

TERRAS RARAS



Cristal de monazita (Mina João Torres, Muqui, Espírito Santo)
(fonte: [Rob Lavinski & irocks.com](#). Acesso em 26/5/2018)

Lucia Castanheira de Moraes

CEFET-MG/Unidade Araxá
2013luciam@gmail.com

Hildor José Seer

CEFET-MG/Unidade Araxá
hildorseer@cefetmg.br

SUMÁRIO

1. ASPECTOS GERAIS.....	1
1.1. MINERALOGIA.....	6
1.2. APLICAÇÕES	7
2. GEOLOGIA	14
2.1. GEOLOGIA DOS DEPÓSITOS EM MINAS GERAIS	16
2.1.1. Geologia dos Depósitos Alcalino Carbonatíticos.....	17
2.1.1.1. Complexo Alcalino Carbonatítico de Araxá.....	19
2.1.1.2. Complexo Carbonatítico de Tapira	20
2.1.1.3. Complexo Alcalino Carbonatítico de Serra Negra.....	22
2.1.1.4. Complexos Alcalino Carbonatíticos de Salitre I, II e III.....	25
2.2. COMPLEXOS ALCALINOS.....	26
2.2.1. Complexo Alcalino de Poços de Caldas – Morro do Ferro	26
2.2.2. Terras raras em Bambuí (Complexos Alcalinos?)	27
2.3. ROCHAS VULCÂNICAS ALCALINAS	28
2.3.1. Rochas alcalinas Mata da Corda.....	28
2.4. DEPÓSITOS EM GRANITOS (E PEGMATITOS ASSOCIADOS).....	29
2.4.1. Pegmatitos na região de São João del Rei (MG).....	29
2.5. DEPÓSITOS EM PLACERS FLUVIAIS.....	30
2.5.1. São Gonçalo do Sapucaí (MG).....	30
3. ASPECTOS ECONÔMICOS.....	32
3.1. PRODUÇÃO INTERNA	32
3.2. IMPORTAÇÃO	33
3.3. EXPORTAÇÃO	34
3.4. CONSUMO INTERNO.....	35
3.5. PROJETOS EM ANDAMENTO E/OU PREVISTOS.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

1. ASPECTOS GERAIS

A União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) classificou um grupo de 17 elementos químicos relativamente abundantes de Elementos de Terras Raras (ETR). A Figura 1 mostra que 15 desses elementos pertencem ao grupo dos lantanídeos (elementos com número atômico entre Z=57 e Z=71, isto é, do lantânio ao lutécio); os outros dois são o escândio (Z=21) e o ítrio (Z=39), elementos que ocorrem nos mesmos minérios e apresentam propriedades físico-químicas semelhantes.

Grupo 1 IA												18 VIIIA																																							
1	H Hidrogênio 1.00794																	2	He Hélio 4.002602																																
2 IIA												13 IIIA		14 IVA		15 VA		16 VIA		17 VIIA																															
3	Li Lítio 6.941	4	Be Berílio 9.012182																	5	B Boro 10.811	6	C Carbono 12.0107	7	N Nitrogênio 14.0067	8	O Oxigênio 15.9994	9	F Flúor 18.9984032	10	Ne Neônio 20.1797																				
3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																					
11	Na Sódio 22.989770	12	Mg Magnésio 24.3050	13	Al Alumínio 26.981538	14	Si Silício 28.0855	15	P Fósforo 30.973761	16	S Enxofre 32.065	17	Cl Cloro 35.453	18	Ar Argônio 39.948	19	K Potássio 39.0983	20	Ca Cálcio 40.078	21	Sc Escândio 44.955910	22	Ti Titânio 47.867	23	V Vanádio 50.9415	24	Cr Cromo 51.9961	25	Mn Manganês 54.938045	26	Fe Ferro 55.845	27	Co Cobalto 58.933200	28	Ni Níquel 58.6934	29	Cu Cobre 63.546	30	Zn Zinco 65.409	31	Ga Galo 69.723	32	Ge Germânio 72.64	33	As Arsênio 74.92160	34	Se Selênio 78.96	35	Br Bromo 79.904	36	Kr Criptônio 83.798
4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																							
37	Rb Rubídio 85.4678	38	Sr Estrôncio 87.62	39	Y Ítrio 88.90585	40	Zr Zircônio 91.224	41	Nb Nióbio 92.90638	42	Mo Molibdênio 95.94	43	Tc Tecnécio (98)	44	Ru Ródio 101.07	45	Rh Ródio 102.90550	46	Pd Paládio 106.42	47	Ag Prata 107.8682	48	Cd Cádmio 112.411	49	In Índio 114.818	50	Sn Estanho 118.710	51	Sb Antimônio 121.760	52	Te Telúrio 127.60	53	I Iodo 126.90447	54	Xe Xenônio 131.293																
5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																									
55	Cs Césio 132.90545	56	Ba Bário 137.327	57	La Lantânio 138.9055	58	Ce Cério 140.116	59	Pr Praseodímio 140.90765	60	Nd Neodímio 144.24	61	Pm Promécio (145)	62	Sm Samário 150.36	63	Eu Európio 151.964	64	Gd Gadolínio 157.25	65	Tb Tório 158.92534	66	Dy Disprósio 162.500	67	Ho Hólio 164.93032	68	Er Érbio 167.259	69	Tm Tório 168.93421	70	Yb Ítrio 173.04	71	Lu Lutécio 174.967																		
6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																											
72	Hf Háfnio 178.49	73	Ta Tântalo 180.9479	74	W Tungstênio 183.84	75	Re Rênio 186.207	76	Os Osmio 190.23	77	Ir Irídio 192.217	78	Pt Platina 195.078	79	Au Ouro 196.96655	80	Hg Mercúrio 200.59	81	Tl Tlúlio 204.3833	82	Pb Chumbo 207.2	83	Bi Bismuto 208.98038	84	Po Polônio (209)	85	At Astato (210)	86	Rn Radônio (222)																						
7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																													
87	Fr Françaço (223)	88	Ra Rádio (226)	89	Ac Actínio (227)	90	Th Tório 232.0381	91	Pa Protactínio 231.03588	92	U Urânio 238.02891	93	Np Netúnio (237)	94	Pu Plutônio (244)	95	Am Americio (243)	96	Cm Cúrio (247)	97	Bk Berquélio (247)	98	Cf Califórnio (251)	99	Es Einstênio (252)	100	Fm Férmio (257)	101	Md Mendelévio (258)	102	No Nobelio (259)	103	Lr Laurêncio (262)																		
8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																															
104	Rf Rutherfordio (261)	105	Db Dúbnio (262)	106	Sg Seabórgio (266)	107	Bh Bóhrnio (264)	108	Hs Hássio (277)	109	Mt Meitnério (268)	110	Ds Darmstádio (271)	111	Rg Roentgênio (272)	112	Uub Ununbium (285)	113	Uut Ununtrium (285)	114	Uuq Ununquádmio (289)	115	Uup Ununpéutrio (288)	116	Uuh Ununhexímio (292)																										

Figura 1. Tabela periódica dos elementos químicos, destacando os chamados elementos de terras raras. (redesenhado a partir de [Wikipedia](#)).

Entretanto, são elementos que não podem ser considerados raros e tampouco são terras. Com exceção do lantânio – que é muito instável e, portanto, raro – o ETR mais raro, o túlio, é mais comum na crosta terrestre que o mercúrio e a prata (Figura 2).

A partir da descoberta de Carl Auer Welsbach, de que uma mistura de 99% de óxido de tório e 1% de óxido de cério intensificava o brilho da chama quando aquecida, a indústria passou a produzir camisas para lâmpões a gás com esse material (Chakhmouradian & Wall 2012, p. 237 *in* Lima 2017).

Ocorre que, nos finais do século 18/ início do século 19, quando foram identificados pela primeira vez, foram isolados sob a forma de óxidos. Óxidos da maioria dos elementos eram, então, denominados “terras”. Além disso, de acordo com a Wikipedia (2018), “...por

apresentarem propriedades muito similares, serem apenas conhecidos em minerais oriundos da Escandinávia e por serem de difícil separação, foram considerados 'raros.'" Uma outra versão imputa ao termo "raro" a dificuldade de obtê-los com o grau de pureza e concentração necessários para as exigências da indústria (Técnicomineração.com.br). Para exemplificar, foram necessários mais que 100 anos para que esses 17 elementos fossem isolados e identificados, em grande parte devido às semelhanças físico-químicas partilhadas por eles. Isto é, ainda que haja registro de reconhecimento do mineral gadolinita no final do século 18, só com o desenvolvimento das técnicas de raio X, no início do século 20, foi possível a determinação dos números atômicos e concluir que os lantanídeos compõem 15 elementos químicos.

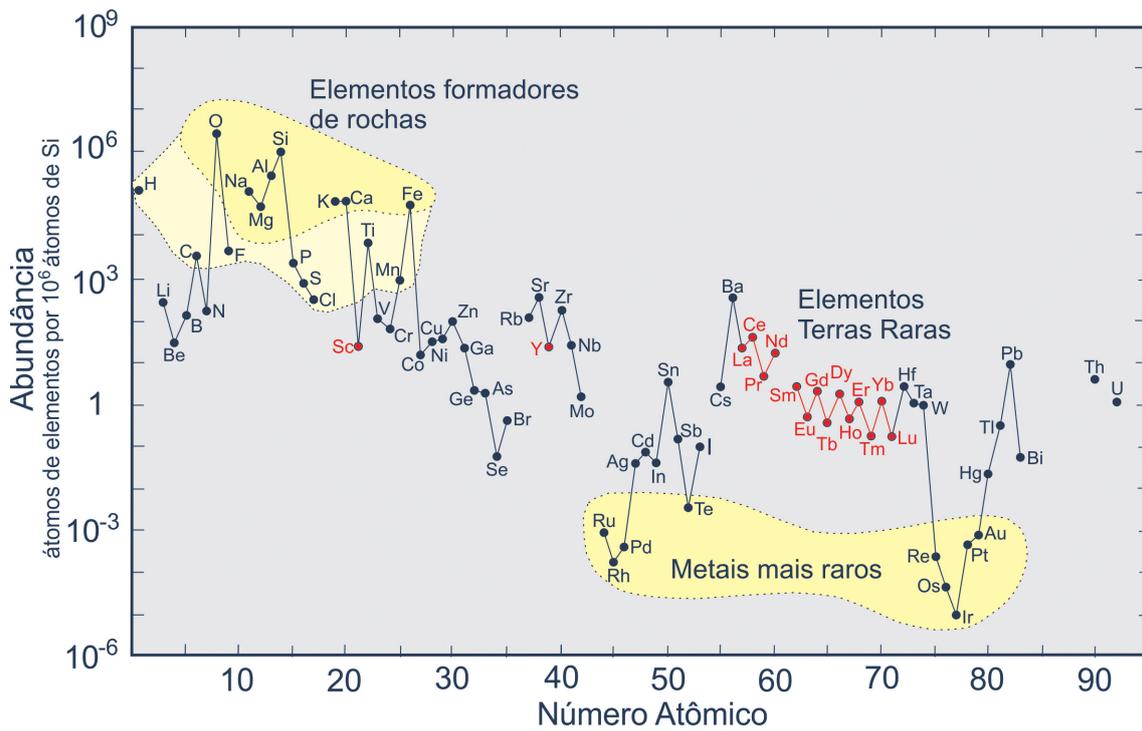


Figura 2. O quadro da abundância dos elementos químicos na crosta continental mostra que os ETR não são assim tão raros em relação a outros. Modificado de Haxel *et al.* (2002, p. 2).

Os 17 ETR são subdivididos em três subgrupos em relação à sua densidade: Elementos Leves (La, Ce, Pr, Nd, Pm), Elementos Médios (Sm, Eu, Gd) e Elementos Pesados (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, Sc). São encontrados em proporções econômicas nos minerais monazita $(\text{ETR})\text{PO}_4$, bastnaesita $[\text{ETR}(\text{CO}_3)]\text{F}$, xenotima $(\text{ETR})\text{PO}_4$ e em argilas lateríticas. As argilas e a xenotima são as principais fontes de ETR pesados. Monazita e bastnaesita são principalmente fontes de terras-raras leves. Caracteristicamente são dúcteis, maleáveis, de baixa dureza, altamente magnetizáveis e bons condutores de calor e eletricidade. Essas propriedades os tornam essenciais como matéria prima para a indústria de alta tecnologia tais como produção de materiais luminescentes, magnetos, dopantes em tubos de raios catódicos para televisores e computadores e constituição de catalizadores. Possuem também importância geológica tanto na datação de alguns minerais, através da abundância relativa do samário e do neodímio, como no estudo da fonte de magmas, através da concentração relativa de terras raras nas rochas ígneas.

O Brasil foi o primeiro grande fornecedor desses elementos. Para atender a demanda para produção dessas mantas incandescentes, a partir de 1886, iniciou a exploração de areias monazíticas, localizadas nas praias de Cumuruxatiba-Bahia. Até 1915 foi o maior produtor mundial de ETRs e, a partir de então, passou a alternar essa posição com a Índia durante 45 anos. A entrada dos EUA no comércio internacional quebra essa cadeia, mas ainda assim, em 1995 o país produziu 110 toneladas de óxidos. Hoje, a sua única usina de produção está fechada (Eco4u 2012).

A partir da década de 1960, quando começa a ser produzido comercialmente, até a década de 1980, a principal fonte de ETR foi o depósito carbonatítico de Mountain Pass, EUA (Chakhmouradian & Wall 2012, p. 238 in Lima 2017). A China iniciou a produção de ETR ao final da década de 1970, e em curto espaço de tempo tornou-se líder do mercado mundial. Lutando com os problemas ambientais ligados à deposição do rejeito (rico em tório) e com a concorrência chinesa, a mina de Mountain Pass fechou em 2002. Como mostra a Figura 3, a China tornou-se, então, responsável por 95% do suprimento global de ETRs (USGS 2015). Hoje esse percentual é um pouco menor, mas a China continua dominando o mercado. A posição dominante da China na mineração, concentração e toda a cadeia produtiva completa de ETR é parte de uma estratégia atribuída ao líder do Partido Comunista Deng Xiaoping, que, em 1992 teria dito: “Se o Oriente Médio conta com petróleo, nós contamos com Elementos Terras Raras”.

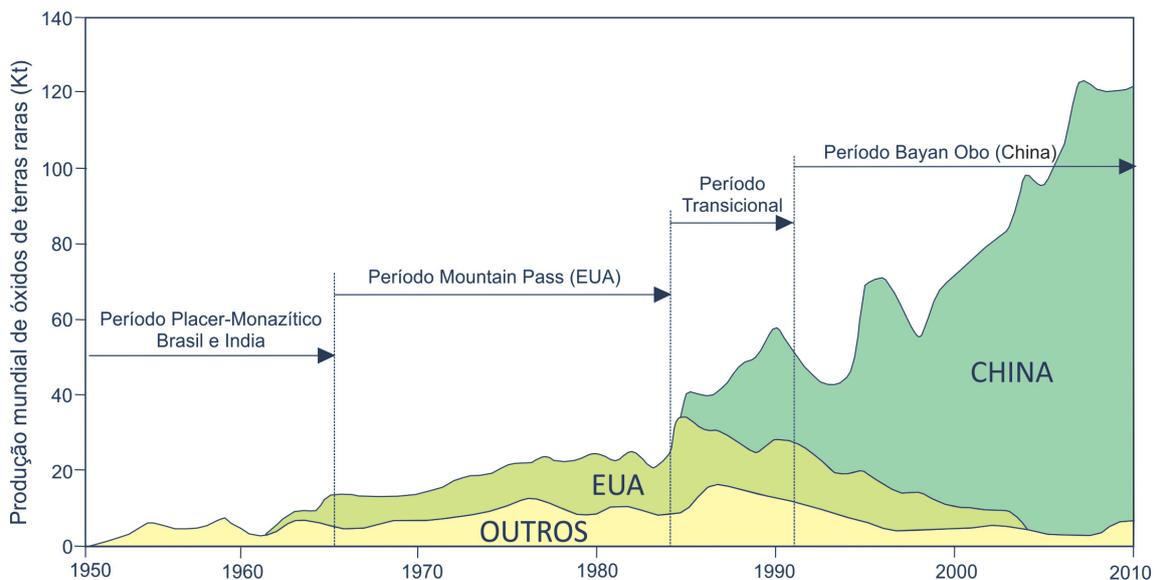


Figura 3 Evolução da produção de terras-raras desde 1950 (Modificado de Hocquard 2011, in Martins *et al.* 2014).

De acordo com Martins *et al.* (2014), pontos significativos dessa estratégia são investimento em atividades de pesquisa e desenvolvimento e política de proteção e agregação de valor. Em 2002 entrou em vigor um documento intitulado *Inherim Provisions on the Administration of Foreign-Funded Rare Earth Industry*, concebido pela Comissão de Planejamento do Desenvolvimento da China. Determina a proibição do estabelecimento de empresas para mineração de ETR na China por investidores estrangeiros, mas os incentiva a investir em três setores: processamento intensivo, novos materiais e produtos aplicados. Desde 2006, o Ministério da Terra e Recursos Naturais da China, responsável pelos planos de produção de terras-raras, estabeleceu a política anual de cotas de produção e exportação.

As cotas de exportação vêm caindo desde então, passando de 61,56 mil toneladas métricas naquele ano para 30,26 mil toneladas métricas em 2010, em função do aumento da demanda interna. Essas medidas vieram acompanhadas de tarifas de exportação sobre ETR que variam de 25% para neodímio, ítrio, európio, térbio e escândio, 20% para ligas de neodímio e ligas de disprósio e 15% para os demais ETR. A situação gerou uma alta automática nos preços (Figura 4) e forçou o desenvolvimento de muitos projetos de mineração de ETRs mundo afora.

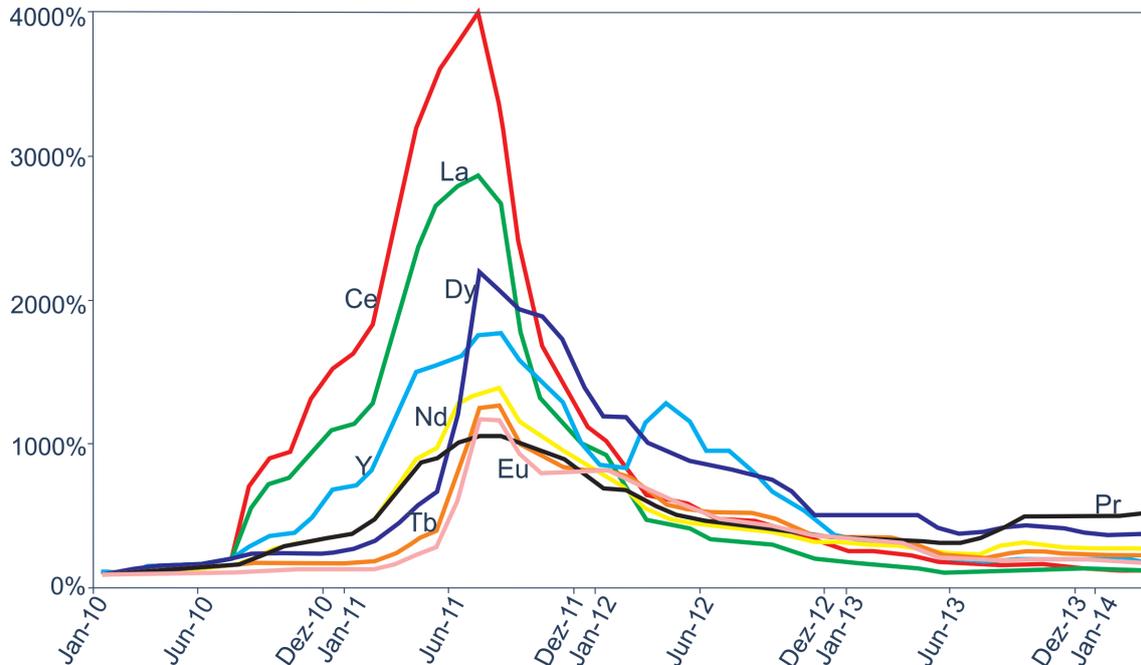


Figura 4. Evolução dos preços de ETRs após o anúncio de cotas de exportações feitas pela China (jan/2010 a jan/2014), de acordo com Takehara (2015).

De acordo com Rocio *et al.* (2012), a situação das reservas mundiais em 2010 era conforme mostrado no gráfico da Figura 5. O que se vê é, ainda, um predomínio das reservas na China, mas também uma porcentagem significativa de reservas em diferentes localidades. Esses autores também indicam como pertencente ao Canadá (Ontário) o maior depósito de ETRP e ítrio, sendo subprodutos de minérios de urânio, enquanto os principais depósitos de ETRL se acham nos EUA (Califórnia), China (vários locais), África do Sul e Rússia (Península de Kola).

Uma fonte de ETR que começa a ser considerada a partir de 2010 é o lixo eletrônico, em especial no Japão, onde se estima haver cerca de 300.000 toneladas de TR em produtos eletrônicos descartados (Rocio *et al.* 2012). Ainda segundo esses autores, os 50 anos de extração de minérios de urânio e loparita na Estônia geraram quantidades significativas de ETR nos rejeitos, que passam a ser pesquisados.

Os dados mais atualizados encontrados são do Sumário Mineral (Andrade 2014), mostrado na Tabela 1. A diferença brutal encontrada entre a Figura 5 e a Tabela 1, em termos de reservas brasileiras, em grande parte se deve à política adotada pela China. Desde então, pesquisas geológicas geraram um incremento significativo nas reservas a partir de 2013,

quando os resultados começaram a aparecer. Ainda assim, sua produção permaneceu próxima de zero.

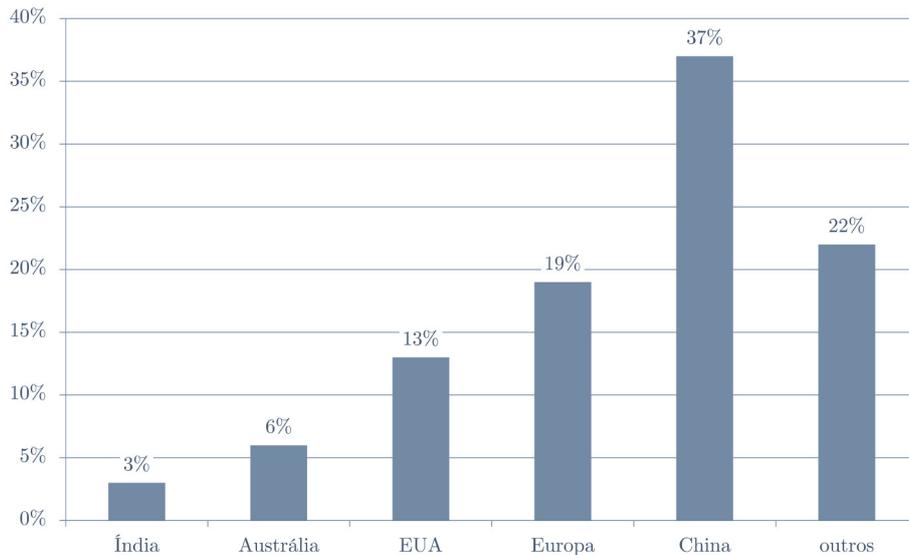


Figura 5. Distribuição das reservas de ETR no mundo em 2010 (modificado de [Rocio et al. 2012](#)).

Tabela 1 Dados do DNPM discriminam valores de reserva e produção de ETRs dentre os maiores detentores nos anos de 2013 e 2014. Repare que o Brasil aparece como segundo detentor mundial de reservas em 2014, ainda que com produção zero (a produção de 2013 se refere a monazita lavrada e estocada no município de São Francisco do Itabapoana); a produção da Rússia e do Vietnã estão incluídas em outros países.

Modificado de [Takehara \(2015\)](#).

PAÍS	RESERVA (10 ³ T)		PRODUÇÃO (T)	
	2014	2013	2013	2014
CHINA	55.000	95.000	95.000	95.000
BRASIL	22.000	600	0	0
AUSTRÁLIA	3.200	2.000	2.500	2.500
ÍNDIA	3.100	2.900	3.000	3.000
EUA	1800	5.500	7.000	7.000
MALÁSIA	30	180	200	200
RÚSSIA	--	2.500	2.500	2.500
TAILÂNDIA	nd	800	1.100	1.100
VIETNÃ	--	220	200	200
OUTROS	41.000	nd	nd	nd
TOTAL	126.130	109.700	111.500	111.500

Ainda mais surpreendentes são os dados apresentados na Figura 6. Segundo [Loureiro & Santos \(2013, p. 156\)](#), o autor dos dados é Cheng, um especialista chinês em ETR que, com base em estudos internacionais bem fundamentados, informa que as reservas (depósitos) do Brasil são da ordem de 52,5 milhões de toneladas.

Vale lembrar que os desafios de extração e processamento não são pequenos, em especial devido a disponibilidade limitada de conhecimentos técnicos para a separação dos minerais-minério contendo ETRs. Soma-se a isso o elevado custo de plantas convencionais, a produção concomitante de resíduos radioativos, a variação no preço de mercado e níveis de demanda inconsistentes para ETRs individuais ([Jordens et al. 2013, p.98 in Lima 2017](#)).

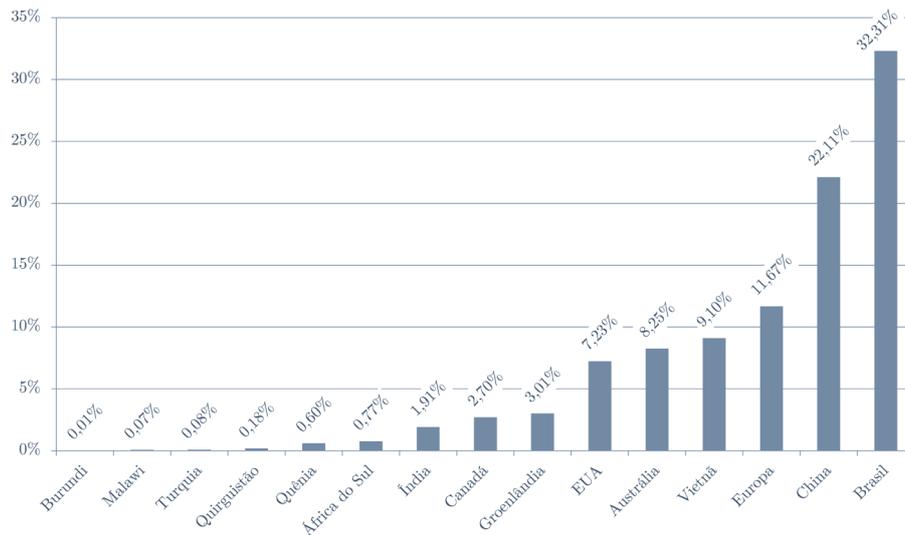


Figura 6. Dados de distribuição de ETR no mundo, modificado de Loureiro & Santos (2013).

1.1. Mineralogia

De acordo com o Natural Environment Research Council (NERC 2011), são conhecidos mais de 200 minerais que carregam consigo algum elemento de Terras Raras. Entretanto, os minerais fornecedores de ETR em volume econômico são Xenotima, Monazita e Bastnaesita (Figura 7), sendo os dois últimos, fonte predominantemente de ETRs leves. Martins *et al.* (2014) lembram que a xenotima, assim como algumas argilas portadoras de terras-raras adsorvidas sob forma iônica, produzem especialmente ETRs pesados (no sul da China, depósitos de ítrio e lantanídeos pesados atingem o teor de 65% de óxido de ítrio). As argilas são predominantemente originadas de feldspato e micas. De acordo com Viera & Lins (1997), minerais como perovskita, fluorita e zircão, poderão se tornar futuras fontes importantes de terras-raras.

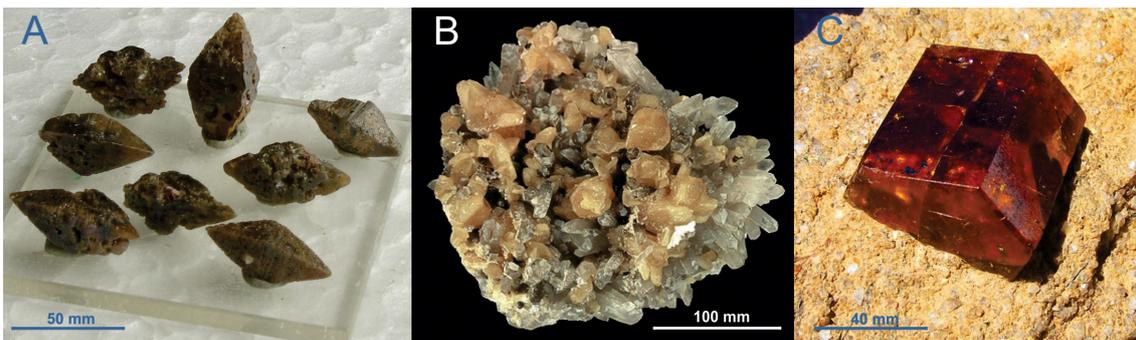


Figura 7. Mineralogia de ETRs; **A)** Xenotíma de Poços de caldas, MG, de cor castanho. Autores: Tom Epaminondas e Eurico Zimbres; **B)** Monazita da mina de Lallagua, em Potosi, na Bolívia, de cor caramelo (fonte: Rob Lavinski & irocks.com); **C)** Bastnasita Ce de Zagi Mountain, Peshawar, Paquistão (fonte: C. Mercer). Acesso em 12/3/2018.

A **Xenotima** (do grego *xenos*, "estranho", e *time*, "honra") é um fosfato de ítrio (Figura 7A), com quantidades variadas de térbio, disprósio, hólmio, érbio, túlio, itérbio e lutécio, além de cálcio, silício, flúor, tório e urânio. Os dois últimos podem alcançar volume suficiente para serem explorados como subproduto ou impureza (Voncken 2016, p. 16 in Lima 2017). Ocorre como acessório em pegmatitos, rochas félsicas e rochas metamórficas. É também

encontrada em *placers* como um mineral detrítico e, neles, é comumente considerado um produto secundário do processamento de monazita (Jordens *et al.*, 2013, p.10 in Lima 2017). É tetragonal com hábito prismático, clivagem boa em uma direção, dureza entre 4 e 5 e densidade entre 4,4 e 5,1 g/cm³. Suas cores variam entre amarelo pálido a castanho escuro e é radioativo.

A **monazita** é também um fosfato cuja fórmula química pode ser escrita como (La, Ce, Pr, Nd, Y, Th)PO₄ e cujo nome é derivado do grego "*monazēin*" (estar solitário), em alusão aos seus cristais isolados (Figura 7B). É um mineral encontrado em pegmatitos, veios, rochas metamórficas e, por ser resistente ao intemperismo, em depósitos de *placer* e em paleopraias. De fato, são esses últimos as principais fontes de monazita, pela facilidade de exploração. O teor de ETR leves chega a atingir 70% e, segundo a United States Environmental Protection Agency (EPA 2012), pode também conter ETR pesados. São reconhecidas quatro monazitas, dependendo do ETR predominante:

- monazita-Ce (Ce, La, Nd, Th, Y)PO₄
- monazita-La (La, Ce, Nd)PO₄
- monazita-Nd (Nd, La, Ce)PO₄
- monazita-Sm (Sm, Gd, Ce, Th)PO₄

Os elementos entre parênteses estão listados em ordem decrescente de abundância. A monazita pode também ser fonte significativa de tório, o que a torna radioativa. Sua densidade específica varia entre 4,6 a 5,7 g/cm³, e a dureza entre 5,0 e 5,5. Sua cor é castanha, variando entre amarelado e avermelhado, mas podendo ser ocasionalmente esverdeada. É monoclinica e apresenta certo magnetismo, que é usado na sua purificação.

A Figura 7C mostra a **bastnaesita** (do sueco *Bastnas*, a localidade tipo), um fluorcarbonato encontrado tipicamente em carbonatitos, pegmatitos de granitos alcalinos e corpos de minério formados por processos hidrotermais (Bulatovic 2010, p. 151 in Lima 2017). De acordo com Enghag (2004, p. 390 in Lima 2017) a bastnaesita pode ser representada como (Ce, La, Y) CO₃F, sendo 70% óxidos de terras raras (OTRs) que inclui Ce, La, Pr e Nd. É o mais comum dos minerais de terras raras. Sua dureza varia entre 4 e 4,5, sua densidade específica entre 4,9 e 5,2 g/cm³, os cristais – do sistema hexagonal – são tipicamente tabulares, sem clivagem, com brilho vítreo a resinoso e cores variando entre vermelho acastanhado, amarelo, amarelo claro e incolor. De acordo com Jordens *et al.* (2013, p. 100 in Lima 2017), por não conter tório ou urânio, a bastnaesita substituiu a monazita como fonte de ETRs leves, sendo as minas de Bayan Obo na China, e de Mountain Pass, nos Estados Unidos suas principais fontes mundiais.

1.2. Aplicações

As aplicações dos ETRs estão ligadas às suas propriedades químicas, elétricas, catalíticas, óticas e magnéticas. Além de sua aplicação em setores tradicionais como têxteis, de petróleo, metalúrgico e agricultura, eles vêm se tornando indispensáveis na indústria de alta tecnologia como turbinas eólicas, carros híbridos, televisores de tela plana, telefone celular, lâmpadas fluorescentes compactas, ímãs permanentes, catalisadores de gases de

escapamento, lentes de alta refração e mísseis teleguiados (eufemisticamente chamados de tecnologias de defesa). Em alguns casos um único ETR é necessário, como no caso das baterias híbridas à base de níquel com lantânio. Porém é comum o uso de vários deles como, por exemplo, neodímio e praseodímio, nos ímãs permanentes (Xie *et al.*, 2014 *in* Lima 2017).

Esses autores esclarecem que ímãs permanentes contendo ETR são formados por ligas com metais de transição como ferro, cobalto e níquel. Exemplos são samário-cobalto (de alto custo e relativamente baixo campo magnético, porém com alto ponto Curie), neodímio-ferro-boro ou praseodímio-ferro-boro-até 5% cério (de amplo uso em produtos que requerem alta energia e alta força coercitiva). A coerção do ímã sinterizado de Nd-Fe-B pode ser potencializada com a adição de térbio e disprósio.

Além disso, íons de ETR como Tb^{+3} e Eu^{+3} possuem propriedades luminescentes únicas capazes de uma alta eficácia luminescente e boa qualidade de luz branca. Um composto cristalino de ETR e fósforo pode ter o fósforo ativado pela substituição de seus cátions por íons de outro ETR, alcançando um alto grau de fluorescência. Telas de plasma têm usado tantalato de ítrio ativado por túlio (YTaO₄:Tm) ou Nb (YTaO₄:Nb).

A Tabela 2 lista os ETRs, em ordem crescente de número atômico, e suas aplicações, enquanto a Figura 8 traz alguns exemplos de aplicações tecnológicas para esse grupo de elementos.

Tabela 2. Aplicações dos diferentes produtos de ETRs, modificado de Rocio *et al.* (2012).

ELEMENTO/SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÃO
<p data-bbox="375 1070 475 1093">Escândio Sc</p>  <p data-bbox="172 1415 673 1460">Por Alchemist-hp (talk) (www.pse-mendeleejew.de) - Obra do próprio, FAL. Cubo = 1 cm³</p>	<p data-bbox="710 1182 1439 1348">Metal mole e leve, resistente aos ácidos nítrico e fluorídrico diluídos, reage rapidamente com outros ácidos. Seu ponto de fusão muito superior ao do Al tem permitido seu uso nas indústrias aeroespacial e aeronáutica. O Sc₂O₃ é usado para a produção de lâmpadas de vapor de Hg, obtendo-se uma luz solar artificial de alta qualidade. O isótopo radioativo Sc-46 é usado no craqueamento do petróleo, como traçador.</p>
<p data-bbox="395 1473 454 1496">Ítrio Y</p>  <p data-bbox="367 1852 481 1874">cubo = 1 cm³</p>	<p data-bbox="710 1505 1439 1841">Quando finamente dividido e exposto ao ar, é muito instável. O óxido de ítrio é o composto mais importante de Y, apresentando alta resistência mecânica, elevado ponto de fusão e baixas características de expansão. Usado com Eu para dar a coloração vermelha em cinescópios de televisão e com o Fe para filtro de micro-ondas. Ligas de ítrio e Fe, ítrio e Al e ítrio e Gd apresentam propriedades magnéticas e a primeira é eficiente como transmissor e transdutor de energia sonora. Liga de Y e Al apresenta dureza 8,5, sendo usada como gema substituta do diamante ou para lapidação. 0,1 a 0,2% de Y reduzem a granulação de ligas de Cr, Mo, Ti e Zr, melhorando seu desempenho. É importante na elaboração de cerâmicas supercondutoras de elevada temperatura crítica, como desoxidante de V e outros metais não-ferrosos e como catalizador para a polimerização do etileno.</p>

ELEMENTO/SÍMBOLO

CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÃO

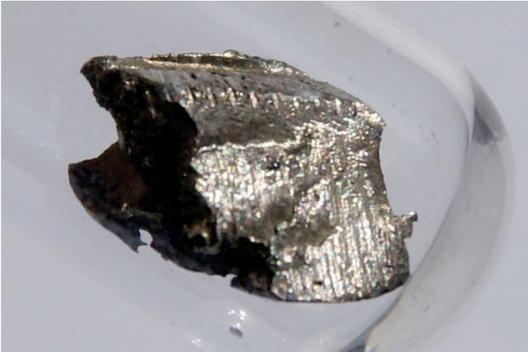
Lantânio La



preservado em tubo de neônio; peça maior = 1 cm³

Dúctil e maleável, mole o bastante para ser cortado com uma faca, é um dos mais reativos ETRs; oxida rapidamente quando exposto ao ar e reage diretamente com C, N, B, Se, Si, P, S e os halogênios. A água fria ataca lentamente o La, mas com a água quente o ataque é rápido. Pequenas quantidades de La, adicionados ao aço melhoram sua maleabilidade, ductilidade e resistência ao impacto. Usado para a solda DW1600E e, principalmente, em ligas para a produção de lentes especiais, pedras de isqueiros, como esponja de H (capazes de absorver até 400 vezes o seu volume de H gasoso em um processo reversível) e em eletrodos de carbono para a produção de luz, principalmente para iluminação de estúdios e projeções na indústria cinematográfica. La₂O₃ aumenta a resistência de vidros, que são usados para a produção de vidros ópticos especiais, tais como absorvedores de radiação infravermelha, lentes ópticas para câmeras de máquinas fotográficas e telescópios, devido ao elevado índice de refração e baixa dispersão. LaB₆ é usado como fonte emissora de elétrons em microscópios eletrônicos de alta resolução. Pequenas quantidades são adicionadas ao Fe para produzir ferro fundido nodular e 0,2% a 5% de La adicionados ao Mo diminuem sua dureza e sensibilidade a variações de temperaturas. Pode ser catalizador no craqueamento do petróleo, usado na forma de compostos para polir vidros e em lapidação e, a dupla La-Ba em datações de rochas e minérios.

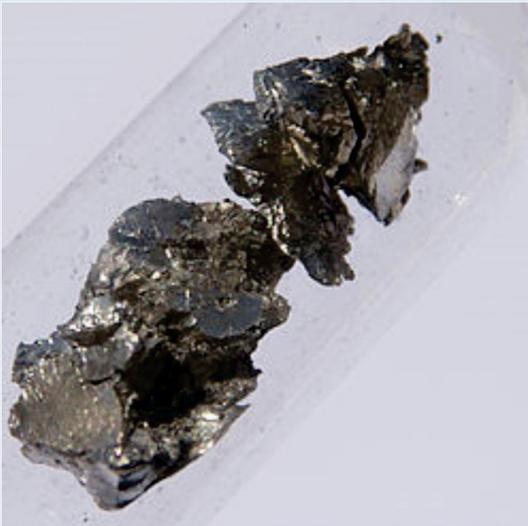
Cério Ce



preservado em tubo de neônio; tamanho original = 1x1 cm

Metal macio, maleável e dúctil, é o segundo mais reativo dos ETRs, atrás apenas do Eu. Pode inflamar-se quando riscado com uma faca. É usado como componente do cristal de cintilação em câmera gama de última geração em medicina nuclear, na manufatura do vidro e na coloração de esmalte. Usado na forma de ligas pirofosfóricas para a produção de pedras de ignição de isqueiros e eletrodos de arco de grafite na indústria cinematográfica. Quando adicionado ao ferro fundido, produz ferro maleável; ao aço, ajuda a reduzir sulfatos e óxidos; ao aço inoxidável, funciona como agente endurecedor. A adição de 3 a 4% de Ce a ligas de Mg dão resistência ao calor. Na forma de óxido é usado como catalisador em fornos, em camisas de lâmpões a gás, como catalisador de hidrocarbonetos, como abrasivo na indústria de polimento de vidros. Permite a absorção da luz ultravioleta no vidro. Por ser um forte agente oxidante, o sulfato é usado em análises de titulação quantitativa.

Praseodímio Pr



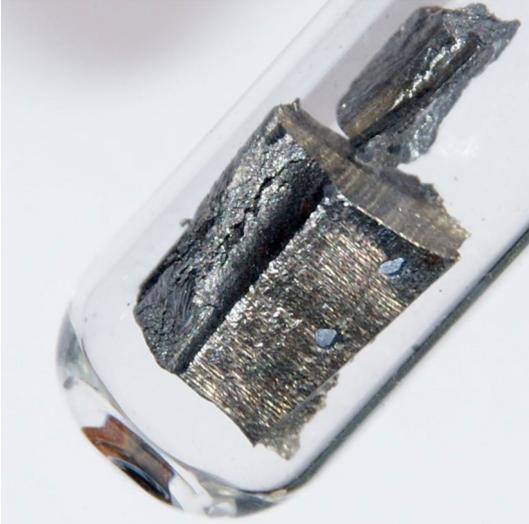
preservado em tubo de Ne; peça maior = 0,5 cm

Metal prateado, macio e pouco resistente à corrosão no ar, é usado para produzir ligas metálicas (com o Mg) de alta resistência térmica e mecânica utilizadas em componentes de motores de avião. Também em ligas entra na composição de filamentos para lâmpadas de projetores cinematográficos. Vidros e esmaltes coloridos em amarelo possuem Pr na composição. Compõe 5% da produção de metal Misch para pedras de isqueiros e, em adição ao Nd, é usado para a fabricação de óculos de proteção na fundição de vidros.

ELEMENTO/SÍMBOLO

CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÃO

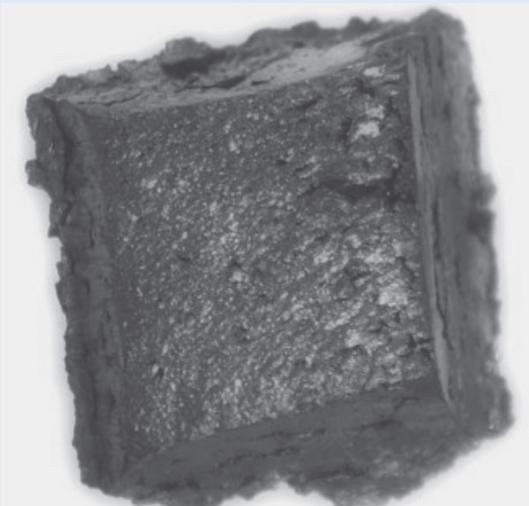
Neodímio Nd



preservado em tubo de Ne; peça maior = 1 cm

Com brilho metálico prateado é um dos ETRs mais reativos em contato com o ar. Em associação com o Pr, entra na fabricação de óculos de proteção para os soldadores e assopradores de vidro, pois absorve a luz amarela da chama. Na coloração de vidro serve tanto para remover a cor verde causada pelo Fe contaminante como para conferir delicadas cores que variam desde o violeta puro, vinho até ao cinza claro. Alguns destes vidros são usados por astrônomos para calibrar dispositivos denominados espectrômetros e filtros de radiação infravermelha e outros; para produzir rubis sintéticos, utilizados em lasers empregados na odontologia e na medicina. Além disso, o ímã permanente de Nd é poderoso e mais barato do que os ímãs de SmCo, sendo usado em produtos como fones de ouvido, alto-falantes, disco rígido de computadores, acionadores de partidas de motores e sensores. NdFeB é considerado o ímã permanente mais forte do mundo, essencial para muitos armamentos. Sais de Nd são usados como corantes de esmaltes.

Promécio Pm



Autor e dimensão desconhecidos

Não existe na natureza e possui radioatividade elevada; como fonte de radiações beta, é utilizado na produção de medidores de espessuras muito finas. Ao incidir sobre o fósforo a radiação beta gera luz que, através de fotocélulas, pode ser usada para produzir baterias muito pequenas, com uma vida útil de aproximadamente 5 anos e que tem sido usadas em pesquisas espaciais. Sais deste metal apresentam luminescência na obscuridade com um fulgor azul ou acinzentado pálido usados para a produção de ponteiros e mostradores de relógios. É uma potencial fonte portátil de raio-X e de calor para ser usada em sondas espaciais, satélites artificiais, aplicações médicas, e para a produção de lasers.

Samário Sm



preservado em tubo de Ne; sem dados de dimensão

Metal prateado brilhante, o Sm ocorre em três estruturas cristalinas, se transformando nas temperaturas de 734 e 922 °C. É razoavelmente estável no ar, mas inflama-se à temperatura de 150 °C. Tem sido empregado como absorvente de nêutrons em reatores nucleares, em ligas para a produção de fones de ouvido, em ligas SmCo para produção de ímãs permanentes com elevada resistência à desmagnetização (ideais para mísseis guiados de precisão, bombas inteligentes e aeronaves), no tratamento de dores ósseas em pacientes com câncer e em sensores de absorção de espectroscopia no infravermelho (ambos em sínteses orgânicas envolvendo o isótopo radioativo ¹⁵³Sm) na forma de óxido como catalisador para a desidratação e desidrogenação do etanol e em vidros ópticos para absorção de radiação infravermelha. Na forma de titanato, para estabilizar o desempenho de condensadores elétricos. Também tem sido utilizado em lâmpadas de eletrodos de carbono na indústria cinematográfica.

Európio Eu



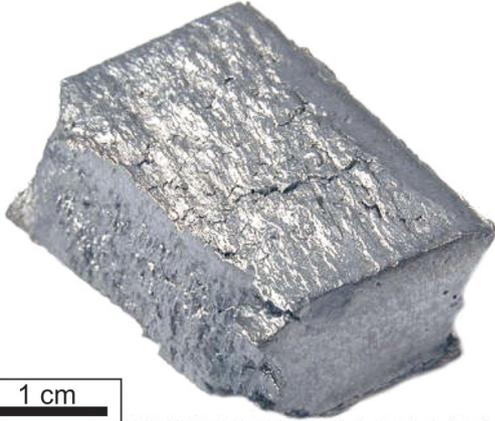
preservado em tubo de Ne

Seu uso mais extensivo é como componente do fósforo vermelho, em cinescópios de televisores a cores e como um ativador de fósforos de ortovanadato de ítrio. Além de ser um agente na produção de vidros fluorescentes, é também utilizado como iluminador muito brilhante em lume de relógio, em associação com estrôncio, alumínio, oxigênio e disprósio, como dopante de alguns tipos de plásticos, na fabricação de lasers e filmes de óxido de zinco. Devido a sua capacidade de absorver nêutrons, este metal está sendo estudado para uso em reatores nucleares.

ELEMENTO/SÍMBOLO

CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÃO

Gadolínio Gd



1 cm

Possui forma hexagonal à temperatura ambiente e cúbica de corpo centrado quando aquecido a 1235 °C. Mostra-se branco prateado, maleável, dúctil com um brilho metálico e é fortemente magnético à temperatura ambiente. Abaixo de uma temperatura crítica de 1,083 °K (-272,067 Celsius) torna-se supercondutor. Possui propriedades metalúrgicas incomuns, pois ligas de F, Cr ou outras com cerca de 1% Gd se tornam mais resistentes à corrosão e a altas temperaturas, além de melhorar a maleabilidade. É usado na manufatura de CDs e memórias de computador e como componente de materiais para a fabricação de telescópios a lasers. Compostos de Gd são usados como ativador de cor em tubos de televisores coloridas e cristais de gadolínio e ítrio têm aplicações em micro-ondas. Em solução, compostos de Gd são usados para realçar imagem em ressonância magnética como contrastes intravenosos.

Térbio Tb



tamanho original = 1 cm

Metal cinza-prateado, maleável, dúctil, suficientemente macio para ser cortado com uma faca, apresenta sistema cristalino hexagonal, mas torna-se cúbico à temperaturas superiores a 1289 °C. É razoavelmente estável no ar. Dentre seus usos estão o de dopante de materiais utilizados em dispositivos semicondutores e estabilizador de células de combustíveis que funcionam em temperaturas elevadas, junto com ZrO₂. Borato de térbio e sódio é usado como material de lasers que emite radiação em 546 nm e óxido de Tb é um ativador da coloração verde em tubos de imagem de televisões coloridas. O Tb também é usado em ligas metálicas para a produção de dispositivos eletrônicos.

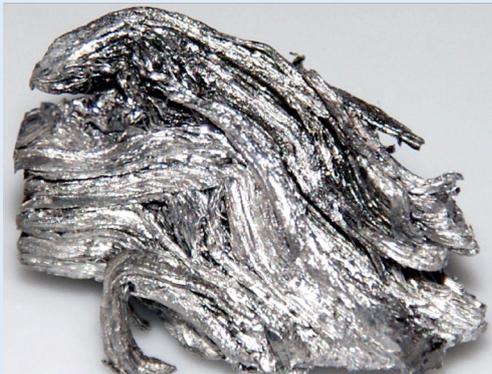
Disprósio Dy



Dendritos de disprósio; fotografia Jurii
tamanho original = 2 cm

Macio o bastante para ser cortado com uma faca, e pode ser processado com máquinas sem emitir faíscas, evitando o superaquecimento. Pequenas quantidades de impurezas podem afetar as características do Dy. É usado, em conjunto com o V e outros elementos, como componente de materiais para lasers. Óxido misto de Dy e Ni é usado em barras de esfriamento em reatores nucleares já que absorve os nêutrons e, mesmo sob bombardeio prolongado, não se contraem e não se dilatam. Alguns calcogênios de Dy e Cd são fontes de radiação infravermelha utilizada no estudo de reações químicas. Também é usado para a fabricação de CDs.

Hólmio Ho



dimensão = 1.5 x 2.5 cm

Por suas propriedades magnéticas incomuns, foi usado no mais forte campo magnético artificial gerado; por absorver nêutrons de fissão nuclear é usado para controlar e moderar as reações nucleares nos reatores nucleares; aditivo em ligas metálicas; seu momento magnético muito elevado é apropriado para a produção de lasers: Ho-YIG (cristal de ítrio e ferro) e Ho-YLF (fluoreto de Y e La) usados em medicina e odontologia; óxido de Ho, amarelo, é utilizado para colorir vidros.

ELEMENTO/SÍMBOLO

CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÃO

Érbio Er



dimensão 1 cm

Sua resistência o faz útil como aditivo metálico em tecnologia nuclear; como um absorvente de nêutrons; como dopante em amplificadores ópticos a fibra (EDFAs); em liga com o V diminui sua dureza e melhora sua condição de ser trabalhado; como filtro fotográfico; óxido de Er, rosado, é usado para tingir vidros e esmalte para porcelanas.

Túlio Tm



cubo = 1 cm³

O alto custo de produção impediu usos comerciais para o Tm, além do laser. Potencialmente o ¹⁶⁹Tm, estável, pode ser usado em materiais magnéticos cerâmicos denominados ferrites (que são usados em equipamentos de micro-ondas) ou bombardeado em reatores nucleares, como fonte de radiação em dispositivos portáteis de raio-X; já o instável Tm-171 possivelmente pode ser usado como fonte de energia.

Ítérbio Yb



peça maior com 1 cm de comprimento

Algumas ligas de Yb tem sido usadas em odontologia. Já o metal, para melhorar o refinamento dos grânulos, a resistência e outras propriedades mecânicas do aço inoxidável. Um isótopo do Yb funciona como fonte de radiação alternativa para máquina de raio-X portátil na ausência de eletricidade.

Lutécio Lu



Dendritos sublimados com pureza superior a 99,995%; cubo = 1 cm³

Metal resistente à corrosão, relativamente estável em presença do ar, é o mais pesado e duro dos ETRs. Também o mais difícil de isolar, o que justifica as poucas utilidades que apresenta. Empregado como catalisador no craqueamento do petróleo e em diversos processos químicos como alquilação, hidrogenação e polimerização. Também usado na medicina nuclear, como oxiortossilicato de lutécio, para ativar cintilador de cério. Partículas de hidroxiapatita associadas ao radioisótopo de massa 177 desse elemento estão sendo utilizadas como fonte de radiação beta menos, para pesquisas em tratamento de tumores, atuando de forma seletiva nas células tumorais e evitando a irradiação de células sadias.

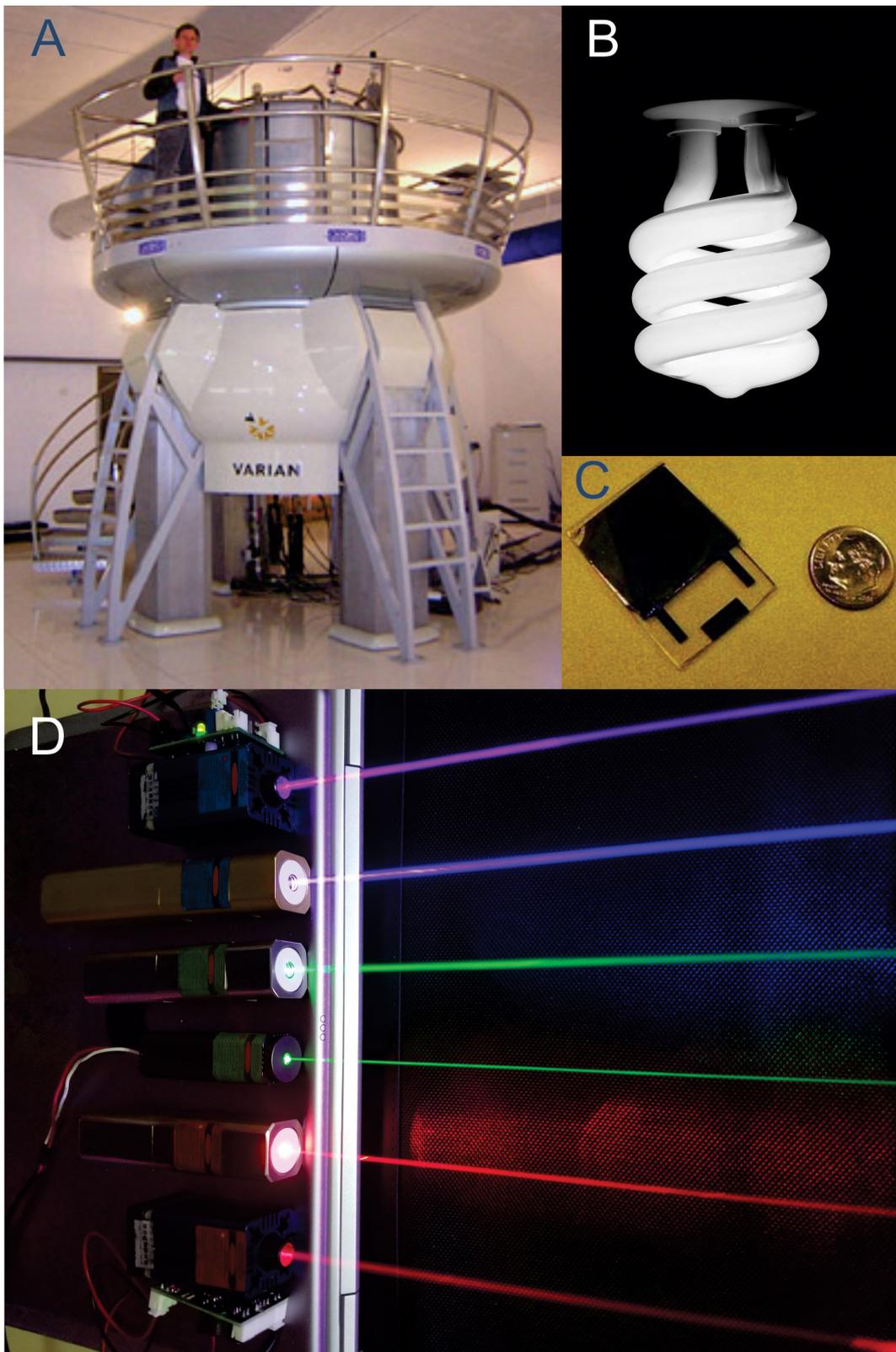


Figura 8. Exemplos de usos dos ETRs: **A)** Aparelho de ressonância magnética nuclear-RMN de 900 MHz com um magneto de 21.2 T no Henry Wellcome Building for NMR (HWB-NMR), Birmingham, GB (Fonte: [Wikipedia](#)); **B)** Lâmpada fluorescente compacta, que faz uso de Tb, melhorando a qualidade da luz branca (Fonte: [Wikipedia](#), autor – Giligone); **C)** Ainda em desenvolvimento, as baterias nucleares já estão do tamanho de uma moeda, mas prometem ser tão finas como um fio de cabelo e poderão oferecer uma densidade de energia seis vezes maior do que as baterias químicas (fonte: [Inovação Tecnológica](#)); **D)** Laser = *light amplification by stimulated emission of radiation* – laser vermelho: 635 nm, 660 nm, laser verde: 520 nm, 532 nm, laser azul: 405 nm, 445 nm (fonte: [Wikipedia](#)).

2. GEOLOGIA

Os minerais minério de ETR ocorrem em ambiente geológico variado como ígneo (magmático + hidrotermal), sedimentar (conglomerados e placer) e secundários (adsorção em argilas residuais e mantos de intemperismo).

Os depósitos ígneos de ETR podem ser agrupados em três categorias principais: carbonatitos, rochas peralcalinas subsaturadas em sílica e granitos diferenciados. Rochas silicáticas peralcalinas podem estar associadas, formando as fases tardias, mas também podem estar relacionadas a fontes e evolução de magmas parentais de origem distinta.

De acordo com Verplank & Van Gosen (2011, *in* Takehara 2015), uma porcentagem considerável dos depósitos de ETR se situa em ambientes intracontinentais e anorogênicos extensionais. A litosfera se afina no processo gerando *rifts*, *grabens*, descontinuidades e sistemas de falhas crustais profundas (Chakhmouradian & Zaitsev 2012). A decompressão adiabática facilita a fusão parcial do manto, originando extensas províncias ígneas com diferentes tipos de magmas subsaturados em sílica e ricos em álcalis. A reativação episódica dessas estruturas origina depósitos de idades diferentes dentro da mesma província.

Nos carbonatitos, dominam as mineralizações de ETR tanto em minerais primários como secundários, ainda que o carbonatito de Loftal (Namíbia) seja enriquecido em ETRP, com xenotima pós-magmática (Chakhmouradian & Zaitsev 2012). Carbonatos e apatitas controlam o enriquecimento de ETR e geralmente os carbonatitos ricos em ferro, como Seis Lagos, Jacupiranga e Lages, possuem os teores mais altos em ETR e são considerados tardios. Segundo Takehara (2015):

‘As fases acessórias como perovskita e pirocloro também podem conter ETR na sua composição e podem influenciar no teor e padrão de ETR se ocorrerem em quantidades substantivas na rocha. Durante o processo de resfriamento do magma, alguns elementos destes minerais são substituídos por outros elementos, liberando os ETR, que são incorporados na monazita, bastnaesita, parisita e em outros minerais secundários’.

Exemplos de depósitos de ETR em carbonatito são os clássicos de Bayan Obo (China) e Mountain Pass (USA), por terem se tornado minas importantes e de grande significado na produção desses elementos. Já no Brasil se destacam os depósitos de Araxá (MG), Catalão (GO) e Barra do Itapirapuã (SP).

Depósitos de ETR geralmente ocorrem com Nb, Y e Zr (Linnen & Cuney, 2005 *in* Takehara 2015) em *plugs*, *stocks* e diques de rochas subsaturadas em sílica e supersaturadas em álcalis (em especial, em sódio) associadas a carbonatito. Os depósitos de Lovozero (Rússia) e Ilímaussaq (Groenlândia) mostram evidências de mineralização magmática, com cumulados de eudialita e loparita. De acordo com Scheibe (1989, *in* Takehara 2015), são os principais minerais concentradores de ETR dessas rochas, sendo a eudialita um mineral concentrador de ETRP. Comumente há evidências de mineralização hidrotermal associada

com a percolação de fluidos ricos em Na; nessa situação depósitos com volume expressivo, mas de baixo teor podem estar presentes (Castor & Hedrick, 2006, *in* Takehara 2015). No Brasil são desse tipo Repartimento (RR) e em Minas Gerais, os depósitos/ocorrências de Salitre I e II e Serra Negra. O Complexo Alcalino de Poços de Caldas não possui carbonatito associado, ainda que, em 1992 Waber (*in* Loureiro & Santos 2013) tenha defendido que originalmente o teve (detalhes no tópico 2.2.1).

Elementos de Terras Raras podem também estar presentes em granitos (e pegmatitos associados) peralcalinos e peraluminosos. Isso ocorre uma vez que os líquidos residuais ricos em F, Li, B e P reduzem a temperatura *solidus* e a viscosidade, facilitando a separação sólido/líquido e, portanto, o enriquecimento do fundido em ETR, além de Sn, Ta e Nb (Linnen *et al.* 2012, *in* Takehara 2015). Destacam-se por serem enriquecidos em xenotima, fergusonita, samarskita e gagarinita, minerais portadores de ETRP, mas também em monazita e alanita, que carregam ETRL e, de acordo com Chakhmouradian & Zaitc (2012), as concentrações de ETR são elevadas (entre 300 e 800 ppm). Takehara (2015) pontua que as características finais da mineralização dependem de processos petrogenéticos finais do magmatismo, da ação de fluidos hidrotermais e também da redistribuição durante o intemperismo. Exemplos brasileiros são os granitos Água Boa e Madeira, que compõem o depósito Pitinga (AM), granito Serra Dourada (GO), Complexo Granítico Costa Marques (RO), todos compondo províncias estaníferas.

Dentre aqueles de origem sedimentar, cita-se Elliot Lake (Canadá) ligado a conglomerados e os depósitos tipo *placer* de Kerala (Índia), Richards Bay (África do Sul) além daqueles presentes nas areias litorâneas dos estados brasileiros de RJ (mina em São Francisco de Itabapoana, onde, até recentemente, se extraía monazita), ES, BA, PI, MA.

Elementos de Terras Raras adsorvidos em argilas formam depósitos significativos e o destaque é Longman, Xunwu (China); além do volume magnífico ainda produz ETR leves e pesados. Já os depósitos residuais – ainda não produtivos – também podem ter volume espetacular e exemplos são Mt. Weld (Austrália); Araxá, Catalão (Brasil); Kangankunde (Malawi).

Além desses depósitos principais, ETR têm sido descritos em veios de quartzo e fluorita polimetálicos e pegmatitos (isto é, ambiente hidrotermal sem associação com rochas alcalinas), como no Burundi, África do Sul, EUA e Canadá e do tipo Iron-Oxide-Cobalt-Copper-Gold-Rare-Earth-Element (IOCG-REE), cujos exemplos são St. François Mountains terrane, SE Missouri (EUA) e Olympic Dam (Austrália), de acordo com USGS (2017) e Carajás (Igarapé Bahia - Brasil), segundo Loureiro & Santos (2013).

A Figura 9 mostra a distribuição no mundo dos principais depósitos de ETR de acordo com a classificação acima e discrimina aqueles que já são minas. Cada um desses ambientes é discutido em subtítulos próprios, para facilitar o entendimento.

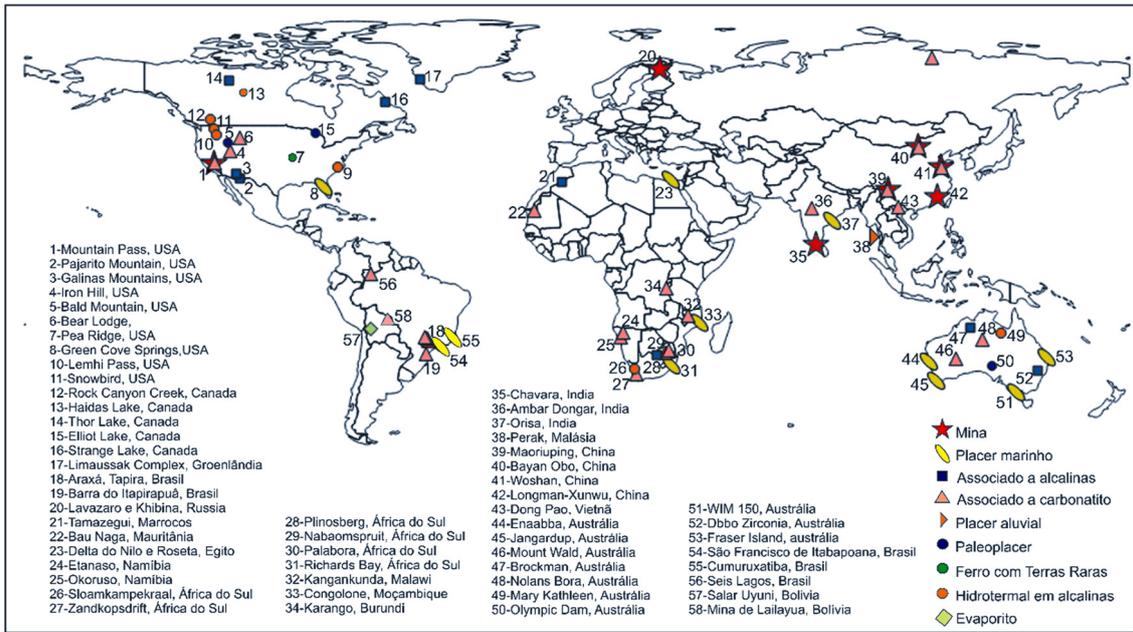


Figura 9. Depósitos e ocorrências de ETRs no mundo, de acordo com sua gênese, destacando-se aqueles que já são minas. Modificado de Paes de Andrade & Arcoverde (2013).

2.1. Geologia dos Depósitos em Minas Gerais

A Tabela 3 apresenta um apanhado dos dados sobre ETR em Minas Gerais e três outros depósitos, por seu significado em termos de volume de minério. São eles Catalão I, Pitinga e Morro de Seis Lagos. Das seis ocorrências/depósitos mineiros listados, três são em carbonatito, um em complexo alcalino com carbonatito subordinado, um em complexo alcalino e um em *placer* de rio. A Figura 10 e a Tabela 4 mostram a localização das principais ocorrências de ETR em Minas Gerais.

Tabela 3. Recursos de ETR presentes em Minas Gerais. Três ocorrências não mineiras (presentes na Figura 9) são também apresentadas por sua significância. Nem todas as ocorrências possuem dados disponíveis e algumas delas mostram dados variáveis a depender do autor.

Depósito/ Ocorrência	Quantidade Mt	Teor (%) e tonelagem de OTR	Fonte	Contexto Geológico
Araxá Área Zero	450	5,9 8.100.000	Lima 2012	Residual sobre Carbonatito
Poços de Caldas	3.000	1,15 34.800.000	Andrade 2014	Residual sobre Complexo Alcalino
Serra Negra	--	>3 200.000	Rocio <i>et al.</i> 2012	Residual sobre Complexo Alcalino com carbonatito
Vale do Sapucaí	17,2	9.700.000 de monazita	Andrade 2014	Placer
Salitre I e II	--	Ocorrência associado à anatásio e perovskita	USGS 2011	Residual sobre Complexo Alcalino com carbonatito
Tapira	5,2	0,03 150.000	Rocio <i>et al.</i> 2012	Residual sobre Carbonatito
Catalão I	120	7,5 30.000.000	Ribeiro 2008	Residual sobre Carbonatito
Pitinga	164	13,60 246.000	Bastos Neto <i>et al.</i> 2005	Granitos alcalinos e rejeitos de cassiterita
Morro de Seis Lagos	2.900	1,50 43.500.000	De Sousa 1996	Residual sobre Carbonatito

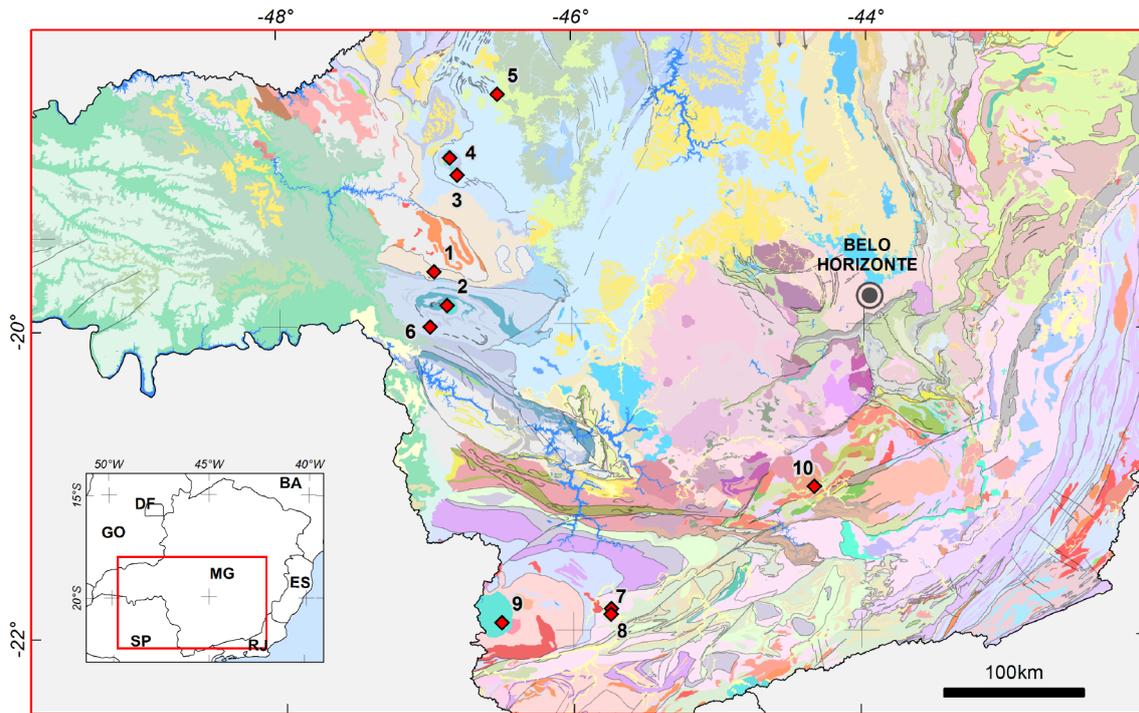


Figura 10. Principais ocorrências de elementos Terras-Raras no estado de Minas Gerais. A numeração se refere aos itens da Tabela 4. Mapa geológico modificado de Pinto & Silva 2014.

Tabela 4. Principais ocorrências de elementos Terras-Raras no estado de Minas Gerais.

TOPONÍMIA	MUNICÍPIO	STATUS ECONÔMICO	SITUAÇÃO	Latitude	Longitude	
1	Complexo do Barreiro	Araxá	Mina	Ativo	-19,6545	-46,93996
2	Complexo de Tapira	Tapira	Mina	Não explotado	-19,875754	-46,85356
3	Complexo de Salitre I	Patrocínio	Não explotado	Não explotado	-19,025725	-46,777336
4	Complexo de Serra Negra	Patrocínio	Não explotado	Não explotado	-18,913243	-46,825546
5	Planalto da Mata da Corda	Patos de Minas	Não explotado	Não explotado	-18,5	-46,5
6	Distrito-sede de Sacramento	Sacramento	Não explotado	Não explotado	-20,015	-46,972
7	Ribeirão Piranga	Turvolândia	Garimpo	Inativo	-21,8628	-45,7389
8	Rio Sapucaí	Turvolândia	Garimpo	Inativo	-21,8983	-45,7394
9	Morro do Ferro	Caldas	Mina	Inativo	-21,948243	-46,498125
10	Oeste de Ibitutinga	Ritápolis	Não explotado	Não explotado	-21,064	-44,3328

2.1.1. Geologia dos Depósitos Alcalino Carbonatíticos

A Figura 11 situa a Província Ígnea do Alto Paranaíba (Almeida 1983), onde se encontram alojados os complexos alcalino-carbonatíticos de Minas Gerais (Serra Negra, Salitre I, II e III, Araxá e Tapira). Em termos gerais, são intrusivos ao longo do lineamento NW Alto Paranaíba, em rochas metamórficas neoproterozoicas da Faixa Brasília e possuem forma circular a ovalada e área que varia entre 15 km² e 65 km². Também compartilham a idade, entre 60 Ma e 90 Ma. Sendo ricos em fluidos, sua instalação na crosta terrestre gera metassomatismo alcalino disseminado, que se traduz como fenitos nas rochas encaixantes e flogopititos no interior dos complexos.

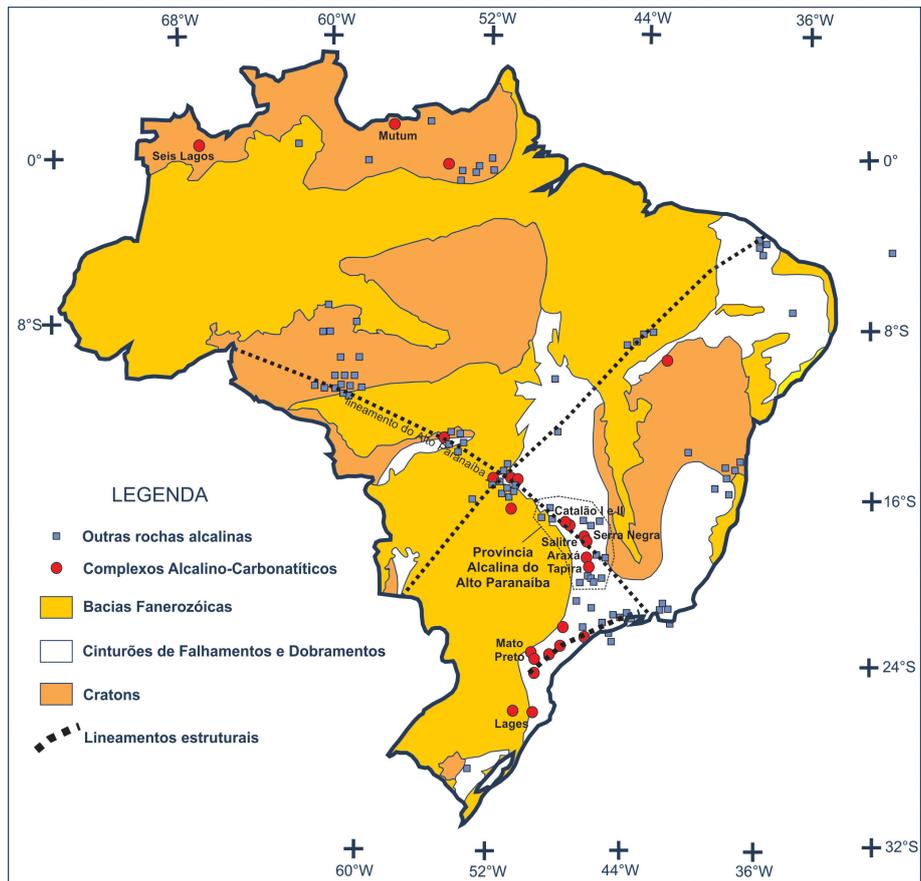


Figura 11. A distribuição dos complexos alcalinos carbonatíticos ressalta a já conhecida associação entre a geração de magmas alcalinos e o controle estrutural dado pelo lineamento do Alto Paranaíba (Modificado de Biondi 2015).

Os complexos alcalino-carbonatíticos associam-se geneticamente a magmatismo alcalino ultrapotássico. Partindo de magmas primitivos de afinidade kamafugítica e sob ação, em proporções distintas, de imiscibilidade de líquidos e/ou cristalização fracionada, originam as séries de diferenciação bebedourítica, foscorítica e carbonatítica (Brod *et al.* 2004).

A primeira dessas séries produz rochas com proporções variadas de olivina, clinopiroxênio, apatita, perovskita, magnetita e flogopita, por cristalização fracionada, podendo ocorrer sienitos nos termos finais de diferenciação. Brod *et al.* (2004) descrevem feições de acamamento magmático, com intercalações de bebedourito, apatitito, magnetitito ou perovskitito nos complexos de Tapira e Salitre, que não seriam raros nessa série.

Já a série foscorítica, originada na diferenciação de magmas fosfáticos, compõe dunitos, apatititos, magnetititos e nelsonitos (apatita + magnetita). Estes termos, assim como foscorito, estão presentes no complexo de Araxá (Brod *et al.* 2004). Foscorito é definido como uma rocha constituída por proporções equivalentes de apatita, magnetita e olivina, além de flogopita e carbonato.

A série carbonatítica é definida com base nas proporções modais dos diferentes carbonatos presentes, seguindo a recomendação de Le Maitre *et al.* (2002): calcita

carbonatito, dolomita carbonatito e ferro carbonatito. O complexo de Araxá é predominantemente dolomítico, enquanto os demais mostram-se mais calcíticos.

2.1.1.1. Complexo Alcalino Carbonatítico de Araxá

Localizado a cerca de 5 km a sul de Araxá (19°40'00,61"S, 46°55'55,23"W), é um dos complexos mais importantes da Província do ponto de vista econômico. Além da maior reserva de Nb do mundo, possui importantes reservas de P, águas minerais e ETR. É dominado por dolomita carbonatito, com proporções subordinadas de carbonatito calcítico, glimerito, foscorito, lamprófito e silexito. A auréola de fenitização (Figura 12) chega a uma largura de 2,5 km. Outro importante processo de alteração ocorreu por intemperismo, que gerou um manto complexo que varia de uns poucos metros até 250 metros. Nele se concentraram os minerais resistentes à alteração, dando origem aos depósitos minerais (Brod *et al.* 2004). Os dados mais atuais disponíveis sobre as reservas são:

- **Nióbio** 462 Mt @ 2,48% Nb₂O₅;
- **Fosfato** 210 Mt @ 10% P₂O₅;
- **Bário** 51 Mt @ 7,26% BaSO₄;
- **ETR** 14,20 Mt @ 3,02% de OTR contido (pertencente à CBMM);
- **ETR** 7,73 Mt @ 2,35% de OTR contido (pertencente à CODEMIG);
- **ETR** 6,3 Mt @ 5,01% (2% de *cut-off*, pertencente à MBAC Fertilizantes Corp).

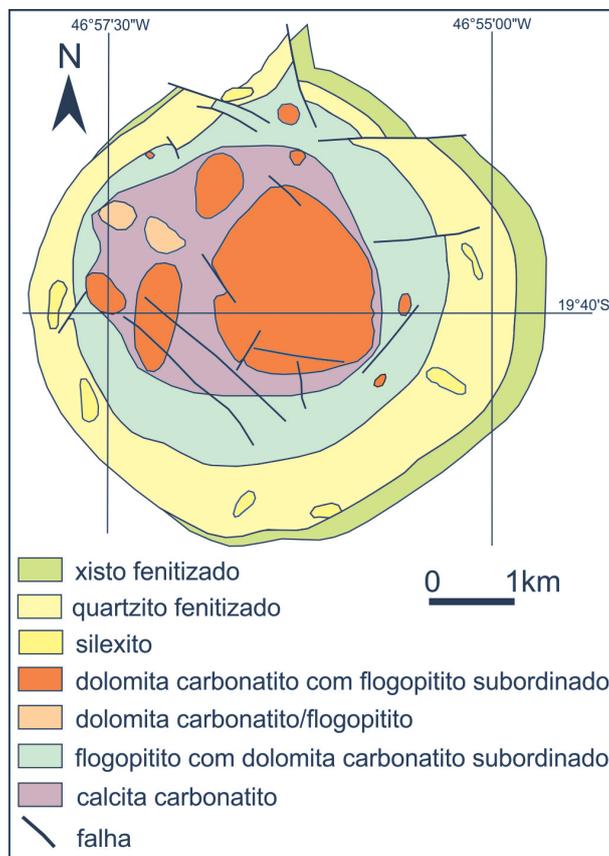


Figura 12. Mapa geológico do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Araxá, adaptado de Silva *et al.* (1979).

Os três primeiros dados são de acordo com Brod (2012), os dois seguintes disponibilizados em Andrade (2013) e o último por MBAC (2012). Segundo Takehara & Silveira (2014), a partir da década de 2010, a CBMM está extraíndo compostos de ETR do resíduo do processamento de Nb com capacidade atual de 1.200 t/ano de sulfato duplo e hidróxido de ETR.

As mineralizações concentram-se de forma isolada, o que facilita muito a mineração; na porção central encontra-se o depósito de Nb, enquanto na porção noroeste se situa o de P e, ao norte, estão concentradas as mineralizações de P, U e ETR (Torres 2008, *in* Takehara 2015). Mas em cada uma dessas mineralizações os demais minérios potencialmente podem ser subprodutos econômicos.

No processo de intemperismo, as fases carbonáticas e silicáticas foram transformadas em argilominerais do grupo da caulinita enquanto a apatita primária foi acumulada. O avanço do processo resulta na transformação da apatita em monazita pela substituição do cálcio por ETRs presentes nos fluidos percolantes, que trazem ETR especialmente das fases carbonáticas (Torres 2008, *in* Takehara 2015). Apatitas secundárias e aluminofosfatos, em especial a gorceixita ($BaAl_3(PO_4)_2(OH)_2$), além de hidróxidos de ferro, são os principais carreadores de ETR. Nos silexitos há ainda a presença de monazita.

2.1.1.2. Complexo Carbonatítico de Tapira

O Complexo Alcalino Carbonatítico de Tapira (Figura 13) localiza-se a norte da cidade homônima, cerca de 30 km a SE de Araxá nas coordenadas 19°52'04,46"S, 46°51'16,90"W. Consiste de um corpo intrusivo elíptico alongado na direção N-S, encaixado em rochas quartzíticas do Grupo Canastra, com área de 35 km². Associa-se a fraturamentos regionais paralelos e profundos com direção geral NW-SE e a fraturas radiais e concêntricas e estrutura dômica, locais.

As litologias presentes são da série bebedourítica e da série carbonatítica. Na primeira, predominam bebedouritos e clinopiroxenitos, com enriquecimento em apatita, magnetita e perovskita (entre 8% a 10%). Brod *et al.* (2004) interpretam bandas monominerálicas presentes como produtos de cumulos. Diopsídio, flogopita, melanita e titanita completam a mineralogia, cuja textura varia de fina a grossa e localmente pegmatítica. Peridotitos e dunitos, além de diques de traquitos e lamprófiros, ocorrem de forma subordinada. Sienitos, presentes no centro norte da intrusão, indicam quão longe foi o processo de diferenciação. Os carbonatitos se distribuem em cinco corpos e são compostos de 90% de calcita e 10% de minerais acessórios, tais como magnetita, apatita, flogopita, pirocloro e, subordinadamente, barita e sulfetos tardios. Dolomita carbonatitos são restritos a veios tardios. Os processos metassomáticos geraram flogopitito (flogopita+magnetita+dolomita) no contato carbonatito/ rochas ultramáficas e fenito (com piroxênio sódico e feldspatos) nos quartzitos encaixantes.

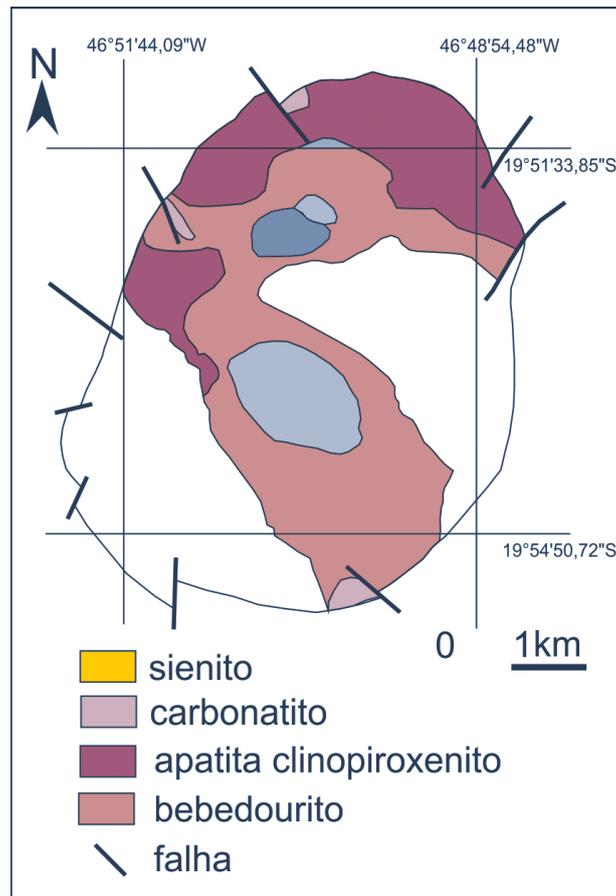


Figura 13. Complexo Alcalino Carbonatítico de Tapira – arcabouço geológico baseado em testemunhos de sondagem, modificado de Brod (1999).

Já os processos intempéricos deram origem a um manto com espessura média de 30 metros, mas que atinge localmente 200 metros. A mineralização é tipicamente eluvial e carrega um dos maiores depósitos de fosfato do Brasil. Subordinadamente, possui titânio, nióbio, ETR (em especial, Ce e La), associados à alteração do carbonatito, e vermiculita. Os minerais de minério são apatita, anatásio, bariopirocloro e fosfatos de ETR (Melo 1997). O manto de intemperismo possui a seguinte zonização, do topo para a base (Figura 14):

- i. Zona estéril, de cor castanho-avermelhada, enriquecida em óxidos/hidróxidos de ferro, e argilas, com menos de 5% P_2O_5 e de 15% TiO_2 ;
- ii. Zona mineralizada em titânio, de cor esverdeada, contendo mais de 15% TiO_2 e mais de 5% P_2O_5 , fazendo a transição entre a zona rica em titânio e a zona rica em fosfato;
- iii. Zona mineralizada em fosfato, com menos de 15% TiO_2 , e com mais de 5% P_2O_5 .

Atualmente, só o fosfato está sendo beneficiado pela VALE, em Tapira e, de acordo com VALE (2014, *in* Takehara 2015), é a maior mineração de rocha fosfática da América Latina atualmente, com capacidade produtiva de 2,17 Mtpa e previsão de vida útil de 65 anos de produção. Os dados mais atuais disponíveis sobre as reservas são:

- **Fosfato** - (P_2O_5 solúvel) - 744 Mt @ 8,35% P_2O_5 com teor de corte de 5,0% P_2O_5 + 637 Mt @ 8,20% P_2O_5 (Loureiro 1988);

- **Titânio** (minério de anatásio) - 191 Mt @ 21,9% TiO₂ com teor de corte de 15,0% TiO₂ + 233 Mt @ 14,34% TiO₂ (Loureiro 1988);
- **Nióbio** – 113 Mt @ 0,9% Nb₂O₅ com teor de corte de 0,5% Nb₂O₅ + 53 Mt @ 0,36% Nb₂O₅ (Melo 1997);
- **ETR** 150 mt @ 0,03% de OTR (Rocio *et al.* 2012) ou 800 a 900 mt @ 1 a 10% de OTRtotal (Loureiro & Santos 2013).

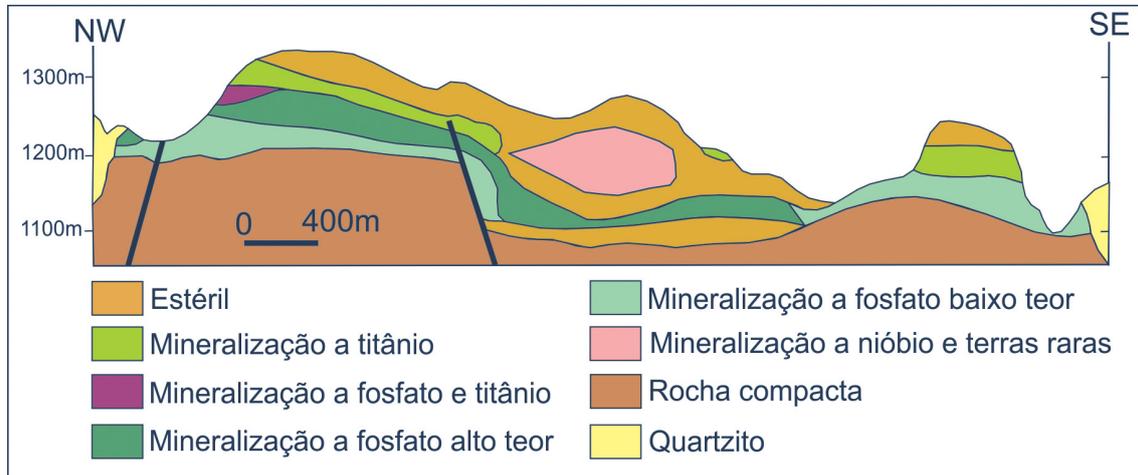


Figura 14. Esboço geológico dos horizontes mineralizados no Complexo Alcalino- Carbonatítico de Tapira, segundo Melo (1997) com destaque para a mineralização de nióbio e terras raras (Lantânio e Cério), em cor rosa.

Ainda segundo Melo (1997), a geração dos depósitos minerais está relacionada com processo de intemperismo da rocha matriz, pela solubilização e lixiviação dos carbonatos e minerais máficos. Ela cita diferentes autores, com diferentes interpretações sobre o processo de enriquecimento em ETR, mas todos concordam com o enriquecimento supergênico: Loureiro (1994) associa a ocorrência de ETR com o minério de anatásio, com teores oscilando entre 1 a 10% de TR₂O₃, com o que concordam Soubiès *et al.* (1991), para quem a perovskita seria o principal mineral portador de ETR na rocha mãe (TR₂O₃ = 1,9%). Já para Melo (1997), o Nb₂O₅ está associado com ETR na rocha fresca mineralizada, enquanto para Ferrari (2000, *in* Takehara 2015) a apatita teria importante papel na concentração dos ETRs, já que identificou três gerações de apatitas neste depósito (primárias, hidrotermais e supergênica) e as secundárias apresentam teores de ETR (0,1 a 0,4% de TR₂O₃) superiores aos das primárias.

2.1.1.3. Complexo Alcalino Carbonatítico de Serra Negra

Situado a 10 km a leste da cidade de Patrocínio, nas coordenadas 18°55'S, 46°50'W, o Complexo de Serra Negra intrudiu quartzitos do Grupo Canastra há 83 Ma, deformando e fraturando intensamente essas rochas e permitindo o desenvolvimento da belíssima estrutura dômica vista hoje em fotos aéreas e imagens de satélites, mesmo por uma pessoa leiga em leitura de imagens (Figura 15). Possui 10 km de diâmetro (78,5 km²) e está envolto por anéis concêntricos de quartzito e recoberto por manto de intemperismo laterítico com espessura média de 150 metros. Aproveitou a grande zona de fraqueza de direção NW para

se instalar e uma análise das estruturas regionais mostra persistência de fraturas NW, além de fraturas radiais e concêntricas.

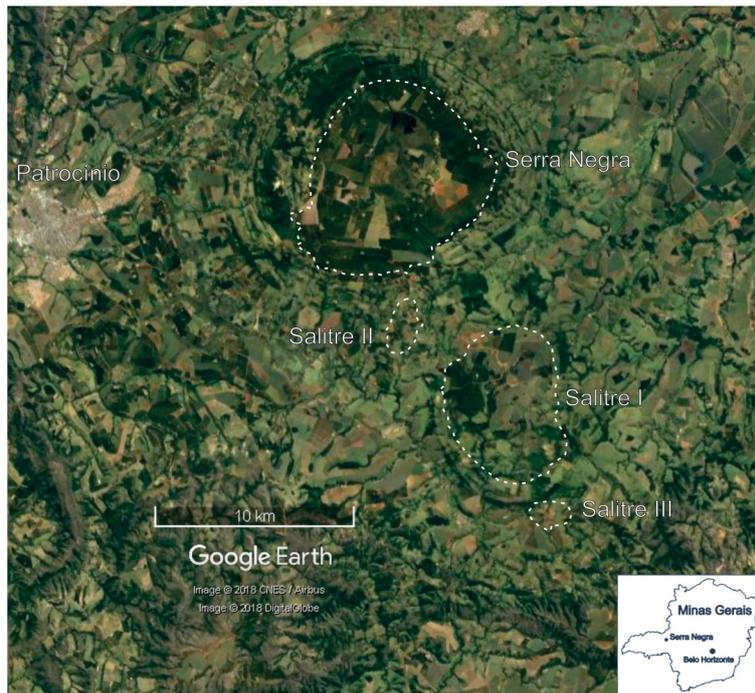


Figura 15. Imagem de Satélite dos Complexos Serra Negra e Salitre I, Salitre II e Salitre III e sua localização no mapa de MG, à direita. A imagem mostra também a cidade de Patrocínio, a NE.

A litologia dominante é o dunito (serpentinito), mas também estão presentes, em ordem decrescente de importância, carbonatito dolomítico, carbonatito calcítico, perovskita bebedourito, apatita cálcio carbonatito, flogopita picrito, traquito, além de brechas silicáticas e silexito, de acordo com [Brod *et al.* \(2004, Figura 16\)](#).

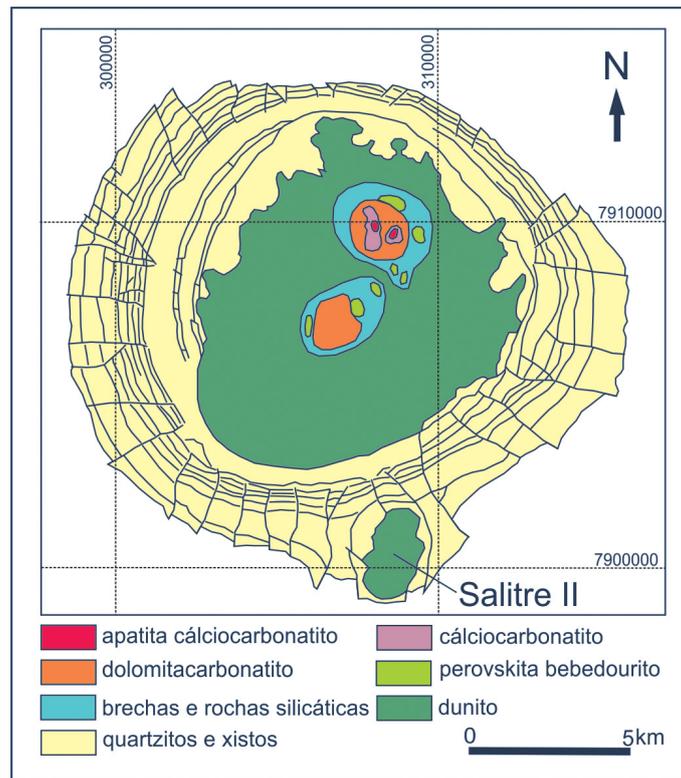


Figura 16. Geologia do Complexo Alcalino Carbonatítico de Serra Negra. Modificado de Brod *et al.* (2004).

Afloramentos frescos são muito raros, mas Grasso (2010, *in* Takehara & Silveira 2014) indica ser o dunito formado por cumalados finos, com predomínio de olivina e Cr-magnetita, flogopita aluminosa e carbonato intercumulus de forma subordinada. Ainda segundo esse autor – e com base em furos de sonda – os carbonatitos dominam a parte central e norte do Complexo como cumulado de dolomita (\pm magnetita, flogopita e barita) na forma de pequenos plugs e diques com textura variando de grossa a fina. Essas intrusões geram auréolas brechadas vistas na Figura 16. Já os apatita cálcio carbonatitos passam a cumalados foscoríticos, inicialmente decimétricos, mas que atingem dezenas de metros em profundidade; tem textura granular e com apatita e magnetita (tardia) como fase cúmulos e carbonato como intercúmulus. Diferentemente dos anteriores, esse Complexo não gera fenitos; localmente é gerada uma silicificação, associada ao seu alojamento.

O conhecimento que se tem do complexo não permite estabelecer perfis característicos da cobertura eluvionar que detém a mineralização supergênica. O Complexo tem potencial especialmente para Ti. Entretanto, como já discutido no item anterior sobre o Complexo de Tapira, o mineral de minério é o anatásio e os processos metalúrgicos existentes não permitem a extração do Ti. Os dados disponíveis sobre as reservas são:

- **Titânio** (minério de anatásio) – 200 Mt @ 27,68% TiO₂ (CBMM 1984);
- **Fosfato** - (P₂O₅ solúvel) – Medida + Indicada = 228 Mt @ 10% de P₂O₅, totalizando 22,8 Mt de P₂O₅ contido (Fonseca 2012);
- **ETR** 0,9% OTR nos concentrados de Ti (Kamitani & Hirano 1990, *in* Takehara 2015); 3% ETR nos concentrados de Ti (Rocio *et al.* 2012);

- Os ETR estão contidos na apatita e no anatásio. Nos aluviões foram encontrados ainda monazita e xenotima, as quais estão associadas com as rochas alcalinas, principalmente na porção oeste do complexo (Torres 1977, *in* Takehara 2015).

2.1.1.4. Complexos Alcalino Carbonatíticos de Salitre I, II e III

A Figura 15 mostra a localização dos complexos de Salitre I, II e III, ao sul do Complexo de Serra Negra (19°00'S, 46°47'W). Estão intrudidos em quartzitos do Grupo Canastra que foi alçado, deformado e fenitizado. Nesse processo de intrusão, as rochas do Grupo Bambuí, que recobrem as do Grupo Canastra e que dominam na área, muito mais frágeis, foram igualmente deformadas na forma dômica e, posteriormente, erodidas, permitindo a atual exposição dos Complexos. Salitre I, Salitre II e Salitre III, que possuem respectivamente área de 35 km², 2,6 km² e 2 km². Os três possuem forma oval, estão ligados ao amplo fraturamento NW e a fraturas radiais e anelares locais, essas últimas frequentemente preenchidas por carbonatito e foscorito (Figura 17).

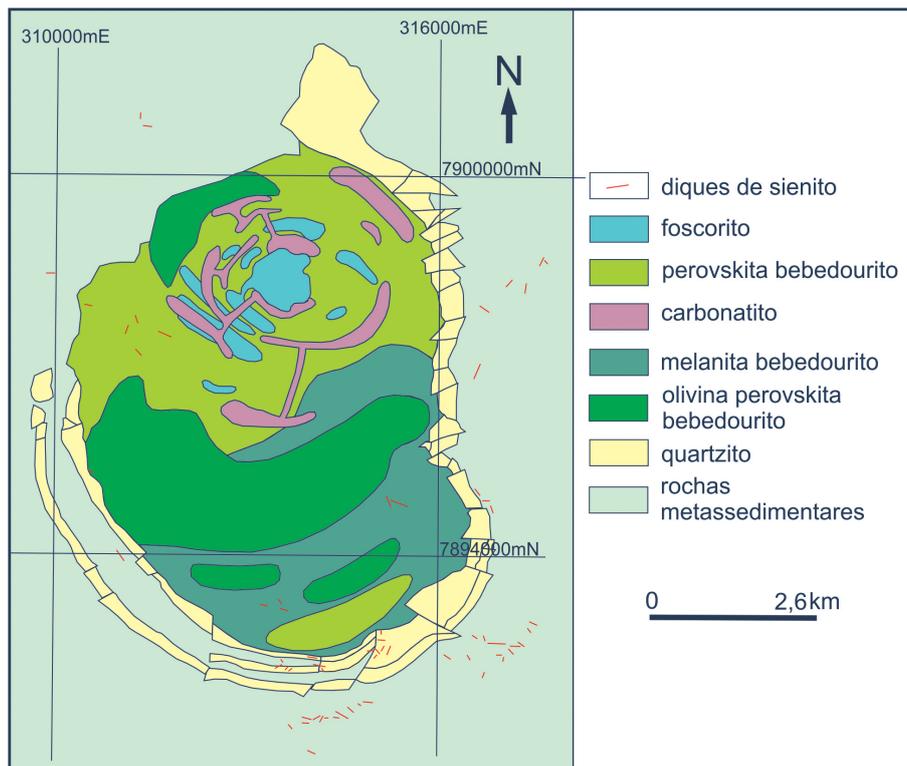


Figura 17. Mapa geológico de Salitre I, de acordo com Barbosa (2009), onde fica nítida a disposição anelar e concêntrica dos diques de foscorito e carbonatito.

Os dois primeiros são compostos por intrusões múltiplas de bebedouritos, carbonatito e foscorito, em ordem decrescente de volume, enquanto Salitre III é dominado por piroxenitos, com foscorito subordinado. Os bebedouritos tendem a formar cumalados que podem ser mais ou menos ricos em perovskita e melanita. De acordo com Barbosa (2009), os diques anelares e concêntricos de foscorito e carbonatito (calcítico) mostram íntima conexão e fazem parte de enxames de diques. Brod *et al.* (2004) reportam variações composicionais significativas nas ultramáficas, ora mais ricas em olivina, ora em apatita ou

perovskita. Os três complexos são recobertos por solo laterítico que pode alcançar espessura de 100 metros.

A mineralização nesses complexos é do tipo supergênica e os depósitos são de fosfato e titânio. Os minérios de fosfato foram subdivididos em seis tipos por Uliana (2010, *in Takehara 2015*): apatítico, foscorito intemperizado, foscorito silicificado, piroxenito, piroxenito intemperizado e zona de mistura. O mineral de titânio no solo residual é o anatásio, provavelmente produto de alteração da perovskita. Os ETR são muito subordinados e ocorrem associados à apatita, à perovskita, ao anatásio e à monazita. Além de não serem expressivos como P e Ti, os ETR estão associados a elementos radioativos (U e Th) e, ainda, são liberados em granulometria muito fina, o que dificulta a recuperação.

Os dados disponíveis sobre as reservas são:

- **Fosfato** - (P_2O_5 solúvel) - 852 Mt @ 10,7% P_2O_5 (Melo 1997);
- **Titânio** (minério de anatásio) - 694,3 Mt @ 17,5% TiO_2 (Melo 1997);
- **Nióbio** – 166 Mt @ 0,73% de Nb_2O_5 (Melo 1997).

A situação atual, segundo FOSFERTIL (2008, *in Takehara 2015*) é que a VALE (atual MOSAIC Fertilizantes) estima produzir 2,0 Mtpa por mais de 100 anos de fosfato no Complexo de Salitre I.

2.2. Complexos alcalinos

2.2.1. Complexo Alcalino de Poços de Caldas – Morro do Ferro

O complexo alcalino de Poços de Caldas (21°55'S, 46°34'W) é, segundo Loureiro & Santos (2013), um dos mais estudados do mundo e foi gerado por múltiplas atividades magmáticas, tendo como variedades petrográficas dominantes nefelina-sienitos, tinguaitos, fonólitos e foiaítos (intrusivos), além de tufo, lavas e brechas vulcânicas (Figura 18A). Sua estrutura, de cerca de 800 km² de área, se destaca no relevo, estabelecendo um platô com altitude média de 1300 metros. Possui formato aproximadamente circular e está intrudido em gnaisses, migmatitos e granulitos de idades arqueanas e, parcialmente, em arenitos da Formação Botucatu, de idade Juro-Cretácea. Regionalmente está associado a fraturas paralelas e profundas com direção geral NW-SE e, localmente, a fraturas radiais e concêntricas. As fraturas locais podem estar preenchidas, formando diques e vênulas de fonólitos e material hidrotermalizado. O manto de intemperismo que recobre o complexo possui espessura variável entre 20 e 50 metros, podendo alcançar centenas de metros localmente.

O Morro do Ferro é uma estrutura elevada dentro do complexo, situada a 15 km ao sul da cidade de Poços de Caldas e alcança a altitude de 1.540 metros (Figura 18B). É constituído e sustentado por uma rede de veios e vênulas de magnetita em rochas totalmente decompostas por atividade hidrotermal e processos de brechação, além de processos intempéricos posteriores, aos quais a mineralização de tório e de ETR está relacionada (Takehara 2015).

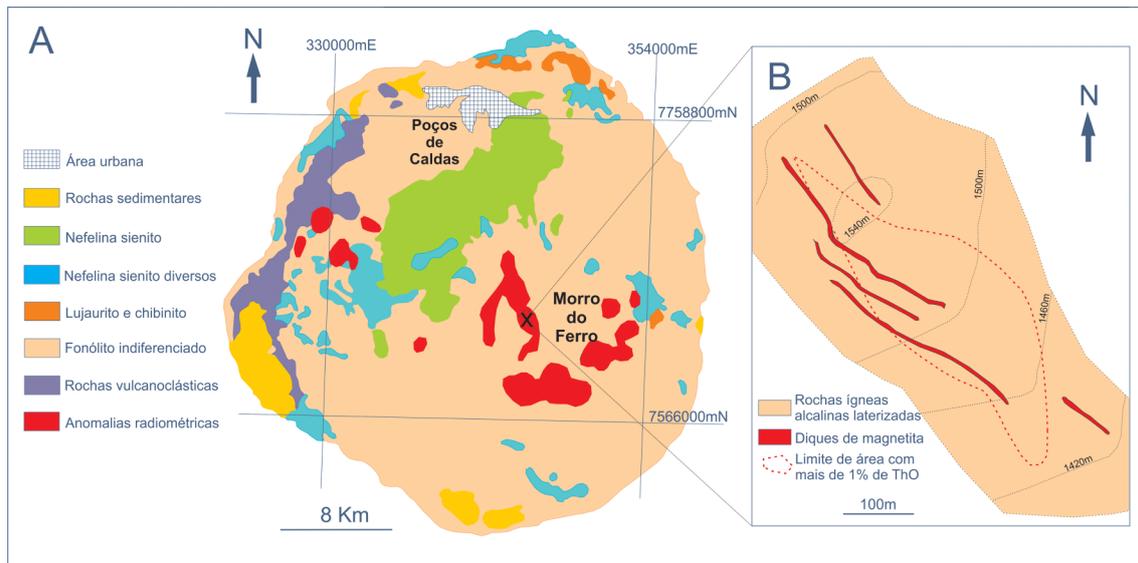


Figura 18. Complexo Alcalino de Poços de Caldas, modificado de Wedow Jr. (1967) e Ricardi (2010), ambos in Takehara 2015; **A)** mapa geológico com a localização da cidade de Poços de Caldas e as anomalias radiométricas; **B)** detalhe geológico e topográfico do Morro do Ferro.

De acordo com Loureiro & Santos (2013), uma grande variedade de minerais-minério muito ricos especialmente em Ce, Nd, La, Th e Zr, foram identificados no solo síltico-arenoso e localmente ferruginoso que recobre o Morro do Ferro. Esse solo alcançou 425 metros em um furo de sonda realizado pela ex-Nuclebrás. Nessa profundidade ocorre um tinguáito hidrotermalizado e sericitizado, conhecido como “rocha potássica” pelos estudiosos do local. Loureiro & Santos (2013) informa também que, em 1992, Waber, estudando essa área, propôs a existência original de um carbonatito cuja intrusão teria sido responsável pela fenitização dos fonólitos e tinguaitos já existentes e que, por sua vez, teria sido destruído pelos processos de intemperismo e laterização subsequentes. De acordo com essa versão, o carbonatito teria sido a fonte primária dos ETRs e tório. Por sua vez, Takehara (2015) cita Miekeley e colaboradores que, em 1982, definiram a rocha hospedeira do minério como bauxita ferruginosa, com alta concentração de gibsita, hematita e limonita (essas provenientes da oxidação da magnetita), refletindo o intenso processo de lixiviação e oxidação.

Mais recentemente foi definida uma jazida de 3,5 milhões de toneladas de minério (Brasil Mineral 2017a). Com um teor médio de 3,9% de OTR (praseodímio, disprósio, európio e neodímio), o volume de minério em óxidos chega a 138.500 toneladas. Ainda de acordo com essa fonte, duas grandes vantagens do depósito são a ausência de estéril e os baixos teores de contaminantes que não ultrapassam 0,5% de tório e menos de 55 ppm de urânio.

2.2.2. Terras raras em Bambuí (Complexos Alcalinos?)

A cidade de Bambuí, distante 270 km a oeste de Belo Horizonte, faz parte de uma área parcialmente coberta por sedimentos terciários (argilitos, siltitos, conglomerados), que podem alcançar espessuras de 30 a 40 m. Esses sedimentos recobrem litologias do grupo Bambuí que, segundo Loureiro & Santos (2013), estão localmente cortadas por estruturas filonianas e diatremas, preenchidos por material brechoide. Estudos realizados pela CNEM

(Comissão Nacional de Energia Nuclear), em 1969, em uma área recoberta por levantamento aerogamaespectrométrico, com 2000 km², detectaram 131 anomalias radiométricas, sendo que 12 delas correspondiam, seguramente, a diatremas. Também segundo esse autor, a Nuclemon realizou o reconhecimento das 18 anomalias mais representativas dessa área e uma delas (BMB-21) mostrou concentração de 6,2% para a associação TR₂O₃ e ThO₂. Não há mais detalhes sobre essa ocorrência.

2.3. Rochas Vulcânicas Alcalinas

2.3.1. Rochas alcalinas Mata da Corda

O Grupo Mata da Corda compõe um planalto com cerca de 2200 km² de área no flanco leste do Arco do Alto Paranaíba (Figura 19), cuja região mais central se situa nas coordenadas (18°30'N, 46°30'W). Caracteriza-se por rochas de afinidade kamafugítica que afloram na forma de plugs subvulcânicos, derrames e depósitos piroclásticos (Formação Patos) e epiclásticos (Formação Capacete), sendo os termos explosivos os dominantes (Seer *et al.* 1989). Todo o planalto é recoberto por um manto de intemperismo rico em ferro e predominantemente argiloso, mas muito fértil para a agricultura. Crostas lateríticas são comuns nessa paisagem.

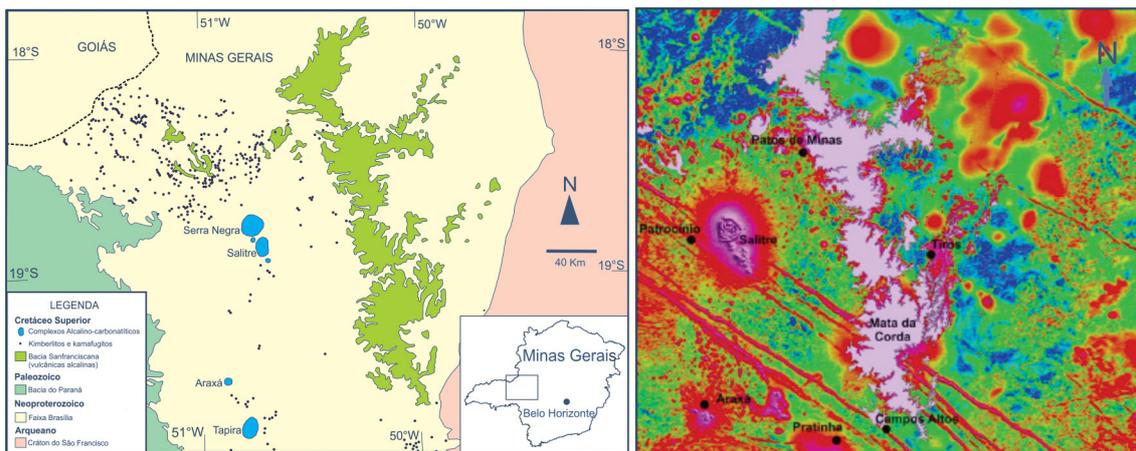


Figura 19. Região de ocorrência do Grupo Mata da Corda: à esquerda, em verde, modificado de Heineck *et al.* (2004); à direita, em rosa claro na imagem do sinal analítico (magnetismo) de acordo com Rolim (2014).

Do ponto de vista geológico, é possível afirmar, com base na recorrência de níveis piroclásticos – tufo, lapilitos e brechas – que o vulcanismo se deu em pulsos repetidos. As rochas de afinidade kamafugítica são mafuritos e uganditos, isto é, rochas ultrabásicas, com feldspatoides no lugar de feldspatos, abundante clinopiroxênio, titanomagnetita e perovskita (Melo 2012, *in* Takehara 2015). Seer *et al.* (1989) reportam a presença, nas rochas piroclásticas, de fragmentos dessas mesmas rochas além de tufo vítreo e álcali-piroxênio basalto, fenitos e sienitos; esses três últimos são localmente significativos, o que pode estar sugerindo a presença de carbonatito em profundidade. No entanto, esses autores chamam a atenção que nenhum bloco de carbonatito foi ainda descrito na área. Mas a suposição é confirmada por dados geoquímicos (Brod *et al.* 2000). Não raramente se observa a presença de diques kamafugíticos cortando a sequência piroclástica.

Rolim (2014) apresenta o perfil estratigráfico da Figura 20, no qual está destacada a distribuição dos elementos químicos de interesse econômico. Nele se observa que o fósforo se concentra nos termos kamafugíticos alterados, na forma de fluorapatita, gorceixita e wavellitita. Segundo Rolim (2014), esses minerais podem ser primários, hidrotermais e/ou intempéricos. O Fe e o Ti se concentram especialmente na laterita e no saprólito, mas também no kamafugito alterado, na forma de Ti-magnetita e anatásio. Ainda segundo esse autor, ETR seriam subprodutos do processamento de Ti.

Com relação ao aproveitamento, Rolim (2014) destaca que há um volume muito expressivo de ferro e titânio. Ainda que seja de fácil concentração, com bons teores e grande volume, o ferro apresenta problema de mercado e logística de transporte deficiente. Além desses aspectos, a presença de contaminantes radiogênicos também complica o aproveitamento econômico. Os fatores dificultadores do aproveitamento do fosfato são a falta de geometria definida e variação aleatória de teores. Por fim, em relação aos ETR, razão primeira desse texto, pode-se dizer que seriam aproveitados como subprodutos do Ti; em seu favor, apresentam teores significativos de ETRP, o que eleva seu valor comercial.

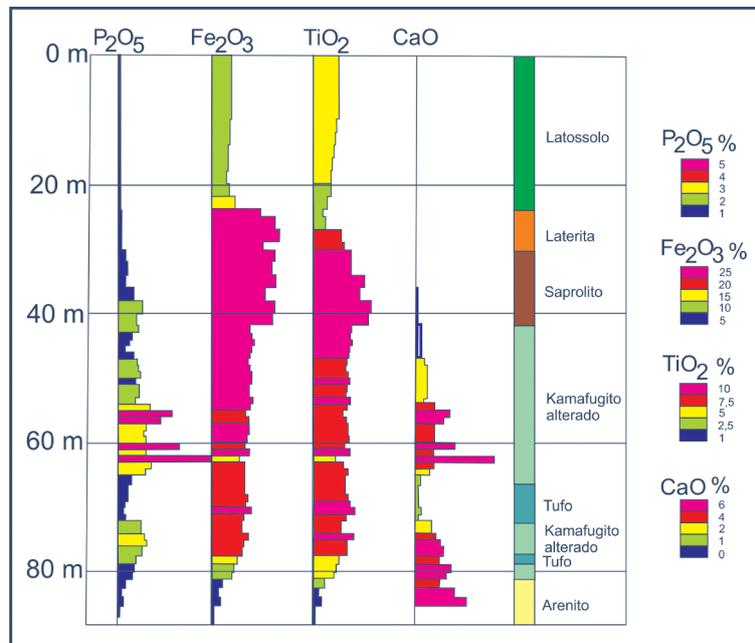


Figura 20. Distribuição de P, Fe, Ti e Ca no perfil estratigráfico do furo de sondagem PMC-FD-0020 da Vicenza Mineração (modificado de Rolim 2014).

2.4. Depósitos em granitos (e pegmatitos associados) peralcalinos e peraluminosos

2.4.1. Pegmatitos na região de São João del Rei (MG)

A presença (e garimpo) de cassiterita e columbotantalita em pegmatitos e depósitos elúvio-aluvionares da região de São João del Rei é conhecida desde a década de 1940. Os pegmatitos ocorrem na cúpula de granitos e variam em atitude de sub-horizontal a subvertical. A área de ocorrência é alongada na direção N70°W e se estende entre os

meridianos 43°45'W e 44°45'W, abrangendo os municípios de Lavras, São João del Rei, Ritópolis, Prado e Resende Costa. De acordo com [Loureiro & Santos \(2013\)](#) “Chama-se a atenção para o fato de que mediante a utilização de etapas de peneiramento, ser possível obter concentrados ricos de granada (54,45%) + tantalita (9,14%) + cassiterita (6,92%) + monazita (2,24%)”.

Já ao final da década de 1940, Paulo Rolf e, na década de 1950, Djalma Guimarães (ambos de acordo com [Loureiro & Santos 2013](#)), alertaram para a presença de xenotímio e monazita nessas litologias. Todavia, não foram encontradas informações mais atualizadas ou detalhadas a respeito.

2.5. Depósitos em *placers* fluviais

Os *placers* fluviais têm recebido pouca atenção no Brasil, ainda que seu potencial seja nada desprezível, em especial se pesquisados do ponto de vista de ocorrências poliminerálicas. O vale do rio São Gonçalo do Sapucaí é um exemplo.

2.5.1. São Gonçalo do Sapucaí (MG)

O depósito situa-se ao longo do rio São Gonçalo do Sapucaí e abrange os municípios de Turvolândia, Cordislândia, São Gonçalo do Sapucaí, Careaçu, Silvianópolis, São Sebastião da Bela Vista e Pouso Alegre, no sul de Minas Gerais. Formado por camadas de cascalho e areia tanto na várzea quanto no leito atual (aluviões) do rio, o depósito é considerado de idade Quaternária.

Segundo [Loureiro & Santos \(2013\)](#), pesquisas realizadas em 1989, indicaram uma espessura média da camada de leito de 3,5 metros e ausência de estéril. Nos depósitos de várzea, os paleocanais mostram espessura média de 6,7 m, dos quais 3,6 metros são predominantemente argila estéril.

Os ETRs concentram-se na monazita e o depósito conta ainda com concentrações de ilmenita, zirconita e ouro, perfazendo um total de 27,6 Mt de minério ([Takehara 2015](#)). Isso caracteriza um depósito de pequeno porte. Souza e Paixão (1989, *in* [Loureiro & Santos 2013](#)) elaboraram uma tabela (Tabela 5) com as reservas do depósito e um croqui sobre o plano de lavra e de recuperação ambiental, mostrado na Figura 21. A Mineração Trindade S.A. (SAMITRI), detentora inicial dos direitos minerários, repassou as reservas para a VALE.

Tabela 5. O depósito de minerais pesados no vale do rio Sapucaí, de acordo com Souza e Paixão (1989, *in* [Loureiro & Santos 2013](#)).

ROM	52.116.000 t	Distribuição de Minerais Pesados
Ilmenita	631.800 t	85,30%
Zircão	70.700 t	10,75%
Monazita	29.300 t	3,95%
Ouro	50 mg/m ³	---

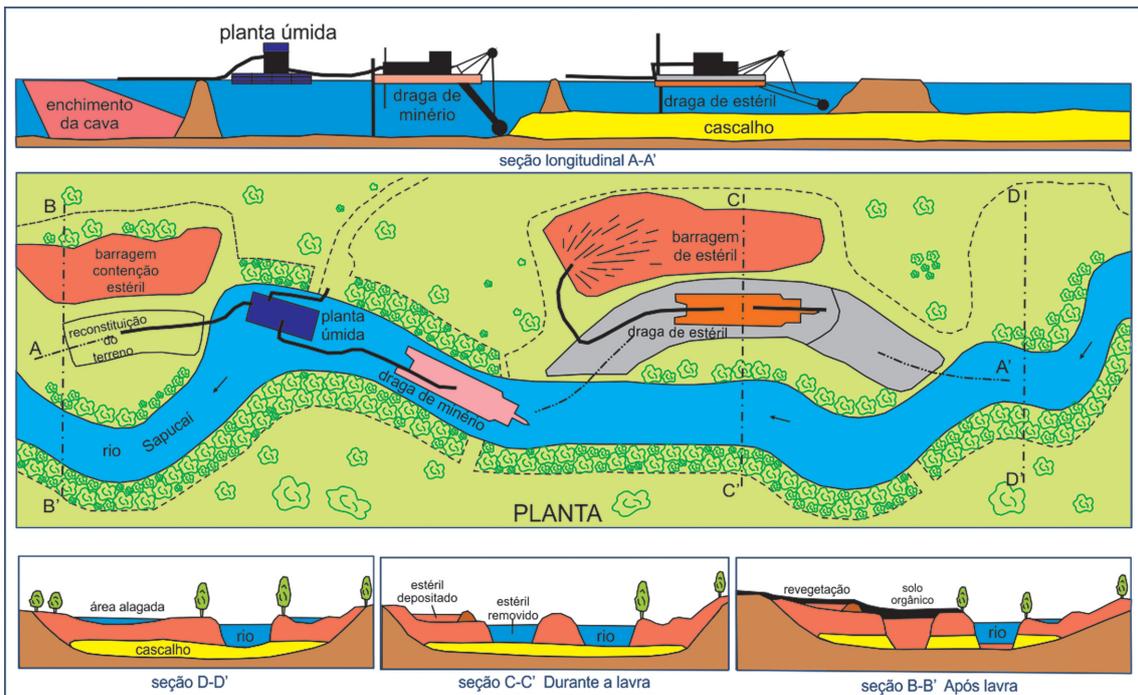


Figura 21. O *placer* do Rio Sapucaí: projeto de lavra e de recuperação ambiental. Modificado de Souza e Paixão (1989, *in* Loureiro & Santos 2013).

3. ASPECTOS ECONÔMICOS

O fato de a China dominar o mercado de ETR e reduzir a oferta para o comércio internacional (Takehara 2015) gerou uma reação nos países detentores de depósitos e consumidores de ETR, com o desenvolvimento de uma série de projetos. Os desafios para se alcançar o sucesso não são poucos nem simples e passam por falta de domínio de conhecimentos técnicos para a separação dos minerais-minério contendo ETR, elevado custo de plantas convencionais, demanda e preço de mercado variáveis e a destinação dos resíduos radioativos gerados, que exigem tratamento específico e complexo (Jordens *et al.*, 2013, p.98 in Lima 2017).

3.1. Produção Interna

De acordo com Loureiro & Santos (2013), o Brasil já ocupou uma posição de destaque na produção de ETR e, na década de 1950, a empresa ORQUIMA tinha domínio de toda a cadeia, desde a extração até a concentração em compostos de alta pureza. Por exemplo, chegou a fornecer Eu_2O_3 com pureza entre 99,9 a 99,99% para a produção de barras metálicas utilizadas na absorção de nêutrons que viabilizavam o funcionamento do reator do Nautilus, o primeiro submarino nuclear do mundo. Entretanto, vários fatores contribuíram para a redução dessa produção, em especial a presença de elementos radioativos nos minerais hospedeiros de ETR. As Figuras 22 e 23 explicitam o cenário atual, ainda que, como já foi dito, a perspectiva de o Brasil retomar um lugar de destaque na produção de OTR seja bastante positiva. Os dados disponíveis sobre a produção brasileira de ETR nos anos mais recentes são os seguintes:

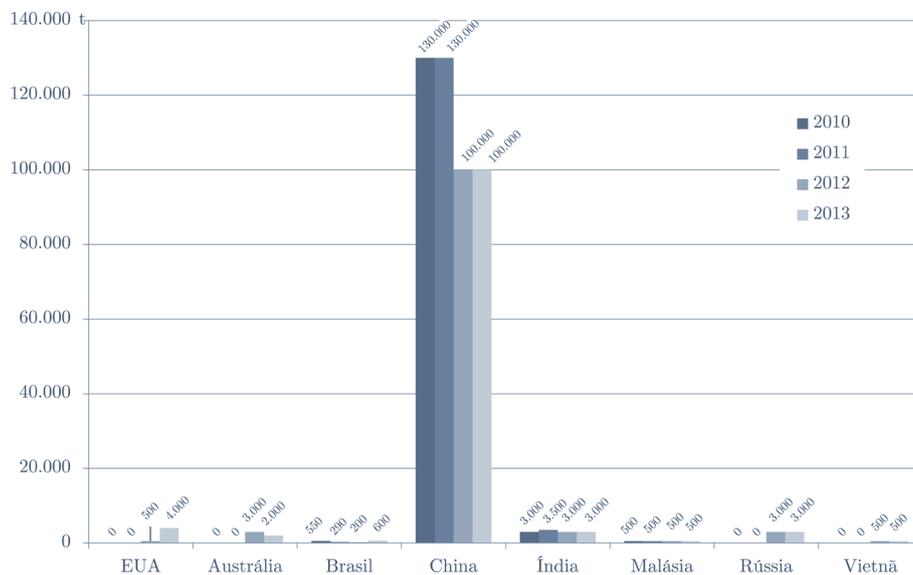


Figura 22. Os principais países produtores de ETR entre 2010 e 2013, de acordo com Takehara (2015), com base em dados do USGS 2011 a 2015).

Rocio *et al.* (2012) afirmam que a produção de óxidos de terras-raras no Brasil foi de 730, 650, 650, 550 e 550 toneladas respectivamente nos anos de 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010. O último dado é predominantemente de lantânio e equivale a 0,41% da produção mundial.

O Sumário Mineral (Andrade 2014) mostra na tabela II, p. 115, que a produção brasileira foi de 290 t, 206 t e 600 t de monazita respectivamente nos anos de 2011, 2012 e 2013. São dados que coincidem com aqueles apresentados por Takehara (2015), que acrescenta que o material foi produzido em São Francisco do Itabapoana (placer marinho), juntamente com ilmenita, zirconita e rutilo. Ainda segundo essa autora, a monazita não é comercializada por conter alto teor de tório e, mantendo-se o ritmo atual de produção, suas reservas devem estar esgotadas dentro de 3 a 4 anos.

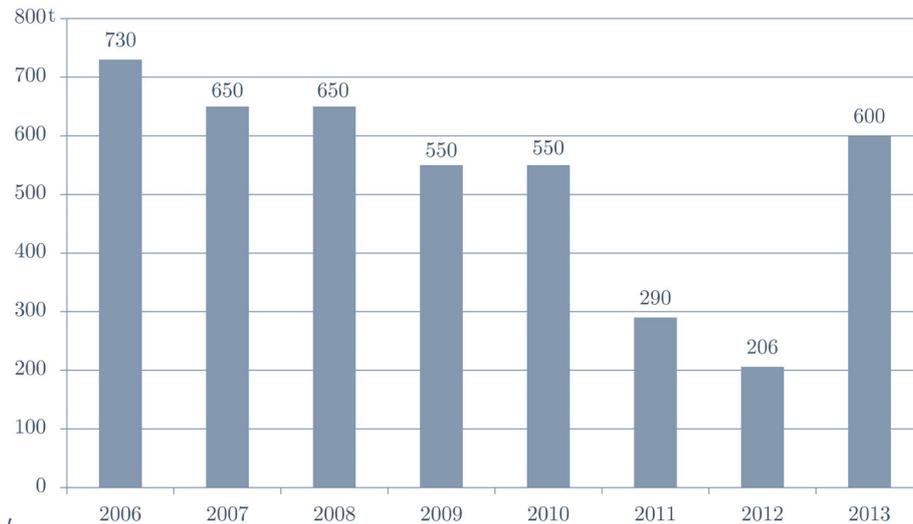


Figura 23. Variação de produção de ETR no Brasil entre os anos de 2006 e 2013, de acordo com dados de Rocio *et al.* (2012) e Andrade (2014).

3.2. Importação

Somando compostos químicos e produtos manufaturados, o Brasil importou um total de US\$17,08 milhões em 2008, US\$9,27 milhões em 2009 e US\$14,15 milhões em 2010 (Tabela 6) segundo Lima (2012).

Tabela 6. Dados de Lima (2012) mostrando as importações de ETR pelo Brasil nos anos entre 2008 e 2010 e de Sumário Mineral (Andrade 2014) para os demais dados.

Produto	Importação (em toneladas)					
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Compostos Químicos (Óxido de Pr, cloretos de ETR, outros compostos de ETR)	2.274	1.306	1.156	765	1.082	887
Produtos Manufaturados (metais de ETR mesmo misturados ou ligados entre si; liga de Ce com teor de Fe ≤ 5% - mischmetal; ferrocério e outras ligas pirofóricas)	635	327	686	396	426	544
Total	2.909	1.633	1.842	1.161	1.508	1.431

Ainda de acordo com o mesmo autor, os países fornecedores de compostos químicos foram China (93%), Estados Unidos (2%), Espanha (2%) e França (2%) e de produtos manufaturados China (82%), Estados Unidos (5%), Bulgária (7%), Austrália (2%) e Bélgica (2%). O Sumário Mineral (Andrade 2014) informa que o volume de compostos químicos e produtos manufaturados com ETR importados pelo Brasil praticamente não variou entre 2012 e 2013, ainda que, em termos de valores, a importação de 2013 represente menos da metade dos valores alcançados em 2012, de US\$15,3 milhões (FOB). Isto na prática reflete a

significativa redução dos valores dos ETR no mercado. Os principais países fornecedores de compostos químicos foram China (67%), Bulgária (16%), Canadá (6%), Estados Unidos da América (5%) e Austrália (2%) de manufaturados; China (92%), França (4%), Estados Unidos da América (3%) e Reino Unido (1%) de compostos químicos.

3.3. Exportação

A tabela 7 e a Figura 24 mostram, respectivamente, a variação dos valores exportados entre 2008 e 2013 e os países destinos dessas exportações. O Brasil exportou, em 2010, compostos químicos e produtos manufaturados no montante de US\$ 1,4 milhão. Nesse ano, a Espanha comprou 99% dos compostos químicos exportados, enquanto os produtos manufaturados tiveram como destino principal os países do Reino Unido (27%), Canadá (21%), Angola (21%), Estados Unidos (17%) e Países Baixos (4%) (dados de Lima 2012 e Andrade 2014).

Tabela 7. Exportação de ETR pelo Brasil, baseado em dados de Lima (2012) e Andrade (2014).

Produto	Exportação (em toneladas)					
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Compostos Químicos	36	21	21	0	0	0
Produtos Manufaturados	421	321	506	175	238	129
Monazita	--	--	--	1.500	2.700	600
Total	457	342	527	1.675	2.938	729

Em 2012, a Espanha continuou como principal país de destino dos compostos químicos exportados (96%), seguida pela República Dominicana (2%), Argentina (1%) e Chile (1%); por outro lado, os produtos manufaturados tiveram como destino Angola (38%), Canadá (17%), Estados Unidos da América (16%), Reino Unido (12%), e Uruguai (4%). O total exportado foi de US\$ 1,996 milhões (FOB), o que inclui 2700 t de monazita compradas pela China (Andrade 2013).

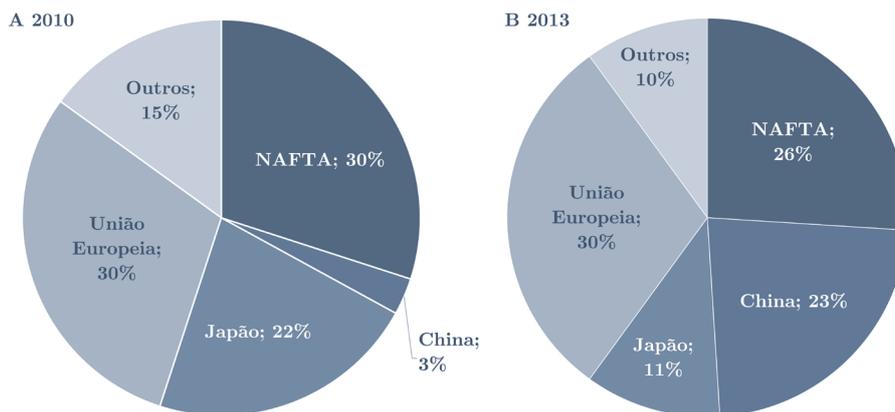


Figura 24. Destino das exportações de ETR brasileiros nos anos de **A)** 2010 e **B)** 2013.

De acordo com Andrade (2014), em 2013, o Brasil exportou para a China 22% da quantidade de monazita de 2012. As exportações de compostos químicos foram destinados para a República Dominicana (33%), Paraguai (18%), Argentina (17%), Chile (16%) e Venezuela (5%) e os produtos manufaturados foram para Angola (39%), Estados Unidos (20%), Uruguai (7%) e Portugal (4%), totalizando US\$ 1,064 milhões.

3.4. Consumo Interno

De acordo com informações de [Rocio et al. \(2012\)](#), em 2010 o Brasil consumiu 1.315 toneladas de compostos químicos e produtos manufaturados de terras raras. Os fabricantes de catalisadores foram responsáveis por 800 toneladas desse total, seguidos pelos fabricantes e polidores de vidros e lentes especiais e fabricantes de cerâmicas e de consumidores indiretos como fabricantes de turbinas eólicas e motores. Esse volume representou em torno de 1% da demanda mundial, o que é irrisório.

Já o Sumário Mineral ([Andrade 2014](#)) acrescenta o consumo de 986 toneladas em 2011, 1.270 t em 2012 e 1.302 t em 2013. Além das aplicações já destacadas, acrescenta luminóforos para tubos catódicos de televisores em cores, telas planas de televisores e monitores de computadores, cristais geradores de laser, supercondutores e absorvedores de hidrogênio. O gráfico abaixo (Figura 25) mostra as variações de consumo.

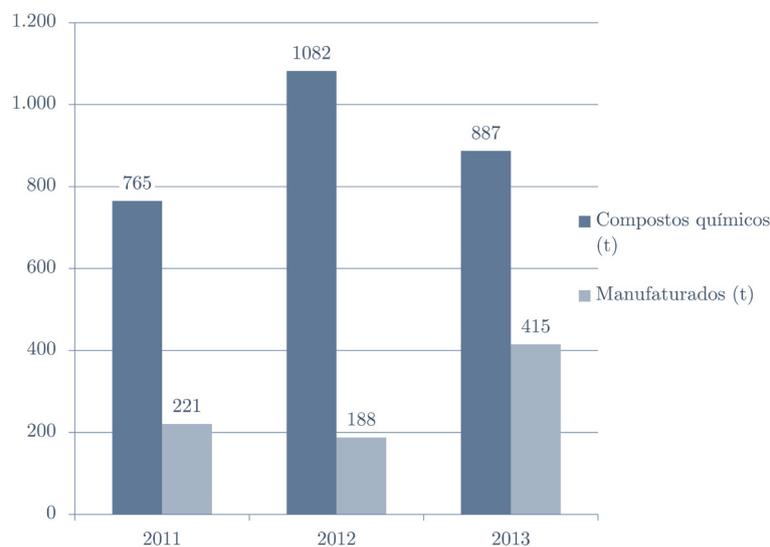


Figura 25. Variação do consumo de produtos manufaturados e de compostos químicos de ETR no Brasil, de acordo com dados de [Rocio et al. \(2012\)](#) e [Andrade \(2014\)](#).

3.5. Projetos em andamento e/ou previstos

Informações disponíveis indicam perspectivas otimistas para a extração e manufatura de ETR atualmente no Brasil. Desse ponto de vista, não só a situação em que a China colocou o comércio mundial desses elementos como o próprio avanço acelerado da física e química aplicada e tecnologias criadas a partir dele alavancaram as pesquisas geológicas e de viabilização de concentração de óxidos de terras raras.

Segundo [Takehara \(2015\)](#), a MBAC Fertilizantes Corp., que já está com uma planta-piloto no Rio de Janeiro para produção de concentrados de óxidos de ETR com pureza superior a 99% desde 2014, tem planos para produzir em torno de 17 mil toneladas/ano de OTR a partir de 2020. De acordo com [Lima \(2012\)](#), o Projeto Araxá produzirá, além do óxido de nióbio e fosfato bicálcico, os seguintes óxidos de terras raras: óxido de cério, óxido de lantânio, óxido de neodímio, óxido de praseodímio, óxido de samário, óxido de európio, óxido de gadolínio e óxido de ítrio.

No Complexo Carbonatítico de Tapira, em 2010, a VALE deu início a trabalhos de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia mineral de ETR, porém sem conseguir resultados economicamente viáveis.

A Revista [Brasil Mineral \(2017a\)](#) anuncia que o projeto da Mineração Terras Raras SA já está em fase de licenciamento e planejamento da planta piloto. A viabilidade da concentração do minério já foi confirmada e envolve cura ácida-lixiviação e tratamento com Ca e Mg. A empresa, de capital nacional e detentora dos direitos minerários de uma área no Morro do Ferro, no Complexo Alcalino de Poços de Caldas, prevê uma taxa de recuperação acima de 80%.

Essa mesma publicação ([Brasil Mineral 2017a](#)) informa sobre o projeto Mineração Serra Verde, em Minaçu, Goiás, um projeto que teve início com a Mining Ventures Brasil, por sua vez controlada pela Denham Capital Management LP, com participação minoritária da Arsago Mining Capital (BVI) Ltda. O estudo de viabilidade foi concluído em 2014, com reservas de 350 Mt de minério com 0,15% de OTR (neodímio, praseodímio e térbio). A empresa, que possui Licença Prévia, já solicitou Licença de Instalação e prevê produção de 10 mt/ano de ETR. A previsão é que o empreendimento entre em operação entre 2019 e 2020. É considerado pela empresa o maior depósito de ETR em argilas iônicas do Hemisfério Ocidental.

Já o presidente da CODEMGE, Marco Antônio Soares Castello Branco, anunciou no 17º Congresso Brasileiro de Mineração ([Brasil Mineral 2017b](#)) que o Brasil deverá inaugurar, ainda em 2018, um laboratório-fábrica de ligas de terras raras em Lagoa Santa, MG. O empreendimento, em parceria com a CBMM, UFSC, Fundação CERTI e IPT, deverá ser um ambiente empresarial voltado a fomentar competência tecnológica e produtiva de componentes a partir de OTR. Segundo Castello Branco, o foco serão ímãs de conformação ideal a serem aplicados primeiramente em refrigeração magnética.

A CBMM vem trabalhando, em convênio com o IPT, no desenvolvimento de tecnologia para fabricação de neodímio metálico desde 2015 e anunciou, em início de 2015 ter produzido os primeiros 100 gramas de didímio metálico, fundamental na fabricação de superímãs ([Brasil Mineral 2016](#)). De acordo com João Batista Ferreira Neto – coordenador do projeto – a CBMM já vem conseguindo concentrar ETR e seus óxidos em uma planta piloto e laboratório próprios. Em janeiro de 2017, a revista [Brasil Mineral \(2017c\)](#) anuncia que, com previsão de duração de um ano, a CBMM e o IPT deram início à segunda etapa do projeto, buscando gerar a liga didímio-ferro-boro. E já anuncia que essa precede a etapa final, de geração do pó da liga, que permitirá a produção do superímã.

Na região do Planalto de Mata da Corda, três empresas trabalham na viabilização de projetos minerários para ETR; Vicenza Mineração, Brasil Exploração Mineral S.A. (Bemisa) e TerrAtiva Mineração ([Rolim 2014](#)). Todavia esse autor destaca que o desenvolvimento de rotas de processos tecnológicos para extração de ETR é essencial para viabilizar economicamente esses projetos. Existe informação de que a BEMISA tem trabalhado com o CETEM nesse sentido ([Takehara 2015](#)), mas não foram encontrados dados mais atualizados sobre esses projetos.

Loureiro & Santos (2013) destaca que o Brasil pode ter grandes consumidores de ETR, uma vez que existem projetos, envolvendo universidades e centros de pesquisa e iniciativa privada, para viabilizar a produção, por exemplo, de ímãs permanentes, de turbinas eólicas, de carros híbridos elétricos (empresa EBX e Renault/Nissan) e de trens de levitação magnética para transporte urbano (Projeto MagLev Cobra – COPPE / UFRJ). Existem, também, indústrias já instaladas que fazem uso de ETR como, por exemplo, a FCC – Fábrica Carioca de Catalisadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida F.F.M. 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. *Revista Brasileira de Geociências*, **13**(3):139-158.
- Andrade R.H.P. 2013. Terras-Raras. In: Lima T.M. & Neves C.A.R. (coords.). *Sumário Mineral 2013*. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), v. 33, p. 114-115. ISSN: 01012053
- Andrade R.H.P. 2014. Terras-Raras. In: Lima T.M. & Neves C.A.R. (coords.). *Sumário Mineral 2014*. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), v. 34. p. 114-115. ISSN: 01012053
- Barbosa E.S.R. 2009. *Mineralogia e petrologia do Complexo Carbonatítico-Foscorítico de Salitre, MG*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 430 p.
- Bastos Neto A.C., Pereira V.P., Lima E.F., Ferron J.M., Minuzzi O., Prado M., Ronchi L.H., Flores J., Frantz J.C., Pires A., Pierosan R., Hoff R., Botelho N.F., Rolim S.B., Rocha F., Ulmann L.A. 2005. A jazida de criolita da Mina Pitinga (Amazonas). In: Marini O.J., Queiroz E.T., Ramos.B.W. (org.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília: DNPM; CT-MINERAL; ADIMB, p. 477-552.
- Biondi J.C. 2015. *Processos metalogenéticos e os depósitos minerais Brasileiros*. 2ª ed. São Paulo. Oficina de textos, 552 p. ISBN: 9788579751684
- Brod J.A. 1999. *Petrology and geochemistry of the Tapira alkaline complex, Minas Gerais State, Brazil*. Tese de doutorado, University of Durham, UK, 486 p.
- Brod J.A., Gibson S.A., Thompson R.N., Junqueira-Brod T.C., Seer H.J., Moraes L.C., Boaventura G.R. 2000. The kamafugite-carbonatite association in the Alto Paranaíba Igneous Province (APIP), southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(3):408-412. doi: 10.25249/0375-7536.2000303408412
- Brod J.A., Ribeiro C.C., Gaspar J.C., Junqueira-Brod T.C., Barbosa E.S.R., Riffel B.F., Silva J.P. da, Chaban N., Ferrari A.J.D. 2004. Excursão 1. Geologia e mineralizações dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. In: 42º Congresso Brasileiro de Geologia. Araxá, *Guia das Excursões*, p. 1-29.
- Brod J.A. 2012. *Ambientes metalogenéticos e depósitos associados ao magmatismo alcalino-carbonatítico*. Brasília. Curso ADIMB. SIMEXMIN 2012.
- CBMM - Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração. 1984. *Complexos carbonatíticos do Brasil: Geologia*. São Paulo, CBMM, 44 p.
- Chakhmouradian A.R. & Zaitsev A.N. 2012. Rare Earth mineralization in igneous rocks: sources and processes. *Elements*, **8**(5):347-353. doi: 10.2113/gselements.8.5.347
- De Sousa M.M. 1996. The niobium deposit in Morro dos Seis Lagos, North-Brazil. *International Geological Congress Abstracts*, v. 30, nº 2, p. 784.
- Eco4u. 2012. Governo quer criar politica para exploração de terras-raras: conheça melhor esses valiosos minerais. Disponível em <https://eco4u.wordpress.com/2012/05/23/governo-quer-criar-politica-para-exploracao-de-terras-raras-conheca-melhor-esses-valiosos-minerais/>. Acesso em 22/2/2018
- EPA - United States Environmental Protection Agency. 2012. Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues. EPA/600/R-12/572. 135 p.
- Fonseca D.S. 2012. *A jazida de fosfato de Patrocínio: Serra do Salitre, MG*. Apresentação no CETEM.
- Haxel G.B., Hedrick J.B., Orris G.J. 2002. Rare Earth Elements - Critical Resources for High Technology. USGS - *U.S. Geological Survey, Fact Sheet 087-02*, 4 p.
- Heineck C.A., Vieira V.S., Drumond J.B.V., Leite C.A.L., Lacerda Filho J.V., Valente C.R., Souza J.D., Lopes R.C, Malouf R.F., Oliveira I.W.B., Oliveira C.C., Sachs L.L.B., Paes V.J.C., Junqueira P.A. 2004. Folha SE.23 – Belo Horizonte. In: Schobbenhaus C., Gonçalves J.H., Santos J.O.S, Abram M.B., Leão Neto R., Matos G.M.M., Vidotti R.M., Ramos M.A.B, Jesus J.D.A. (eds.). *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo*. Programa Geologia do Brasil – PGB. CPRM, Brasília. CD-ROM.

- Le Maitre R., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M., Bonin B., Bateman P. (eds.). 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. 2ª ed. Cambridge: Cambridge University Press. 236 p. ISBN: 9780511535581, doi: 10.1017/CBO9780511535581
- Lima J.L. 2017. *Flotação de Óxidos de Terras Raras: Estado da Arte*. Monografia de trabalho de conclusão de curso; Engenharia de Minas Campus Araxá, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá, MG. 66 p.
- Lima P.C.R. 2012. *Terras-Raras: Elementos estratégicos para o Brasil*. Consultoria Legislativa da Área XII (Recursos Minerais, Hídricos e Energéticos) Câmara dos Deputados; Praça 3 Poderes, Brasília, DF, 226 p.
- Loureiro F.E.L. 1988. Terras raras: onde e porque prospectá-las; tipos de jazimentos; perspectivas mercadológicas. Rio de Janeiro: CPRM. 56 p. (Informe Técnico)
- Loureiro F.E.V.L. 1994. *Terras-Raras no Brasil: Depósitos, recursos identificados e reservas*. MCT-CNPq-CETEM, 189 p. ISSN: 01036319
- Loureiro F.E.L. & Santos R.L.C. 2013. *O Brasil e a Reglobalização da Indústria das Terras Raras; Cap. II: Terras raras no Brasil: Reservas e características químico-mineralógicas de suas ocorrências e depósitos*. CETEM / MCTI, Rio de Janeiro, p. 67-144. ISBN: 9788582610015
- Martins C., Lima P.C.R., Teixeira L.S., Teixeira M.P., Queiroz Filho A.P. 2014. *Minerais Estratégicos e Terras-Raras*. Centro de Documentação e Informação; Edições Câmara. Brasília, DF, Série estudos estratégicos, nº 3, 237 p. ISBN: 9788540202603
- MBAC Fertilizantes Corp. 2012. *Araxá Project Located in Minas Gerais State, Brazil*. Technical Report on MBAC Fertilizer Corp. (MBAC). Disponível em https://itafos.com/site/assets/files/1773/itafos-araxa_technical_report_final-.pdf. Acesso em 23/2/2018.
- Melo M.T.V. 1997. Depósitos de fosfato, titânio e nióbio de Tapira, Minas Gerais. In: Schobbenhaus C., Queiróz E.T., Coelho C.E.S. (coords.). *Principais Depósitos Minerais do Brasil: rochas e minerais industriais*. Brasília, DNPM/CPRM, v. 4, parte C, p. 41-56.
- NERC – Natural Environment Research Council. 2011. *Rare Earth Elements*. British Geological Survey, Mineral profiles, 54 p.
- Paes de Andrade R.H. & Arcoverde W.L. 2013. *Reavaliação das Reservas de Terras Raras no Brasil*. II Seminário Brasileiro de Terras Raras. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. RJ. 43 p.
- Pinto C.P. & Silva M.A. 2014. *Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, Escala 1:1.000.000*. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, CODEMIG e Serviço Geológico do Brasil, CPRM.
- Revista Brasil Mineral. 2016. *Terras Raras - Brasil consegue fazer didímio metálico*. 10/2/2016. Disponível em <http://www.brasilmineral.com.br/noticias/brasil-consegue-fazer-did%C3%ADmio-met%C3%A1lico>. Acesso em 15/2/2018.
- Revista Brasil Mineral. 2017a. *Terras Raras - Brasil terá dois novos projetos de óxidos*. 19/10/2017. Disponível em <http://www.brasilmineral.com.br/noticias/brasil-ter%C3%A1-dois-novos-projetos-de-%C3%B3xidos>. Acesso em 15/2/2018.
- Revista Brasil Mineral. 2017b. *Terras Raras – Brasil terá laboratório-fábrica em 2018*. 21/09/2017. Disponível em <http://www.brasilmineral.com.br/noticias/brasil-ter%C3%A1-laborat%C3%B3rio-f%C3%A1brica-em-2018>. Acesso em 15/2/2018.
- Revista Brasil Mineral. 2017c. *Terras Raras - Embraçii e CBMM investem em nova etapa*. 05/1/2017. Disponível em <http://www.brasilmineral.com.br/noticias/embrapii-e-cbmm-investem-em-nova-etapa>. Acesso em 15/2/2018.
- Ribeiro C.C. 2008. *Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do Complexo Carbonatítico Catalão I, GO*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 473 p.

- Rocio M.A.R., Silva M.M., Carvalho P.S.L., Cardoso J.G.R. 2012. Terras-raras: situação atual e perspectivas. Rio de Janeiro. *BNDES Setorial*, **35**:369-420.
- Rolim V.K. 2014. Mineralizações de Ti e P no Grupo Mata da Corda. In: 2º Seminário das Províncias Metalogênicas Brasileiras. Paracatu. CPRM. *Apresentações*.
- Seer H.J., Moraes L.C., Fogaça A.C.C. 1989. *Roteiro Geológico para a Região de Lagoa Formosa - Chumbo - Carmo do Paranaíba - MG*. SBG, Núcleo Minas Gerais, *Boletim* nº 9. Belo Horizonte; 65 p.
- Silva A.B., Marchetto M., Souza O.M. 1979. Geologia do complexo carbonatítico de Araxá (Barreiro), MG. *Mineração e Metalurgia*, **415**:14-18.
- Soubiès F., Melfi A.J., Autefage F. 1991. Comportamento geoquímico dos elementos terras raras nos alteritos da jazida de fosfato e titânio de Tapira (Minas Gerais, Brasil): a importância dos fosfatos. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**(1):3-16. doi: 10.25249/0375-7536.1991316
- Takehara L. & Silveira F.V. 2014. Avaliação do Potencial de Terras-Raras no Brasil. In: Martins C., Lima P.C.R., Teixeira L.S., Teixeira M.P., Queiroz Filho A.P. *Minerais Estratégicos e Terras-Raras*. Centro de Documentação e Informação; Edições Câmara. Brasília, DF, Série estudos estratégicos, nº 3, p. 202-219. ISBN: 9788540202597
- Takehara L. (org.). 2015. Avaliação do potencial de Terras Raras no Brasil. In: *Informe de Recursos Minerais, Série Minerais Estratégicos*. Brasília, CPRM, nº 2, 218 p. ISBN: 9788574992785
- Técnicomineração.com.br 2014. *Terras Raras – Mercado e Suas Aplicações*. Disponível em <https://tecnicoeminerao.com.br/o-mercado-dos-elementos-terras-raras-e-suas-aplicacoes/>. Acesso em 14/2/2018.
- USGS - United States Geological Survey. 2011. *Mineral Commodity Summaries 2011*. Reston, U.S. Geological Survey, 198 p. ISBN: 9781411330832
- USGS - United States Geological Survey. 2015. *Mineral Commodity Summaries 2015*. Reston, U.S. Geological Survey, 196 p. ISBN: 9781411338777, doi: 10.3133/70140094
- USGS - United States Geological Survey. 2017. *Iron Oxide-Copper-Cobalt-Gold-Rare Earth Element Deposits of Southeast Missouri - From the Ore Deposit Scale to a Global Deposit Model*. USGS - Mineral Resources Program - Characterization and Identification of Critical Mineral Resources. Disponível em <https://minerals.usgs.gov/science/semissouri/index.html#overview>. Acesso em 15/3/2018.
- Viera E.V. & Lins F.A.F., 1997. *Concentração de minérios de terras-raras: uma revisão*. Rio de Janeiro. CETEM/CNPq, 53 p. (Série Tecnologia Mineral nº73). ISSN: 01037382
- Wikipedia. 2018. Terras Raras. Disponível em <https://pt.wikipedia.org/wiki/Terra-rara>. Acesso em 26/2/2018.