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH) <sub>3</sub>
Davidita	Trigonal	(La, Ce)(Zr, U, Fe <sup>3+</sup> )(Ti, Fe <sup>3+</sup> ) <sub>20</sub> (O, OH) <sub>38</sub>
Disanalita	C6bico	(Ca, Ce, Na)(Ti, Nb, Ta)O <sub>3</sub>
<u>Euxinita</u>	Ortorr6mbico	(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
<u>Fergusonita</u>	Tetragonal	(Y, Er)(Nb, Ta)
Fersmita	Ortorr6mbico	(Ca, Ce, Na)(Nb, Ti, Fe, Al) <sub>2</sub> (O, OH, F) <sub>6</sub>
Formanita	Tetragonal	(Y, Er)(Ta, Nb)O <sub>4</sub>
Hibonita	Hexagonal	(Ca, Ce)(Al, Ti, Mg) <sub>12</sub> O <sub>19</sub>
Knopita	C6bico	(Ca, Ce)Ti O <sub>3</sub>
Loparita	Ortorr6mbico(?)	(Ce, Na, Ca)(Ti, Nb)O <sub>3</sub>
Loveringita	Trigonal	(Ca, Ce)(Ti, Fe <sup>3+</sup> , Cr, Mg) <sub>21</sub> O <sub>38</sub>
Policrasa	Ortorr6mbico	(Y, Ca, Ce, U, Th)(Ti, Nb, Ta) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Priorita	Ortorr6mbico	(Y, Ca, Fe, Th)(Ti, Nb) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
<u>Pirocloro o Betafita</u>	C6bico	(Na, Ca, Ce) <sub>2</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH, F)

Continuación T A B L A 1.4

ESPECIE MINERAL	SISTEMA DE CRISTALIZACION	F O R M U L A
<u>Samarskita</u>	Ortorrómbico	(Y, Ce, U, Fe)(Nb, Ta, Ti) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
Ytrotantalita	Monoclínico	(Y, U, Fe)(Ta, Nb)O <sub>4</sub>
Ytrotungstenita	MONoclínico	YW <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH) <sub>3</sub>
<u>FOSFATOS:</u>		
<u>Apatita</u>	Hexagonal	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F
Belovita	Hexagonal	(Sr, Ce, Na, Ca) <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> OH
Brockita	Hexagonal	(Ca, Th, Ce)PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O
Churchita	Monoclínico	YPO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub>
Florencita	Trigonal	Ce Al <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
<u>Monacita</u>	Monoclínico	(Ce, La)PO <sub>4</sub>
Rabdofino	Hexagonal	(Ce, La)PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O
Vitusita	Ortorrómbico	Na <sub>3</sub> (Ce, La, Nd)(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
<u>Xenotimo</u>	Tetragonal	YPO <sub>4</sub>
<u>HALUROS:</u>		
<u>Fluocerita</u>	Hexagonal	(Ce, La)F <sub>3</sub>
Gagarinita	Trigonal	Na Ca Y (F, Cl) <sub>6</sub>
Tueitita	Monoclínico	Ca <sub>1-x</sub> Y <sub>x</sub> F <sub>2+x</sub>
Ytrocercita	Cúbico	(Ca, Ce)F <sub>2</sub>
<u>Ytrefluorita</u>	Cúbico	(Ca, Y)F <sub>2</sub>

Continuación T A B L A 1.4

ESPECIE MINERAL	SISTEMA DE CRISTALIZACION	F O R M U L A
<u>FLUO-CARBONATOS:</u>		
<u>Bastnaesita</u>	Hexagonal	(Ce, La)(CO <sub>3</sub> )F
Cordilita	Hexagonal	(Ce, La) <sub>2</sub> Ba (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> F <sub>2</sub>
Huanghoita	Hexagonal	Ce Ba (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F
Parisita	Hexagonal	(Ce, La) <sub>2</sub> Ca (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> F <sub>2</sub>
<u>Sinchisita</u>	Hexagonal	(Ce, La)Ca (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F
Zhonghuacerita	Trigonal	Ba <sub>x</sub> Ce (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> F
<u>CARBONATOS:</u>		
Ancililita	Ortorrómico	Sr Ce (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> OH H <sub>2</sub> O
Burbankita	Hexagonal	(Ca, Ca, Sr, Ba, Ce) <sub>6</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>5</sub>
Calkinsita	Ortorrómico	(Ce, La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> 4H <sub>2</sub> O
Donayita	Triclinico	Sr <sub>3</sub> Na Ca Y (CO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> 3H <sub>2</sub> O
Ewaldita	Hexagonal	Ba (Ca, Y, Na, K)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Lantanita	Ortorrómico	(La, Ce) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> 8H <sub>2</sub> O
McKelveyita	Triclinico	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> (Y, Ca, Sr, U) <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O
Sahamalita	Monoclinico	(Mg, Fe)(Ce, La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>
Tengerita	Monoclinico	Ca Y <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> (OH) <sub>3</sub> 3H <sub>2</sub> O
<u>SILICATOS:</u>		
Ashcroftina	Tetragonal	K Na Ca Y <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>12</sub> (OH) <sub>10</sub> 4H <sub>2</sub> O
<u>Britholita</u>	Hexagonal	(Ce, Ca) <sub>5</sub> (Si O <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH, F)

Continuación T A B L A 1.4

ESPECIE MINERAL	SISTEMA DE CRISTALIZACION	F O R M U L A
Cappelenita	Hexagonal	Ba Y <sub>6</sub> B <sub>6</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>25</sub>
<u>Cerita</u>	Trigonal	(Ce, Ca) <sub>9</sub> (Mg, Fe <sup>2+</sup> )Si <sub>7</sub> (O, OH, F) <sub>28</sub>
Chevkinita	Monoclínico	(Ca, Ce, Th) <sub>4</sub> (Fe <sup>2+</sup> , Mg) <sub>2</sub> (Ti, Fe <sup>3+</sup> ) <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>22</sub>
Eudialyta	Trigonal	(Ca, Na, Ce) <sub>5</sub> (Zr, Fe) <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> (O, Oh, Cl) <sub>20</sub>
<b>Gadolinita</b>	Monoclínico	(Y, Ce) <sub>2</sub> Fe <sup>2+</sup> Be <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub>
Hellandita	Monoclínico	(Ca, Y) <sub>6</sub> (Al, Fe <sup>3+</sup> )Si <sub>4</sub> B <sub>4</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub>
Iimoriita	Triclinico	Y <sub>5</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>3</sub>
Ilimaussita	Monoclínico	Ba <sub>2</sub> Na <sub>4</sub> Ce Fe Nb <sub>2</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>28</sub> 5H <sub>2</sub> O
Ilmajokita	Monoclínico	(Na, Ce, Ba) <sub>2</sub> Ti Si <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>10</sub> nH <sub>2</sub> O
Iragita	Hexagonal	(K, La, Ce, Th)(Ca, Na, La) <sub>2</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>20</sub>
Joaquinita	Monoclínico	Ba <sub>2</sub> Na Ce <sub>2</sub> Fe <sup>2+</sup> (Ti, Nb) <sub>2</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>26</sub> (OH, F)H <sub>2</sub> O
Kainosita	Ortorrómbico	Ca <sub>2</sub> (Y, T.R) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>12</sub> )CO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O
Karnasurtita	-	(Ce, La, Th)(Ti, Nb)(Al, Fe <sup>3+</sup> )(Si, P) <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (OH) <sub>4</sub> 3H <sub>2</sub> O
Laplandita	Ortorrómbico	Na <sub>4</sub> Ce Ti P Si <sub>7</sub> O <sub>22</sub> 5H <sub>2</sub> O
melanocerita	Hexagonal	Ce <sub>4</sub> Ca B Si <sub>2</sub> O <sub>12</sub> (OH)
Mosandrita	Monoclínico	(Na, Ca, Ce) <sub>3</sub> Ti(Si <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> F
Nordita	Ortorrómbico	Na <sub>3</sub> Ce (Sr, Ca)(Mn, Mg, Fe, Zn) <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub>

Continuación T A B L A 1.4

ESPECIE MINERAL	SISTEMA DE CRISTALIZACION	FORMULA
Perrierita	Monoclínico	$(Ca, Ce, Th)_4 (Mg, Fe^{2+})_2 (Ti, Fe^{3+})_3 Si_4 O_{22}$
<u>Allanita</u>	Monoclínico	$(Ce, Ca, Y)_2 (Al, Fe^{2+})_3 (Si O_4)_3 OH$
Sazhinita	Ortorrómbico	$Na_3 Ce Si_6 O_{15} 6H_2O$
Semenovita	Ortorrómbico	$(Ca, Ce, La, Na)_{10-12} (Fe^{2+}, Mn) (Si, Be)_{20} (O, OH, F)_{42}$
Spencita	Hexagonal	$(Y, Ca, La, Fe)_5 (Si, B, Al)$
Steenstropina	Trigonal	$(Ce, La, Na, Mn)_6 (Si, P)_6 O_{18} OH$
Stillwellita	Trigonal	$(Ce, La, Ca)_B SiO_5$
<u>Thalenita</u>	Monoclínico	$Y_3 Si_3 O_{10} (OH)$
Thortveitita	Monoclínico	$(Sc, Y)_2 Si_2 O_7$
Tombartita	Monoclínico	$Y_4 (Si, H_4)O_{12-x} (OH)_{4+2x}$
Tritomite	Hexagonal	$(Ce, La, Y, Th)_5 (Si, B)_3 (O, OH, F)_{13}$
Tundrita	Triclínico	$Na_3 (Ce, La)_4 (Ti, Nb)_2 (Si O_4)_2 (Co_3)_3 O_4 (OH) 2H_2O$
<u>SULFATOS:</u>		
Chukhrovita	Monoclínico	$(Ca, Ce, Th)_4 (Fe^{2+}, Mg)_2 Ti, Fe^{3+})_3 Si_4 O_{22}$
<u>BORATOS:</u>		
Braitschita	Hexagonal	$(Ca, Na_2)_7 (Ce, La)_2 B_{22} O_{43} 7H_2O$

ESPECIE MINERAL	SISTEMA DE CRISTALIZACION	F O R M U L A
<u>ARSENATOS:</u>		
Agardita	Hexagonal	$(Y, Ca)Cu_6 (As O_4)_3 (OH)_6 3H_2O$

Tomada de Clark 1984 y modificada.



Mayor importancia económica

Mediana importancia económica

Menor importancia económica



Como puede observarse en la tabla 1.4 las T.R. se presentan, principalmente, en forma de óxidos, silicatos, fosfatos, carbonatos, haluros y fluorcarbonatos. De estos grupos solo algunos minerales constituyen menas de importancia económica como lo son:

-Fosfatos: monacita, xenotimo, apatita y relativamente fluorapatita o francolita.

-Silicatos: gadolinita, cerita, allanita y britholita.

-Fluorcarbonatos: bastnaesita, sinchisita.

-Haluros: fluocerita e ytrofluorita.

-Óxidos: cuxinita, samarskita, fergusonita, pirocloro y brannerita.

#### **1.4.1.) Características de los principales minerales de tierras raras.**

##### **a) Fosfatos:**

- **Monacita**; es uno de los minerales de T.R. más estudiados. Carron, 1958 y Veda, 1967 mencionan que la monacita tiene afinidad a contener elementos del subgrupo del cerio.

La monacita presenta la misma estructura que la ceralita y la huttonita, óxidos de fósforo y sílice con Th, T.R., U y un silicato de torio respectivamente (Bowles, 1980; Pabst y Hutton, 1951), de lo cual se infiere la alta afinidad con el elemento torio.

La monacita contiene cerca del 70% de una mezcla de óxidos de T.R. incluyendo aproximadamente 1.5-2% de óxido de ytrio (Moore M.C., 1979; O'Driscoll M., 1988); presenta valores constantes de La+Nd=42+2%, Pr=5+1% y Ce+Sm+Gd+Y=53+3% (Clark A., 1984; Murata, 1953).

La monacita está ampliamente distribuida, principalmente, como un mineral detrítico en depósitos de placer y bancos de arena de composición variable, ortofosfatos de T.R. y Th (Carrillo y Nieto, 1975); en pegmatitas asociadas con granitos y sienitas; en rocas metamórficas y depósitos de vetas; y como minerales accesorios en granitos, rocas alcalinas y carbonatitas (Clark A., 1984).

- **Xenotimo**; es uno de los minerales más comunes de T.R.. Este mineral es selectivo de Y, Yb o Dy, está asociado a monacita y actúa como concentrador de Ce. Clark Andrew (1984) de Vainshtein (1956) reconoce una tendencia de enriquecimiento de elementos de T.R. ligeras.

Es isoestructural con el zircón y ocurre en pequeñas cantidades de rocas ígneas alcalinas; en pegmatitas, rocas metamórficas, vetas tipo alpino y como detritos.

Los concentrados de óxidos de ytrio contienen 60% de este y 40% de óxidos de T.R. (O'Driscoll M., 1988).

- **Grupo de la apatita**; el miembro común es la fluorapatita  $[Ca_5(PO_4)_3F]$  que se utiliza como sinónimo de apatita.

Algunos minerales como la belivita y la britholita contienen elementos de T.R. como constituyentes mayores, pero en general la fluorapatita contiene pequeñas pero importantes cantidades. Fleischer y Altschuler en 1969 mencionan que las apatitas de rocas ígneas desde máficas, ultramáficas y alcalinas tienen al cerio como grupo dominante lo cual también sucede en rocas graníticas y pegmatitas graníticas. Además algunos análisis presentan Nd, Gd, Dy o Yb. Por otro lado dicen que las apatitas de origen marino presentan enriquecimiento de Ce, La o Nd.

En México Mayoral M. L. (1979) menciona minerales de fluorapatita y francolita (variedad de apatita rica en  $\text{CO}_2$ ) en la Formación Monterey en Baja California Sur.

### **b) Silicatos**

- **Gadolinita**; se presenta asociada a la fluorita y a la allanita en granitos y pegmatitas. El subgrupo del ytrio ocurre como dominante, aunque puede contener cerio, 24.5 porcentaje en peso (wt%)  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (Segalstad y Larsen, 1978).

- **Cerita**; contiene por encima del 70 wt% del subgrupo del cerio. Se presenta en pegmatitas y vetas hidrotermales, en sienitas alcalinas y granitos.

- **Allanita (ortita)**; la allanita es un miembro del grupo de la epidota rico en Ce, producto de la sustitución de Ca-T.R. y de Al- $\text{Fe}^{2+}$ . Este es un mineral accesorio característico de muchos granitos, granodioritas, monzonitas y sienitas. Tiene un aspecto resinoso de color pardo o negro y es ligeramente radiactivo.

- **Britholita**; es un mineral relacionado con la apatita donde ocurre la sustitución de  $(\text{T.R.}^{+3} + \text{Si}^{+4})$  por  $(\text{Ca}^{+2} + \text{P}^{+5})$  lo cual sucede, principalmente, en yacimientos de sienita nefelínica y metasomatismo de contacto relacionado con sienitas alcalinas y granitos. Estos minerales exponen un marcado enriquecimiento por cerio ( $\text{T.R.}_2\text{O}_3$  60.54 wt% con  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  22.5 wt%).

### **c) Fluorcarbonatos**

- **Bastnaesita**; es un mineral ampliamente investigado ocurre en muchas pegmatitas, asociada con allanita, cerita y fluocerita, algunas veces se presenta como alteración. Fleischer (1965) lo enlista como un mineral afín al Ce.

Este mineral contiene 75% de óxidos de T.R. (Shannon S. S., 1982; O'Driscoll Mike, 1988), del subgrupo del cerio.

Carrillo y Nieto (1975) mencionan que en estado puro es de color pardo rojizo transparente.

- **Sinchisita**; ocurre en un gran número de pegmatitas y carbonatitas, asociados con minerales del grupo de la bastnaesita.

Existen variedades enriquecidas en Nd (Mksimovic y Pantano, 1978); otras enriquecidas en ytrio. Es de color amarillo oscuro.

#### d) Haluros

- **Fluocerita**; éste mineral es afín al cerio y existe comúnmente en pegmatitas la cual es posteriormente alterada a bastracita. Se presenta como inclusiones en fluorita e ytrofluorita al NW de Ucrania (Gurov, 1975).

- **Ytrofluorita**; contiene 13.7 wt% de Y, 14.1 wt% de Ce. Los elementos de T.R. reemplazan al Ca. Jacob (1974) y otros han demostrado que ocurren cantidades de fracción de elementos de T.R. en fluorita y que los radios Tb/Ca contra Tb/La pueden ser usados para diferenciar el origen de la fluorita (hidrotermal o sedimentaria).

#### e) Oxidos

- **Euxinita**; ocurre en pegmatitas graníticas, como accesorio de granitos y esporádicamente en placeres. Butler (1958) menciona que los minerales contienen entre 20 y 30 wt%  $(Y+T.R.)_2O_3$ , contiene complejos de oxidos principalmente de

niobio y tantalio con considerables concentraciones de elementos de T.R. (O'Driscoll M., 1988).

- **Samaraskita**; es un complejo niobio-tantalio caracterizado por la predominancia de Nb sobre Ti y Ta. Ocurre en pegmatitas graníticas, asociada con columbita; también se presenta como un mineral detrítico. Es de color rojo oscuro (Carrillo y Nieto, 1975).

- **Fergusonita**; Butler y Hall (1960), analizan que este mineral presenta afinidad hacia los elementos de T.R. ligeros aunque su estructura es capaz de aceptar un cierto rango de elementos de T.R. pesados por sustitución. Ocurre en pegmatitas asociado con euxinita, gadolinita y otros elementos de T.R.. Tienen un color negro y lustre opaco (Carrillo y Nieto, 1975).

- **Pirocloro**; se han dividido tres subgrupos (Hogarth, 1977), de acuerdo con los contenidos relativos de Nb, Ta y Ti:

1. Pirocloro; se caracteriza por el mayor contenido de Nb.
2. Microlita; se caracteriza por el mayor contenido de Ta.
3. Betafita; se caracteriza por el mayor contenido de Ti.

Los dos primeros son los más conocidos, los análisis sugieren que el grupo de T.R. del Ce son más comunes en el pirocloro y que los del grupo del ytrio se presentan en la betafita. por otro lado, Carrillo y Nieto (1975), mencionan que poseen radiactividad de alta a moderada.

- **Brannerita**; contiene concentraciones de óxidos de T.R. por arriba de 11,6 wt% los cuales han sido reconocidos como valores bajos. Ocurre como un mineral primario en pegmatitas o en detritos producto de las pegmatitas, en vetas

y como asociado de yacimientos de uranio como en Ontario, Canadá.

### **1.5. Geoquímica de los elementos de las tierras raras**

La variedad de los elementos que forman un mineral está en función de su carácter geoquímico y de su abundancia. En la naturaleza los elementos de T.R. forman muy pocos minerales; de hecho, todos juntos forman menos compuestos que el antimonio, que es un mineral mucho menos abundante 0.2 ppm (Carrillo y Nieto, 1975).

Esto se debe, de acuerdo con Gómez C.A. (1981), a que los elementos de T.R. tienden a sustituir al Ca de algunos minerales dentro de la secuencia magmática; tales como la allanita o epidota, la esfena, la apatita, el granate y el zircón los cuales impiden que se concentren altos porcentajes de T.R. en la naturaleza.

Goldschmidt (1937), organiza y clasifica a los elementos que constituyen a nuestro planeta de acuerdo con la afinidad de presentarse en las diferentes fases que componen la Tierra, es así, como clasifica a los elementos de T.R. como litófilos (Tabla 1.6) (Carrillo y Nieto, 1975; Gómez C.A., 1981).

Por otro lado, Gómez C.A.(op. cit.), menciona que las T.R. son inmóviles tanto en condiciones oxidantes como reductoras y en ambientes ácidos y básicos, debido a sus características físico-químicas de poseer un radio iónico bajo (1A) y su valencia (3+). (Tabla 1.5).

**Tabla 1.5.**

<b>MOVILIDAD RELATIVA</b>	<b>ELEMENTOS MAYORES</b>	<b>ELEMENTOS MENORES</b>
<b>Muy móviles</b>	<b>S, Cl</b>	<b>Br, I, Mo, B, Se</b>
<b>Moderadamente móviles</b>	<b>Ca, Na, Mg, K</b>	<b>Zn, Ba, U</b>
<b>Moderadamente inmóviles</b>	<b>Si, Mn</b>	<b>Ni, Co, Cu, As, Sb, Pb</b>
<b>Muy inmóviles</b>	<b>Fe, Al, Ti</b>	<b>Cr, (E.T.R.)</b>

**Movilidad de elemento en un ambiente silíceo libre de sulfuros (Hawkes and Webb, 1972), de Frederic R. Siegel (1974).**

SIDEROPILOS	CALCOPILOS	LITOFILOS	ATMOSPILOS	BIOFILOS
Fe, Ni, Co	((O)), S, Se, Te	O, (S), (P), (H), (C)	(H), C, N, O	C, H, O, N, P
Ru, Rh, Pd	Fe, Cr, (Ni), (Co)	Si, Ti, Zr, Hf, Th	F, Cl, Br, I	S, Cl, I
Re, Os, Ir, Pt, Au	Cu, Zn, Cd, Pb	Li, Na, K, Rb, Cs	Ar, He, Ne, Kr, Xe	(Ca), (Mg)
Ge, Sn, Sb	Sn, Ge, Mo, (Os)	F, Cl, Br, I		(K), (Na)
(Pb), C, (As), P	As, Sb, Bi	B, Al, (Ga), Sc		(V), (Mn)
Mo, W	Ag, (Au), Hg	<u>Y, RE (La-Lu)</u>		(Fe), (Cu)
(Nb), Ta	Ru, (Pt), (Rh)	<u>Be, Mg, Ca, Sr, Ba</u>		
Se, Te	Ga, In, Tl, (Pd)	(Fe), V, Cr, Mn		
Cu, Ga		Nb, Ta, W, U		
		(Ti), (Ge), (Zn)		
		(N)		

Fig. 1.6. Afinidad de los elementos químicos a las principales fases que comprenden la Tierra (Recopilado de diferentes fuentes pero basado en la presentación original de Goldschmidt, 1937).



Por otro lado, la abundancia relativa de los elementos en la Tierra se distribuye en tres grandes partes de ésta, que son; la atmósfera con un volumen equivalente de agua correspondiente a 1' 268 000 millas cúbicas que representa el 0.03% del volumen total. El volumen de corteza sólida es de 1" 633' 000 000 millas cúbicas constituyendo el 92.89% y, por último, el océano con 302' 000 000 de millas cúbicas que representan el 7.08% del volumen total (datos aproximados obtenidos de Wigglesworth, 1954).

Por lo que la mayor concentración de elementos se encuentra en la corteza terrestre y es donde se hallan los elementos de T.R. en porcentajes de ppm ya que no son fácilmente concentrados en la naturaleza (Tabla 1.7).

O'Driscoll M, (op.cit.) menciona una curiosa relación de los elementos de T.R. donde existe una mayor abundancia de aquellos que tienen número atómico par de los que tienen un número atómico impar. (Fig. 1.3).

De acuerdo a su abundancia la T.R. se clasifican como minerales traza (contenido menor del 0.1%) donde el contenido promedio en la corteza terrestre es de 184 ppm (Gómez C., 1981; Elías H. M., 1985). Este grupo de elementos resulta ser más abundante que el conjunto constituido por el Zn, Pb, Cu y Ag que suman 125 ppm. La siguiente tabla muestra la concentración de los elementos de T.R. que es muy parecida a la de Taylor (1964).

Por otro lado Elías H.M. (1985), menciona que el cerio es el elemento más abundante del grupo y está en mayor proporción que el Cu (45 ppm) así también el tulio es de los más escasos, no obstante es más abundante que el antimonio (0.2 ppm). Así los tres elementos de T.R. más abundantes son el cerio, lantano y neodimio como se observa en la tabla 1.7.

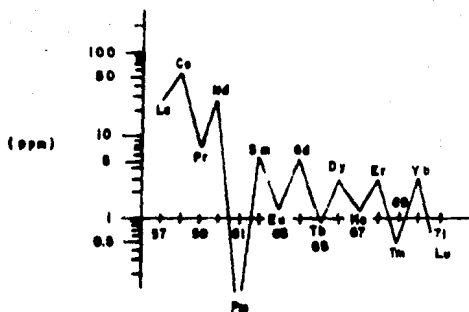


FIG. 1.3  
Abundancia relativa de los lanfánidos

"RELACION NONES/PARES"

O' Driscoll Mike, 1988.

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1986.  
FACULTAD DE INGENIERÍA

(Datos en ppm)

Y	33	Nd	28	Gd	5.4	Er	2.8	
La	30	Pm	-	Tb	0.9	Tm	0.48	
Ce	60	Sm	6	Dy	3.0	Yb	3.0	
Pr	8.2	Eu	1.2	HO	1.2	Lu	0.5	
							Total	183.68

**Tabla 1.7. Abundancia Media en la Corteza de T.R.**  
(Gómez C. A. , 1981).

(1) TIERRAS RARAS. Carbonatitas. Nieto O. J., Fac. de Ingeniería, UNAM. s/f

**CAPITULO II**

**CLASIFICACION  
DE LOS YACIMIENTOS  
DE TIERRAS RARAS**

## **II. CLASIFICACION DE LOS YACIMIENTOS DE TIERRAS RARAS**

Los yacimientos minerales son definidos y clasificados dentro de marcos geológicos para su mejor entendimiento y prospección, actualmente no se tiene una clasificación para este tipo de yacimientos lo que refleja el poco conocimiento que de ellos se tiene.

En la tabla 2.1 se clasifican a los yacimientos de T.R. de acuerdo al tipo de roca y rasgo predominante que los originaron tomando en cuenta la clasificación genética de Jensen y Bateman (1979). Los depósitos presentes en la tabla son retomados, en gran parte, del capítulo tres (Modelos de los yacimientos de T.R.).

T A B L A 2.1 CLASIFICACION PROPUESTA DE LOS DEPOSITOS DE T.R.

ORIGEN	TIPO DE ROCA	RASGO PREDOMINANTE	AMBIENTE DE DEPOSITO
1. YACIMIENTOS DE ORIGEN SEDIMENTARIO	1.A) ROCAS SEDIMENTARIAS DE AMBIENTES EPICONTINENTALES	EVAPORITAS MARINAS: - ORGANICAS - INORGANICAS	T.R. ASOCIADAS A POSFORITAS
	1.B) ROCAS SEDIMENTARIAS DETRITICAS; CONTINENTALES Y MARGINALES	PLACERES: 1. PLAYA 2. FLUVIAL 3. ELUVIAL 4. FOSILES	A. PLAYAS - BARRERA y DUNAS - TERRAZAS B. RIO, LAGUNA, ESTUARIO C. PIE DE MONTE D. CUALQUIERA
2. YACIMIENTOS DE ORIGEN PLUTONICO	2.A) ROCAS PLUTONICAS ALCALINAS	A. PREFERENCIALMENTE VETAS	A. SIENITAS-CARBONATITAS Y ROCAS PERALCALINAS
	2.B) GRANITOS Y PEGMATITAS	B. ZONEAMIENTO DEFINIDO	B. PEGMATITAS GRANITICAS
3. YACIMIENTOS DE ORIGEN PERIPLUTONICO	3.A) ROCAS DE METAMORFISMO DE CONTACTO	A. CALIZA-INTRUSIVO	A. T.R. ASOCIADAS A SIDERITA DE Fe
		B. CALIZA-VOLCANICO	B. T.R. ASOCIADAS A FLUORITA

Continuación T A B L A 2.1

ORIGEN	TIPO DE ROCA	RASGO PREDOMINANTE	AMBIENTE DE DEPOSITO
4. YACIMIENTOS DE ORIGEN VOLCANICO	4.A) ROCAS VOLCANICAS ALCALINAS	CONTINENTALES	BASALTO RICO EN K BASALTO ALCALINO RIOLITAS
5.	5.A) ROCAS ULTRABASICAS	A. OBDUCCION DE UN COMPLEJO OFIOLITICO	A. ULTRABASICOS - SERPENTINIZADOS

LAZARO I. RODRIGUEZ ARVIZU, 1990.  
FACULTAD DE INGENIERIA

**CAPITULO III**

**MODELOS  
DE LOS YACIMIENTOS  
DE TIERRAS RARAS**



### III. MODELOS DE LOS YACIMIENTOS DE TIERRAS RARAS

#### III.1. Yacimientos de tierras raras de origen sedimentario

##### III.1.1) Rocas sedimentarias de ambientes epicontinentales.

#### INTRODUCCION

Los yacimientos de fosforita son de gran importancia, pues aportan más del 70% del fósforo de la producción mundial (Mayoral M., 1979). Los depósitos de Baja California se cuentan entre los más grandes donde Colín V. A. (1989), menciona que estos representan veinte veces las reservas neozelandesas; por tanto, México es un país con un alto potencial mundial de fosforita, así lo menciona la Comisión de Minerales Submarinos Mexicanos (M.S.M.).

Una ventaja de las reservas mexicanas es que se encuentran entre los 60 y 180 m de profundidad, mientras que las neozelandesas oscilan entre 380 y 430 m (Colín V.A., 1989).

Ahora, ya que las T.R. se encuentran en concentraciones bajas dentro de la fosforita como elementos de sustitución se mencionará el siguiente modelo:

#### - YACIMIENTOS DE TIERRAS RARAS ASOCIADOS A MODELOS DE PRECIPITACION

##### a) Paragénesis

La estructura interna de la apatita  $[Ca_{10}(PO_4CO_3)_6(F, OH, Cl)_2]$  y sus otras variedades fluorapatita  $[Ca_{10}F_2(PO_4)_6]$  y francolita (mayor contenido de di-

óxido de carbono), (Mayoral M.L., 1979), permite numerosas sustituciones como las del Ca por Mg, Na, Pb, Sr, Th, U y T.R.. (Mc Kelvey, 1967). Por lo que la paragénesis de estos yacimientos está conformada por,

- 1) Francolita  $\text{CO}_3(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_2(\text{F OH})$
- 2) Fluorapatita  $\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$
- 3) Apatita  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4\text{CO}_3)_6(\text{F OH Cl})_2$
- 4) Colófano  $9\text{CaO } 3\text{P}_2\text{O}_5\text{CaCO}_3\text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$  (amorfo de la apatita)

Los elementos de T.R. presentes en estos yacimientos son principalmente el Y, La, Nd y están enriquecidas en ytrio lo cual es reflejo del agua de mar (Neary y Highley, 1984).

Un ejemplo de ellos son los análisis obtenidos por el C.R.N.N.R., 1961 en un reconocimiento geológico de los depósitos de fosfato en el estado de Zacatecas y áreas adyacentes, donde reporta la presencia de La (0.001-0.003), Y (0.003-0.001) y Nd (0.003-0.01), mientras que el Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Lu, Pr, Sm, Tb, Tm e Yb no se encontraron en la Formación La Caja, y su equivalente de facie litoral la Formación La Casita.

Las T.R. se encuentran dentro de los minerales anteriormente mencionados formando parte de oolitos, intraclastos, micro y macrofósiles fosfatizados con algo de apatita masiva, asociados con calcita, sílice, feldespato y pedernal, así como algunas veces diatomeas como se observó en la zona de San Hilario, Baja California Sur.

#### **b) Alteración supergénica**

En este tipo de yacimientos la alteración de la fosforita (francolita) pro-

duce dahlita como producto del intemperismo, aunque se pueden presentar minerales como:

Dahlita o apatita carbonatada  $(\text{PO}_4)_2(\text{CaCO}_3)$

Bruschita  $\text{H Ca PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Candrellita  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

Millisita  $(\text{Na, K}) \text{CaAl}_6(\text{PO}_4)_4 (\text{OH})_2$

Monetita  $\text{H Ca PO}_4$

El volumen de estos minerales es pequeño por lo que no constituyen un yacimiento mineral y en ellos no se ha reportado ningún estudio sobre la presencia de T.R.

### c) Leyes y composición química

La producción de fosforita comienza a partir de 1957 como puede observarse en la tabla de indicadores mineros recopilados de la revista de la Cámara Minera de México. Hasta la actualidad se tiene aproximadamente 5' 568 337 ton de concentrados (Tabla 3.1)

En la fosforita se tienen diferentes concentraciones de T.R. (Gómez C.A., 1981; Neary y Highley, 1984; Elfas H.M., 1985; Chiodi M., 1988), que se forman por sustitución del Ca. De acuerdo con Robinson (1948), las apatitas de origen marino contienen entre 110 y 1550 ppm de óxidos de T.R..

Por otro lado, se reportan algunos elementos de T.R. dentro de los depósitos de fosfato de la Formación La Caja; tales como el Y (0.01), La (0.003) y Nd (0.01).

ANO	PRODUCCION (TM)	ANO	PRODUCCION (TM)	ANO	PRODUCCION (TM)
1957	22,363	1971	50,206	1985	645,299
1958	25,992	1972	62,674	1986	—
1959	29,760	1973	71,542	1987	580,000
1960	27,500	* 1974	194,095	1988	665,000
1961	29,642	1975	282,480		
1962	31,743	1976	224,428		
1963	34,292	1977	205,470		
1964	33,124	1978	—		
1965	39,235	1979	171,069		
* 1966	55,549	1980	283,246	TOTAL:	
1967	49,809	1981	—		5'560,337 (TM)
1968	43,138	* 1982	515,000		
1969	32,574	1983	510,000		
1970	46,726	1984	510,293		

Tabla 3.1. REVISTA CAMIMEX, núms. 16, 15, 8, 3, 11, 16, 4 .

Ahora, con los datos anteriores y si en Florida (E.U.A.), se obtuvieron 3 500 ton de T.R. a partir de 6'000 000 ton de fosforita de la Formación Bone Valley (Altschuler, 1967; Gómez C.A., 1981), lo cual representa el 6% del total producido, entonces, comparativamente el potencial en México es de aproximadamente 3 300 ton de obtener T.R. a partir de procesos de elaboración de fertilizantes.

Las suposiciones anteriores están hechas sin tomar en cuenta las reservas submarinas que posee México y que está entre los más grandes yacimientos de fosforita, según estimaciones realizadas por la Comisión de Minerales Submarinos Mexicanos (Colín V.A., op. cit.). Además, no consideran las reservas de fosforita en roca fosfórica y roca fosfatada submarginal de la Formación La Caja en el

norte de Zacatecas y áreas adyacentes que son en total 77' 370 000 ton métricas con una ley de 18.4% de  $P O_4$ .

#### **d) Tonelaje**

Hasta la actualidad no se ha reportado el tonelaje producido de T.R. de yacimientos de fosforitas, aunque el único dato de tonelaje que se tiene es el anteriormente mencionado. Debido a sus bajas concentraciones de los minerales de T.R. en estos yacimientos.

#### **e) Litología y rocas asociadas**

Las rocas asociadas a los yacimientos de fosforita y con ello a las T.R. son principalmente areniscas-lutitas y calizas.

El fosfato inhibe la precipitación de carbonato de calcio lo cual origina que las rocas más fosfatadas contengan menos carbonato de calcio, como se observa en los diversos depósitos de este material. Por lo que la roca con mayor abundancia de fosforita es la " fosforita calcárea " y a la de menor concentración de fosforita se le nombra " caliza fosfatada ".

#### **f) Estructuras**

Las principales estructuras de estos yacimientos lo constituyen mantos, mantos lenticulares, capas, laminillas y nódulos que sólo son alteradas por fallamiento o plegamiento por lo que se pueden considerar como yacimientos singenéticos-alienígenos.

### g) Hipótesis genética

Las hipótesis aún son muy subjetivas puesto que hasta la fecha se realizan estudios sobre la procedencia de las T.R.. Se requiere conocer los mecanismos físico-químicos de liberación de las T.R. de la roca fuente; Balashov (1964), sugiere que los elementos de T.R. pesadas son preferencialmente transportados en solución, ya que forman más bicarbonatos solubles y complejos orgánicos que las T.R. ligeras. Además, Burkov y Podporina en 1967, proponen que las T.R., principalmente los ligeros, son movilizados bajo condiciones ácidas y fijadas en condiciones alcalinas.

Existen varios procesos que explican la presencia de T.R. en sedimentos marinos:

1) Precipitación inorgánica, el cual se refiere a una simple precipitación causada por el exceso de concentración de sales de T.R. que son insolubles, la cual no es muy aceptada ya que existen concentraciones muy bajas de las T.R. en el agua de mar (Tabla 3.2).

Así mismo considera que las sales de las T.R. están en solución y posteriormente precipitan, donde los minerales hidrógenos y el material biógeno los incorpora dentro de su estructura, lo cual fué discutido posteriormente.

El mismo Turner y Whitfield (1979) modifican el postulado original de las T.R. en el agua de mar y mencionan que viajan en estado sólido lo cual controla las bajas concentraciones en agua de mar. Proponen que las T.R. son incorporadas al material biógeno y al hidrógeno por la captura de iones, principalmente los elementos de T.R. ligeras (Goldschmidt, 1954).

Así las T.R. son incorporadas en esqueletos de peces, en el plancton marino tales como los foraminíferos (globigerínidos) (Fig.3.1), donde las T.R. son originadas principalmente por las fases litógenas ( Fleet, 1977).

T A B L A 3.2. Concentración (Brewer, 1975), tiempo (Goldberg, 1963) y espacio (Turner y Whitfield, 1979) de las T.R. en el agua de mar.

ELEMENTO	CONCENTRACION (ng l <sup>-1</sup> )	TIEMPO (años)	DISTRIBUCION EN EL AGUA DE MAR (%)					
			LIBRE	OH	F	Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>
La	3	440	31	4	1	16	16	33
Ce	1	80	22	4	1	11	21	41
Pr	0.6	320						
Nd	3	270						
Sm	0.05	180						
Eu	0.01	300	11	7	1	5	8	68
Gd	0.7	260	11	4	1	6	13	68
Dy	0.9	460						
Ho	0.2	530						
Er	0.8	660						
Tm	0.2	1800						
Yb	0.8	330						
Lu	0.2	490	7	7	1	2	3	81

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
Facultad de Ingeniería

2) Las T.R. son formadas durante las reacciones de halmirolisis entre el agua de mar y material litógeno originándose en sedimentos atrapadores (AI), durante la formación de glauconita y por la absorción de las fases amorfas. Algunos de los minerales halmirolíticos importantes son la phillipsita y la smectita, quienes presentan concentraciones de T.R.. La phillipsita es una arcilla originada por material volcánico litógeno y el agua de mar, sometido a un intemperismo marino, lo cual se explica también para la smectita.

Así, la barita, los minerales de fosforita, los sedimentos hidrotermales y

los nódulos de manganeso son algunos de los minerales de precipitación química más importantes.

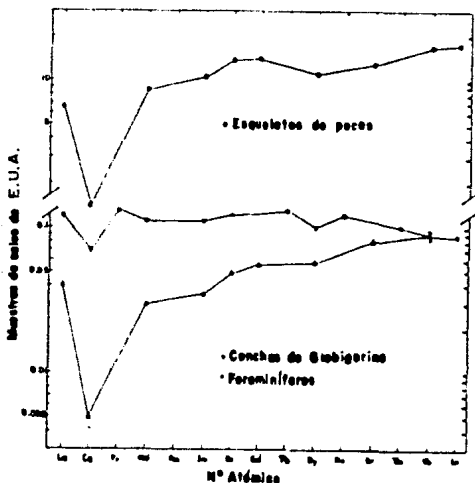


Fig. 3.1 Abundancia de los T.R. en restos de esqueletos de peces (Apatita biogénica)(Bernat, 1975), conchas de globigerina (Spin, 1965) y foraminíferos (Elderfield, 1981)

En lo que se refiere a los minerales de fosforita marina, el contenido de T.R. varía considerablemente (Fig.3.2) lo cual puede ser debido a la disolución de minerales fosfáticos de fases litógenas, biogénicas e hidrógenas (Altschuler, 1980).



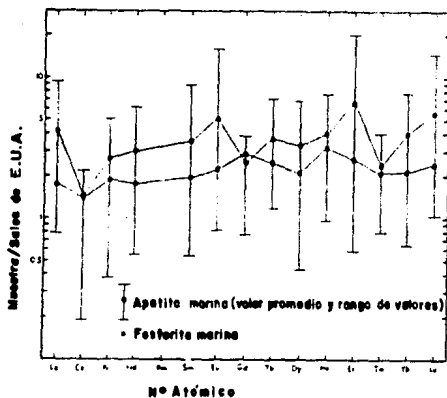


Fig.3.2. Abundancia de T.R. en fosforitas marinas (Goldberg, 1963); promedio y rango de la abundancia de T.R. en apatita marina (Altschuler, 1980), comparada con la composición de las sales de Norte América.

Con toda la información anterior se concluye que las T.R. provienen de fuentes litógenas y evolucionan en un ambiente marino hasta ser concentrados por la combinación de factores físico-químicos y biológicos.

Las T.R. se encuentran en una estrecha relación con los yacimientos de fosforita, lo cual indica que durante la formación de la apatita-francolita y colófano se depositan los elementos de T.R.. Al igual que los yacimientos de fosforita, las T.R. se forman en bahías o golfos de aguas someras, lo cual sucede en la Formación La Caja y muy probablemente en la Formación Monterey y San Isidro, así como al SW-NW de Africa y SE de E.U.A. (Fig.3.3).

Dentro de los factores químicos el pH es muy importante para que precipite el fosfato y con ello las T.R., ya que conforme disminuye el pH se incre-

menta la precipitación. Además la presencia de corrientes frías en aguas templadas origina la precipitación, lo cual quedó evidenciado por los estudios realizados por el C.R.N.N.R. para la Formación La Caja y para la Formación Monterey (Mayoral M. L., 1979; Rivera O.J., 1979). Este tipo de corrientes circulan actualmente en las proximidades de las costas de Chile, Perú y California (Sverdrup, Johnson y Fleming, 1946, retomado por el C.R.N.N.R., 1961).

Las profundidades a las que actualmente se depositan fosfatos en el fondo marino oscilan entre los 50 a 1000 m.

Por último en la tabla 3.3 respecto al rango de sedimentación de T.R. en los océanos (Fleet A.J., 1984), se puede observar las diferentes fases que mueven a las T.R. y su depositación total.

Fase de remoción de T.R.	Rango de sedimentación anual de T.R. (10 <sup>-3</sup> g cm <sup>-3</sup> )								
	La <sup>a</sup>	La <sup>b</sup>	Ce <sup>b</sup>	Ni <sup>b</sup>	Sm <sup>b</sup>	Eu <sup>b</sup>	Tb <sup>b</sup>	Yb <sup>b</sup>	Lu <sup>b</sup>
CaCO <sub>3</sub> Biogénico	0.06	0.49	0.36	0.46	0.08	0.02	0.01	0.04	0.01
SiO <sub>2</sub> "		0.10	0.14	0.09	0.03	0.01	0.00	0.02	
Nódulos Fe-Mg	0.95	0.11	0.44	0.16	0.03	0.01	0.01	0.01	
Esqueletos de peces	0.30								
Montmorillonite	1.60	1.26	1.79	1.27	0.28	0.07	0.06	0.22	0.04
Phillipsite	0.25	0.50	0.18	0.50	0.10	0.02	0.02	0.07	0.01
Fase amorfa		0.42	1.64	0.45	0.08	0.02	0.02	0.03	0.01
<b>Total</b>	<b>2.26</b>	<b>2.91</b>	<b>4.55</b>	<b>2.90</b>	<b>0.59</b>	<b>0.15</b>	<b>0.12</b>	<b>0.36</b>	<b>0.07</b>

Tabla 3.3. Rango de sedimentación de las T.R. en los océanos (Martín, 1976; Piper, 1974).

## h) Ejemplos

Los yacimientos de T.R. están sumamente ligados a los yacimientos de fosforita, es por ello que se han tratado en forma conjunta. La figura 3.3 muestra la localización de yacimientos de fosforitas de plataforma, ya que estos son los más susceptibles de ser explotados por la tecnología avanzada.

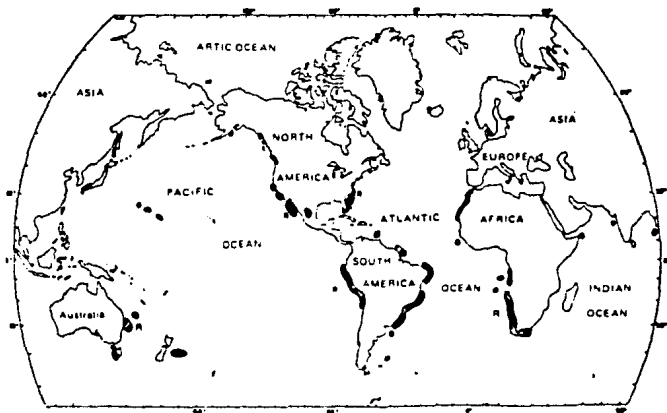


Fig. 3.3. Localización de yacimientos de fosforita de plataforma (Garrant, 1977), nótese:

- 1) Los depósitos de fosforita se presentan entre las latitudes 10 a 30 grados norte y 10 a 30 grados sur.
- 2) La provincia metalogénica en California se extiende a lo largo de la costa Norteamericana desde el sur de San Francisco, EUA hasta el extremo sur de Baja California, México. (Economic Geo-logy, 1985).

En México los yacimientos actuales y depósitos potenciales se localizan en Baja California Sur; siete yacimientos de fosfato, de los cuales cinco se encuentran en la península y dos en el fondo marino de la costa del pacífico. los de la península son San Juan de la Costa, San Hilario, Santo Domingo, Santa Rita y Tembache; los submarinos son el Banco Ranger y arenas de San Juanico.

Otros depósitos afloran en los estados septentrionales del país, como en Zacatecas, Coahuila, San Luis Potosí y Nuevo León, dentro de la ya mencionada Formación La Caja.

En E.U.A. se tienen yacimientos al SW la costa pacífica y al SE en la península de Florida (Formación Bone Valley).

#### **1) Ocurrencia estratigráfica**

Las fosforitas se presentan en diferentes horizontes estratigráficos como son:

- La Formación Kara Tau de Kazakstan U.R.S.S. (Cámbrico Inferior)
- En el Jurásico Superior la Formación La Caja en México; en la meseta de Oulland Abdoun, en la de Gannfour y Merkala, Marruecos.
- En el Terciario Superior la Formación Bone Valley, E.U.A.; en la Formación Monterey, México; la Formación Punta River; y la Formación Sechura, Perú.

## INTRODUCCION

Los yacimientos de concentración mecánica también son denominados yacimientos de placer, los cuales son formados por separación natural de los minerales pesados de los ligeros por agentes físico-químicos, tales como la gravedad, el agua, el viento e intemperismo.

Algunas propiedades que deben tener algunos minerales para su concentración son:

1. Peso específico elevado.
2. Resistencia al intemperismo.
3. Resistencia al transporte.
4. Concentración anómala.

Las T.R. están íntimamente asociadas a la monacita, la cual tiene un peso específico de 5, es resistente al intemperismo y a la erosión lo que permite que se concentre constituyendo depósitos de placer. Comúnmente son explotados junto con minerales pesados tales como la ilmenita, el zircón y el rutilo. Son concentrados en depósitos lacustres, fluviales y deltaicos, pero los más importantes son los de playa y duna.

### a) Paragénesis

La mena importante de este tipo de yacimiento, la constituyen los siguientes minerales;

- Monacita            (Ce, La) PO<sub>4</sub> con Th asociado
- Xenotimo           YPO<sub>4</sub>
- Euxinita            (Y, Ca, Ce, U, Th) (Nb, Ta, Ti)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>
- Leucoxeno

Son explotados como subproductos de yacimientos de placer de minerales pesados tales como ilmenita, rutilo, leucoxeno y zircón, con algo de casiterita u oro, la monacita constituye del 0 al 35% de la fracción pesada. (Neary y Highley, 1984).

#### **b) Alteración supergénica**

No existe alteración supergénica de importancia en estos yacimientos debido a su génesis.

#### **c) Leyes y composición**

La monacita representa el principal mineral de mena de las T.R. que se distribuyen dentro de ésta en forma de óxidos, como se observa en la tabla siguiente.

<u>TRL</u>	(%)	<u>TRP</u>	(%)	
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	23.7	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	1.5	
CeO <sub>2</sub> -----	45.6	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub> -----	0.04	
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub> -----	5.0	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	0.68	
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	17.2	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	0.05	
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	2.5	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	0.21	
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	<u>0.05</u>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	0.02	
<b>Subtotal</b>	<b>94.05</b>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	0.12	<b>TOTAL 99.11%</b>
		Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	0.04	<b>DE O.T.R.</b>
		Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -----	<u>2.4</u>	
		<b>Subtotal</b>	<b>5.06</b>	

Nota: De un total de 55-60% de O.T.R. en concentrados.

(Yaganup, Capel al W de Australia) Neary and Highley, 1984.

"Westralian Sands Ltd".

El xenotimo es explotado en forma importante en Malasia por lo que también es considerado. La distribución de óxidos de T.R. es obtenido de los concentrados que constituyen de 42-52%.

<u>TRL*</u>		<u>TRP**</u>		
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-----	0.5	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----- 4.0
CeO <sub>2</sub>	-----	5.0	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	----- 1.0
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	-----	0.7	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----- 8.7
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-----	2.2	HO <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----- 2.1
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-----	1.9	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----- 5.4
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-----	<u>0.2</u>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----- 0.9
Subtotal		10.5	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----- 6.2
			Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----- 0.4
			Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----- <u>60.8</u>
			Subtotal	89.5
				<u>TOTAL 100.0%</u>
				DE O.T.R.***

Neary and Highley, op. cit. de Moore, 1979.

- \* Tierras raras ligeras.
- \*\* Tierras raras pesadas.
- \*\*\* Óxidos de tierras raras.

Donde se puede apreciar que el xenotimo contiene a los elementos de T.R. pesados (subgrupo del ytrio+gadolinio). Ahora dentro de los concentrados de óxidos de T.R. el contenido de T.R e ytrio es el siguiente: (Tabla 3.4)

Por lo que se deduce, por un gran número de autores, que la monacita está constituida aproximadamente de un 60% de óxidos de T.R. en la que predomina el subgrupo del cerio, más no para el xenotimo. Debido a que se asocia el xenotimo a los yacimientos de monacita es por ello que E.U.A. importa T.R. del subgrupo del ytrio



Tabla 3.4.

T.R.	M O N A C I T A					XENOTIMO
	E.AUSTRALIA	W.AUSTRALIA	FLORIDA	INDIA	CHINA	MALASIA
Lantano (La)	20.20	23.90	17.47	23.00	23.35	0.50
Cerio (Ce)	43.50	46.03	43.73	46.00	45.60	5.00
Praseodimio (Pr)	5.40	5.05	4.98	5.50	4.16	0.70
Neodimio (Nd)	10.30	17.38	17.47	20.00	15.74	2.20
Samarium (Sm)	4.60	2.53	4.87	4.00	-3.05	1.90
Europio (Eu)	0.10	0.05	0.16		0.10	0.20
Gadolinio (Gd)	2.00	1.49	6.56		2.03	4.00
Terbio (Tb)	0.20	0.04	0.26		0.10	1.00
Dysprosio (Dy)	1.15	0.69	0.90		1.10	8.70
Holmio (Ho)	0.05	0.05	0.11		0.10	2.10
Erbio (Er)	0.40	0.21	0.04	1.50	0.51	5.40
Tulio (Tm)	traza	0.01	0.03		0.51	0.90
Yterbio (Yb)	0.20	0.12	0.21		0.51	6.20
Lutecio (Lu)	traza	0.04	0.03		0.10	0.40
Ytrio (Y)	2.10	2.41	3.10		3.05	60.00
T O T A L	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

J.B. Hedrick. Mine & Problems, 1985 (Industrial Minerals Nov., 1988).

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
Facultad de Ingeniería

#### d) Tonelaje

En la tabla 3.5 se presenta la producción mundial de monacita a partir de 1982, así como las reservas de algunos yacimientos de importancia.

Tabla 1.5. PRODUCCION MUNDIAL DE MONACITA Y XENOTIMO.

PAIS	TONELADAS DE CONCENTRADO				
	1982	1983	1984	1985	1986
<b>MONACITA:</b>					
Australia	9,562	15,141	16,260	18,735	14,822
India	4,200	4,000	4,000	4,000	4,000
Malasia	582	1,034	1,095	5,808	5,959
Tailandia	162	257	298	663	1,609
U.S.A.	1,667	667	750	750	750
Sri Lanka	304	292	147	200	200
Irre	32	15	2	-	-
Brasil	3,500	5,256	3,622	3,953	4,000
	20,009	26,662	26,174	34,109	31,340
<b>XENOTIMO:</b>					
Australia	50	24	66	46	41
Malasia	14	10	68	1,124	145
Tailandia	46	38	28	158	28
	100	72	162	1,328	214
					<b>TOTAL ANUAL</b>

Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V. (1987).  
 Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990. Facultad de Ingeniería.

Los principales productores de monacita son Australia, India y Brasil, mientras que del xenotimo es Malasia.

Australia representa el 2.1% de las reservas de T.R. con 754 000 ton. En 1987, la Wimmers Industrial Minerals Pty Ltd (WIM), descubrió a través de su proyecto WIM-150 en el distrito Drung South un yacimiento de minerales pesados en arenas y presenta la siguiente tabla:

## Reserva por minerales individuales (miles de ton)

Rutilo	3 400
Leucoxeno	4 600
Ilmenita	12 500
Zircón	5 100
Monacita	580
Xenotimo	170

### e) Litología y rocas asociadas

Estos yacimientos se presentan preferentemente en ambientes mixtos; los más importantes son los de playa y duna, de menor importancia se tiene a los deltaicos. Finalmente los de ambientes continentales con muy poco interés como los lacustres y fluviales.

En forma general, se presentan en arenas constituidas por cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca y minerales pesados.

La litología de los yacimientos de playa se ve influenciada directamente por fuentes de abastecimiento de material. Así, la monacita proviene de la roca fuente la cual puede ser una roca granítica, de pegmatitas graníticas y sieníticas, de pegmatitas de rocas metamórficas, de gneises graníticos y de complejos peralcalinos en menor proporción.

Por ejemplo, los yacimientos de Eneabba que son arenas de minerales pesados del Terciario Superior-Pleistoceno Inferior (Lissiman y Oxenford, 1975), consisten de una asociación de arenas de playa, duna y estuario de 12 km de largo por 1.2 km de ancho.

Los yacimientos de Espíritu Santo, Río de Janeiro y otros ocurren en terrazas elevadas y bahías, constituidas de arenas Terciarias (Leonardos, 1974).

Algunos yacimientos de origen fluvial son ubicados al sur de Corea (Neary y Highley, 1984).

De estudios realizados en E.U.A. por Haskin se observó que las grauvacas tienen una mayor abundancia de T.R. y que disminuye hacia areniscas y calizas que es esta última la de menor contenido de T.R. (Fig.3.4).

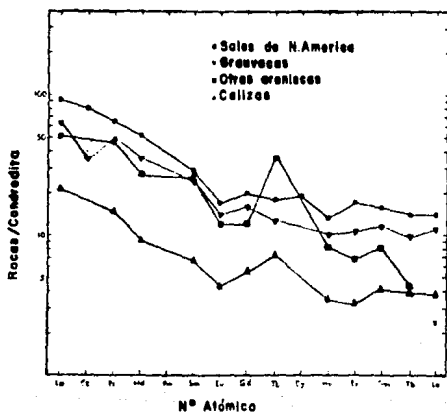


Fig.3.4. Abundancia promedio de las T.R. en las sales de Norteamérica (Haskin, 1966) en las grauvacas, areniscas y calizas, comparada con los meteoritos condriticos (Wakita, 1971)

## **f) Estructuras**

Los principales lugares donde ocurren los yacimientos de minerales pesados y con ello la monacita, el xenotimo y la euxinita son las playas, playas-barrera, terrazas y dunas con menor frecuencia los ríos, lagunas y estuarios. Las estructuras que se forman son dunas, estratos, capas y laminillas asociadas a la fracción fina de la arena como lo mencionó Folk (1974), lo constata Carranza E.A. en varios de sus estudios de la república mexicana (1980, 1987) y lo corroboran otros autores.

## **g) Hipótesis genética**

Los yacimientos de T.R. no solo se forman en playas, sino también ocurren en lagunas, ríos, depósitos de pie de monte y deltas.

Los tipos de placer se dividen de acuerdo al agente mecánico que los forma en: eluviales, fluviales, marinos (los más importantes) y eólicos, aunque algunos ambientes involucran varios ambientes, pero siempre predomina uno de ellos.

Además, es necesario tener en cuenta los procesos para la formación de un yacimiento de placer que son principalmete dos:

- Liberación, por los agentes de intemperismo y erosión de los minerales pesados y estables de su matriz.
- Concentración de dichos minerales en sitios adecuados.

## TIPOS DE YACIMIENTOS DE PLACER ASOCIADOS CON LA CONCENTRACION DE MINERALES QUE CONTIENEN TIERRAS RARAS.

### A) De playa

La formación de un yacimiento de placer de playa se efectúa por la acción de las olas y corrientes costeras, cuyas aportaciones del material pueden provenir de algún río que desemboca en la costa, de la erosión por las olas en la roca y terrazas, etc.

#### Ejemplos:

Los mejores yacimientos de monacita asociada a ilmenita, rutilo y zircón, así como otros minerales pesados se ubican en ambientes de playa-duna en los litorales. Australia, Brasil e India son algunos ejemplos importantes aunque también se han reportado en E.U.A., Canadá, Sudáfrica, etc. (Fig.1.1.). Los depósitos de Eneabba consisten de una asociación de ambientes de playa-duna-estuario, los de la costa de Brasil, de Espíritu Santo en Río de Janeiro ocurren en terrazas, bahías elevadas y barras. Otros depósitos de menor importancia son los de arenas minerales de Mozambique con reservas de 124' 000 000 ton a una ley de 4% de minerales pesados incluyendo la monacita, los depósitos de las costas de Madagascar que contienen 60' 000 000 ton de arenas con ilmenita (60%), zircón (15%) y monacita (10%) (O'Driscoll M., op.cit.), los depósitos de minerales pesados en arenas del Zaire que tienen 2 000 ton de monacita a 2.8 kg/m<sup>3</sup>.

En México, actualmente, no se tiene una evaluación de estos depósitos aunque se mencionan algunas localidades, principalmente en las costas occidentales del país. En las costas del estado de Sonora, Carranza E. menciona dos localidades con alta concentración de Fe asociado con titanio en arenas el cual se

encontró hasta de un 42.66%. El Fe ocurre en forma de hematita y magnetita en Bahía Kino y San Carlos; esta última es la más atractiva, aunque no se analizó por monacita.

En el estado de Guerrero el mismo Carranza E. (1986), menciona las concentraciones de minerales pesados que tienden a ser más abundantes en la fracción fina de las arenas (Folk, 1974) encontrándose Fe, Zr, Ti, Cu en mayor concentración en Punta Gorda y Laguna de Mitla. Otros lugares propicios con contenidos de magnetita, ilmenita, esfena y zircón son los Tuxtlas-Alvarado, Veracruz, en la desembocadura del río Usumacinta, en Colima, Jalisco y Nayarit (Cardona-Andrade, 1985).

Anteriormente en el área de Cayacal, Guerrero M. Barajas(1980) había encontrado anomalías de minerales pesados. El mismo autor en 1980 a través del C.R.M. menciona la presencia de monacita en la parte NW de la Bahía de Agua Dulce, Oaxaca. Los resultados del análisis de T.R. por espectrometría de fluorescencia de rayos x encontraron hasta 1550 ppm de lantano, cerio. Además infieren que la monacita proviene de una provincia alcalina situada al NW del río Quetzala, aunque no desecha la posibilidad de que la monacita provenga de la erosión del complejo metamórfico.

En 1985 Cardona-Andrade mencionan concentraciones de minerales pesados en ambientes de playa-duna (26%) en duna, (19%) en playa y (9%) en laguna, en la ensenada de Guelaguichi, Oaxaca cercana a la playa de Puerto Escondido.

Un estudio realizado en las costas del Istmo de Tehuantepec por Carranza E. (1980), encontro la presencia de concentraciones altas de minerales pesados, principalmente, en ambientes de playa-barrera y río que son los que ofrecen las

mejores perspectivas desde el punto de vista económico.

De acuerdo con su susceptibilidad magnética Edwards separa los minerales como sigue:

- 0.1            amper - cuarzo con inclusiones de magnetita, biotita e ilmenita.
- 0.2            "    - cuarzo con inclusiones de magnetita, biotita y clorita.
- 0.3            "    - biotita, clorita, hornblenda y zircón.
- 0.4- 0.6       "    - biotita, clorita, hornblenda, zircón y turmalina.
- 0.7- 0.9       "    - zircón, olivino, turmalina y monacita y feldespatos.
- 1.0- 1.2       "    - corindón, turmalina, zircón, monacita y feldespatos.
- 1.3- 1.5       "    - turmalina, zircón, monacita, feldespatos y corindón.

Por lo que es necesario prestar más atención a este tipo de yacimientos en México.

#### **b) Placeres fluviales**

Estos yacimientos se forman por la acción de los ríos, ya que los minerales más pesados tienden a ser menos transportados, debido a sus problemas físicos de estos (forma, densidad, esfericidad). Los minerales pesados se depositan y acumulan en sitios favorables que son en el curso medio del río.



Los yacimientos de T.R. asociados a minerales pesados no son muy comunes, los únicos conocidos son los del sur de Corea, cuya roca fuente es un gneis granítico.

### **c) Placeres eluviales**

Estos placeres se forman por la concentración en la ladera de los montes, por procesos cortos de erosión. El agente de transporte es el agua de lluvia que desciende por las pendientes o por el viento en regiones semidesérticas. Uno de los minerales comunes es la casiterita de donde, en Malasia, se extraen cantidades de monacita y pequeñas cantidades de xenotimo que ocurren en residuos de minerales pesados en depósitos de estaño (Alexander, 1964; Neary y Highley, op. cit.).

Este tipo de depósitos abre otra posibilidad a México, ya que en la región de Guadalcázar (S.L.P.) se mencionan dos grandes acumulaciones de grava granítica en las cuencas de Guadalcázar y Realejo formando dos abanicos eluviales enlazados, constituidos por cuarzo y feldespato potásico como minerales esenciales. Los minerales accesorios más abundantes consisten de zircón, magnetita y pequeñas cantidades de brookita, monacita, turmalina, topacio y fluorita, localmente berilo y casiterita (Fries C. Jr., 1948). También se mencionan algunas pegmatitas que atraviesan el granito, las cuales resultan de interés. Por otro lado, se identificó que entre los minerales pesados se tienen turmalina, a los minerales de titanio (anatasa, esfena, rutilo y brookita), zircón, casiterita, topacio, fluorita, cinabrio y granate.

Por lo anterior sería conveniente realizar un estudio para evaluar el contenido de T.R. así como de minerales pesados para que junto con la casiterita, cinabrio, oro y minerales argentíferos hallados con posibilidades de ser extraídos.

#### **d) Depósitos fósiles de placer**

Actualmente no han sido utilizados como fuente comercial de T.R. pero a futuro tenderán a ser explotados por lo que es conveniente ir localizando y evaluando este tipo de depósitos.

En México, en 1984 a través de un estudio realizado por uranio en el distrito Huajapan de León, estado de Oaxaca, Mosquera-Meléndez reportan en arcasas y areniscas ferruginosas correspondientes a la concentración de minerales pesados; zircón, monacita y xenotimo, los cuales fueron identificados por análisis de fluorescencia de rayos x, realizados en el Instituto de Geología de la U.N.A.M.. Otro estudio practicado con la microsonda (C.F.M.) se detectó a los elementos de Th, Ce, P, Zr, Si, Ti, Fe.

El estudio estratigráfico y estructural indica que este depósito se formó en un ambiente deltaico y cuya fuente de aporte fueron las rocas metamórficas de los complejos Acatlán y Oaxaqueño durante el Jurásico Medio-Superior.

#### **h) Ocurrencia estratigráfica**

Los yacimientos de placer actualmente explotados son los del Terciario al Reciente, aunque estos pueden ocurrir desde el Paleozoico.



## III.2. Yacimientos de tierras raras de origen plutónico

### III.2.1.) Rocas plutónicas alcalinas

#### INTRODUCCION

Como se sabe los yacimientos de concentración magmática son aquellos provenientes directamente de la cristalización del magma, de aquí se derivan diversos tipos de acuerdo a si son segregados o inyectados del magma original. Los yacimientos de T.R. ocurren principalmente en carbonatitas, las cuales son rocas ricas en carbonato derivado de un magma (Heinrich, 1966; Tuttle y Gittins, 1966), que es inyectado como un líquido residual a la superficie.

Las carbonatitas consisten de calcita, dolomita, ankerita y concentraciones de fosfato, hierro, T.R. niobio, uranio, torio y cobre. Además, por lo regular esta se halla íntimamente relacionada espacial y genéticamente con complejos alcalinos-ultrabásicos, asociados con accidentes estructurales profundos de la corteza continental "áreas de rifts en cratones estables" (Gómez C.A., op.cit.; Nieto O.J., s/f; Elías H.M., 1985).

Estas rocas se presentan en formas de diques cuando son intrusivas y con menor frecuencia como derrames y piroclastos en rocas extrusivas.

#### a) Paragénesis

Las carbonatitas contienen los mayores porcentajes de T.R. (72-15, 515ppm) y ratios de  $TRL^*/TRP^* = 7.1-1240$  (Culler R. y Graf J., 1984). Se conocen dos de acuerdo a su tipo de composición; las sövitas y beforinitas cuando poseen composición calcítica y dolomítica respectivamente (Brogger R., 1921;

Stanton, 1972; Nieto J., s/f.). Una estimación de los constituyentes en carbonatitas es la siguiente:

DTO. MOUNTAINS PASS PCO. QUEROL SUÑE, s/f	DTO. MOUNTAINS PASS MIKE O'DRISCOLL, 1988
60% Minerales-Carbonato	40% Minerales-Carbonato
20% Barita	25% Barita y/o Celestita
10% Fluorcarbonatos y Cuarzo	10% Estroncianita
10% Otros	12% Bastnaesita
	8% Sílice
	5% Otros

Dentro de los minerales de T.R. se tiene;

- Bastnaesita,  $RFCO_3$  o  $(Ce, La)(CO_3)F$
- Parisita,  $(Ce, La)_2Ca(CO_3)_3F_2$  (Palache, 1957)
- Cerita,  $(Ce, Ca)_9(Mg, Fe^{2+})Si_7(O, OH, F)_{23}$  (Glass, 1958)
- Sahamalita,  $(Mg, Fe)(Ce, La)_2(CO_3)_4$  (Jaffe, 1953)
- Monacita,  $(Ce, La, Y, Th)PO_4$  (Palache, 1957)
- Allanita,  $(Ca, Mn, Ce, La, Y, Th)_2(Fe^{2+}, Fe^{3+}, Ti)(Al, Fe)_2O.OH(Si_2O_7)(SiO_4)$
- Britholita,  $(Ca, Ce, La)_2(SiO_4)_2(PO_4)_2(OH, F)$  (Deer, 1962)

Menos comunes; pirocloro, baddeleyita, brazilianita, perovskita, knopita-dysanalyta.

### **b) Alteración supergénica**

No es importante en este tipo de yacimientos ya que los minerales que se forman representan bajas concentraciones o son poco comunes, como los anteriormente mencionados. Algunos ejemplos son Mrima Hill al sur oeste de Kenia donde las T.R. son concentradas en suelos residuales sobre carbonatitas intemperizadas, al igual sucede en Brasil en el área de Araxá y Barrairo.

Pero existe una alteración metasomática en éste tipo de yacimientos, donde una ganancia de potasio es reflejo de lo que se conoce como fenitización produciendo las fenitas. Estos procesos se han hallado en la sierra de Tamaulipas en el área de el Picacho ( Elías H. M., 1989), donde la fenitización se observó en las partes aledañas a la veta producto de un proceso de carbonatización tardía.

### **c) Leyes y composición química**

Los concentrados de T.R. del beneficio de yacimientos de carbonatita arrojan los siguientes datos (Mountain Pass, California E.U.A.):

		<u>OTRL*</u>		<u>OTRP **</u>	
CeO <sub>2</sub>	50%	CeO <sub>2</sub>	49.1%	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17%
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.5%	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.2%	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	0.16%
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.5%	Pr <sub>3</sub> O <sub>11</sub>	4.3%	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.031%
Pr <sub>4</sub> O <sub>11</sub>	4.0%	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.0%	HO <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50 ppm
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6%	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.78%	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35 ppm
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2%	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11%	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8 ppm
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.105%		99.49%	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13 ppm
Otros óxidos de				Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 ppm
T.R.P.	0.01%		60-70%	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09%
			OTR		0.318%

(Queroi S.F., s/f)

(Neary y Highley, 1984)

\*óxidos de tierras raras ligeras.

\*\*óxidos de tierras raras pesadas.

Por otro lado el contenido de ytrio y T.R. de la bastnaesita es:

TIERRA RARA	BASTNAESITA	
	California, E.U.A.	China
Lantano	32.00	27.00
Cerio	49.00	50.00
Praseodimio	4.40	5.00
Neodimio	13.50	15.00
Samario	0.50	1.10
Europio	0.10	0.20
Gadolinio	0.30	0.40
Terbio	0.01	} 1.00
Dysprosio	0.03	
Holmio	0.01	
Erbio	0.01	
Tulio	0.02	
Yterbio	0.01	
Lutecio	0.01	
Ytrio	0.10	

J.B. Hedrick (Industrial Minerals, noviembre, 1988).

Hedrick J.B., 1985 (Industrial Minerals, Nov. 1988)

La proporción media de los concentrados se considera de 60% de óxidos de T.R..

#### d) Tonelaje

Para tener una idea cercana del tonelaje producido hasta 1986 de concentrados de bastnaesita y monacita obtenidos de China, E.U.A. y Madagascar (Tabla 3.6.).



Tabla 3.6. Toneladas anuales producidas de concentrados de bastnaesita y monacita en el mundo.

	B A S T N A E S I T A								
	1970	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
E.U.A.	-	-	-	-	29,160	28,472	42,105	22,380	28,490
CHINA	-	-	-	-	n.d.	10,000	13,333	16,667	19,767
MADAGASCAR	-	-	-	-	n.d.	25*	25*	25*	-
TOTAL	23,620	27,555	26,673	28,520	29,160	38,497	55,543	39,072	38,257

	M O N A C I T A				
	1982	1983	1984	1985	1986
E.U.A.	1,667	667	750	750	750

n.d. = No disponible

\* = Estimados

Teniendo un total de 311,489 ton de concentrados.

- Información obtenida de Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V

- B.G.S. World Mineral Statistics 1982-86.

### e) Litología y rocas asociadas

Las rocas silicatadas alcalinas son comunmente; urtita-ijolita-malteigita y sienitas de nefelina. (Fig.3.5)

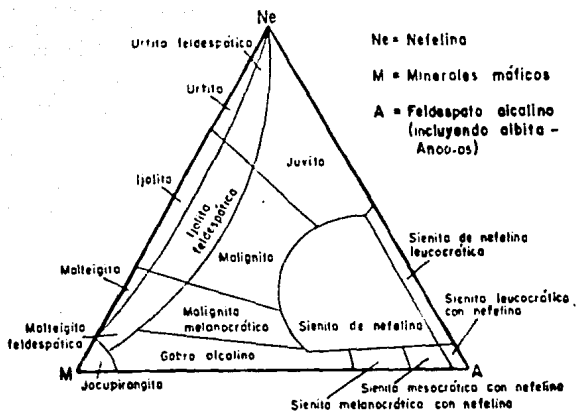


Fig. 3.5. Clasificación de rocas alcalinas de Sarantina y Shinkarev, 1967.

La importancia económica de estas rocas es que presentan concentraciones bajas de T.R., por ejemplo:

**Serie ijolita-urtita-malteigita.** 145-1334 ppm.

**Lamprófidos.** 261-1033 ppm. (más básico)

**Toda roca alcalina;**

**Máfica.** 69-1435ppm.

**Shoshonita.** 69-240ppm.

**Sienitas-fonolitas-traquitas.** 154-1750 ppm (intermedio).

**Basanita, basalto nefelínico-nefelina.** 202-597 ppm (básico).

(Tomado de Culler R., Graf J., 1984).

En la tabla 3.7 se pueden observar los depósitos asociados a algunas rocas alcalinas, donde en la mayoría son susceptibles de ser explotados por T.R., entre otros metales.

T A B L A 3.7. TIPOS DE DEPOSITOS GENETICAMENTE ASOCIADOS CON ROCAS ALCALINAS.

TIPO DE ROCA	ESTADO	MINERALES CARACTERISTICOS	ELEMENTOS CARACTERISTICOS
Sienita de Sodalita	Neumatolítico	Steenstropina, sorensenita, analcima, monacita, aegirina, epistolita.	Ce, Th, U, Be, Nb
Sienitas de Nefelina Eulandítica	Magmática	Eulandita, microclina, aegirina, rinkite.	Zr, Nb, Ce
urtitas	Magmática	Nefelina, apatita, NbCe- perovskita, titanita, eulandita.	P, Al, Nb, Ti, Ce, Zr, P
Ultramáficas Alcalinas	Hidrotermal	Ankerita, rodocrosita, pirocloro, bastaesita, estroncionita, barita, fluorita.	Nb, Ce, Ba, Sr
Sienitas Alcalinas y Nefelínicas	Neumatolítico	Albita, zircón, pirocloro, titanita, apatito, britholita.	Zr, Nb, Ti, P, Ce, Ca

Continuación T A B L A 3.7.

TIPO DE ROCA	ESTADO	MINERALES CARACTERISTICOS	ELEMENTOS CARACTERISTICOS
Sienitas Alcalina	neumatolítico	Albita, microclina, barilita aegirina.	Be, Nb, Ce, Ba
	Hidrotermal	Fluorita, leucofanita, bastnaesita.	Be, P, Ce
Granitos Alcalinos	Hidrotermal	Hematita, siderita, fluorita, barita, bastnaesita, monacita, cryolita.	Fe, Ba, Ce, Y, Se, Nb, P.
	Supergénica	Halloysita, limonita, bastnaesita, rhabdofanita.	Al, Fe, Ce

H. Sorensen, 1984.

Aunque también existen rocas asociadas a los cuerpos carbonatíficos tales como, gabros, piroxenitas, dioritas, sienitas (complejo calcoalcalino), como sucede en el área el Picacho en la sierra de Tamaulipas. En el complejo alcalino de la sierra de San Carlos, se presenta un complejo calcoalcalino (gabros, dioritas, cuarzo-dioritas, granitos, monzonitas y sienitas) y un complejo menor de rocas alcalinas constituidas por sienitas alcalinas, sienitas de nefelina y tianguafitas.

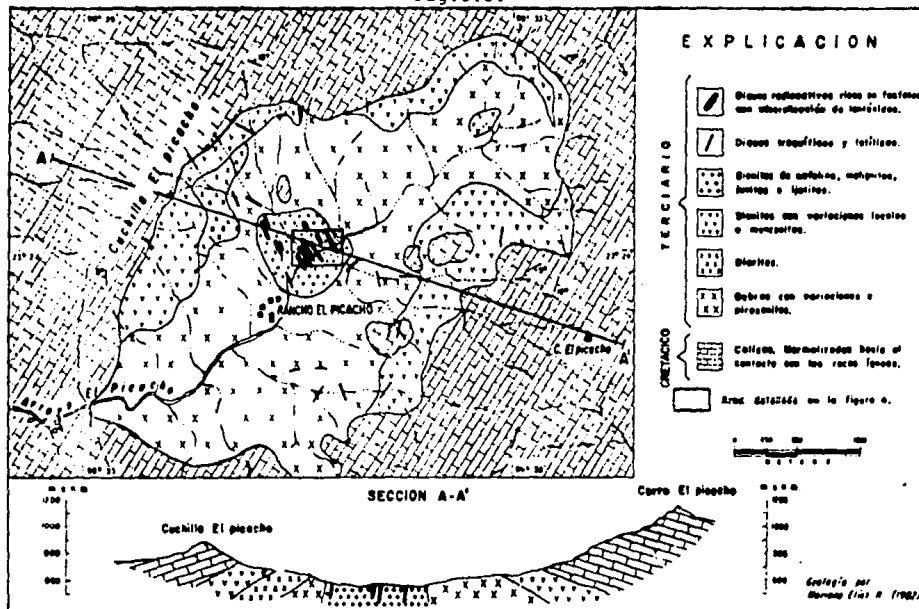
Entre las rocas metamórficas asociadas por lo regular, se tienen gneis graníticos de biotita, biotita-granate y augen gneis como lo ilustran los yacimientos de Mountain Pass, California.

## f) Estructuras

El tipo más común es el subvolcánico, el cual es típicamente cilíndrico, de pocos kilómetros de diámetro. Se les encuentra en los núcleos de complejos alcalino-ultrabásico en forma de tapones o "plugs" como en Uganda, (King, 1949), donde el domo de carbonatita-ijolita forma el núcleo de grandes extrusiones nefelínicas (97% piroclastos). También forman sills como el de Kuluwe, Zambia; diques anulares o radiales y vetas en el núcleo como se observan en Mountain Pass, California y es reportado en forma semejante en el área de el Picacho, Tamaulipas donde no se han encontrado carbonatitas en el nivel de erosión actual, pero se observan contenidos de T.R. mayor que en la mayoría de carbonatitas, sobre todo de lantánidos pesados (Elías H.M., 1989) (Fig.3.6.).

Según Smirnov (1977), existen los siguientes tipos de complejos alcalinos ultrabásicos que contienen carbonatitas:

Fig.3.6.



Mapa y sección geológica del área El picacho, Sierra de Tamaulipas.

- Stock zonado concéntrico - chimenea volcánica.
- Capas cónicas - lopolito.
- Diques anulares o semianulares - tipo relleno de fisura.
- Intrusiones híbridas - las tres anteriores.

### **g) Hipótesis genética**

Existen varios procesos magmáticos para la producción de carbonatitas entre los cuales se tienen los siguientes:

#### **1) Fusión parcial**

Es más factible que se originen las T.R. de la fusión parcial de peridotitas de espinela con volátiles libres acompañado de un rango de peridotita de granate, que del manto superior peridotítico. (Yesen, 1977; Culler R. y Graf J., 1984). Aunque este proceso no produce los altos contenidos de T.R., por lo que se ha considerado que a aproximadamente 1200°C y 25 kbar el magam carbonatítico puede ser producido por un porcentaje pequeño de fusión de peridotita rica en CO<sub>2</sub> (Eggler, 1976; Wyllie y Huang, 1975; Culler R., op.cit.).

#### **2) Cristalización fraccionada**

Los modelos de cristalización fraccionada como generadores de T.R. de un magma primario basáltico alcalino son irreales, puesto que es necesario un alto grado de cristalización fraccionada. Por lo que Balashov y Krigman en 1975, usan bajos valores D para obtener un gran enriquecimiento de T.R. para grados más razonables de cristalización fraccionada por este proceso se han explicado algunos yacimientos como el de Fen (Mitchell y Brunfelt, 1975) y las carbonatitas de Kenia producto de magmas residuales (Culler R. y Graf, op.cit.).

El complejo peralcalino del área de el Picacho, Tamaulipas es explicado por un modelo de fusión parcial, sin cristalización fraccionada, de una lherzolita con 0.5-0.08% de granate y una fracción fundida de 0.5 a 1.0 % (Elías H.M.,1989). Cabe preguntarse ¿ por qué si se tiene una fusión parcial dentro de los márgenes para producir un enriquecimiento de T.R., se observa un empobrecimiento relativo de dicho complejo?.

Este complejo es a su vez cortado por 15 vetas con rumbo NW-SE que según Elías H. representan un fenómeno hidrotermal tardío posterior a la fenitización y relacionado con el proceso de carbonatización originado por inmiscibilidad líquida que no alteró al complejo peralcalino, sugiriendo un aporte de T.R. del complejo hacia las vetas, concluyendo que estas representan los últimos estados tardíos de cristalización del magma original,

Así el complejo peralcalino y las vetas son originadas de un mismo magma peridotítico, donde actuaron procesos de fusión parcial, cristalización fraccionada, transferencia de volátiles y líquidos inmiscibles.

### 3) Líquidos inmiscibles

En algunas ocasiones la cristalización fraccionada de minerales no produce T.R. en carbonatitas, por lo que se propone en 1975 un modelo de inmiscibilidad líquida (Eby, 1975; Mitchell y Brunfelt, 1975; Culler y Medaris, 1977; Culler y Graf, 1984), para explicar el contenido de T.R. en magmas cogenéticos el mecanismo consiste en la separación, acumulación de carbonatitas enriquecidas en T.R..



#### 4) Transferencia de volátiles

Un proceso bastante importante en el enriquecimiento de T.R. es el transporte de volátiles de fluidos ricos en agua a presiones del manto y fluidos ricos en dióxido de carbono a presiones de la corteza. Este proceso junto con el de líquidos inmiscibles es el que da origen a las vetas emplazadas en el área de el Picacho y que esta enriquecida en T.R. las cuales no proviene del complejo peralcalino asociado. Similarmente sucede en Mountain Pass, California, donde las rocas carbonatadas y vetas han sido formadas de la cristalización de un magma carbonatítico, que es un producto tardío de la diferenciación de un magma rico en potasio; cristalizando primero las shonkinitas, sienitas, granitos y diques shonkiníticos, el cual fué inyectado dentro de un episodio tectónico durante el magmatismo Precámbrico. Las T.R. se concentran principalmente en las vetas formadas por el depósito de soluciones hidrotermales ( Querol S.F., s/f), debido a que el gran tamaño de los radios iónicos de las T.R. y otros elementos son concentrados en fluidos residuales observado en algunas carbonatitas y en todas las pegmatitas.

#### h) Ejemplos

Los principales ejemplos por su potencialidad son: Mountain Pass, California; E.U.A., que es un complejo alcalino carbonatítico emplazado en gneises graníticos. Bayan Obo en Nei Mongol al norte de China, aunque existe duda, ya que las T.R. son extraídos de yacimientos de Fe que ocurren como lentes y cuerpos tabulares, pero que en la figura 1.1. lo ilustran como complejo alcalino y carbonatítico. Los yacimientos de Araxá y Barrairo así como Pocos de Caldas en Brasil, que consisten de yacimientos de carbonatita y yacimientos residuales debido al intemperismo de estos. África posee varios yacimientos de carbonatitas tales como el de Bujumbura en Burundi, los suelos residuales de carbonatitas de

Mrima Hill en Kenia y las del área de Karonge (Fig.1.1.).

En México no se ha realizado una prospección minuciosa para T.R., aunque se reportan algunos complejos peralcalinos en la sierra de Tamaulipas y de San Carlos (Elías H., op. cit. y Cepeda D., 1979).

#### **1) Ocurrencia estratigráfica**

Las carbonatitas se observan en toda la columna geológica, Precámbrico-Reciente. Algunas carbonatitas precámbricas son las de Mountain Pass, California.

### III.3. Otros ambientes geológicos

Otros ambientes geológicos que aportan T.R. en concentraciones menores y por tanto se explotan a pequeña escala son las pegmatitas, los depósitos de fluorita y los de skarn. Se conoce poco del potencial de T.R. en las secuencias ofiolíticas, pero se han mencionado concentraciones de éstas, por lo que también será incluida.

III.3.1.) Las pegmatitas son rocas ricas en feldespato alcalino que esta intercrecido con cuarzo de granulometría muy gruesa de origen ígneo. Las rocas graníticas son las más comunes en formar, durante la consolidación, líquidos residuales que representan el estado final de la cristalización y diferenciación de un magma rico en materiales volátiles mineralizadores (Bateman, 1979).

Los minerales más comunes en las pegmatitas son; el cuarzo, el feldespato, la biotita, la turmalina, el rutilo. Se presentan con menos frecuencia; la ilmenita y la espodumena, así como algunos minerales radiactivos como la allanita y la betafita, donde la primera es un silicato de aluminio, calcio, hierro, torio y T.R..

Las pegmatitas de mayor importancia son las complejas, ya que estas están zoneadas (zona bordera, zona de pared, zona intermedia y núcleo). El tamaño de grano se incrementa hacia el núcleo y la mineralización, por lo regular, se presenta dentro de la zona intermedia o entre ésta y el núcleo.

Se han explotado T.R. de pegmatitas en Cooglengongen al oeste de Australia (Hill, 1975; Neary y Highley, 1984). Algo de bastnaesita ha sido recuperada de pegmatitas en Madagascar donde las T.R. están contenidas en minerales de uranio como allanita y syilluellita (Hawkins, 1975; Neary, op.cit.).

En México las principales posibilidades de encontrar T.R. en pegmatitas son el complejo metamórfico de Oaxaca; donde desde 1950 se vienen reportando pegmatitas, como Martínez B.J. (1955), quien menciona alrededor de 20 pegmatitas como apófisis de cuerpos intrusivos graníticos cuya roca encajonante son gneises graníticos de hornblenda, de grafito y biotita, así como esquistos y mármoles cipolinos. Estos cuerpos se localizan en los alrededores de Telixtlahuaca y son relativamente ricos en minerales radiactivos, pero la cantidad que contienen es muy limitada; sin embargo, permite pensar que se tienen buenas posibilidades de obtener una producción en conjunto de minerales radiactivos y T.R., como sub-producto de la explotación de feldespatos.

Existen además pegmatitas en Sonora y en el norte de Baja California (Carrillo-Nieto, 1975).

**III.3.2.)** Los yacimientos de fluorita contienen concentraciones de T.R. principalmente del subgrupo del ytrio (Gómez C. A., 1981; Chiodi M., 1988).

Se sabe que México es uno de los primeros productores de fluorita donde el calcio tiende a ser sustituido por las T.R., por lo que sería conveniente realizar un estudio enfocado a evaluar el potencial que tienen los jales, producto del beneficio de fluorita. Si los resultados son positivos, entonces se deberán realizar los estudios encaminados a la distribución de T.R. en la fluorita que muy posiblemente sea debido a la actividad hidrotermal durante la formación de estos depósitos. Las plantas de concentración de fluorita, tales como las de Río Verde, Río Colorado, la de Muzquiz, estarían sujetas a análisis de jales por T.R..

**III.3.3.)** También se ha encontrado la presencia de T.R. en skarn, principalmente en la apatita, que aunque es un mineral independiente, está asociado a estos yacimientos.

III.3.4.) En 1983 Frey y Suen observaron una relación de enriquecimiento de T.R. en rocas ultrabásicas con un alto porcentaje de serpentinización. Frederick (1984) indica que las lherzolitas en ambientes ofiolíticos han presentado abundancia de T.R., aunque no se conoce a ciencia cierta y existen muchas interrogantes. Sin embargo, la localidad del Cayacal, Guerrero presenta concentraciones de minerales pesados asociados a T.R. en sus playas. Tal vez esto se explica debido a la relativa cercanía de los cuerpos ultrabásicos como el llamado Loma Baya.

En el límite oeste de México, sobre la costa pacífica, existen varios cuerpos ultrabásicos; algunos producto de una obducción de una secuencia ofiolítica.

Algunos ejemplos son el área de Loma Baya, el área del Tamarindo, de Petatlán (Camalotito), donde diferentes autores; (Morales-Ortiz-Núñez, 1985; Delgado A., 1984; Ortiz, 1984; Núñez-Salgado-Segura, 1981), han reportado complejos ultrabásicos asociados con intrusiones graníticas, donde las peridotitas (lherzolita) pueden potencialmente representar depósitos de T.R., además de serpentina, níquel, cromo y algunos elementos del grupo del platino.

**CAPITULO IV**

**LA PROSPECCION  
DE LAS TIERRAS RARAS**

## IV. LA PROSPECCION DE LAS TIERRAS RARAS

### IV.1. Guías para la prospección de tierras raras

La prospección minera aplica todas las disciplinas de la Geología para la búsqueda de yacimientos económicamente rentables. El término de prospección proviene del término latín prospectus, lo cual significa ver hacia adelante.

Así, de los conocimientos que se adquieren del estudio de los yacimientos minerales, se derivan reglas que servirán de guías para la búsqueda de nuevos yacimientos. Uno de los objetivos de esta tesis es intentar dar algunas guías para la búsqueda de yacimientos de minerales de T.R..

Una guía de mineralización es cualquier rasgo natural que ayuda a la localización de un depósito mineralizado o al incremento de los ya conocidos. Estas guías pueden ser físicas o conceptuales.

Las guías (metalotectones), que se desarrollan a continuación son las siguientes:

IV.1.1.) Guías fisiográficas

IV.1.2.) Guías mineralógicas

IV.1.3.) Guías litológicas

IV.1.4.) Guías tectono-estructurales

Los metalotectones que definen a un yacimiento constituyen un modelo (Yacimiento Mineral). Arriaga G. (1981), menciona que a un yacimiento mineral es necesario tomarlo como un ser que ha sido formado por una serie muy compleja de metalotectones, los cuales han concurrido a la creación de un depósito.

#### IV.1.1.) Guías fisiográficas

Es un rasgo del modelado de la corteza terrestre que está ligado directa e indirectamente a un yacimiento y que por tanto ayuda para su localización.

Se dividen en aquellos que forman salientes y depresiones, por ejemplo:

- Los yacimientos de fosforita, se forman en depresiones someras llenas de aguas saladas en un ambiente mixto, donde se propicia la precipitación de sales.

- Las pegmatitas se observan como salientes que desde lejos pueden formar una mancha blanca en un terreno amarillento (gneis) además, de la presencia de fragmento de feldespatos, cuarzo y mica de tamaño anormal.

- Depósitos de placer de playa, los cuales se acumulan en las partes más bajas de los continentes, en ambientes de duna-playa. Donde se requiere necesariamente de una roca fuente que aporte los minerales pesados y con ello la monacita y otros minerales de T.R.. Otros ambientes que constituyen depresiones y que son lugares con posible potencialidad de contener T.R. son los lacustres y fluviales. México tiene algunas localidades donde se encuentra monacita y minerales pesados.

- Los placeres eluviales forman concentraciones en las laderas de montes y cubren valles, en lugares semidesérticos. En este ambiente se explotan depósitos de estaño, que se asocian a residuos de minerales pesados con pequeñas cantidades de monacita y xenotimo.

- Las carbonatitas constituyen el núcleo de depresiones cilíndricas alcano-



ultrabásicas en forma de vetas, taponés, diques anulares o radiales, y sills. En menor frecuencia se presentan derrames y piroclastos.

#### IV.1.2.) Guías mineralógicas

Es cualquier mineral o conjunto de ellos que están relacionados con un yacimiento mineral y que por tanto son utilizados en la prospección minera.

Estos se dividen en 1.) Minerales primarios y 2.) Minerales secundarios. Los minerales primarios son aquellos que tal como se formaron existen hasta su prospección en el lugar de origen. Mientras que los secundarios son aquellos que una vez formados son alterados por procesos supergénicos o hipogénicos.

#### Ejemplos;

- Los yacimientos de fosforita se forman in situ y están asociados íntimamente a minerales como francolita, fluorapatita y apatita.

- En las pegmatitas se caracteriza la presencia de minerales de cuarzo, ortoclasa con cantidades de minerales accesorios tales como turmalina, ilmenita, espodumena, allanita y ocasionalmente betafita (Martínez B.J., 1955).

- En los depósitos de playa se observan aquellos minerales que son resistentes a la erosión e intemperismo tales como el cuarzo, así como el grupo de minerales denominados pesados; zircón, ilmenita, monacita, etc. Para que existan minerales de T.R. es necesario tener una roca fuente. Las posibilidades de México las constituyen las playas de Oaxaca, donde rocas metamórficas graníticas pueden ser la fuente de aporte, las playas de Guerrero donde los cuerpos graníticos y ultrabásicos (ofiolíticos) pueden aportar minerales de T.R..

En Baja California , Sonora, Tamaulipas, Veracruz, también existen las posibilidades de contener minerales de T.R..

- El estaño ( casiterita), en depósitos eluviales es otra fuente de aporte de cantidades de monacita y xenotimo que se obtienen como subproducto de la explotación del estaño.

- La presencia de calcita, dolomita, ankerita y concentraciones de fosfato, Fe, Nb, U, Th y Cu en ambientes ígneos indican la existencia de minerales de T.R. .

Los minerales radiactivos como la allanita y la monacita por los pequeños contenidos de Th, ayudan para que por medio del contador geiger se descubran anomalías radiactivas.

#### **IV.1.3.) Guías litológicas**

Se consideran como guías litológicas aquellas rocas que se encuentran directa o indirectamente relacionadas a un cuerpo mineralizado.

Los minerales de T.R. tienden a presentarse en diferentes litologías o rocas. La tabla 4.1 y 4.2 se refieren a la abundancia de las T.R. en diversas rocas.

T A B L A 4.1 Comparación de abundancias (ppm) de elementos trazas y menores, en carbonatitas, con rocas ígneas y calizas (Según Pecora, 1956; Gold, 1963; Heinrich, 1966).

	TODAS LAS ROCAS IGNEAS	GABROS	ROCAS ALCALINAS ULTRAMAFICAS A PELSICAS	CALIZAS	CARBONATITAS
<u>Re<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (tot).</u>	<u>50</u>	<u>5</u>	<u>100-500</u>		<u>200-n x 100,000</u>
BaO	300	200	1000-10000		5000-100,000
SrO	300	200	1000-10000		5000-20,000
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5	20	10-50		10-5000
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2	1	1-10		0.1
ZrO <sub>2</sub>	300	100	400-2000		10
TiO <sub>2</sub>	8000	15000	5000-20,000		1000-30,000
Sc	13			1	10
Co	18			0.1	17
Ni	100			20.0	8
Cu	70			4	2.5
Ga	26			4	1

Continuación T A B L A 4.1

	TODAS LAS ROCAS IGNEAS	GABROS	ROCAS ALCALINAS ULTRAMAFICAS A FELSITAS	CALIZAS	CARBONATITAS
Zr	170			19	1120
Mo	1.7			0.4	42
Sn	32			1	4
Cr	117			11	48
La	40			1	516
Ce	40			11.5	1505
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3000	3000	2000-20,000		1000-n x 10,000
P	500	300	100-2000		200-24,000
S	500	2000	1000-3000		10,000-100,000

TOMADO DE STANTON, 1972

T A B L A 4.2 ABUNDANCIA DE LOS ELEMENTOS DE LAS TIERRAS RARAS  
EN LA LITOSFERA. (VALORES EN ppm)

NO.	ELEMENTO	SIMBOLO	U B*	BASALTO	ALTO Ca	BAJO Ca	SIENITA	CARBONATITA	LUTITA	ARENISCA	CALIZA
39	Ytrio	Y	O.X <sup>4</sup>	21	35	40	20		26	40	30
57	Lantano	La	O.X	15	45	55	70	516	92	30	X.
58	Cerio	Ce	O.X	48	81	92	161	1505	59	92	11.5
59	Praseodimio	Pr	O.X	4.6	7.7	8.8	15		5.6	8.8	1.1
60	Neodimio	Nd	O.X	20	33	37	65		24	37	4.7
61	Prometio	Pm	SOLO OCURRE EN TRAZAS, ES RADIOACTIVO								
62	Samario	Sm	O.X	5.3	8.8	10	18		6.4	10	1.3
63	Europio	Eu	O.X	0.8	1.4	1.6	2.8		1.0	1.0	0.2
64	Gadolino	Gd	O.X	5.3	8.8	10	18		6.4	10	1.3
65	Terbio	Tb	O.X	0.8	1.4	1.6	2.8		1.0	1.6	0.2
66	Disproseo	Dy	O.X	3.8	6.3	7.2	13		4.6	7.2	0.9
67	Holmio	Ho	O.X	1.1	1.8	2.0	3.5		1.2	2.0	0.3
68	Erbio	Er	O.X	2.1	3.5	4.0	7.0		2.5	4.0	0.5
69	Tulio	Tm	O.X	0.2	0.3	0.3	0.6		0.2	0.3	0.04
70	Yterbio	Yb	O.X	2.1	3.5	4.0	7.0		2.6	4.0	0.5
71	Lutecio	Lu	O.X	0.6	1.1	1.2	2.1		0.7	1.2	0.2
TOTAL TIERRAS RARAS				130.7	238.6	274.7	405.8		233.2	249.7	52.74

TOMADO DE TURKIAN Y WEDEPOL, 1961, TABLA 2, GEOL. SOC. AMERICA, V. 72. (DATOS DE CARBONATITA: STANTON, 1972).

\* UB - ROCAS ULTRABASICAS

<sup>4</sup> X - NO SE CONOCE CON PRECISION, SOLO EL ORDEN

Los minerales de T.R. son abundantes en carbonatitas, rocas alcalinas ultrabásicas a félsicas como la serie urtita-ijolita-melteigita y sienita de nefelina y descienden en abundancia hacia el basalto alcalino, toleitas continentales, komatiita, komatiitas basálticas, andesitas, cuarzodioritas, sieno granitos y aumenta ligeramente en granitos alcalinos como puede observarse en las tablas (4.3, 4.4 y 4.5).

**Tabla 4.3.** Rocas ultrabásicas y básicas con mayor contenido de T.R. (las rocas silíceas son incluidas en el grupo de las rocas ricas en alcalis).

TIPO DE ROCA	RANGO	
	Σ ETR (ppm)	
1. Kimberlita	115	- 4613
2. Carbonatitas	72	- 15,515
3. Serie Ijolita (urtita-melteigita)	145	- 1334
4. Lamprófidos	261	- 1033
5. Toda roca alcalina Máfica:		
a) Máfico	69	- 1453
b) Intermedio	92	- 1750
c) Félsico	92	- 1750
a.1) Basalto alcalino	130	- 250
a.2) Basanita, basalto nefelínico, nefelinitas	202	- 597
b.1) Traquitas, fonolitas, sienitas asociado con basanitas	380	- 1750
c.1) Asociado con basalto transicional o alcalino	316	- 730
c.2) Basalto rico en K	255	- 1453
6. Toleita continental	15.2	- 322

R.L. CULLER Y L. GRAP, 1984 DE P. HENDERSON.

**TABLA 4.4 ROCAS IGNEAS INTERMEDIAS Y SILICEAS CON  
CONTENIDOS DE T.R.  
(SE INCLUYEN LAS ANORTOSITAS).**

TIPO DE ROCA	RANGO Σ ETR (ppm)
1. Andesita	25 - 341
- Océánica	25 - 178
- Continental	67 - 341
2. Gabro anortosítico	34.5 - 312
3. Cuarzo diorita, tonalita, granodiorita y trondhjamita	10.5 - 499
- Ofiolita	34.4 - 131
4. Monzogranito y sienogranito	8 - 1977

**R.L. CULLER Y J. GRAP, 1984 DE P. HENDERSON.**

T A B L A 4.5 ELEMENTOS RAROS LITOFILOS EN GRANITOS ALCALINOS (ppm)

Elemento	Región				Promedio
	Nigeria	Nigeria	Kazakhstan (USSR)	Siberia (USSR)	Contenido de Ácido en Rocas
(RE + Y <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	-	880*	700-800	500-4000	292(RR)
Nb	-	605 (195-1050)	315-490	1092	20
Ta	-	4.8-58	25-33	82	3.5
Zr	1000 (300-2200)	2390 (510-7800)	370-5700	5620	200
Hf	21-66	8.9-110	-	-	1
Be	-	13 <sup>4</sup>	20-24	18	5.5
Li	230 (54-630)	243 <sup>4</sup>	-	170	40
Rb	260-840 (2700-12400)	410 <sup>4</sup>	-	820	200
F	7200	-	1600-3000	5400	800
Nb/Ta	-	22.6 (14.8-8-39)	26	12.4	5.7
Zr/Hf	19-29	48 (28.3-71)	-	-	200
Ce/ Y	-	0.84*	-	-	-
Fuente Literaria	Bowden (1966a, 1966b)	Tugarinow, et al. (1968)	Mineev (1968)	Beus et al. (1962)	Vinogradov (1962)



#### IV.1.4.) Guías tectono-estructurales

Son los rasgos primarios y secundarios, tectónicos y estructurales que están asociados directa o indirectamente con la mineralización. Se trata de las guías tectónicas cuando se trabaja con metalotectones regionales y estructurales cuando la escala es más grande (a detalle) o se manejan metalotectones locales, por ejemplo;

- Las carbonatitas y los complejos alcalinos tienden a ocurrir en rifts continentales, es decir, están relacionados a esfuerzos tectónicos extensionales (H. Sorensen, 1984). Las rocas alcalinas no son exclusivamente posttectónicas, sino que son emplazadas también antes y durante el fallamiento, levantamiento, foliación o emplazamiento de granitos, como lo demostro un estudio realizado por Barker (1984), de 127 localidades de roca alcalina en los E.U.A. (H. Sorensen, 1984).

Por otro lado, a nivel local algunas guías para su prospección las constituyen algunos cuerpos tabulares o vetas, tanto anulares y radiales como cortantes. Así también forman tapones o domos, emisiones piroclásticas y están sujetos a procesos magmáticos, neumatolíticos, hidrotermales y supergénicos como puede observarse en la tabla 3.7 del capítulo tres.

#### IV.2. Métodos analíticos de prospección de las tierras raras

Existen diversos métodos para la determinación de las T.R.; procesos físico-químicos que se clasifican de acuerdo a la propiedad utilizada para su análisis. Carrillo-Nieto (1975), enuncian varios métodos.

#### **IV.2.1) Métodos volumétricos:**

- Basado en reacciones de óxido-reducción.
- Basado en la formación de complejos.
- Basado en la precipitación de reacciones.

#### **IV.2.2.) Métodos ópticos:**

- Espectro fotométrico.
- Flamo fotométrico.
- De luminiscencia.
- De emisión espectroscópica.
- De espectroscopia de rayos x.

En el método espectrofotométrico se obtiene el espectro de absorción de las T.R. a través de diferentes reactivos, utilizado para soluciones con amplio rango de longitud de onda (200-1400 nm). El método flamo fotométrico utiliza el espectro de las T.R. excitados a través de una flama de gas, el espectro es analizado por medio de espectrofotómetros (480-600 milimicras). Este método no se utiliza para el Ce y Pr.

El método de luminiscencia es poco estudiado, mientras que el de emisión espectroscópica, en donde se analizan las líneas de el espectro de las T.R. han sido clasificadas en tres grupos.

Por último, el método de espectroscopia de rayos x que es clasico para analizar T.R. (Carrillo-Nieto, 1975).

Actualmente los métodos que se utilizan son el análisis de activación

neutrónica y el de disolución de isótopos-espectroscopia de masas. Otro análisis reciente es el I.C.P. (Inductively Coupled Plasma), de emisión espectroscópica, el cual determina un amplio rango de elementos incluyendo las T.R..

#### **IV.2.3.) Análisis de activación neutrónica**

Es un método físico bastante sensitivo y versátil, este permite obtener determinaciones de muchos elementos en partes por millón y algunas veces en partes por billón sin la necesidad de destruir el espécimen.

El proceso consiste en colocar la muestra en el flujo de neutrones (reactor nuclear o fuente neutrónica), donde las reacciones nucleares producen líneas de radiación gamma emitida, la cual es medida y comparada con la radiación de los estándares. La precisión de estos métodos depende del conteo estadístico.

#### **IV.2.4.) Análisis de disolución isotópica-espectroscopia de masas**

Se basa en la determinación de la composición isotópica de un elemento por espectrómetro de masas. Este método es aplicable a diez de las T.R., es altamente sensitivo y requiere de 50-100 mgr de materiales para un análisis completo. Por tales razones es muy utilizado para la geoquímica de las T.R. especialmente en el aspecto cuantitativo de la formación entre cristales de T.R. y durante el fraccionamiento ígneo de un magma.

La muestra es sujeta a un bombardeo electrónico de muestras gaseosas, o por evaporación termal de filamentos encendidos, el resultado es un espectro de masas.

El método se utiliza, además, para la determinación de patrones normali-

zadores de T.R. con las condroditas, llevando un control óptimo de las anomalías de Eu (samario, europio, gadolinio). La desventaja de este método es la necesidad de un equipo costoso y operadores expertos, así como el tiempo y el esfuerzo requerido.

#### **IV.2.5.) Espectrómetro de emisión de plasma inductivamente conectado**

El plasma inductivamente conectado (I.C.P.), de emisión espectroscópica presenta alcances en los procesos rutinarios para análisis simultáneo multielemental, siendo eficiente y rápido.

El proceso implica la obtención de una solución de la muestra la cual es llevada, como un aerosol dentro de unos electrodos de plasma de Ar. Así, el aerosol inyectado en el plasma por un período relativamente largo (aproximadamente 2 milisegundos), a una temperatura de 6000 y 8000 °K (21.9°-29.3°C) lo cual permite un mayor grado de atomización y excitación de numerosas líneas espectrales atómicas e iónicas.

La técnica es bastante sensitiva y precisa para el análisis de elementos mayores y traza de rocas silicatadas o minerales. La disolución de la muestra es relativamente rápida y se requiere de dos minutos o menos para la determinación simultánea de muchos elementos. (Henderson P. y Pankhurst P., 1984).

**CAPITULO V**

**METODOS  
DE EXPLOTACION**

## V. METODOS DE EXPLOTACION

Las características físico-químicas del depósito son un factor importante para escoger el tipo de minado en la extracción de minerales de T.R..

El tipo de explotación que se escoge está íntimamente relacionado con algunos factores como lo son:

- El tipo de roca.

Pueden ser ígneas (intrusivas o extrusivas), sedimentarias (consolidada o no consolidada), metamórficas. Los principales yacimientos residuales de minerales de T.R. son los de placer de playa no consolidada y vetas en rocas ígneas.

- Accidentes estructurales.

Algunos factores que se tienen que tomar en consideración son las fallas, las fracturas, los planos de deslizamiento, la foliación, las juntas (fracturas de enfriamiento), planos de estratificación, laminación.

- Descomposición química de la roca.

Los efectos que causan que la roca pierda resistencia son varios, de los cuales se conoce el intemperismo, la alteración hidrotermal y la solubilidad de la roca.

En rasgos generales se utilizan dos tipos de minado; operaciones de dragado para yacimientos de placer y operaciones de tajo abierto para los de bastnaesita (carbonatitas). Las operaciones mineras en placeres de playa de material no

consolidado utiliza máquinas dragadoras para trabajos en agua (Fig.5.1.) con sus modalidades con elevadores para explotación en seco (Fig.5.1.a.), con cadena y cubetas en el sistema de dragado (Fig.5.1.b.), así como grandes palas. Cuando se presenta en bolsas es minado selectivamente por bulldozers y scrapers.

Fig. (5.1) DRAGADORA

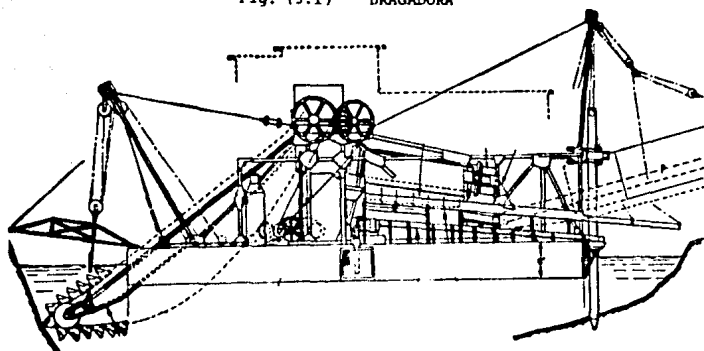




Fig.5.1.a

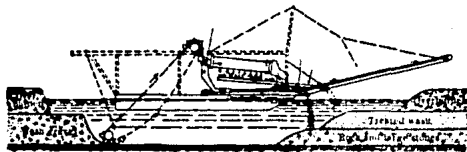


Fig.5.1.b

Los yacimientos de bastnaesita son minados o explotados a través de "tajo abierto", que es utilizado en depósitos donde afloran pequeñas cubiertas, también para las partes superiores de vetas como en el caso de las vetas de bastnaesita. Los métodos utilizados son combinaciones de tumba, carga y transporte del material hacia la superficie. La combinación seleccionada depende de la fase de explotación, el tamaño de ésta, de la profundidad que se alcanzará, de la topografía del área y el rendimiento requerido. El rendimiento y el método de explotación son ajustados al tamaño del depósito, asegurando un mínimo costo de producción, incluyendo intereses y amortización en el capital por equipo.

El método de explotación utilizado en Mountain Pass, California es a tajo abierto. El producto de la explotación (barrenación, voladura y cargado) es llevado mediante camiones a los patios de la planta, donde se procesa para la obtención



de concentrados de T.R..

Los métodos de explotación por la empresa Roca Fosfórica Mexicana, S.A. de C.V., se efectúa en el continente por dos procesos; el minado convencional (Fig. 5.2.) y el minado continuo (Fig.5.3.), que son método subterráneo. Las T.R. asociadas a estos yacimientos tienen que ser evaluados, así como los dos yacimientos en el fondo marino; Banco Ranger y arenas de San Juanico, Baja California (Fig.5.4), que tendrán que ser explotados por maquinaria de trabajos submarinos como se puede observar en la figura 5.5.

Fig. 5.2

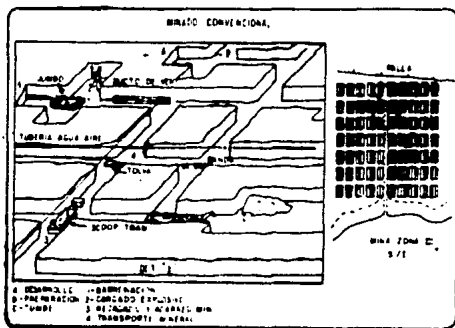


Fig. 5.3

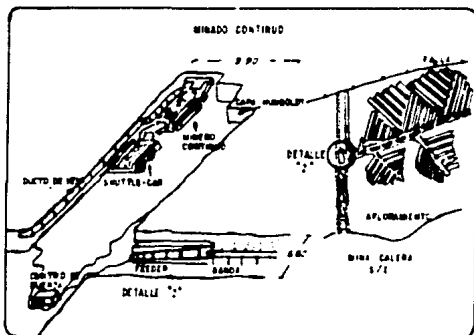
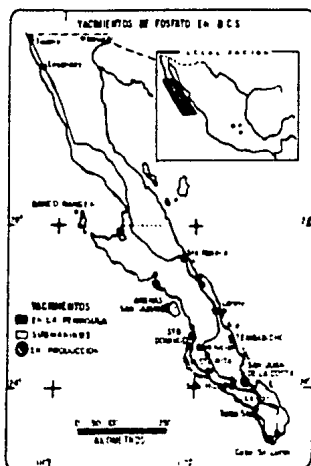
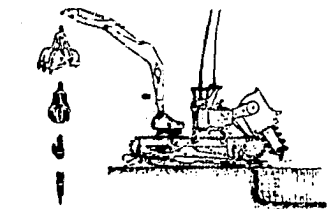
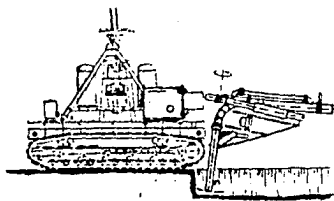


Fig.5.4

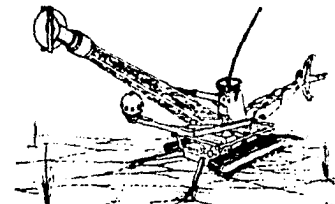




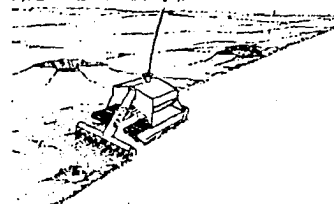
Obras diversas



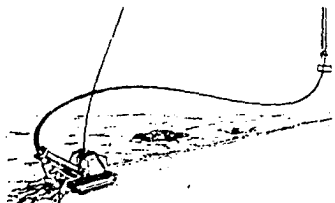
Recuperación de cables colocados en ganchos



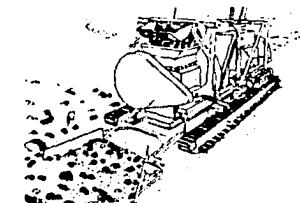
Intervenciones en cables perdidos



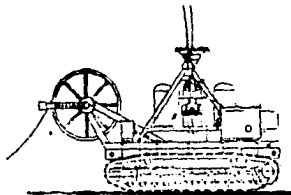
Restribo



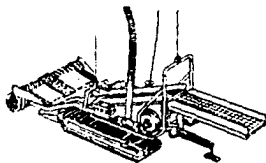
Limpieza



Materia fuera costa tipo 1



Tendido de cables



Materia fuera costa tipo 2

Fig. 5.5. MAQUINARIA DEL FUTURO (Burg A., 1989)  
Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
Facultad de Ingeniería



FIG. 5.5. MAQUINARIA DEL FUTURO (continuación)

## **CAPITULO VI**

### **BENEFICIO**

## VI.BENEFICIO

Una vez que la mena ha sido separada, cargada y transportada fuera de la mina (explotación), es dejada en los patios o llevada directamente a la planta de beneficio que puede estar cerca o lejos de la zona de explotación.

Las características físico-químicas de la mena son un factor importante para escoger el tipo de beneficio con el que se obtendrá una mayor eficiencia en su concentrado. Estos concentrados son sometidos posteriormente a los procesos metalúrgicos, obteniendo los materiales en forma de metal y por último se puede mejorar la pureza de estos con procesos de refinación.

Los métodos para obtener concentrados de óxidos de T.R. tanto de yacimientos de placer como de vetas en carbonatitas difieren desde su origen, su constitución y su ocurrencia. Así, los métodos de separación y acumulación de concentrados en yacimientos de placer se basan en procesos gravitacionales, magnéticos, electrostáticos y mecánicos como se observa en la figura 6.1 (separación adicional de concentrados después que han sido separados por procesos gravitacionales).

Una vez minado el material es llevado a las plantas concentradoras donde la mena de minerales pesados es sometida a concentradores en espiral o richert en cono, los cuales a través de la densidad diferencial de los minerales, separan la ganga rica en cuarzo.

Después que las partículas han sido tamizadas y secadas se obtiene un concentrado de arena negra por medio de cribas, bandas vibrantes en espiral, aunque también se utilizan separadores electroestáticos y magnéticos los que recuperan gran parte de los concentrados (Fig.6.1.).

Las técnicas de beneficio de la Westralian Sand Ltd de la planta Capel al W de Australia se observan en el diagrama de flujo de la figura anteriormente mencionada.

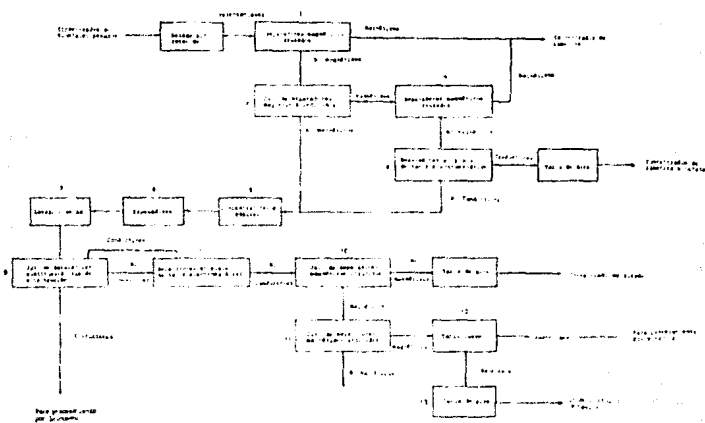


Fig. 6.1

1. Separadores magnéticos; se obtiene un concentrado de ilmenita.
2. Juego de separadores magnéticos; separa el material no magnético y recicla el magnético al paso tres.
3. Separadores magnéticos; incrementa el concentrado de ilmenita.
4. Placas cribadoras electroestáticas; primer tratamiento y separación de materiales conductores de los no conductores, donde los primeros alimentan los concentrados de ilmenita alterada.
5. Concentrados en espiral; clasificación de minerales de mena separándolos de la ganga (cianita, estauroilita y espinela).
6. Agotamiento; el ácido clorhídrico es adicionado para remover minerales arcillosos y preparar la superficie de los minerales que serán sujetos posteriormente a cribadores electroestáticos.
7. Lavado y secado.
8. Juego de separadores electroestáticos; clasifica material conductor del no conductor, obteniéndose concentrados para procesar por leucóxeno del material conductor.
9. Placa de cribadores electroestáticos; reciclan el material conductor al paso ocho y el no conductor pasa al paso diez.
10. Separadores magnéticos inducidos; el material no magnético es almacenado en los concentrados de zircón.
11. Juego de separadores magnéticos; el material magnético del paso diez es separado por segunda vez para que el material magnético sea procesado.
12. Cribado Sweco; tamiza el material del paso anterior en dos fracciones, el fino 210 mm y el grano de mayor tamaño es almacenado para su posterior recuperación por monacita, mientras que el grano fino es sopleteado para reducir el zircón y el rutilo obteniendo concentrados de monacita con leyes de 55% de óxidos de T.R. y 6% de óxido de torio.

Por otro lado, los yacimientos de bastnaesita son minados a cielo abierto



como ocurre en Mountain Pass, California donde la mena es barrenada, volada y acarreada a través de camiones hacia el molino, posteriormente es tratada por filtración y procesos químicos.

En forma general, la mena cruda de Mountain Pass es triturada dos veces por medio de los molinos obteniéndose un tamaño en donde el 96% es menor a 150 mm. Entonces la suspensión es calentada hasta su punto de ebullición y llevada a celdas de flotación donde se comienza a enfriar hasta 60°C por medio de espumas de flotación. En este lugar los minerales de ganga y barita son desprendidos flotando la bastnaesita con lo que se obtiene un concentrado con 55-60% de óxidos de T.R..

El concentrado así obtenido es llevado a otra planta, dividiéndose en cuatro circuitos (Fig.6.3.A, B, C y D) y que Carrillo-Nieto desarrollaron en 1975. En estos circuitos se utilizan procesos de calcinación, espesamiento (se agregan ácidos; clorhídrico y otros), filtrados, precipitados, etc. El producto resultante del circuito del europio es un óxido del mismo (Fig.6.5.A), el resultante pasa al circuito del lantano que a través de diversos procesos se tiene un hidrato de lantano (Fig.6.5.B), del circuito del europio se alimenta el circuito del cerio obteniéndose dos productos; hidrato de cerio homogeneizado y un hidrato de cerio, por último del circuito del europio es llevado al circuito del gadolinio-samario para obtener estos en forma de carbonatos de gadolinio-samario.

Existen otros métodos para obtener T.R. de los concentrados de monacita, estos consisten en procesos químicos; uno de ellos es el ácido (ácido sulfúrico) y el alcalino (sosa caústica, mantenida a temperaturas de 140°-150°C), según Spencer S.S, 1982; Carrillo-Nieto, 1975; Neary y Highley, 1984).

La solución lixiviación utilizada en la extracción de óxidos de T.R. de la

bastnaesita son posteriormente tratadas por solventes para producir óxidos de Eu con una pureza de 99.99% y compuestos de Sm, Gd, Pr, Nd, como subproductos (Neary y Highley, 1984).

Los metales de T.R. son producidos por electrólisis, resultado de la fusión de cloruros u óxidos anhídridos de T.R. (Morrice y Wong, 1979). Esto incluyen al mischmetal, el cual contiene Ce, La, Pr y Nd.

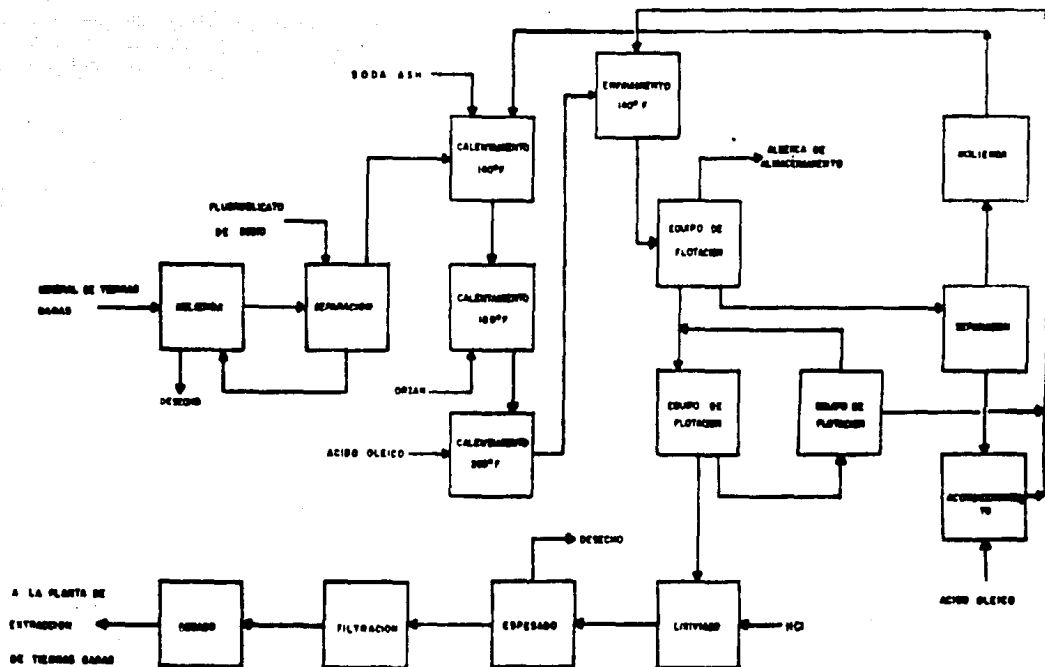


Fig. 6.2. SISTEMA DE SEPARACION DE T.R. EMPLEADO EN "MOLYCORP"

Carrillo - Nieto, 1975

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
Facultad de Ingeniería

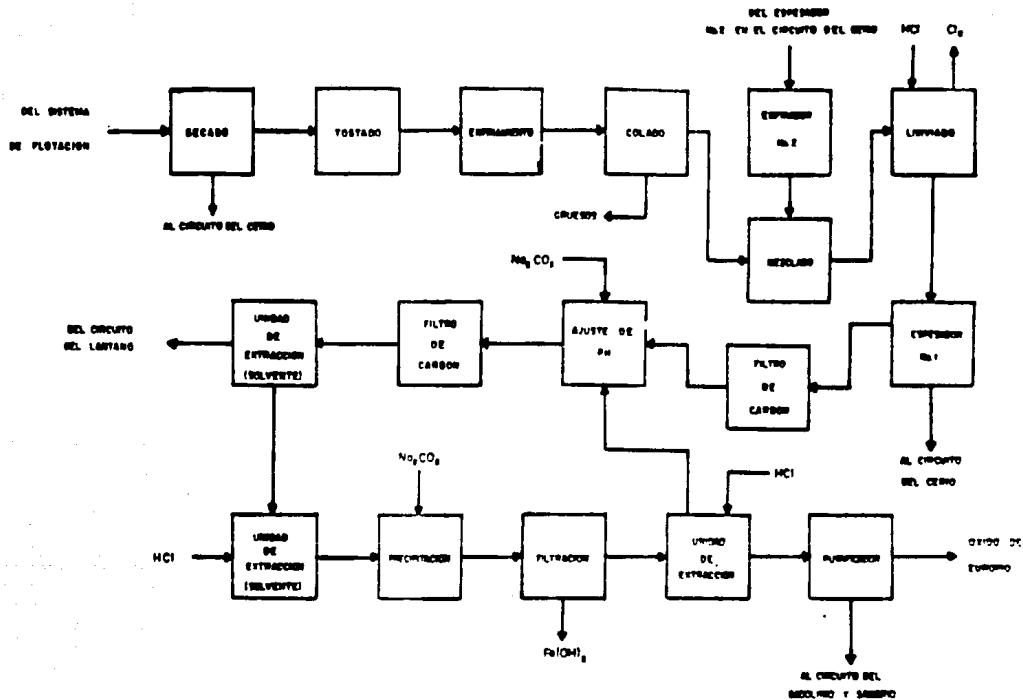


Fig. 6.3.A. CIRCUITO DEL EUROPIO

Carrillo - Nieto, 1975

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
Facultad de Ingeniería

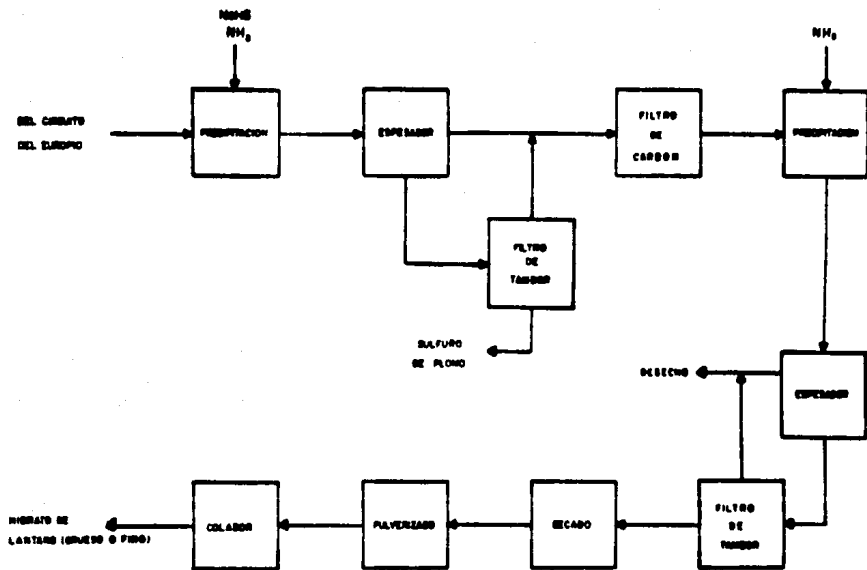


Fig. 6.3.B. CIRCUITO DEL LANTANO

Carrillo - Nieto, 1975

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
 Facultad de Ingeniería

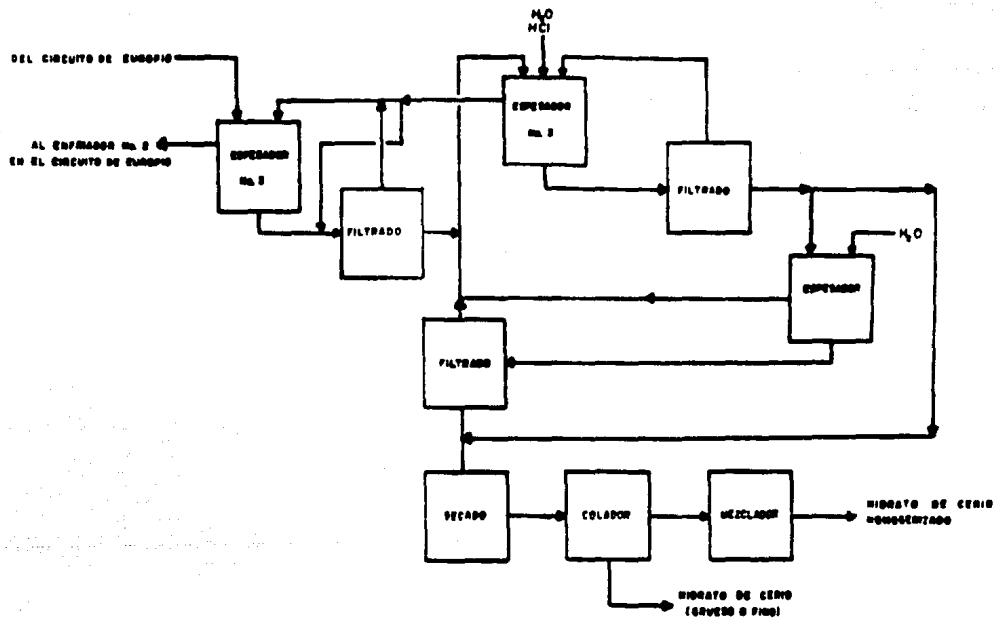


Fig. 6.3.C. CIRCUITO DEL CERIO

Carrillo - Nieto, 1975

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
Facultad de Ingeniería

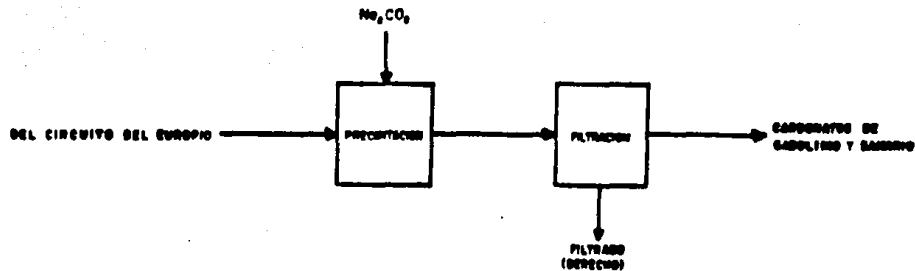


Fig. 6.3.D. CIRCUITO DEL GADOLINIO Y SAMARIO

Carrillo - Nieto, 1975

Rodríguez Arvizu Lázaro, 1990  
Facultad de Ingeniería

## **CAPITULO VII**

### **USOS**



## VII. USOS

El uso y aplicaciones de la T.R. está íntimamente reflejado en el consumo de éste, lo cual a grandes rasgos representa cuatro mercados que son:

- Cerámica y vidrio	31% ___ 19%
- Catalizadores y productos químicos	44% ___ 41%
- Metalúrgicos	22% ___ 35%
- Electrónica	3% ___ 5%

SIPSA-CV. GOMEZ C.

OF. MEX. 1981

Actualmente nuevos mercados de T.R. son creados gracias a la investigación continua de sus aplicaciones, siendo dividida en dos grandes grupos de acuerdo a sus usos; catalizadores, productos químicos, metalurgia, cerámica, vidrio y sustancias luminiscentes, imanes, electrónica, vidrios especiales y cerámica fina que serán abordados en el capítulo ocho.

La siguiente tabla (7.1.) sintetiza el uso común de las T.R., mencionando el producto que requiere de T.R. para su elaboración; el material al que se aplica; la presentación de como se aplican las T.R., ya sea óxidos, cloruros, etc; y por último en donde y para que se usan.

PRODUCTO	MATERIAL	PRESENTACION DE LAS TIERRAS RARAS	U S O S
<b>1. COLORANTES, ILUMINACION, RADIACION ELECTROMAGNETICA Y LASER :</b>			
- Coloreado de vidrios	Vidrio	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y óxidos de Er y Pr	Filtros para T.V., etc.
- Control de radiación	Vidrio	Ce	Escudo de radiación Placa de tubo para rayos catódicos.
- Coloreado de cerámica	Zircón	Ce, Y	Lámparas de color.
- Coloreado de tubos para Rayos catódicos	Mg y Ca	Tb, Y, Ga, Eu	Monitores de T.V. y computadoras.
- Laser	Vidrio	nd, Sm	Material audio-visual
- Cristales microondas	½ Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	La	Procesamiento de microondas.
- Lentes	Zr - B - O	La	Cámaras.
<b>2. CATALIZADORES :</b>			
- Catalizadores para el Cracking	Si-Al-Y zeolita	CeO <sub>2</sub> , La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Refinación del petróleo.
- Catalizadores de oxidación		Cs <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Reacciones químicas
<b>3. CERAMICA :</b>			
- Azulejos	Zircón	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub> , CeO <sub>2</sub>	Materiales superficiales.

PRODUCTO	MATERIAL	PRESENTACION DE LAS TIERRAS RARAS	U S O S
- Cerámica electrónica	Titariate de Ba	La, Ce, Pr, Nd	Capacitores
- Zirconia estabilizada	Zirconia	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Joyería sintética, cuchillos, tijeras.
- Sensores de oxígeno	Zirconia estabilizada parcialmente	T <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sensores para escape de máquinas de auto-motivo.
- Capa protectora	Fe-Cr-Al-ZrO <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Máquinas.
<b>3. ELECTRICOS Y MAGNETICOS :</b>			
- Resistores	La B <sub>6</sub>		Eléctricos.
- Transmisores	Ba TiO <sub>3</sub>	La, Y	Piezas eléctricas a alta temperatura.
- Cristal conductor Super-iónico	ZrO <sub>2</sub> CeO <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pr, Gd	Electrolitos para altas temperaturas de cargado.
Almacenaje de información	Gd <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	La	Comunicaciones.
<b>4. ELECTRONICOS Y COMUNICACIONES :</b>			
- Burbujas magnéticas		T.R.	Electrónica.
- Almacenaje	Granate	Ga	Mecanismo de memoria.
- Almacenaje óptico	Fluoruros alcalinos orgánicos/ácido bórico	T.R.	Computadoras.

PRODUCTO	MATERIAL	PRESENTACION DE LAS TIERRAS RARAS	U S O S
- Teléfonos portátiles	Fe	T.R.	Audio-video VTRs
<b>5. ELECTRICOS :</b>			
- Imanes permanentes	Fe	Nd, Sm	Automóviles, computadoras, autopartes, puertas automáticas.
	Fe	T.R.	
- Imanes para motores	Fe	T.R.	Motores micro-acelerados. Motores para robots.
- Imanes plásticos	Plástico	T.R.	VTRs, Teléfonos portátiles, cassette, etc.
		Sm	Instrumentos de precisión.
<b>6. ENERGIA TERMAL :</b>			
- Celdas completas	Ni, Fe	T.R.	Energía eléctrica.
- Condicionador de aire	Fe, Ti	T.R.	Transferencia de energía.
<b>7. CERAMICA :</b>			
- Capa metálica	Zirconia	T.R.	General.
- Cerámica piezoeléctrica		O.T.R.	Industria eléctrica.

PRODUCTO	MATERIAL	PRESENTACION DE LAS TIERRAS RARAS	U S O S
- Catalizadores	Aluminio	La, Nd	Catalizadores de polimerización.
<b>8. METAL - ORGANICO :</b>			
- Pintura	Resinas orgánicas	Ce	Aditivos para pintura.
- Aceite de combustión	Aceite orgánico	Ce	Evita corrosión, mejo- ramiento de combustión.
<b>9. OTROS :</b>			
- Resistencia a la superf. de corrosión	Metálico o cerámico	Y	Máquinas, aleaciones, medicina, etc...

Recientemente el uso de materiales poco comunes se convierte en realidades de vanguardia, a escasos diez años del siglo XXI, la práctica de tecnología avanzada con éstos materiales; se trabaja a escala de laboratorio o planta piloto en diversos lugares del mundo reflejando un impacto en la industria minera y extractiva.

Los metales de T.R., así como otros, son cada vez mayormente demandados. Por ejemplo la demanda japonesa crece a un 10% anual desde 1981 (SIPSA de CV, Of. México). Lo anterior evidencia el aumento de usos de estos metales dentro de algunos campos de la industria, tales como; metales avanzados, aleaciones ultraligeras, extrafuertes y termoresistentes; cerámicos avanzados con elevada tenacidad, refractariedad, resistencia al desgaste, semiconductividad o superconductividad; informática y comunicación, circuitos integrados de alta velocidad, fibras ópticas, burbújas de memoria; energética; celdas de combustión, supermagnetos, combustibles nucleares, acumulación, conversión de energía.

## **CAPITULO VIII**

### **ESTUDIO DE MERCADO**

## VIII. ESTUDIO DE MERCADO

### VIII.1. Introducción

Cada vez más, las T.R. tienden a intrudirse en la industria de minerales corrientemente explotados a nivel mundial y actualmente se asocian o son sinónimo de tecnología avanzada. Es fácil apreciar el creciente mercado que han alcanzado en algunos ramos como los imanes permanentes, los autocatalizadores, las piezas cerámico-piezoeléctricas, el laser, los superconductores a altas temperaturas, entre otros.

Para tal caso se pretende dar un panorama general del mercado mundial de las T.R..

### VIII.2. Producción

La producción de T.R. en el mundo se elevó de 48 300 ton de concentrados en 1978 a 81 879 ton en 1984, pero en 1985 y 1986 se redujo y llegó a 69 800 ton debido a una baja de producción de bastnaesita en E.U.A. y de monacita en Australia; esta baja a su vez, fué ocasionada principalmente por la débil demanda de los fabricantes de catalizadores para el fraccionamiento del petróleo en E.U.A.. Así, la producción mundial de T.R. se expone en el cuadro 8.1.



CUADRO 8.1 PRODUCCION MUNDIAL DE T.R.  
(TONELADAS DE CONCENTRADO - 60% OTR)

AÑOS	CANTIDAD
1975	39,200
1976	34,900
1977	43,500
1978	48,300
1979	51,700
1980	49,400
1981	50,200
1982	49,287
1983 *	65,231
1984	81,231
1985	74,509
1986	69,811

\* Se incluye la producción de China a partir de 1983.

SIPSA DE CV, OP. MEXICO.

HEARY AND BIGLEY, 1986.

Los productores más importantes son E.U.A., China, Australia, Brasil, **Malasia y la India**, los cuales en conjunto participan con el 95% del total.

Se presenta una lista de evolución de producción mundial de T.R. por país-producto, donde E.U.A. representa el 27.5% de la producción de 1986, para el mismo año Australia representa el 47%, China con el 51.5%, y Brasil que representa el 12.7%. En la tabla 8.1 se observa la evolución de la producción mundial de T.R..

TABLA 8.1.  
EVOLUCION DE LA PRODUCCION MUNDIAL DE T.R.  
(TONELADAS DE CONCENTRADO)

<u>PRODUCTO/PAIS</u>	<u>1975</u>	<u>1976</u>	<u>1977</u>	<u>1978</u>	<u>1979</u>	<u>1980</u>	<u>1981</u>	<u>1982</u>	<u>1983</u>	<u>1984</u>	<u>1985</u>	<u>1986</u>
<b>MONACITA</b>												
Australia	4,507	5,310	9,379	14,992	16,340	14,079	-	9,562	15,141	16,260	18,735	14,822
India	3,000	2,994	2,734	3,303	3,254	4,210	-	4,200	4,000	4,000	4,0900	4,000
Brasil	1,403	1,610	2,441	2,541	1,900	2,532	-	3,500	5,256	3,622	3,953	4,000
Malasia	3,285	1,879	1,976	1607	460	347	-	582	1,034	1,095	5,808	5,959
Tailandia	367	-	-	-	32	152	-	162	257	298	663	1,609
U.S.A.	750	600	600	1,250	1,200	700	-	1,667	667	750	750	750
Sri. Lanka	6	1	-	18,	4	63	-	304	292	147	200	200
Zaire	298	125	96	77	92	51	-	32	15	2	-	-
	13,616	12,519	17,226	23,788	23,288	22,134	-	20,009	6,662	26,174	34,109	31,340

TABLA 8.1.  
 Continuación EVOLUCION DE LA PRODUCCION MUNDIAL DE T.R.  
 (TONELADAS DE CONCENTRADO)

PRODUCTO/PAIS	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
<b>BASTNAESITA</b>												
U.S.A.	14,940	13,039	15,359	14,148	16,515	15,986	-	29,168	28,472	42,185	22,380	18,490
China	-	-	-	-	-	-	-	-	10,000	13,333	16,667	19,767
Madagascar	-	-	-	-	-	-	-	-	25	25	25	-
Burundi	82	139	165	40	30	-	-	-	-	-	-	-
	15,022	13,178	15,524	14,188	16,545	15,986	-	29,168	38,497	55,543	39,072	38,257
<b>XENOTIMO</b>												
Malasia	25	79	35	-	-	-	-	14	10	68	1,124	145
Australia	20	7	12	23	19	27	-	50	24	66	46	41
Tailandia	-	-	50	-	6	52	-	46	38	28	158	28
	45	86	97	23	25	79	-	110	72	162	1,328	214

BGS. WORLD MINERAL STATISTICS 1982-86 "rare earth" MIKE O'DRISCOLL (1988).

SIPSA DE CV, OP. MEXICO.

NEARY AND HIGHLEY, 1984.

Las empresas productoras de los tres concentrados minerales de T.R. más importantes son:

PAIS	EMPRESA	MINERALES PRODUCIDOS
E.U.A.	-Molycorp. Inc. (Subsidiaria de Unión Oil Company of Calif.).	Bastnaesita
	-Associated Minerals Inc. (Subsidiaria de AMC de Australia).	Monacita
AUSTRALIA	-Associated Minerals Consolidated Ltd. (AMC).	Monacita
	-Westralian Sands Ltd. (WSC)	Monacita
	-Cable Sands (WA) Pty. Ltd.	Monacita y Xenotimo
	-Rutile & Zircon Mines Pty. Ltd.	Monacita
CHINA	-Bactau Iron & Steel Co.	Bastnaesita y Monacita
	-Otros productores	
INDIA	-Indian Rare Earth Ltd. (IRE)	Monacita
	-Kerala Minerals & Metals Ltd.	Monacita
BRASIL	-Nuclebras de Monazite e Associados Ltda. (Nuclemon).	Monacita
MALASIA	-Beh Minerals Sdn. Bhd.	Monacita y Xenotimo

Hay que aclarar que de los productores de concentrados de T.R., sólo algunos están integrados verticalmente, separando y refinando los elementos para obtener diversos compuestos y productos de alta pureza; en cambio otros, principalmente los países en desarrollo, venden sólo los concentrados.

De los países que cuentan con instalaciones para el procesamiento y separación de los concentrados, se tiene a los E.U.A. quien utiliza materia prima propia e importada, Japón y algunos países europeos como Francia, Alemania Occidental, Australia.

Noruega e Inglaterra emplean materia prima importada y algunos países en desarrollo han tenido que irse integrando por sus depósitos en T.R. como son la India, Brasil y Malasia.

PAIS	EMPRESA	PRINCIPALES PRODUCTOS FABRICADOS
E.U.A.	- Molycorp Inc.	Oxidos puros de todos las T.R. (a excepción del promesio). Compuestos lantánidos mezclados; metales puros (lantano, cerio, ytrio, gadolinio, neodimio, praseodimio); mischmetal y aleaciones.
	- Davison Specialty Chemical Div. (of. W.R. Grace & Co.).	Cloruros de T.R. y compuestos de cerio.
	- Ronson Metals Corporation.	Mischmetal; metales puros (cerio, lantano y neodimio).
	- Reactive Metals & Alloys Corp.	Mischmetal y siliciuros.
	- Rhone Poulenc	Cloruros de T.R.
FRANCIA	- Nucor	Aleaciones de T.R.
	- Rhone Poulenc	oxidos de T.R., Mischmetal, cloruros de T.R. y metales puros.
ALEMANIA OCCDT.	- Th. Goldschmidt A.G.	Compuestos intermetálicos basados en T.R. -cobalto-Fe y otros elementos; metales puros como el neodimio; compuestos de T.R. y otras aleaciones.

## Continuación

P A I S	E M P R E S A	PRINCIPALES PRODUCTOS FABRICADOS
ALEMANIA OCCIDENTAL	Otros productores.	
AUSTRIA	- Treibacher Chemische Werke AG.	Mischmetal (principal productor del mundo), piedras para encendedor, óxidos y compuestos de T.R.
NORUEGA	- A/S Megon.	Oxidos de Ytrio y Lutecio.
INGLATERRA	- London & Scandinavian metallurgical Co. Ltd. (LSM). - Rare Earth Products.	Oxidos de cerio y diversos polvos para pulido. Metales puros, aleaciones y otros compuestos de alta pureza.
JAPON	- Santoku Metal Industry Co. Ltd.  - Shin Etsu Chemical Co. Ltd.  - Shin-Nippon Kinsoku KagaKu Co. Ltd. - Tohoku Kinzoku KagaKu Co. Ltd.  - Nissan Rare Metals & Chemical Corp. Ltd. - Nippon Ytrium Co. Ltd.	Mischmetal; piedras para encendedor; samario; y óxidos de ytrio, lantano, europio y cerio. Oxido de ytrio, metales de alta pureza y sales. Oxido, fluoruro y nitrato de Ce. Oxidos de lantano, cerio y acetato de cerio. Oxidos de Ce, nitrato de Ce y óxido de La. Oxido de ytrio, metales de alta pureza, samario y sales.

Continuación

P A I S	E M P R E S A	PRINCIPALES PRODUCTOS FABRICADOS
BRASIL	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 10 a 15 productores más.</li> <li>- Nuclemon.</li> </ul>	Carbonatos, óxidos y cloruros de T.R.
INDIA	- Indian Rare Earths Ltd. (IRE).	Oxidos, cloruros y fluoruros de T.R. mezclados, óxidos de Ce, concentrados de Sm, Gd, Yt, Eu; compuestos de un solo elemento de alta pureza.
CHINA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baotau Steel Corp.</li> <li>- Baotau Rare Earths.</li> <li>- Kansu Rare Earths.</li> <li>- Jiujiang Metal.</li> <li>- Jiangnan Rare Earths.</li> <li>- Jiangi Rare Earths</li> </ul>	<p>Oxidos, hidróxidos y cloruros de T.R., mischmetal y metales de alta pureza.</p> <p>Oxidos y cloruros de T.R. oxidos y cloruros de T.R., metales, aleaciones y otros.</p> <p>Metales de alta pureza, materiales para pulido, aleaciones.</p> <p>Metales de alta pureza, aleaciones, otros.</p> <p>Oxidos de ytrio y otros.</p>



Continuación

PAIS	EMPRESA	PRINCIPALES PRODUCTOS FABRICADOS
CHINA	- Shanghai Factory.	Oxidos, cloruros y fluoruros de T.R., metales de alta pureza, mischmetal, materiales para pulido y otros productos derivados.

De lo anterior se puede observar que la producción mundial de T.R. procesadas y refinadas está dominada por dos empresas; Rhone-Poulenc y Moly-corp, aunque cada vez son más las empresas relacionadas en esta industria.

### VIII.3 Consumo

El consumo actual de T.R. en el mundo se estima que tiene un nivel similar al de la producción y puede ser dividido en dos grupos de acuerdo con sus aplicaciones:

1) Catalizadores, productos químicos, metalurgia, cerámica y vidrio; industrias que representan alrededor del 96% del consumo total de T.R. que tiene un crecimiento promedio anual de 4 a 5% donde la mayor parte se consume en la forma de concentraados y compuestos.

2) Sustancias luminiscentes, imanes, electrónica, vidrios especiales y cerámica fina; sectores que actualmente participan sólo con el 4% del consumo, pero cuyo crecimiento medio anual es mayor al 15% y se utiliza principalmente en forma de elementos individuales.

El primer grupo se refiere a los mercados tradicionalmente consumidores de grandes cantidades de T.R. que en años recientes han tenido un estancamiento, mientras que el segundo grupo representa a los mercados más novedosos, de rápido crecimiento, consumidores de T.R. de alta pureza.

La reducción más notable para el primer grupo, en parte se produjo en E.U.A., ya que el consumo para la aplicación del fraccionamiento del petróleo descendió a un 52% desde 1984-1987. También ha habido disminuciones, aunque menos severas en la industria metalúrgica y del vidrio.

El patrón de consumo de T.R. es diferente para cada país, se cree que la mayor parte se utiliza en forma de compuestos conteniendo un elemento en forma individual o una mezcla de ellos. En E.U.A. aproximadamente el 90% de las T.R. consumidas se hace en forma de compuestos de T.R. mezcladas; en cambio, Japón consume a éstos como elementos de alta pureza debido a su industria altamente especializada.

En cuanto al consumo por producto, los más importantes son los óxidos de Ce, Y, La, así como los compuestos de T.R. con forma de cloruros, hidróxidos y nitratos; aún todavía es importante el uso de mischmetal y otras aleaciones, aunque los mayores crecimientos se están dando en ytrio, neodimio, cerio, europio y samario. Por lo que el consumo de T.R. en los mercados actuales está creciendo a un ritmo adecuado de acuerdo con la evolución industrial mundial y existen buenas perspectivas de un crecimiento futuro mayor.

Haciendo énfasis en los mercados de mayor expansión en los últimos años, los principales son los siguientes:

- El neodimio para imanes y laser, que se prevé de mayor crecimiento.
- Samario y neodimio para imanes.
- Ytrio, europio, terbio y gadolinio para materiales luminiscentes con aplicaciones en televisores a color, rayos x y lámparas fluorescentes.
- Cerio, lantano, praseodimio, erbio y neodimio para la industria del vidrio.
- Ytrio para la obtención de zirconita con usos en moldes de extrusión, boquillas, máquinas, herramientas, bombas y componentes de motores.
- Gadolinio para aplicaciones nucleares.
- Cerio y lantano de alta pureza para autocalzadores con aplicaciones en automotores.

Existe otro mercado potencial con buen panorama para las T.R. que es el desarrollo de aleaciones superconductoras; ya que un compuesto de La-Ba-Cu-O es superconductor a 36°K sin el uso de presión y otro compuesto de Yt-Ba-Cu-O que muestra resistencia 0 a 90-100°K.

- Otro mercado potencial es el de sistemas de computación.

Por lo que el panorama general para el mercado de T.R. es de continua expansión en lo que resta del siglo. Uno de los pronósticos más pesimistas indica que el crecimiento promedio anual será de 2.6% y los más optimistas predicen que para el año 2000 la demanda se incrementará de 2-4 veces el nivel actual.

#### **VIII.4. Comercio internacional**

El comercio internacional de T.R. incluye una amplia variedad de productos. En general, los países que obtiene los minerales y concentrados no son grandes consumidores de T.R., a excepción de E.U.A. y de U.R.S.S., por lo que venden la mayor parte de la producción a los países refinadores y procesadores de éstos elementos tales como Japón, E.U.A., etc. (Fig. 1.1).

Los más comercializados son la bastnaesita y la monacita. Los compuestos, metales, aleaciones y productos de alta pureza se comercializan entre países industrializados.

#### **VIII.5. Precios**

Los precios de las T.R. en sus diferentes presentaciones varían ampliamente dependiendo de la cantidad a comprar, la calidad del producto, la fuente de obtención y del país donde se venda.

Los precios de las T.R. no tienden a moverse demasiado, a menos que se registre simultáneamente un rápido crecimiento del mercado y una baja oferta de un producto en particular.

En la siguiente tabla se puede ver los precios de noviembre de 1988 de algunos de los productos más representativos.

PRODUCTO	CONCENTRACION %	PRECIO
		DOLARES U.S./L.B.
- CONCENTRADOS DE:		
Bastnaesita -----	70 OTR -----	1.20-1.35
Monacita -----	55 OTR FOB AUSTRALIA	700-780 Dls. Austr/ta
Lantano -----	80 OTR -----	1.35-150
Cerio -----	60 CeO <sub>2</sub> -----	1.40-1.65
Ytrio -----	60 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> FOB MALASIA	14.52-14.97
- OXIDOS DE:		
Europio -----	99.99 -----	745-825
Lantano -----	99.99 -----	8.75-9.50
Cerio -----	96.00 -----	4.50-5.23
Cerio -----	99.00 -----	8.00-8.75
Neodimio -----	96.00 -----	6.75-7.25
Neodimio -----	99.00 -----	40.00-45.00
Ytrio -----	99.99 -----	52.50-55.00
Samario -----	96.00 -----	85.00-90.00
Gadolinio -----	99.99 -----	65.00-70.00
- OTROS PRODUCTOS:		
Cloruro de lantano - -	-----	1.00-1.15
Carbonato de lantano	99.9 -----	5.90-6.25
Carbonato de cerio	99.0 -----	4.00-4.50

RARE EARTH. MIRE O'DRISCOLL. INDUSTRIAL MINERALS, NOV. 1988.

## VIII.6. Reservas mundiales

Actualmente se estima reservas alrededor de 45 a 47.6 millones de ton de óxidos de T.R. (óxidos de T.R. de las cuales aproximadamente 36 millones de ton se localizan en la República Popular de China, el resto en E.U.A., India, Sudáfrica, Australia y Brasil).

En la tabla siguiente se muestran las reservas mundiales de óxidos de T.R. en toneladas.

P A I S	RESERVAS	PARTICIPACION %
CHINA	36,000,000	80.0 %
E.U.A.	4,900,000	10.9 %
INDIA	2,220,000	4.9 %
U.R.S.S.	450,000	1.0 %
REP. SUDAFRICA	357,000	.7 %
HAWAII	297,000	.6 %
AUSTRALIA	184,000	.4 %
CANADA	182,000	.4 %
EGIPTO	100,000	.2 %
REP. MALGACHE	50,000	.1 %
FINLANDIA, NORUEGA Y SUECIA	50,000	.1 %
REP. DE COREA	45,000	
MALASIA	30,000	
BRASIL	20,000	
SRI LANKA	13,000	.4 %
KENIA	12,000	
BURUNDI	1,100	
TAILANDIA	1,000	
TOTAL	45,000,000	

NUMERO NOTICIAS. SEP/OCT 1989, NO. 135,

"MATERIALES SUPERCONDUCTORES".

### VIII.7. Perspectivas para México y el mundo

México posee T.R. en diversos depósitos, como anteriormente se mencionó, pero en la actualidad no han sido evaluados suficientemente para confirmar sus reservas. Se está comenzando a hacer una evaluación del contenido de éstos metales dentro del país, lo cual aportaría datos cuantitativos que posiblemente ayudarían en la entrada de divisas por ventas de estos.

Por tanto, como primer paso es la evaluación de las T.R. en nuestro país, tanto en yacimientos propicios a contenerlos como en los jales de las mismas minas con posibilidades de contener T.R..

Con las divisas aportadas por la venta de tales metales, México procedería a dar un segundo paso, el cual consistiría en ser autosuficientes en estos materiales. Ya que en 1985 importó 135 ton de T.R. y cada vez más los países en vías de desarrollo se introducen en la industria y uso de estos metales.

De acuerdo con Soberón M. (1988), la demanda actual de T.R. es de 50 000 ton, por lo que prevé una demanda para el año 2001 de 180 000 ton, en tanto México consumió en 1986 85 ton de óxidos de T.R..

El mercado mundial de T.R. aún es de tamaño relativamente pequeño, pero dinámico. En los últimos años se han presentados ciertas tendencias que permiten predecir un futuro de constante crecimiento, sobre todo en las aplicaciones de alta tecnología.

# **CAPITULO IX**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**



## IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES:

Los minerales de T.R. han sido reportados desde los años 1800's en diferentes lugares del mundo tales como; Alemania en 1846, India 1984, Escandinavia 1985 y no es hasta 1949 cuando se descubre uno de los principales yacimientos de T.R. (Mountain Pass, E.U.A.). México tiene muy poco tiempo de haber comenzado la prospección minera para dichos elementos, pues los primeros informes aparecen en los años 1950's.

Las T.R. se conocen como el grupo de los lantánidos que van desde el lantano hasta el lutecio y se incluye al ytrio por su estrecha asociación con los anteriores se dividen en dos grupos; el de los ligeros o del cerio que abarca del lantano hasta el europio y el de los pesados o del ytrio, que abarca del gadolinio hasta el lutecio.

Químicamente son elementos de transición del bloque "f" y poseen propiedades físico-químicas muy similares, por lo que son descritos a nivel de grupo.

Se conocen **setenta** especies minerales que contiene elementos de T.R. como **esenciales** y **mayores**, de los que solo veinte minerales se presentan en **mayor abundancia** en la naturaleza:

- Fosfatos: monacita, xenotimo, apatita y francolita o fluorapatita.
- Silicatos: gadolinita, cerita, allanita y brithonita.
- Fluor-carbonatos: bastnaesita, sinchisita.
- Haluros: fluocerita e ytriofluorita.

- Oxidos: euxinita, samrskita, fergusonita, pirocloro y brannerita.

Geoquímicamente los elementos de T.R. se clasifican como litófilos (Goldschmidt, 1937) y se encuentran en ppm en la naturaleza sumando tan solo 183.68 ppm debido, según Gómez C. A. (1981), a que los elementos de T.R. tienden a sustituir al Ca de algunos minerales dentro de la secuencia magmática lo que impide que se concentren altos porcentajes en la naturaleza. Por otro lado, de acuerdo a su abundancia en los minerales se les clasifica a las T.R. como minerales traza.

Los yacimientos de T.R. se clasifican en un marco geológico, con la intención de proporcionar un enfoque práctico tal como sigue (de acuerdo con su rasgo predominante):

#### 1. Yacimientos de origen sedimentario.

1.1) Evaporación marina.- T.R. asociadas a fosforitas.

1.2) Placer.- playa-barrera, dunas-terrazas, etc.

#### 2. Yacimientos de origen plutónico.

2.1) Rocas plutónicas alcalinas.- sienitas, carbonatitas y rocas peralcalinas.

2.2) Granitos y pegmatitas.

#### 3. Yacimientos de origen periplutónico.

3.1) Metamorfismo de contacto.- contacto caliza-intrusivo o caliza-volcánico.

#### 4. Yacimientos de origen volcánico; rocas volcánicas alcalinas.

## 5. Yacimientos producto de la obducción de un complejo ofiolítico.

Los modelos de yacimientos que tiene prioridad para la prospección por T.R. en México, se encuentran:

Los asociados a fosforitas (Península de Baja California, Zacatecas-Coahuila-S.L.P.-Nuevo León); los de concentración mecánica "placer", principalmente; los de playa (Sonora, Nayarit, Colima, Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas y Veracruz) y los placeres eluviales (S.L.P.).

Los yacimientos de T.R. asociados a complejos peralcalinos en México, no han sido prospectados minuciosamente; sin embargo, se tienen informes del área el Picacho, en la sierra de Tamaulipas, el cual representa una zona de gran interés.

Los modelos de yacimientos de T.R. que menores concentraciones aportan, pero sin implicar que tengan menor importancia para prospectar en México, son: los depósitos de T.R. asociados a pegmatitas (Oaxaca, Sonora, Baja California Norte); los depósitos de fluorita producto de un metamorfismo de contacto (Río Verde, Muzquiz, etc.), así como los producidos por fenómenos de skarn. Por último los depósitos de rocas ultrabásicas serpentinizadas producto de una obducción de un complejo ofiolítico (Loma Baya, Petatlán-Camalotito, Tamaulipas).

Se necesitan además de reglas que sirvan para la prospección de estos minerales, por lo que se desarrollan las siguientes guías (metalotectones), de mineralización: guías fisiográficas, mineralógicas, litológicas y tectono-estructurales. Así también, la prospección es apoyada por estudios o análisis de laboratorio, donde actualmente el plasma I.C.P. es de los más eficientes y rápido que otros métodos.

Para explotar los yacimientos de T.R. actualmente, se utilizan dos tipos de minado; operaciones de dragado para yacimientos de placer y operaciones de tajo abierto para los de bastnaesita (carbonatitas). En el caso de una explotación de minerales de T.R. asociado a fosforita no sería necesario cambiar algunos métodos de explotación ya utilizados en superficie, pero sí para aquellos que se encuentran en el fondo marino donde se tendría que utilizar maquinaria adecuada.

Los métodos de separación de óxidos de T.R. tanto de yacimientos de placer como de vetas en carbonatitas difieren en su origen, su constitución y su ocurrencia.

Los métodos utilizados para separar y acumular concentrados en yacimientos de placer se basan en procesos gravitacionales, magnéticos, electrostáticos y mecánicos. Mientras que la separación y acumulación de concentrados en yacimientos de bastnaesita es molida y posteriormente tratada por filtración, calcinación, espesamiento, procesos químicos (ácidos), de lo cual se obtienen cuatro concentrados; de europio, lantano, cerio, gadolinio y samario.

El uso y las aplicaciones de los elementos de T.R. está concentrado actualmente en cuatro mercados; el de cerámica y vidrio, catalizadores y productos químicos, metalurgia y electrónica. Los metales de T.R. cada vez son más demandados; un ejemplo es la demanda japonesa que crece a un 10% anual desde 1981, lo que evidencia el incremento de usos en algunos campos de la industria tales como:

1. Metales avanzados; aleaciones ultraligeras, extrafuertes y termo-resistentes.
2. Cerámicos avanzados; elevada tenacidad, refractariedad, resistencia al desgaste, semi o superconductividad.

3. Informática y comunicación; circuitos integrados de alta velocidad, fibras ópticas, burbújas de memoria.

4. Energética; celdas de combustión, combustibles nucleares, acumulación, conversión y producción de energía.

#### 5. Supermagnetos.

Actualmente los elementos de T.R. son sinónimo de tecnología avanzada. Uno de los pronósticos más pesimistas indican que el crecimiento promedio anual mundial será de 2.6%, mientras que los más optimistas predicen que para el año 2000 la demanda se incrementará de 2 a 4 veces al nivel actual.

Por lo que se concluye que existe una cierta cantidad de ambientes geológicos favorables para la concentración de T.R.. La descripción de cada modelo geológico permitirá plantear mejor las posibilidades mexicanas.

### RECOMENDACIONES

Es necesario estimular tanto al sector público como al privado para elaborar planes de prospección a nivel nacional, encaminados a la evaluación de las T.R., tanto en depósitos propicios como en los jales de las minas con posibilidades de contenerlos, así como de su posible explotación.

Para la búsqueda de yacimientos minerales de T.R. es requisito utilizar guías de mineralización, tanto físicas como conceptuales, quedando algunas enmarcadas en el capítulo cuatro.

Es importante reactivar aquellos proyectos cuyo potencial en T.R. fué

positivo, como por ejemplo; el área el Picacho en la sierra de Tamaulipas, así como la zona NE de México con posibilidades de contener concentraciones económicas de minerales de T.R. asociadas a rocas alcalinas.

Intensificar programas de exploración por minerales de T.R. en rocas sedimentarias detríticas; principalmente ambientes de playa-duna de las costas pacíficas del país.

Explorar otros ambientes geológicos; como lo son los minerales de T.R. asociados a fosforitas de Baja California, las pegmatitas de Telixtlahuaca, la fluorita de diversos lugares de México, los skarn de Fe y como dato a investigar con más cuidado, los cuerpos ultrabásicos serpentinizados producto de una obducción que pueden significar un potencial relativo de T.R. para México.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- A. Domínguez Xorge."QUIMICA".Edit.,PUBLI- MEX, 8va Reimpresión, 1974.
- 2.- Allen E. Frederic and Crock G. James."DETERMINATION OF THE EARTH RARE ELEMENTS IN GEOLOGICAL MATERIALS BY INDUCATIVELY COUPLE PLASMA MASS SPECTROMETRY".Analytical Chemistry,april, 1987.
- 3.- Ander Paul and Sonnesea Anthony."PRINCIPIOS DE QUIMICA".LIMUSA, 4ta reimpresión, 1978.
- 4.- Arriaga García Germán."ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA CLASIFICACION DE YACIMIENTOS MINERALES Y SUS RELACIONES CON LAS ROCAS ENCAJONANTES EN MEXICO". Miner-Noticias,No. 60, 1981.
- 5.- Bureau of Mines, U.S. Dept. "RARE EARTH ELEMENTS AND YTTRIUM". Mineral Commodity Profiles, may., 1979.
- 6.- Burg Andrea."MINERIA SUBMARINA". INTERFACE No. 30, 1989.
- 7.- Cardona Luciano-Andrade Miriam."CARACTERISTICAS TEXTURALES Y MINERALOGICAS DE LOS AMBIENTES SEDIMENTARIOS MODERNOS DEL LITORAL DE PUNTA GUELAGUICHI, OAXACA, MEXICO". Tesis UNAM. Fac., de Ingeniería, 1985.
- 8.- Carranza Edwards A."MINERALES DEL MAR". Inst. Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. s/f.
- 9.- Carrillo M-Nieto E."ESTUDIO BIBLIOGRAFICO DE TIERRAS RARAS EN LA REPUBLICA MEXICANA".Tesis UNAM. Fac., Química, 1975.
- 10.- Cepeda Dávila-Padilla Lara."EL COMPLEJO ALCALINO DE LA SIERRA DE SAN CARLOS, TAMAULIPAS". Tesis UNAM. Fac., Ingeniería, 1976.

- 11.- Cepeda Dávila, Padilla Lara, Keith Bloomfield."EL COMPLEJO ALCALINO DE LA SIERRA DE SAN CARLOS TAMAULIPAS". XI Memoria de la AIMMG, AC, 1975.
- 12.- CETEI (Centro de Tecnología Electrónica e Informática)."MATERIALES CONDUCTORES". Minero-Noticias, sep/oct, No. 135, 1989.
- 13.- Chiodi Michel."LOS METALES DEL FUTURO". Rev., Tecnoscopia Ciencia y Tecnología en Francia. Mayo 1988.
- 14.- Colín Varela A."MINERALES SUBMARINOS DE MEXICO". Rev., INTERFACE. No. 30, 1989.
- 15.- Colín Varela A."MEXICO, UN PAIS CON GRANDES RESERVAS DE MINERALES SUBMARINOS". INTERFACE No. 29, 1989.
- 16.- C.R.N.N.R. "RECONOCIMIENTO GEOLOGICO Y DEPOSITOS DE FOSFATO DEL NORTE DE ZACATECAS Y AREAS ADYACENTES EN COAHUILA, NVO. LEON Y SAN LUIS POTOSI". Boletín No. 56, 1961.
- 17.- Delgado Luis-Morales Juan."RASGOS GEOLOGICOS Y ECONOMICOS DEL COMPLEJO BASICO-ULTRABASICO DE EL TAMARINDO, GUERRERO". GEOMIMET. No. 128, 1984.
- 18.- Duffy J.A."QUIMICA INORGANICA GENERAL". Edit., Continental, 2da. edición, 1976.
- 19.- Elías Herrera M."ROCAS ALCALINAS Y MINERALIZACION DE LANTANIDOS EN EL AREA DE EL PICACHO, SIERRA DE TAMAULIPAS". GEOMIMET. No. 127. oct. 1983.
- 20.- Elías Herrera M."LAS TIERRAS RARAS Y SUS AMBIENTES GEOLOGICOS". Gaceta Mineralógica. Soc. de Mineralogía, A.C. vol. 1, No. 3, oct. 1985.
- 21.- Elías Herrera M., Sánchez Z. José Luis, Rubinovich K. Raúl y Lozano Rufino."ROCAS PERALCALINAS NEFELINICAS EN EL AREA DE EL PICACHO, SIERRA DE TAMAULIPAS". Implicaciones petrogenéticas con base en E.T.R. 3er simposium de Geología Regional. Memoria del Inst. de Geología, 1989.



- 22.- Elías Herrera M., Rubinovich K. Raúl, Lozano Rufino y Sánchez José L."MINERALOGIA E IMPLICACIONES PETROGENETICAS DEL Ti,Zr,Nb, EN LAS ROCAS ALCALINAS Y VETAS HIDROTERMALES DE EL PICACHO, SIERRA DE TAMAULIPAS". op. cit.
- 23.- Enciclopedia Británica."Tomos;II,III,IV,V,VI,VII,IX,X". 1974.
- 24.- Folk L. Robert."PETROLOGIA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS".
- 25.- Fries Carl Jr. y Schmicter Eduardo."LOS PLACERES DE ESTAÑO DE LA REGION DE GUADALCAZAR, EDO. DE SAN LUIS POTOSI". Comte. Dir. para la Invst. de los Recursos Minerales de México. Boletín No.17, 1948.
- 26.- Friedman/Sanders."PRINCIPLES OF SEDIMENTOLOGY". Edit., John Wiley & Sons, 1978.
- 27.- Gómez Caballero A."PROGRAMA DE EXPLORACION REGIONAL DE LOS ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS". Archivo Técnico del C.R.M., Depto. de Invst. Aplicada, 1981.
- 28.- Harrah H.W."DECO TREFOIL". No. 31, Tomo 5, 1967.
- 29.- Harrah H.W., and Denver P.E."RARE EARTH CONCENTRATION AT MOLYBDENUM CORPORATION OF AMERICA". Solvent Extraction Plant. Molycorp Mountain Pass, California. Bulletin No. M4-B167.
- 30.- Hedrick J.B."MINE & PROBLEMS".Ind. Minerals, nov., 1988.
- 31.- Heinrich."THE GEOLOGY OF CARBONATITES". Edit., Rand Mc. Nully. Chicago, 1966.
- 32.- Henderson P.(Editor)."RARE EARTH ELEMENTS GEOCHEMISTRY". Developments in Geochemistry. Edit., ELSIVIER. Tomo II, 1984.
- 33.- Isohanni M."THE ORAVAINEN NICKEL OCURRENCE IN WESTERN FINLAND". Geological Survey of Finland. Bulletin 333.
- 34.- Isohanni M. and Papunen H."GEOLOGY AND NICKEL-COOPER ORES OF THE NIVALA AREA". op. cit.

- 35.- Jen-en M. and Bateman M."ECONOMIC MINERAL DEPOSITS". Edit., John Wiley & Sons, 1979.
- 36.- Johnson N.L."DECO TREFOIL". No. 30. Tomo 4, 1966.
- 37.- M. Barajas A."DISTRIBUCION DE LOS MINERALES PESADOS EN PLACERES DE PLAYA EN UNA PORCION DEL LITORAL DE LOS ESTADOS DE GRO. Y OAX.". GEOMIMET No. 146, 1987.
- 38.- Martínez Bermúdez J."RECONOCIMIENTO GEOLOGICO DE LA REGION PEGMATITICA DE TELIXTLAHUACA, OAXACA". Tesis UNAM. 1955.
- 39.- Mayoral Martínez L."GEOLOGIA Y YACIMIENTOS MINERALES DE FOSFORITA DEL AREA DE SAN JUAN DE LA COSTA, MPIO., DE LA PAZ, B.C.S.". Tesis UNAM. Fac. Ingeniería, 1979.
- 40.- Myron G. Best."IGNEOUS AND METAMORPHIC PETROLOGY". Edit., Freeman Co., 1982.
- 41.- Nieto O. Jorge."TIERRAS RARAS". Fac. Ingeniería, UNAM, s/f.
- 42.- Núñez Jaime, Salgado Virginio y Segura Ladislao."RECONOCIMIENTO GEOLOGICO DEL AREA CROMIFERA DE PAPANOA PETATLAN, GUERRERO". GEOMIMET, No. 114, 1981.
- 43.- O'Driscoll Mike."RARE EARTH". Enter the Dragon, Asoc., American Editor. Industrial Minerals. nov. 1988.
- 44.- Ojeda R. Jesús."RESUMEN DE DATOS ESTRATIGRAFICOS Y ESTRUCTURALES DE LA FM. MONTEREY QUE AFLORA EN EL AREA DE SAN HILARIO, B.C.S.". GEOMIMET, No. 100, 1979.
- 45.- Ortiz E. Luis."PARAGENESIS Y ALTERACION HIDROTHERMAL EN EL PROSPECTO CROMO NIQUELIFERO DE LOMA BAYA, PETATLAN, GERRERO". GEOMIMET, No. 130, 1984.
- 46.- Ortiz E. Luis, Núñez Jaime y E. Juan."YACIMIENTO DE SERPENTINA EN LA LOCALIDAD ULTRABASICA DE CAMALOTITO, MPIO. DE PETATLAN, GUERRERO". GEOMIMET, No. 136, 1985.

- 47.- Peele Robert."MINING ENGINEERS HANDBOOK". Edit., John Wiley & Sons, 3ra. Edition, 1954.
- 48.- Querol Suñé Fco."RARE EARTH MINERALS DEPOSIT OF THE MOUNTAIN PASS, DISTRICT, SAN BERNARDINO, CALIFORNIA". SIPSA de C.V., s/f.
- 49.- ROFOMEX."ROCA FOSFORICA MEXICANA". Folleto informativo s/f.
- 50.- Sánchez Torrez V."APUNTES DE YACIMIENTOS MINERALES". Recopilación SIPSA de C.V., 1984.
- 51.- Seth D. Woodruff."METHOD OF WORKING COAL AND METAL MINES". Edit., Pergamon Press. 1ra. Edition, vol. 1, 1966.
- 52.- Siegel R. Frederic."GEOCHEMISTRY APPLIED". Edit., John Wiley & Sons. 1ra. Edition, 1974.
- 53.- SIPSA DE CV."PANORAMA MUNDIAL DE LAS TIERRAS RARAS". Informe de Serv. Ind. PEÑOLES SA DE CV. S/F.
- 54.- SIPSA DE CV."TIERRAS RARAS". Informe de Serv. Ind. PEÑOLES SA de CV. s/f.
- 55.- Soberón Mobarak J."MINERIA DEL SIGLO XXI". GEOMIMET, No. 152, 1988.
- 56.- Sorensen H (Editor)."THE ROCK ALKALINE". Edit., Wiley, 1974.
- 57.- Spencer S. Shannon. Jr."MONAZITE AND RELATED MINERALS". Industrial Minerals and Rocks. 4ta. Edition, Soc. Ing. Mines, 1975.
- 58.- Spencer S. Shannon Jr."RARE EARTH AND THORIUM". op. cit., 1982.
- 59.- Stanton R.L."ORE PETROLOGY". Edit., Mc. Graw-Hill, N.Y., 1972.
- 60.- Taylor "APPLIED GEOCHEMISTRY". 1964.
- 61.- Tyrrell G.W."PRINCIPIOS DE PETROLOGIA". Edit., CECSA, 1984.
- 62.- Vargas Badillo José."ESTUDIO GEOLOGICO-MINERO DE LA SIERRA DE TAMAULIPAS". Geología Regional. Tesis UNAM. Fac., Ingeniería, 1981.
- 63.- Wigglesworth Clarke."THE DATA OF GEOCHEMISTRY". Edit., Dept. of the interior and United States, 20va. Edition, 1954.

## REFERENCIAS CITADAS

- Fleischer y Altschuler, 1969 en Andrew Clark. pp 33-54 de P. henderson (Editor), 1984.
- Fleischer 1965 en Andrew Clark. op. cit.
- Segaltad y Larsen, 1978a en Andrew Clark. op. cit.
- Gurov, Gurova, Loginova y Lavitskaya, 1975 en Andrew Clark. op. cit.
- Jacob K.H., 1974 en Andrew Clark. op. cit.
- Butler, 1958 en Andrew Clark. op. cit.
- Butler y Hall, 1960 en Andrew Clark. op. cit.
- Hogarth, 1975 en Andrew Clark. op. cit.
- Bowles, 1980 " " " " "
- Pabst y Hutton, 1951 en Andrew Clark. op. cit.
- Altschler, 1967 y 1980 en Neary y Highley. pp. 423-461, op. cit.
- Robinson. 1948 en Neary y Highley. op. cit.
- Garna, 1981 en Neary y Highley. op. cit.
- Lissiman y Oxenford, 1975 en Neary y Highley. op. cit.
- Leonardos, 1974 en Neary y Highley. op. cit.
- Alexander, 1974 " " " " " "
- Hawkins, 1974 " " " " " "
- Hill, 1975 en Neary y Highley. op. cit.
- Morrice y Wong, 1979 en Neary y Highley. op. cit.
- Balashov, 1964 en Fleet A.J. pp. 343-369. op. cit.
- Burkov y Podporina, 1967 en Fleet A.J. op. cit.
- Turner y Whitfield, 1979 en " " " " "
- Mc. Kelvey, 1967 en " " " " "
- Haskin, 1966 en Larry A.H. pp. 115-148. op. cit.
- Tuttle y Gittins, 1966 en R. Culler y J. Graf pp 237-308. op. cit.

- Egger, 1976 en R. Culler y J. Graf. op. cit.
- Wyllie y Huang, 1975 en Culler y Graf. op. cit.
- Mitchell y Brunfelt, 1975 en Culler y Graf. op. cit.
- Balashov y Krigman, 1975 en Culler y Graf. op. cit.
- Eby in Culler y Graf. op. cit.
- Culler y Medaris, 1977 en Culler y Graf. op. cit.
- King, 1949 en Culler y Graf. op. cit.
- P. Henderson y Pankhurst.1984 pp 467-495 op. cit.
- Brogger, 1921 en Nieto O. J. s/f.
- Gerasimovsky, 1969 en H. Sorensen 1974. pp 22-52
- Barker, 1968 en H. Sorensen 1974. pp 402-412.