



## Seleção de áreas para a construção de um repositório geológico em Minas Gerais

Jonusan R.A.S., Silva R.H.M., Silva C.A.M., Pereira C.

*Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, CEP 31270-901, Departamento de Engenharia Nuclear, Escola de Engenharia, Bl 4, Sala 2299 - Av. Antônio Carlos, 6627 Campus Pampulha, Pampulha – Belo Horizonte – MG  
e-mail: claubia@nuclear.ufmg.br*

---

### RESUMO

O processo de escolha de um local para a instalação de um repositório geológico final do combustível queimado é essencial para garantir o isolamento adequado de longo prazo dos radionuclídeos da biosfera. Entretanto, o grande número de fatores envolvidos – sejam eles: segurança de longo prazo, viabilidade sócio-econômica-ambiental e viabilidade técnica; – associados ao enorme espaço geográfico disponível para a implantação do repositório, torna o processo decisório complexo. O estudo aplicou, ao caso particular do Estado de Minas Gerais, uma metodologia de Análise de Decisão Multicritério Espacial, com o objetivo de identificar, classificar e excluir regiões de interesse para instalação de um repositório geológico. Os resultados indicam boas possibilidades de áreas adequadas para um repositório e os mesmos foram comparados com um estudo semelhante para o estado do Rio de Janeiro. Concluiu-se que é necessário novos trabalhos de levantamentos geológicos e a inclusão de novos dados para uma avaliação mais confiável.

*Palavras-chave: Combustível Nuclear, Seleção de Áreas, Repositório Geológico.*

---

### ABSTRACT

The siting of geological disposal facilities for the spent fuel is essential to ensure the proper long-term isolation of the radionuclides from the biosphere. However, the large number of factors involved – being: long-term safety, socio-economic-environmental viability and technical feasibility; – Associated with the enormous geographic space available for the deployment of the repository, the decision-making process complex. The study applied a methodology of multicriteria spatial decision analysis to the geographic region of the state of Minas Gerais. In order to identify, classify and exclude regions of interest for the installation of a geological repository. The results indicate good possibilities of adequate areas for a repository and it was compared with a similar study carried out in the state of Rio de Janeiro. It was concluded that new studies of geological surveys and the inclusion of new data are needed.

*Keywords: Nuclear Fuel, Siting, Geological Disposal Facility.*

---

## 1. INTRODUÇÃO

A deposição em formação geológica profunda dos rejeitos de alta atividade e combustível usado é, atualmente, considerada a alternativa mais adequada para o isolamento definitivo dos mesmos. Este método de disposição é o mais indicado por não depender de controles institucionais contínuos após seu fechamento [1].

O processo de planejamento e escolha do local é composto por várias etapas [2]. Apesar de serem agrupadas em cinco fases distintas, o número final é dependente das regulamentações nacionais. As fases são:

- Fase 1: Avaliação e seleção de áreas;
- Fase 2: Caracterização das áreas;
- Fase 3: Construção da instalação;
- Fase 4: Operação e fechamento da instalação;
- Fase 5: Pós-fechamento.

A seleção do local para a instalação do repositório deve considerar os seguintes fatores: segurança a longo prazo, viabilidade técnica e, considerações socioeconômicas, políticas e ambientais [1]. Estes fatores são, muitas vezes, antagônicos entre si e, para garantir a segurança do empreendimento, devem envolver análises numéricas e de julgamentos de especialistas em diversas áreas, como geologia, engenharia e proteção ambiental [1, 3]. Os repositórios podem ser construídos em diferentes tipos de rochas hospedeiras, como rochas cristalinas (granito), rochas sedimentares (argilas) ou formações salinas.

Apesar das atuais usinas term nucleares brasileiras estarem localizadas no Estado do Rio de Janeiro (RJ), a avaliação de áreas deve ser feita de uma perspectiva nacional. A Eletronuclear juntamente com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prepararam, em 2011, um Atlas do Potencial Nuclear Brasileiro, identificando áreas adequadas para a instalação de futuras centrais nucleares em todo o território nacional [4]. Além do Atlas, a EPE, através do Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030), obteve como resultado dos estudos de planejamento energético a necessidade da expansão da geração term nuclear em 4.000 MW, além de Angra III, sendo 2.000 MW na região Sudeste e 2.000 MW no Nordeste [5]. Estes dois trabalhos, indicam a possibilidade

de expansão da geração termonuclear para outros estados brasileiros. Portanto, considerando-se a possível expansão da geração para outros estados brasileiros e que se deve evitar a escolha de uma área ou local candidato como a melhor, é necessário realizar um levantamento nacional de áreas potenciais [2].

Considerando-se a extensão territorial brasileira e a necessidade de a determinação da adequabilidade de uma região ser realizada o mais rapidamente possível com o menor uso de recursos, devem ser utilizadas metodologias capazes de atender estes dois requisitos concomitantemente. Com este intuito utilizou-se uma metodologia que combina a análise multicritério baseada em julgamento de especialistas e Sistema de Informação Geográfica (SIG) para identificar, em uma determinada região de interesse, áreas preliminares para aprofundamentos dos estudos e tornando este processo mais ágil e barato [3].

O presente estudo apresenta a aplicação da metodologia, desenvolvida anteriormente para o estado do Rio de Janeiro (RJ) e para repositórios construídos em rochas cristalinas [3], no estado de Minas Gerais (MG) e a comparação entre estes dois estados.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

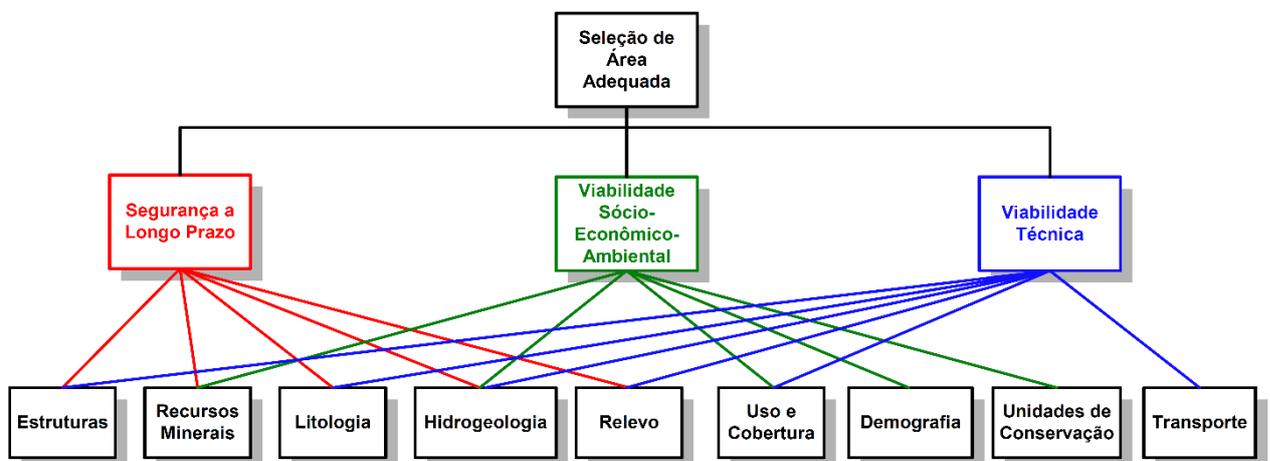
A metodologia aplicada pode ser separada em duas partes distintas: A Análise Multicritério – baseada em julgamentos de especialistas e Análise Hierárquica de Decisão (*Analytic Hierarchy Process* – AHP) – e a integração da análise em um SIG [3].

### 2.1. Critérios e Atributos

Para a primeira parte, de análise multicritério, utilizou-se os mesmos critérios e julgamentos de valor dos especialistas descritos por Martins [3], aplicando-os para o Estado de Minas Gerais (MG). Os critérios utilizados estão dentro dos requerimentos legais exigidos nacionalmente e recomendados internacionalmente [6, 7]. Os requerimentos legais nacionais estão contidos em uma norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) referente à “Seleção e Escolha de Locais

para Depósitos de Rejeitos Radioativos” que são aplicados “[...] à localização de *depósitos finais* ou *intermediários* ou *provisórios* para *rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação* [...]” [6]. Na ausência de critérios específicos para repositórios de rejeitos de alto nível, incluindo-se o combustível irradiado, utilizou-se a referida norma como norteador dos trabalhos de seleção. Os critérios e sua relação hierárquica são apresentados na Figura 1.

**Figura 1:** Critérios e estrutura hierárquica.



Fonte: [3]

O critério de Segurança a Longo Prazo (SLP) é referente à segurança geológica/geotécnica do repositório, da construção ao isolamento pós-fechamento. A Viabilidade Sócio-Econômico-Ambiental (VSEA) diz respeito à relação entre a construção e operação do repositório e os meios social e ambiental na área de implantação. A Viabilidade Técnica (VT) é referente aos critérios técnicos mais importantes na construção e operação do repositório [3].

Cada critério, por sua vez, é composto por uma série de atributos. Os atributos considerados foram: Litologia, Uso e Cobertura do Solo, Favorabilidade Hidrogeológica, Recursos Minerais, Transportes, Declividade e Estruturas. Ambos, critérios e atributos, são classificados em uma escala padronizada de 1 a 5 segundo parâmetros qualitativos, sendo: 1 - muito ruim, 2 – ruim, 3 – regular, 4 – boa, 5 – muito boa.

A Litologia é um dos principais atributos a serem analisados, uma vez que repositório geológico é uma instalação subterrânea permanente e tem como última barreira de contenção a própria rocha a

ser escavada. Desta maneira, somente alguns tipos de rochas são adequados para abrigar um repositório.

Nesse contexto, as rochas sedimentares inconsolidadas receberam as menores notas na classificação por apresentarem menores coesões entre seus constituintes mineralógicos, proporcionando maiores dificuldades técnicas nas perfurações de galeria destinadas ao repositório, sendo, portanto, classificadas com a nota 1 (Ver Tabela 1). As rochas sedimentares consolidadas recebem a nota 2 e são exemplificadas por arenitos e argilitos [8].

As rochas metamórficas, foram subdivididas em duas categorias: a primeira compreendendo Quartzitos e Xistos (nota 3) e a segunda Paragneisses (nota 4). Em relação às rochas de nota 3, embora sejam consideradas “duras”, as foliações bem desenvolvidas podem proporcionar escorregamentos planares e/ou em cunha prejudicando avanços das galerias e/ou aumentos de gastos com medidas de contenção [9].

Paragneisses são rochas de elevado grau metamórfico e consideradas rochas “duras”, as quais apresentam protólitos sedimentares e uma maior variedade mineralógica [10]. As rochas ígneas (nota 5), no qual se enquadram de modo geral aos Granitóides, são produzidas por arrefecimentos do magma ou pela fusão crustal [11].

A utilização das rochas com nota 4 ou 5 são as mais indicadas para o desenvolvimento do projeto, embora características como famílias de fraturas, zonas de cisalhamentos rúptil e dúctil, estrutural, geotectônica sejam importantes fatores a serem considerados no sítio geológico [3].

A classificação litológica empregada na metodologia do trabalho expressa apenas caracterização petrográfica e diagenética das rochas, no qual, apoiou-se na escala de mapeamento de 1:1.000.000. Foi utilizado o Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais produzida pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e pela Companhia de Desenvolvimento Econômico do Estado de Minas Gerais (CODEMIG) [12]. Tais procedimentos de análise considerada nessa pesquisa, não consideraram os fundamentos geotécnicos aplicados nas atuais obras de engenharia.

O atributo Uso e Cobertura do Solo é importante quando se considera a construção e operação do repositório. Apesar de ser uma estrutura subterrânea, o uso do solo ou classes de cobertura e uso da terra podem inviabilizar a construção e operação do mesmo [13, 14, 15]. Neste sentido são classificadas como áreas impróprias para a construção áreas de corpos d’água continentais (rios e

lagos), áreas urbanas e áreas de proteção ambiental. Foram utilizados os mapas das classes de cobertura e uso da terra do Brasil em escala 1:1.000.000 [16].

A favorabilidade hidrogeológica afeta a construção, operação e segurança de longo prazo do repositório. A presença de água subterrânea torna mais difícil, mas não inviabiliza, a construção do repositório. A água subterrânea pode ainda reagir com as barreiras de contenção do repositório, e, em casos de acidentes, pode facilitar o transporte dos radionuclídeos para o restante da biosfera [13, 14, 15]. Desta maneira, são classificadas positivamente as áreas com menor permeabilidade. Foram empregados os dados de favorabilidade hidrogeológica de Minas Gerais em escala 1:2.500.000 [17].

Ações humanas futuras, como a busca por recursos minerais, podem resultar na liberação, não intencional, dos radionuclídeos dispostos no repositório. Portanto, o repositório deve ser localizado em regiões que não disponham de potenciais reconhecidos de recursos minerais [14, 15, 18]. Áreas classificadas como de Aproveitamento Mineral Comprovado foram consideradas impróprias. Neste trabalho, utilizou-se os mapas e a classificação das áreas de relevante interesse mineral criados por [19] em escala 1:100.000.

Dada a necessidade de transporte do combustível queimado do local de armazenamento até o repositório final, o repositório deve ser construído próximo ao sistema de transporte já estabelecido para facilitar o transporte do material, para a construção do repositório e para a redução dos custos de construção [13, 14, 15]. Utilizou-se como critério de classificação a distância euclidiana entre os locais analisados do eixo da malha rodoviária (estadual e federal) e malha ferroviária existente em MG a partir da malha vária dos mapas do sistema de transporte estadual em escala 1:250.000 [20].

Terrenos acidentados, isto é, de perfil montanhoso, podem dificultar os trabalhos de construção e operação do repositório devido à topografia não favorável e devido a fenômenos naturais como deslizamento de terra [3, 15]. Neste trabalho, os terrenos classificados como Escarpados, de declividade maior que 75%, foram considerados como impróprios. Os dados da declividade em percentual do Brasil, com resolução espacial de 90 metros, foram utilizados [21].

Estruturas são as falhas (zonas de cisalhamento) e fraturas existentes nas massas rochosas. Podem representar zonas de instabilidade e fraqueza na rocha hospedeira. As estruturas podem ainda facilitar o transporte de águas subterrâneas na região do repositório [3, 13]. Foram empregados as falhas e fraturas mapeadas em Minas Gerais em escala 1:1.000.000 [12]. Áreas em

buffer de 1 km ao redor das falhas foram consideradas com áreas impróprias e todas as outras foram consideradas muito boas.

As notas de cada atributo foram obtidas e adaptadas de Martins [3]. A Tabela 1 apresenta a classificação de cada atributo.

**Tabela 1:** Classificação dos atributos

Classificação dos Atributos						
Classificação - Nota	Litologia	Uso e Cobertura (ZEE)	Favorabilidade Hidrogeológica (CPRM)	Recursos Minerais	Transportes (Distância da Malha de Transportes)	Declividade
Muito Ruim - 1	Sedimentos inconsolidados (Sedimentos Clásticos e lateríticos)	Área úmida	-	Áreas indicativas de aproveitamento mineral	18 - 30 km	Montanhoso
Ruim - 2	Sedimentar (Arenito, Argilito)	Vegetação florestal, Vegetação campestre	Alta	-	12 - 18 km	Fortemente ondulado
Regular - 3	Metamórfica (Quartzito, Xisto)	Mosaico de vegetação	Variável	Áreas com potencial para o aproveitamento mineral	7 - 12 km	Ondulado
Boa - 4	Metamórfica (Paragnaisse)	Área agrícola, Pastagem, Silvicultura, Mosaico de agropecuária	Baixa	-	3 - 7 km	Suavemente ondulado
Muito Boa - 5	Ígnea (Basalto, Granito, Ortognaisses TTG)	Área descoberta	-	Áreas sem o potencial para o aproveitamento mineral	0 - 3 km	Plano

Fonte: Adaptado de [3]

## 2.2. Adequação dos Dados

Os dados espaciais utilizados foram obtidos de diversas fontes oficiais, como o Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [12, 16, 17, 19, 20, 21]. Para garantir que todos os dados estivessem no mesmo sistema geodésico de referência, todos foram projetados ou reprojados, para o mesmo sistema de coordenadas. utilizou-se o Sistema de Coordenadas UTM

SIRGAS 2000 Brasil Policônico. Para o tratamento dos dados e criação dos Índices de Adequabilidade (I.A.) utilizou-se o *software* Esri® ArcMap™ 10.6.1.

O próximo passo foi a transformação dos dados que estavam em arquivos vetoriais, como os dados de geologia, para arquivos *raster*. Utilizou-se como padrão uma resolução espacial em 90 metros.

### 2.3. Atribuição de Pesos

Os pesos de cada atributo são o resultado da avaliação por especialistas em áreas de conhecimento relevantes ao tema, enquanto o peso de cada critério corresponde à média geométrica dos atributos a ele associados [3]. A Tabela 2 apresenta os pesos definidos pelo método AHP.

**Tabela 2** : Pesos dos Critérios e Atributos

Atributo	Critérios		
	Segurança a Longo Prazo	Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental	Viabilidade Técnica
Estruturas	0,321	-	0,301
Recursos Minerais	0,062	0,262	-
Litologia	0,200	-	0,180
Hidrogeologia	0,255	0,154	0,174
Relevo	0,096	-	0,108
Uso e Cobertura	-	0,432	0,079
Transporte	-	-	0,044
<b>Peso Final</b>	<b>0,578</b>	<b>0,224</b>	<b>0,110</b>

Fonte: Adaptado de [3]

### 2.4. Mapas de Adequabilidade

A criação dos mapas de adequabilidade envolve a junção das classificações dos atributos e dos pesos com os dados espaciais. Desta maneira, a cada conjunto de dados espaciais é necessário a associação com um atributo. Para este fim utilizou-se as ferramentas da extensão *Spatial Analyst*. Após a padronização dos dados de entrada, utilizou-se a ferramenta *reclassify* para atribuir aos

dados *raster* os valores descritos na Tabela 1. No caso específico do atributo de transportes, utilizou-se a ferramenta *euclidean distance* para, primeiramente, calcular, para cada célula, a distância euclidiana ao ponto mais próximo do eixo das rodovias, para a posterior utilização da ferramenta *reclassify*.

As notas dos atributos representada nas *Layers* é, matematicamente, uma matriz quadrada  $M_{ij}$ , de ordem  $m$ . A *layer* agregada, representada pelos critérios, é uma matriz quadrada  $R_{ij}$ , de ordem  $m$ , e pode ser calculada através da combinação linear entre as matrizes  $M_{ij}$  e os pesos de cada atributo,  $w_k$ ,

$$R_{ij} = \sum_{l=1}^l M_{ij}^l * w_k^l \quad (1)$$

Onde  $l$  representa o número de atributos utilizados na análise de cada atributo [3].

De maneira similar, o I.A. final da região estudada  $A_{ij}$  é obtido através da combinação linear das matrizes  $R_{ij}$  e os pesos de cada critério.

$$A_{ij} = \sum_{l=1}^l R_{ij}^l * w_k^l \quad (2)$$

Onde  $l$  representa as matrizes dos critérios obtidos com a utilização da equação 2 [3].

A operação matricial envolvida nas equações 1 e 2 é realizada com o auxílio da ferramenta *Raster Calculator*. Os resultados desta ferramenta são os mapas de adequabilidade.

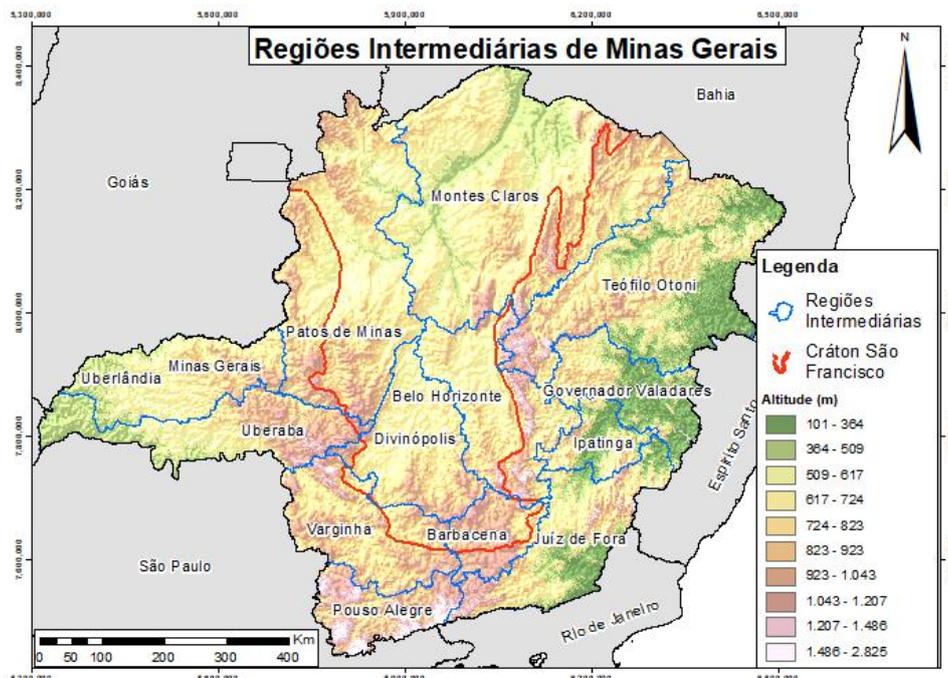
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

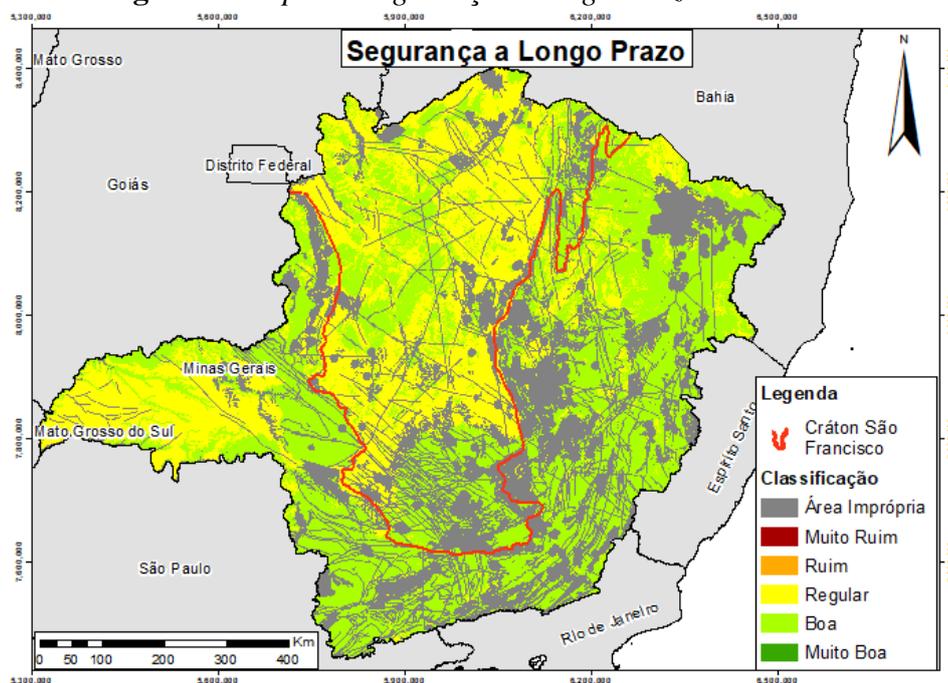
Para facilitar o trabalho de análise, considerando a grande extensão territorial de MG, serão consideradas as divisões territoriais regionais, as chamadas Regiões Geográficas Intermediárias (antigas Mesorregiões), como mostra a Figura 2. MG é dividido em 13 regiões intermediárias estruturadas ao redor de Metrôpoles, Capitais Regionais ou centros urbanos representativos para as cidades da região [22].

Analisando-se primeiramente os critérios considerados para a criação do Índice de Adequabilidade, é possível perceber que em relação à SLP, Figura 3, MG possui, predominantemente, áreas

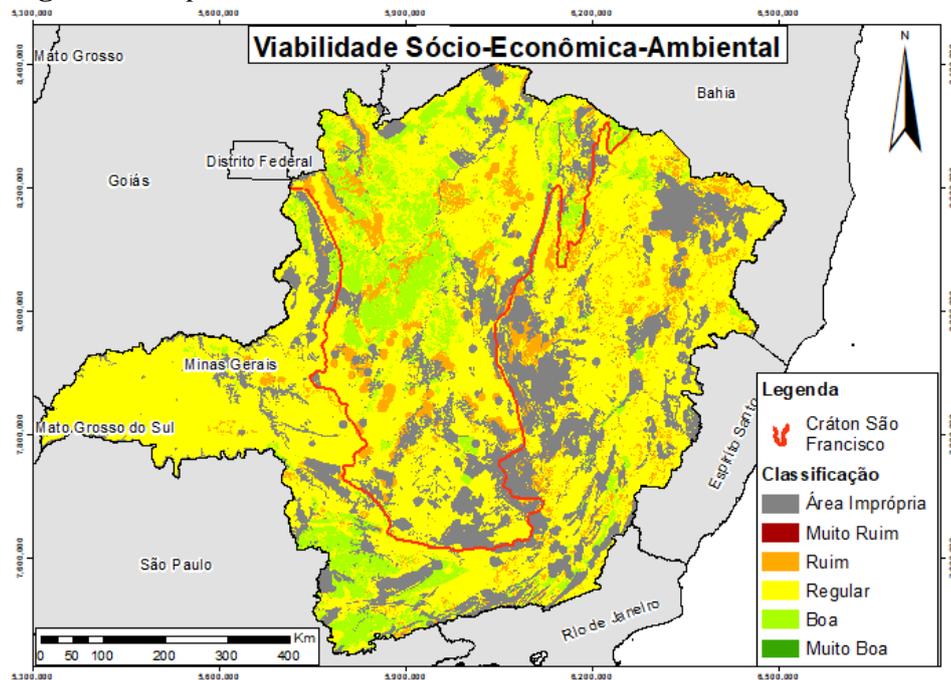
classificadas como 4 – Boa, sobretudo nas regiões adjacente às bordas externas do Cráton São Francisco (CSF). Estas regiões são consideradas Cinturões Orogênicos. Nas bordas externas a oeste, sul e leste do CSFA estão localizados os Cinturões Brasília (leste de Uberaba, Varginha e Pouso Alegre), Ribeira (Pouso Alegre, sul de Barbacena e sudoeste de Juiz de Fora) e Araçuaí (Juiz de Fora, Ipatinga, Governador Valadares, Teófilo Otoni e leste de Montes Claros), respectivamente [23]. Nestas regiões estão concentradas as áreas com as melhores classificações em dois dos principais atributos deste critério, a Litologia e a Favorabilidade Hidrogeológica. Outra área de classificação 4, ocorre na região sul no interior do CSF, nas regiões de Barbacena, Divinópolis e Belo Horizonte. Esta região é marcada pela presença do Cinturão Orógeno Minério e o Quadrilátero Ferrífero (QF). Esta é a única região do CSF em MG com o embasamento do arqueano exposto. O embasamento é composto por complexos metamórficos e de *greenstone belts* [23]. Devido à falta de dados detalhados da Favorabilidade Hidrogeológica de MG deste atributo é possível que, em alguns locais, a classificação esteja, ou subestimada, ou superestimada. O aproveitamento mineral comprovado foi o critério de exclusão mais relevante para este estudo. MG é reconhecido como uma das regiões mineiras mais importantes mundialmente. Nota-se que as regiões consideradas improprias estão localizadas, sobretudo, na borda sul e leste do CSF.

**Figura 2:** Mapa das Regiões Intermediárias de Minas Gerais.

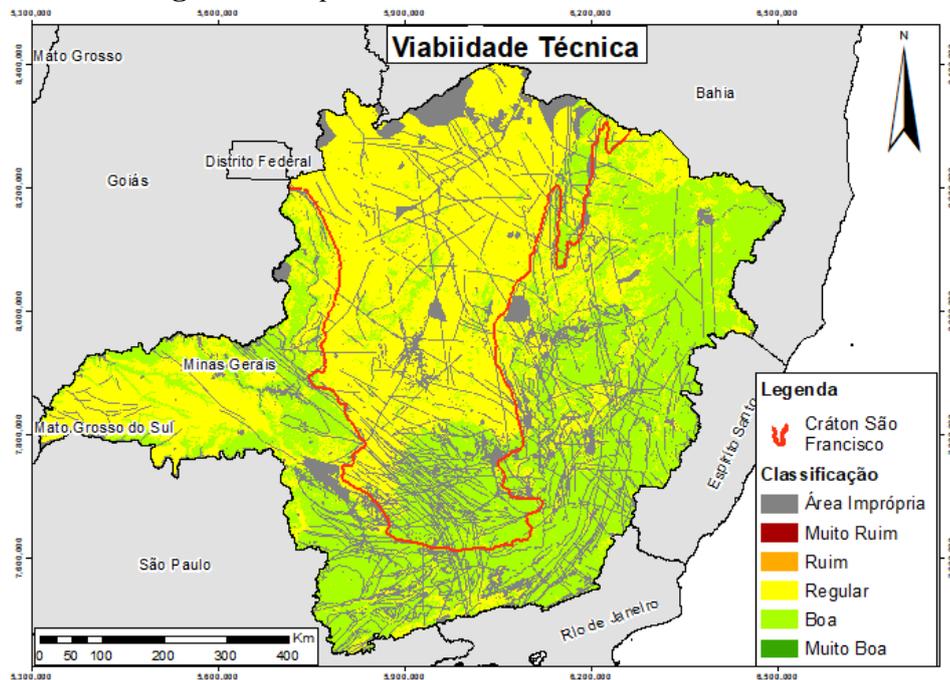


**Figura 3:** Mapa de Segurança a Longo Prazo de MG.

Quanto à VSEA, Figura 4, apesar de MG possuir, predominantemente, a classificação Boa no atributo mais relevante para este critério, Uso e Cobertura do Solo, as baixas classificações nos outros atributos foram determinantes para que a classificação Regular ocorresse na maior parte do estado. Na região do Triângulo Mineiro (Uberlândia e Uberaba), a classificação Ruim no atributo Favorabilidade Hidrogeológica foi preponderante para a classificação Regular. Para o restante de MG, principalmente nas bordas do CSF, o potencial para o aproveitamento mineral foi determinante para a classificação Regular. Assim como na SLP, é possível que a falta de detalhes da Favorabilidade Hidrogeológica, subestime ou superestime, a classificação de uma determinada região ou local. Os atributos mais importantes para a classificação das áreas impróprias neste atributo foram: o aproveitamento mineral comprovado, áreas úmidas (rios ou lagos), centros urbanos e reservas de proteção ambiental. Este é único critério que possui uma grande quantidade de áreas classificadas como ruins.

**Figura 4:** Mapa de Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental de MG.

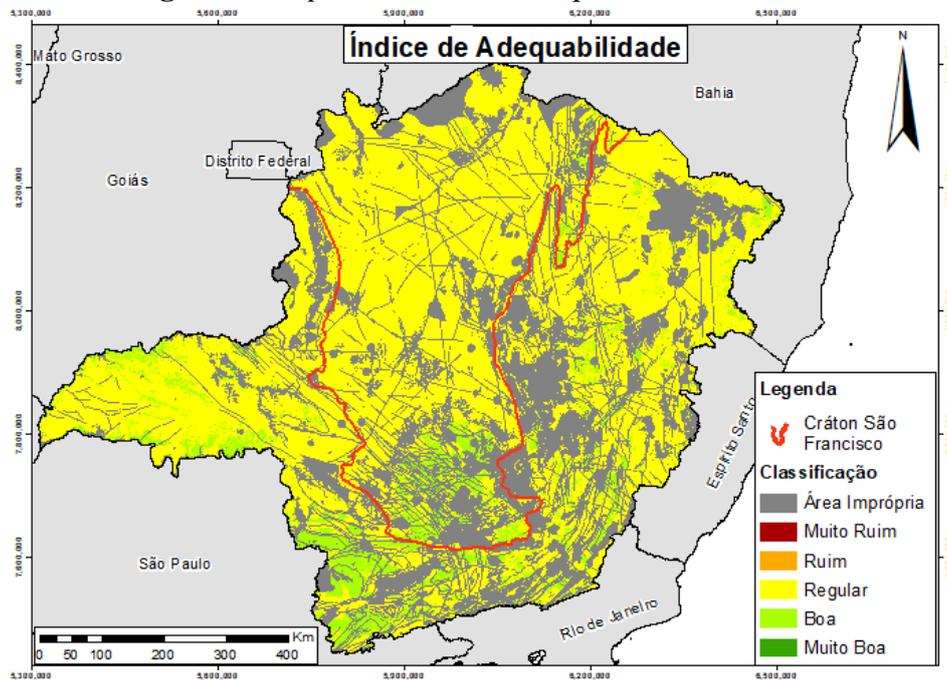
A VT, Figura 5, é marcada pelo predomínio de áreas regulares e boas. A distribuição das áreas consideradas como Regulares ou Boas tem um comportamento muito similar ao critério SLP. Entretanto, nota-se a presença de mais áreas consideradas Regulares no interior do CSF. Este fato ocorre devido ao menor número de rodovias ou ferrovias nas regiões ao Norte de MG. Este é o único critério com áreas consideradas impróprias devido à distância da malha de transporte. Além disso, foram consideradas impróprias: áreas úmidas, adensamentos urbanos, áreas de conservação e locais no entorno de falhas.

**Figura 5: Mapa de Viabilidade Técnica de MG.**

Após a análise do mapa I.A., Figura 6, para MG, verifica-se que a maior classificação alcançada no Estado é a 4 – Boa. As cinco regiões com as maiores áreas classificadas como Boa são: Varginha (7.684 km<sup>2</sup>), Pouso Alegre (6.020 km<sup>2</sup>), Uberaba (4.594 km<sup>2</sup>), Uberlândia (4.082 km<sup>2</sup>) e Divinópolis (3.775 km<sup>2</sup>). As áreas estão distribuídas, majoritariamente no sul de MG, assim como nos critérios, nas regiões com litologias compostas predominantemente de rochas ígneas (granitos) e metamórficas de alto grau (ortognaisses).

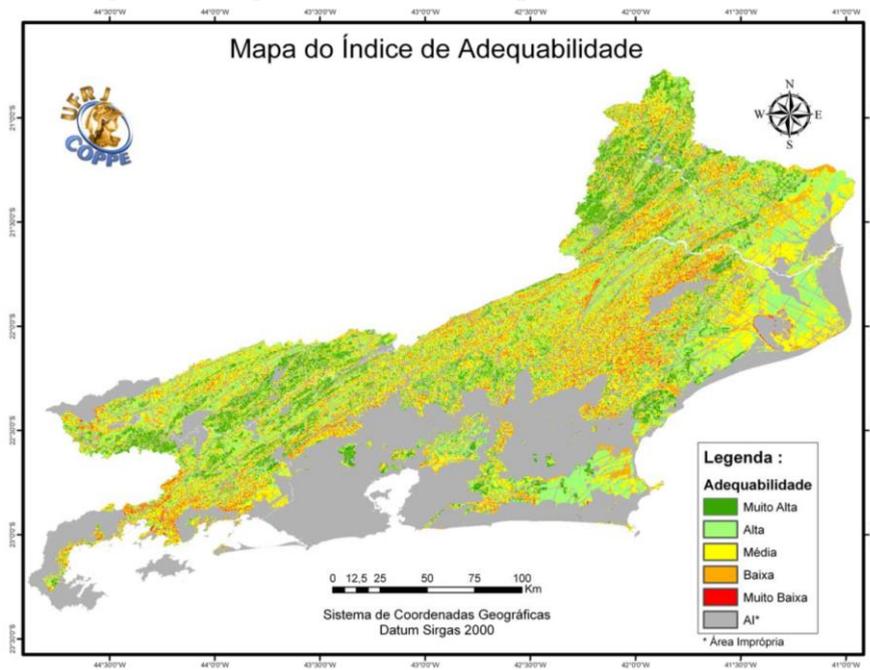
O Estado é dominado por áreas consideradas Regulares (341.843 km<sup>2</sup>), seguido por áreas consideradas Impróprias (210.511 km<sup>2</sup>), Boas (41.553 km<sup>2</sup>) e ruins (169 km<sup>2</sup>). Não sendo encontradas áreas nos extremos da classificação, muito ruins ou muito boas, do I.A.

As áreas consideradas impróprias são, principalmente, áreas com aproveitamento mineral comprovado. Outras áreas importantes excluídas foram as áreas de proteção ambiental e áreas urbanas.

**Figura 6:** Mapa do Índice de Adequabilidade de MG.

### 3.1. Comparação MG/RJ

Comparando-se os resultados obtidos para MG, Figura 5, com o estudo original feito para o RJ [3], Figura 7, nota-se que o RJ apresenta um grande número de áreas classificadas como boas e muito boas, alta e muita alta respectivamente no trabalho original, ao contrário de MG, onde predominam áreas classificadas como regulares, médias no trabalho original. As regiões com os maiores índices de adequabilidade estão localizadas próximo a MG.

**Figura 7:** Mapa do Índice de Adequabilidade do RJ.

As razões pelas quais existem diferenças tão grandes nos índices de adequabilidade entre os dois estados podem ser explicadas em parte por diferenças na metodologia utilizada e pela qualidade dos dados envolvidos. As diferenças na metodologia estão concentradas na classificação dos atributos Recursos Minerais e Transportes.

A classificação do atributo Recursos Minerais em [3] foi realizada considerando-se o grau de exploração dos recursos e, ao se analisar o mapa de classificação do mesmo, observa-se que foram utilizados dados espaciais do tipo ponto. A utilização de pontos para este atributo desconsidera não só as dimensões espaciais dos depósitos ou jazidas minerais, mas também o potencial geológico de uma área. Destaca-se que o levantamento das Áreas de Relevante Interesse Mineral no Brasil (ARIM) realizado pelo Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), fonte de dados para este atributo, neste trabalho, foi publicado no mesmo ano que o trabalho original [3].

O atributo Transportes, por sua vez, considerou somente as classes de rodovias (estaduais ou federais), sendo utilizado dados espaciais do tipo linha. A classificação deste atributo considerando somente o tipo de rodovia e analisando-se somente o eixo da mesma exclui áreas que não são atendidas pela malha viária existente ou não estão adjacentes às rodovias.

Sobre a qualidade dos dados, para o RJ foram utilizados dados espaciais de escalas maiores do que os disponíveis para MG. A menor escala utilizada na criação do I.A. do RJ foi 1:500.000 e a maior 1:50.000, enquanto para MG a menor escala foi 1:2.500.000 e a maior 1:100.000. A utilização de escalas maiores resulta em uma representação mais fidedigna da realidade e resulta em mapas mais precisos.

A falta de dados detalhados sobre MG, assim como em grande parte do território nacional, é explicada pela dificuldade de obtenção de tais dados. Os trabalhos de levantamento geológico básico podem ser divididos em três etapas, sendo elas de caráter dependente, sucessivas e distintas. Possui como as principais técnicas iniciais: a reinterpretação, georreferenciamento e integração de mapas geológicos anteriores, obtenção de novas imagens por sensoriamento remoto e fotografias aéreas, geofísica aerotransportada e geoquímica na fase I; geofísica e mapeamento de superfície em detalhes na fase II e; levantamentos topográficos e mapeamentos de subsuperfície (sondagens, trincheiras, entre outros) na última fase [24]. Dados os custos e dificuldades envolvidos, nem mesmo os trabalhos de prospecção de recursos minerais cobrem, em maiores detalhes, todo o território nacional. A título de comparação, somente 25% do território brasileiro foi prospectado em busca de urânio [25].

Minas Gerais possui uma grande vantagem em relação ao Rio de Janeiro em relação às etapas seguintes da continuidade dos estudos de um repositório: a presença de minas subterrâneas com profundidade igual ou maior de um repositório. Do total de 45 minas com profundidade igual ou maior que 500 m, 26 estão localizadas em MG [26]. Apesar de não poderem ser convertidas, após o fim de sua vida útil, em um repositório por estarem em áreas que estimulem a busca por minerais de interesse econômico, podem ser utilizadas como laboratórios de pesquisa subterrâneos. Estes laboratórios, ainda que genéricos em sua natureza, podem ser utilizados para a “construção da experiência no que concerne o trabalho experimental *in situ*.” [27].

### **3.2. Comparação MG/RJ – Ambiente Geotectônico**

Duas unidades geológicas em MG se destacam no I.A.: o sul do CSF e o Orógeno Araçuai/Ribeira.

O Cráton do São Francisco é uma das principais unidades geológicas aflorantes e abrange considerável parte de MG(Fig.1) [28]. Estruturalmente o CSF se apresenta com fortes características de retrabalhamentos estrutural, por ser constituído inicialmente por colisões e amalgamento de paleocontinentes. Este fato, propiciou diversas faixas de dobramentos localizadas nas extremidades com padrão intensamente colisional, [28]. A região sul do Cráton é composta, entre outros, por granitoides arqueanos e paleoproterozoicos, um complexo metamórfico basal e uma sequência *greenstone belt* [23].

O Orógeno Araçuaí/Ribeira, encontra-se na borda leste do Cráton São Francisco e estende-se até a divisa entre MG e RJ. Este órogeno corresponde a um órogeno colisional, integrante do Ciclo Orogênico Brasileiro, ocorrido durante o neoproterozóico/cambriano, sendo, portanto, uma das faixas de dobramento localizadas nas bordas do Cráton São Francisco [28, 29]. O Orógeno é composto por gnaisses, ortognaisses (bandados e granulíticos) e migmatitos TTG (tonalito-trondhjemitó-granodiorito), plútons graníticos e sequências do tipo *greenstone belt*.

No RJ as regiões com os maiores I.A. estão localizadas no Domínio Juiz de Fora/Paraíba do Sul. Este Domínio ocupa a porção centro-norte e ocidental do estado. Do ponto de vista estrutural, corresponde a raízes de um arco pré-colisional transamazônico acrescido ao Cráton São Francisco e retrabalhado durante uma nova colisão durante o Ciclo Brasileiro. É constituído por gnaisses, quartzitos e mármore, intercalados por ortogranulitos e ortognaisses tonalíticos. Os Domínios Serra do Mar e da Região dos Lagos, respectivamente nas regiões centro-oriental e oriental do RJ, também apresentam regiões com alto I.A. [29].

#### 4. CONCLUSÕES

De modo geral, a rocha hospedeira o local destinado a um repositório geológico deve possuir características físicas, químicas e geométricas que inibam, retardem ou diluam os radionuclídeos dos rejeitos em caso de falha [27]. Estruturas geológicas associadas a falhas, famílias de fraturas e discordâncias são importantes parâmetros a serem estudadas de forma a correlacionar com a profundidade da unidade geológica escolhida. As propriedades mecânicas da rocha devem ser favoráveis à instalação do projeto, de modo que mitiguem ou previnam perigos radiológicos durante o tempo que o material radioativo permanecer no ambiente do repositório [1].

Porém, propiciar todas essas características acima citadas em um único ambiente não é factível. A história geológica é composta de inúmeros eventos estruturais, geotectônicas e estratigráficos ocorridos, ao longo de 4,3 bilhões de anos de evolução do planeta, tornam qualquer ambiente geológico extremamente complexo.

A escolha por um determinado tipo de rocha hospedeira para o repositório depende das condições geológicas disponíveis em cada país. Este trabalho concentrou-se na seleção de locais para a instalação de um repositório em rochas cristalinas. Entretanto, dada a extensão territorial brasileira e sua diversidade de ambientes geológicos a seleção de locais para repositórios baseados em outros tipos de rochas não deve ser descartada.

As áreas de melhor classificação estão concentradas nas bordas do CSF, mais especificamente, nos cinturões orogênicos Brasília, Ribeira e Araçuaí. Outra região com boa classificação é a parte sul do CSF.

Comparativamente, os repositórios da Finlândia e da Suécia estão sendo construídos em ambientes geotectônicos similares às áreas de melhor classificação encontradas neste estudo. O repositório finlandês está sendo construído no complexo de arcos acreacionários da Finlândia central e ocidental [30]. O repositório sueco, por sua vez, está sendo construído na região do cinturão orogênico Svecokarelian [31].

A comparação entre a adequabilidade de MG e do RJ não pode ser realizada adequadamente com os resultados obtidos neste trabalho por, principalmente, diferenças metodológicas e da qualidade dos dados existentes para cada estado.

Portanto, são necessários novos trabalhos de levantamento de mapeamento não só para MG e para o RJ, mas para todo o Brasil. Estes trabalhos tornarão possível a comparação adequada da adequabilidade entre os estados. Além disso seria importante a inclusão de outros atributos como, por exemplo, a presença de sismos, aceitação social e riscos de desastres naturais. A inclusão de um atributo de aceitação social é importantíssima se consideramos que a instalação do repositório não seria imposta à população da municipalidade escolhida.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro. Mapas ao longo deste trabalho foram criados usando o software ArcGIS® pela Esri. ArcGIS®, ArcCatalog™ e ArcMap™ que são de propriedade intelectual da Esri e são usados aqui sob licença. Copyright © Esri. Todos os direitos reservados. Para obter mais informações sobre o software de Esri®, por favor visite [www.esri.com](http://www.esri.com).

## REFERÊNCIAS

- [1] IAEA - International Atomic Energy Agency. **Siting of Geological Disposal facilities. IAEA Safety Series No. 111-G-4.1**, Viena: IAEA, 1994.
- [2] IAEA - International Atomic Energy Agency. **Planning and design considerations for geological repository programmes of radioactive waste. IAEA TECDOC Series No. 1755**, Viena: IAEA, 2014
- [3] V. B. Martins. **Metodologia Baseada em Sistemas de Informação Geográfica e Análise Multicritério para a Seleção de Áreas para a Construção de um Repositório para o Combustível Nuclear Usado. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear)**., Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [4] M. Salomon. **Acidente no Japão atrasa usinas do nordeste, O Estado de São Paulo**. São Paulo, São Paulo, Brasil. Disponível em: <https://sustentabilidade.estadao.com.br/noticias/geral,acidente-no-japao-atrasa-usinas-do-nordeste,716834>>. Acesso em: 22 Out. 2018.
- [5] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007.
- [6] CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos. CNENNE-6.06**, Rio de Janeiro: CNEN, 1989

- [7] IAEA - International Atomic Energy Agency. **Geological disposal facilities for radioactive waste. Safety Standards Series No. SSG- 14**, Viena: IAEA, 2011.
- [8] S. BOGGS JR, S. BOGGS. **Petrology of sedimentary rocks**. Cambridge university press, 2009.
- [9] G. N. C. Sgarbi, **Petrografia macroscópica das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [10] T. J. S. dos SANTOS et al. Petrografia e litogeoquímica das rochas do embasamento cristalino da região de Granja–CE. **Geologia**, v. 14, n. 1, 2001.
- [11] L. V. S. Nardi, Granitoides e séries magmáticas: o estudo contextualizado dos granitoides. **Pesquisas em Geociências**, v. 43, n. 1, p. 85-99, 2016.
- [12] Pinto, C. P., & Silva, M. A. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, Escala 1: 1.000.000**. CPRM-CODEMIG, Belo Horizonte, MG, 2014. Disponível em: <<http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>>. Acesso em 20/04/2019.
- [13] KBS - Kärn Bränsle Säkerhet, **Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High Level Reprocessing Waste – Volume I**. Suécia: KBS, 1977.
- [14] NUMO - Nuclear Waste Management Organization of Japan. **Evaluating site suitability for a HLW repository, scientific background and practical application of NUMO's siting factors**. Japão: NUMO, 2004.
- [15] SFOE - Swiss Federal Office of Energy. **Sectoral Plan for Deep Geological Repositories: Conceptual Part**. Suíça: SFOE, 2008.
- [16] IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Brasil: IBGE, 2014. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/cobertura\\_e\\_uso\\_da\\_terra/mudancas/mapas](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/cobertura_e_uso_da_terra/mudancas/mapas)>. Acesso em 30/05/2018.
- [17] M. F. Machado; S. F. da Silva. **Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. Brasil: CPRM, 2010. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geodiversidade/Mapas-de-Geodiversidade-Estaduais-1339.html>>. Acesso em 30/05/2018.
- [18] OECD-NEA - Organisation for Economic Co-operation and Development-Nuclear Energy Agency. **Future Human Actions at Disposal Sites: a Report of the NEA Working Group on**

**Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites.** Paris: OECD, 1995

- [19] G. M. M. de MATOS; I. S. de C. MELLO; J. H. GONÇALVES. **Áreas de relevante interesse mineral no Brasil-ARIM**, Brasil: CPRM, 2009. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/downloads/#>>. Acesso em 30/05/2018.
- [20] DNIT - Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. **Sistema Nacional de Viação**. Brasil: DNIT, 2016. Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/vgeo/>>. Acesso em 30/05/2018.
- [21] J. F. L. Neto. **Mapa de declividade em percentual do relevo brasileiro**. Brasil: CPRM, Brasil, 2013. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geodiversidade/Mapa-de-Declividade-em-Percentual-do-Relevo-Brasileiro-3497.html>>, Acesso em 30/05/2018.
- [22] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Divisão Regional do Brasil em Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2017.
- [23] M. Heilbron, U. G. Cordani, & F. F. Alkmim (Eds.). **São Francisco Craton, Eastern Brazil: Tectonic Genealogy of a Miniature Continent**. Springer., 2016
- [24] R. J. L. Maranhao. **Introdução à pesquisa mineral**. Brasil: Banco do Nordeste do Brasil SA Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste-ETENE, 1985.
- [25] A. F. S. Rodrigues, C.P. Ferraz. **Economia mineral do Brasil**. Brasília-DF: DNPM, p. 546-568, 2009.
- [26] DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral: **Cadastro Nacional de Minas Subterrâneas 2015**. Brasil: DNPM, 2015.
- [27] IAEA - International Atomic Energy Agency. **The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste**. IAEA TECDOC Series No. 1243, Viena: IAEA, 2001
- [28] M. F. Machado; S.F. Silva. **Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2010.
- [29] L. C. Silva; H.C. S Cunha. **Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM, 2001.

- [30] I. Aaltonen, J. Engström, S. Gehör, P. Kosunen, A. Kärki, M. Paananen, & J. A. Mattila. **Geology of Olkiluoto**. Posiva Oyj, 2016.
- [31] M. B. Stephens. **Forsmark site investigation. Bedrock geology-overview and excursion guide** (No. SKB-R--10-04). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2010.