

# **Avaliação da sustentabilidade do sistema de recursos de terras raras no Brasil em longo prazo através do uso de um modelo dinâmico**

## **System sustainability assessment of rare earth resources of Brazil in a long term assisted by dynamic modeling**

**Ligia Marcela Tarazona Alvarado**

Bolsista Capacitação Institucional, Eng. Controle Eletrônico, M.Sc. PUC-Rio

**Francisco Mariano da Rocha de Souza Lima**

Supervisor, Eng. Metalúrgica e Industrial, D. Sc.

### **Resumo**

Os elementos de terras raras (ETRs) são elementos da tabela periódica que apresentam propriedades especiais. A indústria de alta tecnologia tem fomentado o crescimento anual da procura destes entre 8% a 11%. A posição da China como produtor dominante do mundo e fornecedor de terras raras (TRs) (85,2% da produção total) e as suas políticas de limitar as exportações levantaram preocupações entre muitos países, e.g. os Estados Unidos de America (EUA) especialmente por sua indústria de defesa. Por outro lado o Brasil, segundo país que possui as maiores reservas do mundo de TRs observou a possibilidade de crescimento no mercado e tomou em consideração estes minerais como estratégicos no Plano Nacional de Mineração (PNM) 2030. Este trabalho tem como objetivo fazer uma análise da representação do mercado brasileiro no sistema multioferta de TRs *vis-à-vis* com os mercados estadunidenses, chinês e mundial; são apresentadas as tendências da produção, do consumo, da oferta e da demanda destes mercados para os próximos 40 anos, assistidas pelas simulações de modelagem dinâmica. Os resultados demonstraram que a produção mundial seria aproximadamente cento cinquenta três mil toneladas para 2050, embora a China diminua a sua produção continuará sendo o maior fornecedor de TRs, os EUA tem uma previsão de produção de 10% no mercado, e o Brasil teria uma participação de 2,2% do Brasil no sistema multi-oferta mundial de TRs em 2050. Desde que seja considerado que haja produção e a reciclagem

Palavras chave: terras raras, sistemas dinâmicos, sistema multi-oferta.

### **Abstract**

The rare earth elements are elements of the periodic table that have special properties. The high-tech industry has fostered the annual growth in demand of these from 8% to 11 %. Nowadays, China is the world's dominant producer and supply of rare earth elements (85.2% of total production) and its policies to limit exportation raises a concern among many countries, i.e. USA especially its defense industry. Alternatively Brazil, second country with the largest reserve in the world, would have a possibility of growth in the market and since Brazil took into account these minerals as strategic element in the National Mining Plan (PNM) 2030. This study aims to analyze

the representation of the Brazilian market in the face of USA, China and world market; trends are presented as production, consumption, and supply and demand in these markets for the next 40 years, assisted by dynamics modeling simulations. The results showed that the world production would be about one hundred fifty three thousand tons for 2050. Although China decrease its production, it would continue to be the largest supplier of REEs, USA would be estimated to have 10% production in the market and Brazilian participation would be 2.2% in the global multi-supply system of REEs in 2050 if the production and recycling is implemented

Key words: rare earth, dynamic systems, multi-supply system.

## 1. Introdução

Os elementos de terras raras (ETRs) são um grupo de 17 elementos químicos da tabela periódica. Segundo Ortiz e Junior (2014) a demanda de ETRs vem se intensificando devido a suas propriedades físicas e químicas pois estas desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de aplicações tecnológicas. A indústria tecnológica tem fomentado a utilização dos ETRs, acrescentando a procura anual destes aproximadamente 8% a 11% (*Services Information Roskill*, 2007). Sendo assim, as terra raras (TRs) se confirmam como mineral estratégico no PNM 2030 para o desenvolvimento do Brasil. Segundo Rocio *et al.* (2012), as principais indústrias nacionais consumidoras diretas de produtos que possuem TRs em suas composições são: as fabricantes de catalisadores, de vidros e de cerâmicos; e as consumidoras indiretas tais como as fábricas de motores e de turbinas eólicas.

Para suprir a demanda brasileira incipiente destes elementos, o Brasil importa aproximadamente dois mil toneladas por ano provenientes de compostos químicos e produtos manufaturados, segundo os relatórios anuais de 2006 a 2015 do Departamento Nacional de Produção Nacional (DNPM). Em 2012, o DNPM aprovou reservas lavráveis com cerca de 22 milhões de toneladas desses minerais; porém estes não vêm sendo alvo de exploração seja por riscos ambientais e/ou seja por riscos econômicos.

Neste contexto e tendo em vista a importância das TRs como mineral estratégico, este estudo apresenta a modelagem dinâmica do sistema do mercado do Brasil, EUA e China e sua representação no sistema multi-oferta ao longo do tempo. Foram considerados as estratégias atuais e as possíveis produção e reciclagem de TRs no Brasil.

## 2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo fazer uma análise da representação do mercado brasileiro no sistema multioferta de TRs *vis-à-vis* os mercados estadunidenses, chinês e mundial, evidenciando as tendências da produção, do consumo, da oferta e da demanda destes mercados para os próximos 40 anos, assistido por simulações de modelagem dinâmica. Ademais, avaliar a reciclagem efetiva como meio de suprir a crescente demanda e a sua representação no sistema multi-oferta.

### 3. Metodologia

A modelagem dinâmica foi introduzida por Forrester (1958) é uma metodologia utilizada para compreender o comportamento ao longo do tempo de sistemas complexos. Segundo Kifle et. al. (2013) a análises de sistemas dinâmicos (SD) é obtida através da criação de estruturas de modelos conceituais utilizando os diagramas de laços causais (DLC) para estabelecer as relações de causa e efeito causa e efeito entre os diferentes componentes do sistema. Embasado nos SD as estruturas do sistema conceptual são transferidas para modelos numéricos dinâmicos que podem ser usados como ferramenta de apoio à decisão, geração de diferentes cenários e análise de resultados das simulações associadas. Foi utilizado o software de modelagem dinâmica *i-Think*, que permite identificar as interdependências e os processos de retroalimentação entre os processos e variáveis ao longo do tempo. Iniciando pelo DCL dos processos de procura e de abastecimento de TRs no mercado, a descrição da causalidade dos ativos é apresentada na Figura 1. A demanda aumentará de acordo com o crescimento populacional e o desenvolvimento tecnológico. Por sua vez, a exploração crescerá de acordo com a demanda, em contrapartida a importação diminui à medida que a produção interna aumenta. A quantidade de TRs disponíveis no mercado está diretamente relacionada com o aumento o redução dos preços e o consumo de TRs em novos desenvolvimentos tecnológicos.

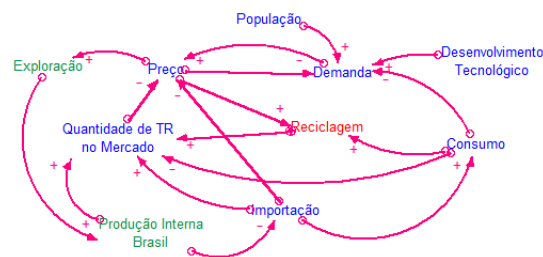


Figura 1. DLC define os laços causais no sistema de abastecimento de TRs do Brasil.

O DLC foi transferido ao modelo apresentado na Figura 2 e os sistemas compostos são representados e interligados com os vários laços de realimentações. No modelo descrito, o fornecimento é composto por três linhas de fluxo: importação, produção e reciclagem. Representou-se como um estoque, a quantidade de TRs no mercado é dada pela diferença entre a oferta e a demanda. A exploração é habilitada com o aumento da procura de TRs e o estoque de reservas conhecidas que tornar-se-ão disponíveis para a produção. O modelo foi parametrizado para o Brasil, EUA e China com base nos dados DNPM e nos relatórios do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) durante os anos de 2009 a 2015. A taxa de procura e as relações entre a oferta e a demanda, e o preço mundial de TRs apresentada por Kifle et al. (2013) foram adaptadas para nosso modelo. A estimativa da produção brasileira foi obtida a partir do potencial de produção de TRs de duas companhias brasileiras que estima-se produzir de uma a três mil toneladas por ano.

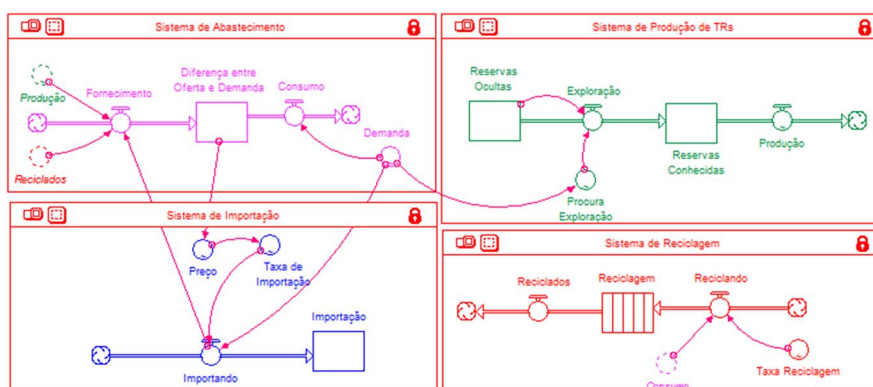


Figura 2. A estrutura do modelo em *i-Think* construído com base no DLC na Figura 1. A taxa de reciclagem foi introduzida com 0,5% e 1,5% em 2050, inspirado em recentes publicações. As relações entre as variáveis do modelo são apresentadas na Figura 3.

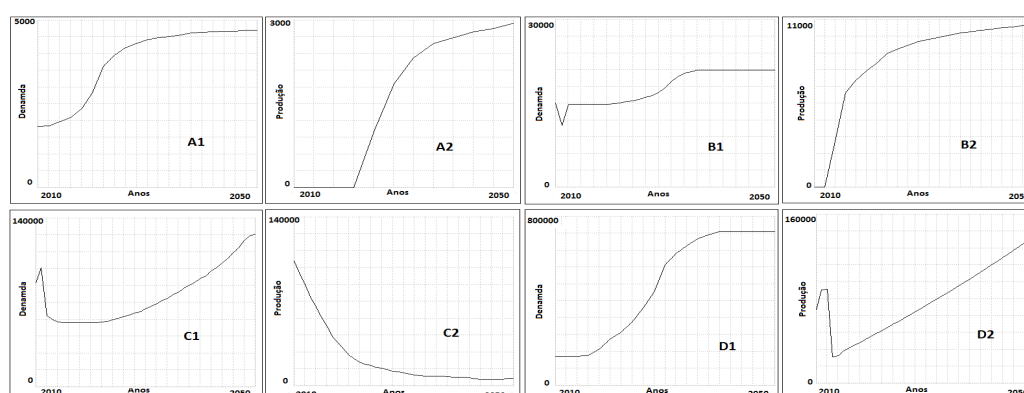


Figura 3. Relações entre as variáveis de demanda e produção em relação ao tempo do modelo proposto. A1: Demanda Brasileira. A2: Produção Brasileira. B1: Demanda Estadunidense. B2: Produção Estadunidense. C1: Demanda Chinês. C2: Produção Chinês. D1: Demanda Mundial. D2: Produção Mundial.

Os sistemas foram configurados para serem executados com o método de integração de Euler usando um passo no tempo de 0,25 anos. Desta forma, o modelo representará qual seria a participação do Brasil em 2050 no sistema multi-oferta de TRs com a implantação da produção e reciclagem de TRs. Foram criados seis cenários descritos na Tabela 1 e incorporados ao DLC e a estrutura do modelo diferenciados por cores (ver Fig. 1 e 2). O cenário 1, em azul, descreve a situação atual do mercado brasileiro no qual a demanda é suprida somente pelas importações. No cenário 2, a produção interna é ativada (cor verde) e posteriormente no cenário 3, o sistema de reciclagem é agregado ao modelo (em vermelho). No cenário 4, o modelo foi parametrizado somente com os dados dos EUA. O modelo do sistema chinês foi parametrizado no cenário 5 e o cenário 6 é composto com os dados da produção e consumo mundial.

Tabela 1. Cenários Propostos para as Simulações

	Brasil			EUA	China	Mundial
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Importação	X	X	x	x	X	
Produção		X	x	x	X	x
Reciclagem			x	x	X	x

#### 4. Resultados e Discussão

Foram mensurados em cinco variáveis que descrevem os resultados das simulações e cenários. Estas variáveis são: consumo, importações, produção, reciclagem e diferença entre oferta e demanda no eixo y, em toneladas, em função do tempo, de 2010 a 2050 no eixo x. Na figura 4, os cenários 1, 2 e 3 referentes ao mercado brasileiro foram ilustrados. A realidade atual brasileira observado na Fig.4-a, observa-se que o consumo é suprido somente pela importação, com uma leve diminuição da diferença oferta-demanda ao longo do tempo, gerando demanda por novos meios de fornecimento.

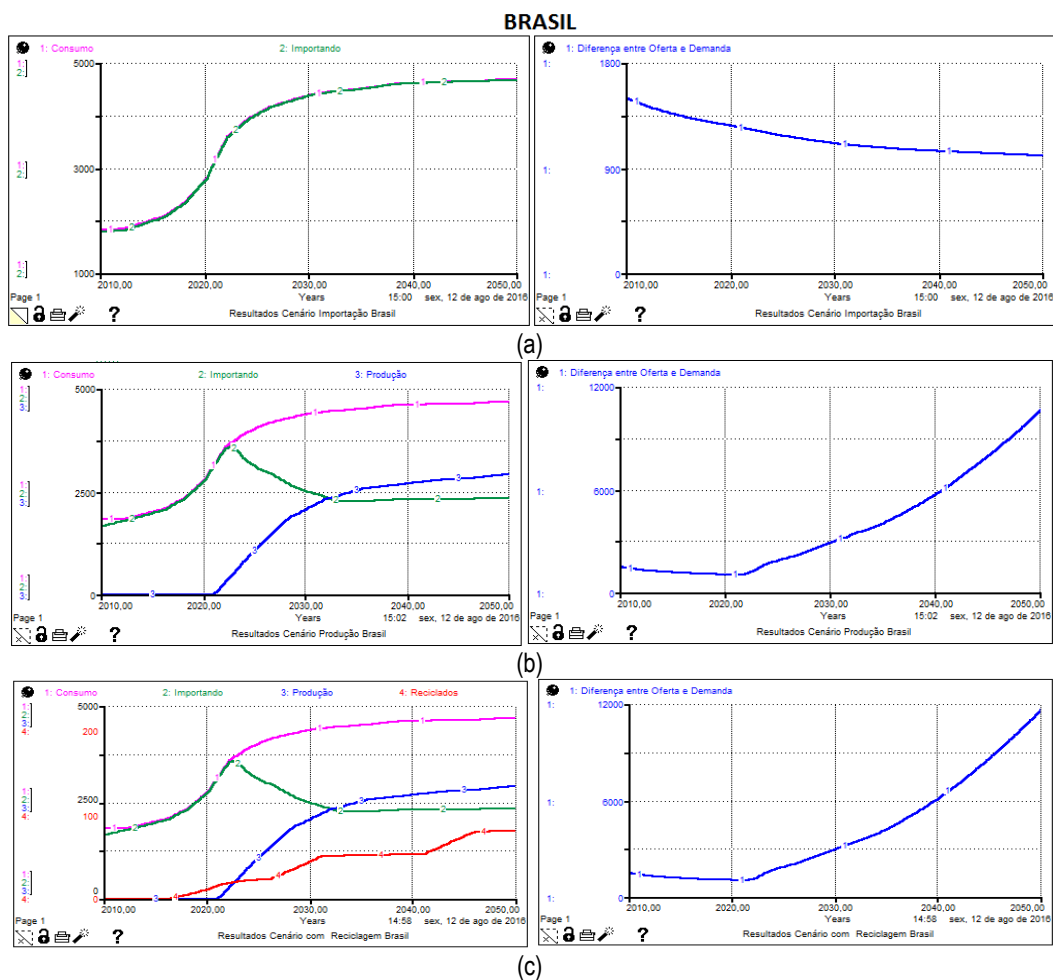


Figura 4. Resultados dos cenários brasileiros (a) Cenário 1: Importações: Verde (2); (b) Cenário 2: Importações e Produção Azul (3); (c) Cenário 3: Importações, Produção e Reciclagem vermelho (4); Consumo: Rosa (1); Diferença entre Oferta e Demanda: Azul (1).

Alternativamente, com a ativação do sistema de produção interna brasileira em 2020 (vide Fig.4-b), há uma queda na importação em 2023, somente dois anos após do início da produção de TRs. O ponto de equilíbrio entre importação e produção só ocorre em 2032. Finalmente, com a efetivação do sistema de reciclagem, nota-se uma queda na importação na metade de 2022 (seis meses antes do cenário anterior). No entanto, o diferencial é que a disponibilidade de TRs no mercado aumentariam ao longo do tempo viabilizando um aumento de 1006 toneladas para 2050. É evidente a maior disponibilidade TRs no mercado brasileiro.

O resultado da simulação do mercado estadunidense é ilustrado na Figura 5. Ressalta-se que o consumo é suprido pela importação, produção e reciclagem. Em 2012, após que iniciara a produção há uma queda na importação. Apenas em 2019, o ponto de equilíbrio entre a importação e produção seria atingido. O consumo para o 2050 será suprido aproximadamente por 50% da produção, contra os 38% de 2015.

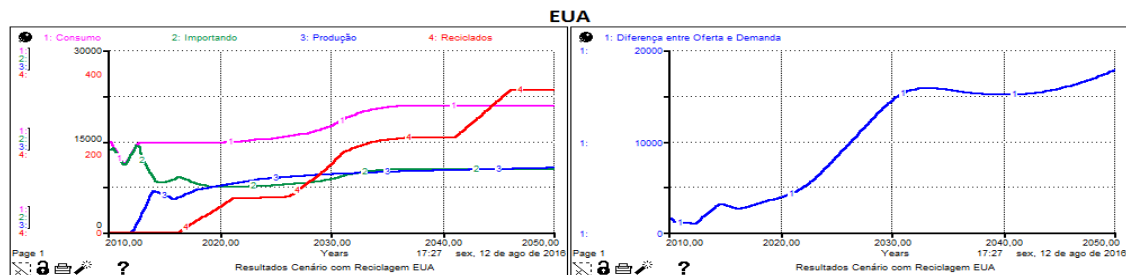


Figura 5. Resultados Cenário 4 – mercado estadunidense.

O maior produtor e consumidor de TRs no mundo, a China teve a sua análise realizada e ilustrada na Figura 6. Devido as políticas de produção interna chinesa, a produção de TRs diminuiria em 2050. Nota-se que em 2040, o consumo seria superior à produção necessitando a ativação da importação. Conseqüentemente, mesmo a China sendo o maior abastecedor de TRs, abrirá espaço para outros mercados terem maior participação em 2050.

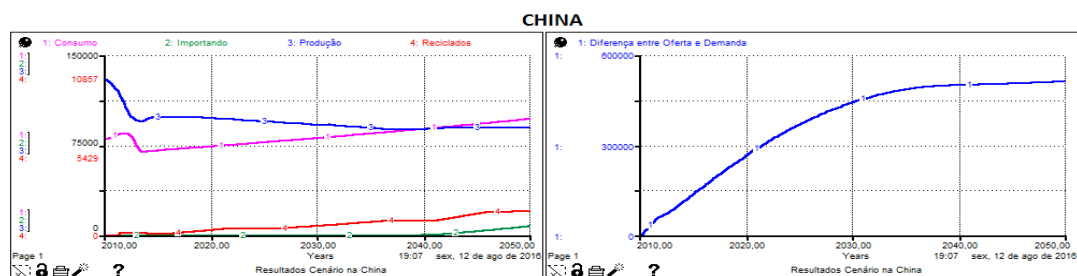


Figura 6. Resultados Cenário 5: análise do mercado chinês entre 2010 e 2050.

O panorama mundial é contemplado e ilustrado na Figura 7. Estima-se que há um aumento na produção de TRs devido à descobertas de novas reservas. Observa-se que em 2026, novos países produtores são inseridos a cadeia produtiva de TRs (ver Fig. 7).

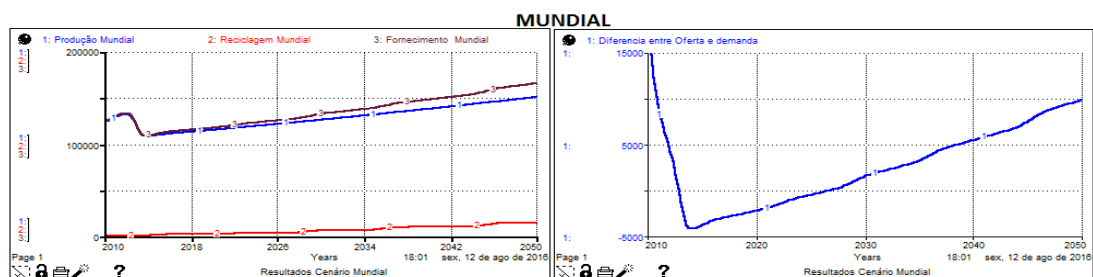


Figura 7: Resultados Cenário 6. Fornecimento Mundial: marrom (3).

Finalmente, para facilitar a análise entre os três países em estudo: Brasil, EUA e China o panorama mundial do abastecimento é ilustrado na Figura 8. Em 2050, o Brasil passa a ter uma participação de 2,2% e ao comparar com 2009 obteve um aumento de 27,16%. A participação dos EUA passou de 0% em 2010 para 7,5% para o

mesmo período. E a China, ainda sim continua sendo a maior produtora com 63,0% da participação no abastecimento global.

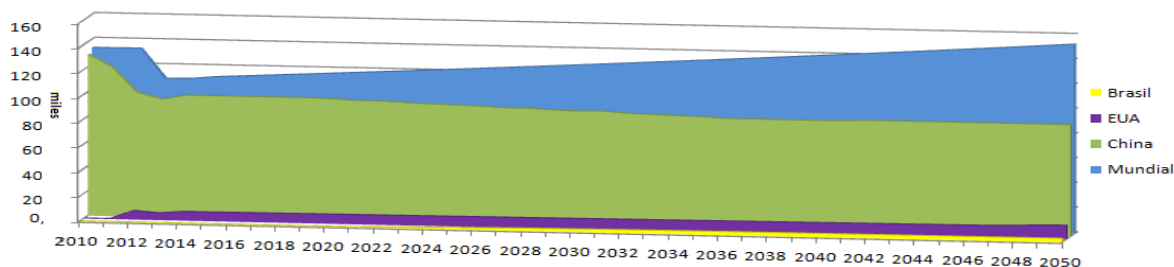


Figura 8. Panorama mundial do abastecimento de TRs.

## 5. Conclusão

Neste trabalho, avaliou-se os sistemas de abastecimento brasileiro de TRs, bem como a sua representação no sistema multi-ofertas. Um modelo dinâmico foi proposto para fundamentar a análise e as condições iniciais desta simulação foram dados fornecimentos por órgãos responsáveis. Considerando a crescente demanda nacional e internacional de TRs, o país tem grande potencial para ter participação no mercado mundial tornando-se um *player* relevante. A viabilidade de atingir esse patamar requer o alavancamento em outra escala de produção e efetivar a reciclagem de TRs no Brasil. A produção mundial para 2050 seria aproximadamente de 153.000 toneladas como base nos resultados obtidos. Para o mesmo período, embora a China diminua a sua produção, ainda sim continuaria sendo o maior fornecedor de TRs. Paralelamente, os EUA teria uma previsão de produção de 10% no mercado mundial. Estimou-se que a participação brasileira seria de 2,2% na produção em oposição ao cenário encontrado em 2009 com o melhoramento na taxa de produção e um sistema de reciclagem. Desta forma, trabalhos futuros e políticas que invistam em estudos aprofundados a respeito da viabilidade técnico-econômica destes empreendimentos no país é recomendado.

## 6. Agradecimentos

Agradeço ao CNPq e ao CETEM pelo incentivo e concessão da bolsa PCI.

## 7. Referências Bibliográficas

- DNPM, B. D. **Sumário Mineral** (ISS 01012053 ed., Vol. 1. 41 p.:il;29cm). 2015
- FORRESTER, J. **Industrial Dynamics**. 1.ed, p.98-101,1958.
- KIFLE, D., SVERDRUP, H., KOCA, D. & WIBETOE, G. A Simple Assessment of the Global Long Term Supply of the Rare Earth Elements by Using a System Dynamics Model. **Environment and Natural Resources Research**, v.3, p.78-91, 2013.
- MME. **Plano nacional de Mineração (PNM)** 178p.1v. Brasília.2010
- ORTIZ, C. E., & JÚNIOR, E. M. Rare earth elements in the international economic scenario. **Revista Escola de Minas**, v.67, p.361-366, 2014.
- ROCIO, M. A., DA SILVA, M., DE CARVALHO, P. S., & CARDOSO, J. G. Terras-raras: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial** 35, p. 369-420, 2012.
- ROSKILL INFORMATION SERVICES LTD. **The economics of rare earths and yttrium. Technical report**, 2007.
- U.S.G.S. **Mineral Commodity Summaries**, January 2016.