

SUSCETIBILIDADE GEOLÓGICA DAS BARRAGENS DE MINERAÇÃO NO ESTADO DE MINAS GERAIS: UM PANORAMA PRELIMINAR A PARTIR DE MODELAGEM ESTATÍSTICA E MORFOMÉTRICA

GEOLOGICAL SUSCEPTIBILITY OF MINING DAMS IN THE STATE OF MINAS GERAIS: A PRELIMINARY OVERVIEW FROM STATISTICAL AND MORPHOMETRIC MODELING

FABIO DE LIMA NORONHA

Agência Nacional de Mineração – ANM; Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil; fabio.noronha@anm.gov.br

RESUMO ABSTRACT

O risco de acidentes e desastres relacionados a falhas no projeto, construção, operação e manutenção de barragens constituem tema de estudo bastante recorrente. Porém, poucos são os trabalhos que relacionam a possibilidade de falhas em barragens com processos geológicos que ocorrem no ambiente que as cercam. Paradoxalmente, não são raros os registros na literatura em que eventos pluviométricos extremos, enxurradas e movimentos de massa no entorno das estruturas foram deflagradores ou contribuíram para a sua ruptura. A presente pesquisa busca contribuir com o tema da segurança de barragens, a partir da identificação de cenários de suscetibilidade natural à deflagração de deslizamentos, corridas e enxurradas nos terrenos do entorno das barragens de mineração no estado de Minas Gerais. Para tal, executou-se uma modelagem estatística e morfométrica da suscetibilidade natural a movimentos de massa e processos hidrológicos, através do emprego de ferramentas de geoprocessamento em variáveis derivadas de modelo digital de elevação (MDE) e fotointerpretação, tais como lineamentos geológicos, declividade e curvatura do terreno. O produto final é a construção de um sistema de informação geográfica (SIG) com o zoneamento da suscetibilidade a movimentos de massa de todas as barragens de mineração do estado de Minas Gerais, oriundas do cadastro oficial da Agência Nacional de Mineração (ANM). O zoneamento permitiu o cálculo de estatísticas para o universo de barragens estudado, com base na suscetibilidade geológica de seus sítios de locação. Os resultados demonstram que 38% dos terrenos no entorno das

The risk of accidents and disasters related to failures in the design, construction, operation, and maintenance of dams is a recurring topic of study. Nevertheless, few works relate the possibility of failures in dams to geological processes that occur in the environment that surrounds them. Paradoxically, it is not rare to find records in the related literature in which extreme pluviometric events, flash floods, and mass movements around the structures triggered or contributed to the dam rupture. The present research aims to contribute to the dam safety theme, from the identification of scenarios of natural susceptibility to landslides, debris flows, and flash floods in the lands surrounding the mining dams in the state of Minas Gerais. For such, a statistical and morphometric modeling of the natural susceptibility to mass movements and hydrological processes was performed by the use of geoprocessing tools in variables derived from the digital elevation model (DEM) and photointerpretation such as geological lineaments, slope and curvature of the terrain. The final result is the construction of a geographic information system (GIS) with the zoning of susceptibility to mass movements of all mining dams in the state of Minas Gerais officially registered with the National Mining Agency (NMA). The zoning enabled the calculation of statistics for the studied dams universe, based on the geological susceptibility of their location. The results demonstrate that 38% of the land surrounding the dams has medium to high susceptibility to landslides, and that 30% of the

barragens possuem média a alta suscetibilidade a deflagração de deslizamentos, e que 30% das estruturas estão localizadas em bacias de drenagem com alta suscetibilidade aos processos de enxurradas ou de corridas de massa.

Palavras-chave: Suscetibilidade, Movimentos de massa, Enxurradas, Segurança de Barragens, Barragens de Mineração.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo tem como objetivo geral a identificação preliminar, através de modelagem estatística e morfométrica, dos cenários de suscetibilidade natural à deflagração de deslizamentos, corridas de massa e enxurradas nos sítios de locação das barragens de mineração no estado de Minas Gerais. Busca-se, assim, contribuir com o tema de segurança de barragens.

A escolha do estado de Minas Gerais como área de estudo justifica-se por ser este o local que concentra 42% de todas as barragens de mineração do Brasil, somando 365 estruturas, conforme cadastro da Agência Nacional de Mineração – ANM, autarquia responsável pela sua fiscalização. Além disso, o estado foi o palco da maior parte dos acidentes e desastres envolvendo este tipo de barragem, como, por exemplo, a barragem de Fundão, em Mariana (2015), e a barragem B1, em Brumadinho (2019).

O termo suscetibilidade pode ser descrito como a propensão natural dos terrenos ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo do meio físico (Macedo & Bressani 2013). O conhecimento destes dados é tradicionalmente utilizado no planejamento do uso e ocupação do território, bem como no controle da expansão urbana.

No caso das barragens de mineração, a identificação da suscetibilidade geológica permitiu a construção de um panorama inédito dos terrenos nos quais estas estruturas estão inseridas, compartimentando-os em 3 classes de suscetibilidade (alta, média e baixa) a processos de movimentos de massa e hidrológicos, conforme a metodologia de mapeamento proposta por CPRM e IPT (Bitar 2014).

structures are located in drainage basins with high susceptibility to flash flood or debris flow processes.

Keywords: Susceptibility, Mass movements, Flash Floods, Dam safety, Mining dams.

Os objetivos específicos são: (a) construção de um SIG com os dados de suscetibilidade geológica das 365 barragens de mineração de MG; (b) a parametrização da suscetibilidade, através da proposição de uma matriz de notas relacionadas ao grau de suscetibilidade a deslizamentos, corridas de massa e enxurradas, formatada de acordo com a sistemática de notas presente na Portaria DNPM nº 70.389/2017, a qual regulamenta as barragens de mineração frente à Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB e; (c) a produção de estatísticas sobre a suscetibilidade geológica das barragens de mineração no estado de MG.

A relevância dos dados produzidos nesta pesquisa traduz-se na possibilidade de sua utilização por gestores de barragens, como subsídio na avaliação de cenários de riscos a serem considerados no Plano de Segurança das estruturas (PSB) e nos Planos de Ação de Emergência (PAE). Aos órgãos fiscalizadores, a sua utilização pode se dar como ferramenta de gestão de segurança de barragens, servindo, por exemplo, como base para a formulação de exigências aos empreendedores, referentes à execução de investigações geotécnicas e hidrológicas detalhadas nas áreas identificadas como de média a alta suscetibilidade, incluindo medidas preventivas ou mitigadoras.

2 POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS – PNSB E O SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO

A PNSB, editada pela Lei 12.334/2010, estabelece em seu conteúdo critérios para o enquadramento de barragens, assim como relaciona os instrumentos de controle e gestão. São reguladas pela PNSB as barragens destinadas à acumulação

de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

- I. altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m;
- II. capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³;
- III. reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- IV. dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas;
- V. categoria de risco alto (incluído pela Lei Federal nº 14.066/2020).

Através da PNSB, a ANM (antigo DNPM) teve incorporadas as competências de órgão fiscalizador da segurança das barragens de mineração. Salienta-se que o papel de controle e fiscalização da ANM abrange também as barragens de mineração que não estão inseridas na PNSB, isto é, aquelas que não se encaixam nas características de enquadramento da referida lei.

Um dos instrumentos de gestão da PNSB é a implementação do sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado. Para normatizar a classificação das barragens de mineração, a Portaria DNPM nº 70.389/2017 utiliza uma matriz que analisa a categoria de risco *versus* o dano potencial associado da barragem (tabela 1).

Tabela 1. Matriz de classificação das barragens de mineração, conforme a Portaria DNPM nº 70.389/2017.

CATEGORIA DE RISCO - CRI	DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	B	C	D
BAIXO	B	C	E

Da Portaria DNPM nº 70.389/2017 define-se: “Categoria de Risco - CRI: classificação da barragem de acordo com os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente, levando-se em conta as características técnicas, o estado de conservação e o Plano de Segurança da Barragem”;

“Dano Potencial Associado - DPA: dano que pode ocorrer devido ao rompimento ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, a ser

graduado de acordo com as perdas de vidas humanas, impactos sociais, econômicos e ambientais”;

As faixas de classificação da CRI são obtidas pela soma dos pontos oriundos das matrizes de Características Técnicas - CT, Estado de Conservação - EC e Plano de Segurança de Barragens - PS (tabela 2), já a categoria referente ao DPA é fornecida por uma única matriz secundária (tabela 3).

Tabela 2. Faixas de classificação da CRI obtidas pela soma dos pontos oriundos das matrizes de Características Técnicas - CT, Estado de Conservação - EC e Plano de Segurança de Barragens - PS, segundo a Portaria DNPM 70.389/2017.

	CATEGORIA DE RISCO	PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	ALTO	≥ 65 ou EC = 10
	MÉDIO	$37 < \text{CRI} < 65$
	BAIXO	≤ 37

Tabela 3. Faixas de classificação do DPA obtidas pela soma dos pontos oriundos de uma única matriz secundária, segundo a Portaria DNPM 70.389/2017.

	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	PONTUAÇÃO TOTAL (DPA)
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	ALTO	≥ 13
	MÉDIO	$7 < \text{DPA} < 13$
	BAIXO	≤ 7

3 SUSCETIBILIDADE GEOLÓGICA

Bitar (2014) aponta que o termo suscetibilidade pode ser sintetizado como a propensão ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo do meio físico que pode gerar desastres naturais, em face da presença de determinadas características dos terrenos ocupados e não ocupados. O autor explica que uma área cujos terrenos apresentam o predomínio de declividade alta, por exemplo, pode ser considerada como propensa a ocorrência de deslizamentos e corridas de massa, independentemente de previsão acerca de quando poderá ocorrer um evento e tampouco do grau de certeza atribuível a essa possibilidade. Evidencia-se, assim, o vínculo entre fatores predisponentes e propensão dos terrenos a processos do meio físico.

A análise de suscetibilidade realizada neste estudo tem como objeto os processos de movimentos gravitacionais de massa (deslizamentos e corridas de massa) e hidrológicos (enxurradas),

conforme definição empregada na metodologia de zoneamento de suscetibilidade da CPRM/IPT (Bitar 2014).

Macedo & Bressani (2013) apontam que a suscetibilidade se refere ao primeiro passo de uma análise progressiva de risco geológico. Áreas de atingimento, severidade, probabilidade de ocorrência e tempos de recorrência dos processos não são abordados pelas análises de suscetibilidade, sendo tema de análises de vulnerabilidade, perigo e risco.

4 MOVIMENTOS DE MASSA, PROCESSOS HIDROLÓGICOS E SUA RELAÇÃO COM FALHAS EM BARRAGENS

O estudo dos aspectos envolvidos nos acidentes com barragens é de suma importância para o entendimento dos riscos e consequências decorrentes. Independentemente do uso a que se destinam essas estruturas, o ponto em comum é que todas armazenam energia potencial, capaz de provocar acidentes ou desastres na região de jusante, caso sua carga seja liberada repentinamente por ocasião de uma ruptura.

Jansen (1983), em publicação do *Bureau of Reclamation* sobre acidentes com barragens sob o título "Barragens e Segurança Pública" (*Dams and Public Safety*) conclui que 59% dos acidentes se devem a causas geológico-geotécnicas e 23% se dão por causas hidrológico-hidráulicas.

Oliveira et al. (2013) destacam que a construção de barragens impõe diversas solicitações aos maciços geológicos naturais, que podem interferir na estabilidade geológico-geotécnica. A principal solicitação é o empuxo hidráulico causado pelo enchimento do reservatório, resistido pelo peso da barragem e pela fundação. Na condição de enchimento, o maciço geológico tem suas condições de estabilidade alteradas em virtude do carregamento e da mudança nas linhas de percolação da água em subsuperfície.

Muitas barragens falharam onde o risco de deslizamento foi ignorado ou recebeu atenção inadequada, por exemplo: barragem de Vajont (Itália), barragem do rio Ohio (EUA), barragem Austin (EUA). As consequências de deslizamentos de terra podem incluir dano ou ruptura do

maciço ou o galgamento da barragem por ondas (Jansen 1983).

Costa (2012) aponta que foi a partir dos acidentes ocorridos com a barragem de Vajont, na Itália, em 1963 e, no ano seguinte, na barragem de Gepatsch, na Áustria, é que se passou a dar maior importância ao estudo de estabilidade de encostas no entorno do sítio de locação das barragens.

No caso mais famoso, em Vajont, o deslizamento de uma massa de 250 milhões de metros cúbicos de rocha e solo proveniente de uma encosta natural instável no entorno da estrutura movimentou-se com uma velocidade de 25 m/s para dentro do reservatório. Como resultado, houve a expulsão instantânea de um volume de 40 milhões de metros cúbicos de água que se deslocou por sobre o maciço, causando a destruição da cidade de Longarone, situada à jusante. O desastre provocou a morte de mais de 2.600 pessoas.

Em relação à alta taxa de falha por causas hidrológico-hidráulicas, Christian e Baecher (2002) apud Pereira (2020) apresentam algumas razões:

- a. quando o evento hidrológico causador da falha se dá antes do término da construção dos órgãos extravasores;
- b. quando se tratam de barragens de mineração, visto que normalmente nesta classe de estrutura não são utilizadas boas práticas de engenharia no projeto e durante a construção, ou a manutenção é deficiente;
- c. quando os sistemas extravasores são antigos e sua capacidade encontra-se desatualizada para as condições climáticas atuais das bacias hidrográficas onde se situam.

A Codificação Brasileira de Desastres classifica aqueles causados por rompimento de barragens como tecnológicos e relacionados a obras civis (CENAD 2012 apud Fonseca 2019), porém, como visto, muitas rupturas tiveram como causa processos naturais do meio físico. Assim, consta-

ta-se que os processos naturais (geológico-geotécnicos e hidrológicos) estão intimamente ligados aos riscos tecnológicos, como no caso da falha de uma barragem.

5 ÁREA DE ESTUDO

O estado de Minas Gerais apresenta grande diversidade geológica, ocorrendo nessa área sequências de idades arqueana a fanerozoica, em contextos tectônicos e metamórficos dos mais variados. Tal variedade geológica se reflete na história mineradora do estado, cujo desenvolvimento está intimamente ligado à exploração de recursos minerais desde o período colonial (Machado & Silva 2010).

Minas Gerais configura-se como o maior produtor nacional de minério de ferro. Dados do Anuário Mineral de 2019 (ANM 2020) mostram que a produção beneficiada chegou a mais de 203 milhões de toneladas.

Com toda esta vasta produção de minério beneficiado, há também uma colossal geração de rejeitos. Como em Minas Gerais o método mais utilizado para disposição de rejeitos de mineração são as barragens, é no estado onde estão concentradas 42% de todas as estruturas existentes no país, segundo cadastro do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração - SIGBM da ANM.

Assim, a área de estudo abrange a distribuição das barragens de mineração presentes no cadastro da ANM para o estado de Minas Gerais, as quais somam 365 estruturas. As barragens estão localizadas em 61 municípios, os quais estão inseridos em distritos minerários, destacando-se o Quadrilátero Ferrífero, a Província Diamantífera do Triângulo Mineiro, o Distrito Plumbo-zincífero e Rochas Dolomíticas de Vazante-Paracatu e a Província de Grafita Pedra Azul e Salto da Divisa (figura 1).

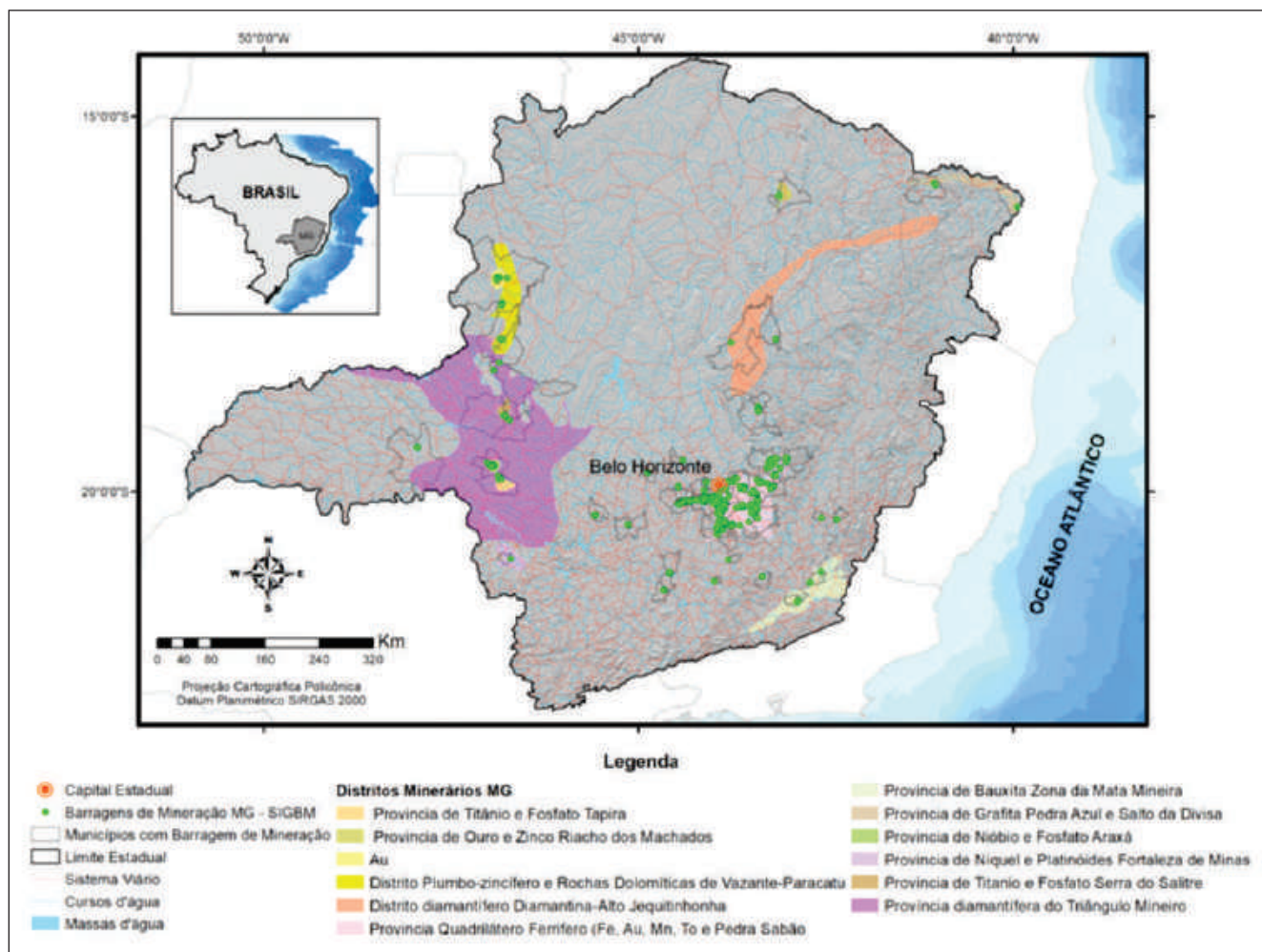


Figura 1. Mapa da área de estudo mostrando a localização das barragens de mineração de MG cadastradas no SIGBM e seu contexto frente aos distritos minerários, conforme Machado & Silva (2010).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas metodológicas foram compostas pela execução de pesquisa bibliográfica e aquisição de dados cartográficos que serviram de insumos para a análise da suscetibilidade natural à movimentos de massa e processos hidrológicos, através do emprego de ferramentas de geoprocessamento em variáveis derivadas de modelo digital de elevação (MDE) e fotointerpretação.

A modelagem da suscetibilidade fundamentou-se nos procedimentos descritos em Bitar (2014) para promover a compartimentação dos terrenos da área de estudo em zonas, segundo comportamentos homogêneos desses processos ante fatores condicionantes do meio físico. Sobre a aplicação desta metodologia, é importante que se destaque as seguintes adaptações:

- como o enfoque desta pesquisa está relacionado aos movimentos gravitacionais de massa e processos hidrológicos de alta energia (enxurradas) que podem afetar as áreas de montante e entorno das barragens de mineração, somente os passos metodológicos aplicados a esses processos foram empregados, não abrangendo a modelagem de inundação.
- considerando o caráter preliminar deste trabalho, a etapa de validação *in loco* não foi executada. Portanto, a aplicação desta metodologia limitou-se à composição do que Bitar (2014) define como o pré-mapa de áreas suscetíveis.

O passo seguinte consistiu no cruzamento das informações de suscetibilidade geológica ge-

radas com os limites de abrangência das barragens de mineração, de modo a calcular a incidência das suscetibilidades nos sítios de locação das barragens. A etapa final consistiu na parametrização desses dados, através da construção de uma matriz que permite atribuir notas a cada barragem de mineração estudada em relação à suscetibilidade incidente em seu sítio de locação. Tal passo permitiu a geração de estatísticas e a construção de um panorama das suscetibilidades das barragens de mineração de MG, com base na distribuição dessas notas. Destaca-se que a matriz de parametrização proposta é inspirada e potencialmente aplicável na sistemática de notas presente na Portaria DNPM n° 70.389/2017, a qual regulamenta as barragens de mineração frente à PNSB.

Assim, as etapas metodológicas definidas para o alcance dos objetivos propostos são descritas na figura 2.



Figura 2. Etapas de trabalho desenvolvidas.

Os procedimentos de geoprocessamento foram executados no software ARCGIS 10.4, no entanto, todas as funções utilizadas podem ser encontradas também em outros softwares de geoprocessamento, estando assim o método passível de ser aplicado em outras plataformas.

Os insumos para os procedimentos de geoprocessamento executados neste trabalho, tais como imagens de satélite, MDE, mapas temáticos,

bem como as informações sobre as barragens foram obtidos de fontes acessíveis a todos os usuários na internet, destacando-se os sites da ANM, CPRM, IPT, IBGE e *Earth Data* (NASA).

6.1 Construção de uma base cartográfica digital em formato SIG

Como ponto de partida, buscou-se junto ao SIGBM os arquivos georreferenciados das barragens de mineração cadastradas para o estado de MG, disponíveis no site da ANM. O passo seguinte foi fazer a aquisição das cenas de MDE que cobrissem a distribuição geográfica das barragens e que possuíssem uma resolução espacial compatível com a escala de análise da metodologia da suscetibilidade (1:25.000). Por esse motivo, fez-se o download de cenas do MDE adquiridas pelo satélite ALOS, com resolução espacial de 12,5m, considerada adequada para a escala de trabalho adotada. Uma vez adquiridas as cenas, foram gerados os mosaicos do MDE final no software ARCGIS 10.4.

Os demais arquivos que compõem a base cartográfica são constituídos por imagens de satélite do acervo multi-escala do BING Maps, disponibilizadas de forma nativa no ARCGIS 10.4, assim como arquivos vetoriais de hidrografia, altimetria, limites políticos e cartas temáticas, extraídos do Mapa de Geodiversidade do estado de MG (Machado & Silva 2010) e do Mapa geológico de MG (CPRM, 2003).

6.2 Análise da suscetibilidade a deslizamentos, corridas de massa e enxurradas

Para o zoneamento da suscetibilidade a deslizamentos, os procedimentos metodológicos aplicados são aqueles discutidos em Stabile et al. (2013), fundamentando-se nas relações estatísticas observadas entre cada fator condicionante e a distribuição dos deslizamentos em área. Nesta metodologia são utilizados como insumos três fatores predisponentes de deslizamentos, frequentemente associados à distribuição das cicatrizes, referenciados em literatura técnico-científica e com possibilidades de mapeamento dentro do escopo dos

trabalhos: declividade, curvatura das vertentes e densidade de lineamentos estruturais, que refletem, respectivamente, a influência combinada de aspectos geomorfológicos, hidrológico-pedológicos e geológicos.

No caso das corridas de massa e enxurradas, as etapas metodológicas aplicadas são aquelas detalhadas em Corsi et al. (2015), pautando-se em parâmetros morfométricos das bacias de drenagem (amplitude topográfica e área), padrão de relevo predominante (serras e/ou morros) e presença de zonas enquadradas na classe de alta suscetibilidade a deslizamento, conforme previamente mapeadas, para fins de delimitação das ba-

cias de drenagem mais suscetíveis à geração desses fenômenos. Assim, apontam-se as bacias de drenagem separadas em duas situações básicas: bacia de drenagem com alta suscetibilidade a corrida de massa e enxurrada; e bacia de drenagem com alta suscetibilidade a enxurrada.

O resultado final da análise de suscetibilidade é um zoneamento do terreno que traduz a incidência das distintas classes de suscetibilidade (alta, média e baixa), consideradas em relação aos deslizamentos e, no caso de corridas de massa e enxurradas, a incidência é destacada em relação à delimitação de bacias de drenagem com alta suscetibilidade a esses dois processos (figura 3).

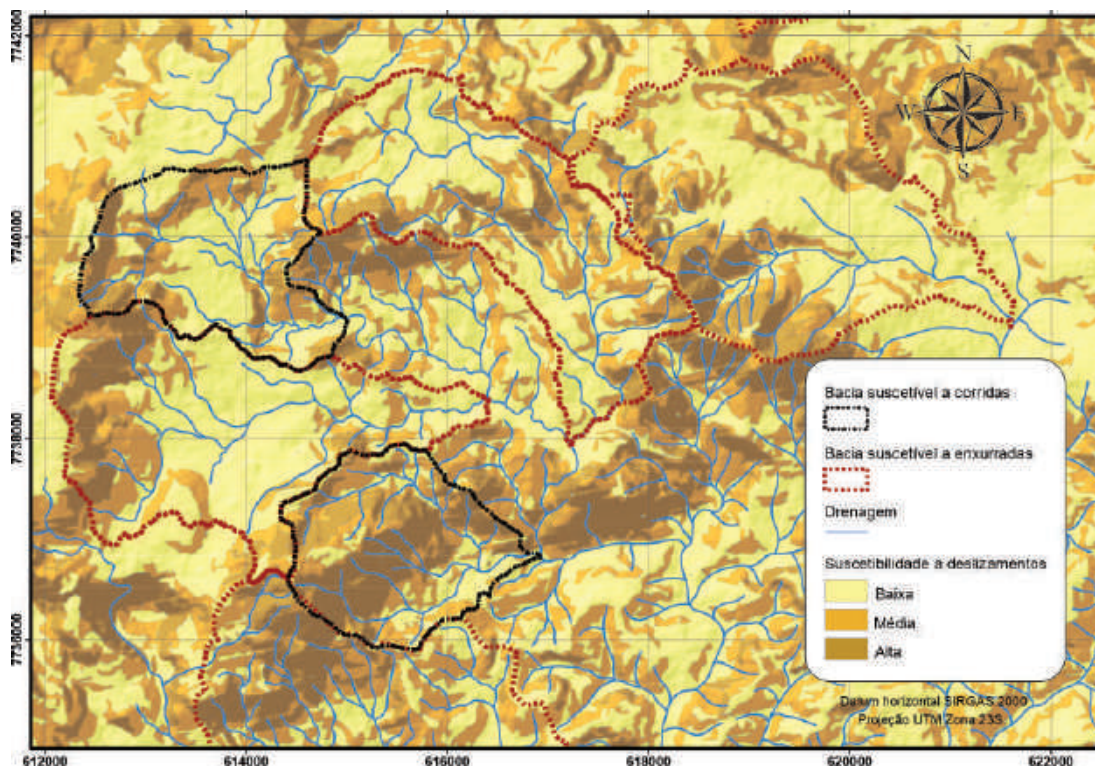


Figura 3. Porção da área de estudo mostrando bacias de drenagem suscetíveis a corridas de massa e enxurradas (delimitadas na cor preta) e a enxurradas (em vermelho), indicadas sobre o zoneamento referente a movimentos gravitacionais de massa.

6.3 Cruzamento das informações de suscetibilidade geológica com os limites de abrangência das barragens de mineração

Uma vez que a área de estudo foi zoneada em termos da suscetibilidade a deslizamentos, corridas de massa e enxurradas, esta etapa tem o objetivo de correlacionar as barragens de minera-

ção a essas zonas, de modo a se determinar a incidência das suscetibilidades em relação aos sítios de locação das barragens.

Esta estimativa da incidência é obtida por meio de cálculos efetuados diretamente em ambiente de SIG, os quais baseiam-se em correlações de área entre as zonas e o entorno das barragens (em hectares) bem como em proporção (%). Para

alcançar este objetivo, foi necessário desenvolver uma etapa metodológica para a delimitação dos limites de abrangência das barragens de mineração.

6.3.1 Delimitação do limite de abrangência das barragens de mineração

Como as estimativas baseiam-se em relações de área, primeiramente, foi necessário definir uma área de abrangência para análise de cada barragem, haja vista que as barragens de mineração são cadastradas pela ANM apenas com um par de coordenadas localizadas no centro da crista da estrutura, resultando em um único ponto.

É comum que as barragens estejam apenas parcialmente envoltas por encostas, o que ocorre normalmente nas ombreiras e região de montante. Assim, adaptou-se o critério descrito em CPRM (2018), no qual, para estes casos, a definição do limite de abrangência para as análises deverá ser realizada a partir do cálculo da média aritmética das distâncias entre o local de interesse e as cristas das encostas mais próximas, utilizando-se, no mínimo, 03 distâncias. A finalidade deste passo é abranger os terrenos onde já ocorreu mobilização de material em eventos pretéritos ou onde ela pode ocorrer.

Dentro desta premissa, definiu-se como limite de abrangência um raio de entorno a partir do ponto de cadastro de cada barragem, perfazendo uma área circular (figura 4). Para viabilizar este cálculo foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento sobre o MDE da área de estudo, em ambiente SIG.

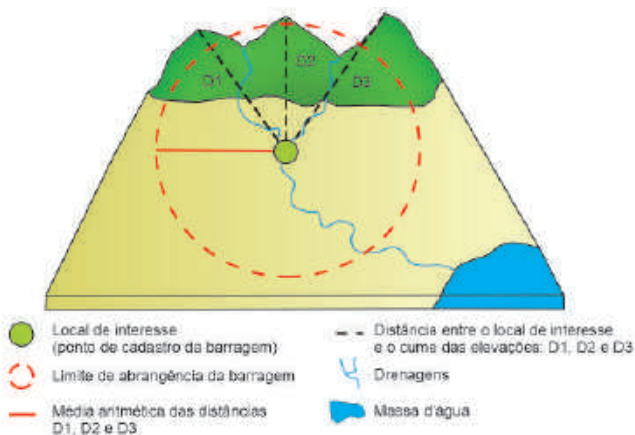


Figura 4. Delimitação do limite de abrangência das barragens de mineração.

Inicialmente, foi preciso determinar a posição das cristas ou cumes das elevações do terreno. Para isto inverteu-se o MDE multiplicando-o por -1 com a função *raster calculator*. O produto desta operação é um novo raster, onde os picos foram transformados em depressões. Posteriormente, fez-se um mapa de direção de fluxo a partir do MDE invertido, e então, aplicou-se a este mapa a função *sink* utilizada para identificar depressões espúrias. O resultado foi uma camada em formato raster onde cada pixel corresponde a um cume. Em seguida converteu-se esta camada para o formato vetorial do tipo ponto.

Posteriormente, atribuiu-se a esses pontos valores de amplitude topográfica, que corresponde à distância altimétrica entre a base da encosta e seu respectivo cume, a partir da função *add surface information*. As amplitudes foram obtidas com a aplicação do algoritmo HAND - *Height Above the Nearest Drainage* (RENNÓ et al. 2008). O HAND é um algoritmo utilizado na modelagem de inundação das cartas de suscetibilidade (BITAR, 2014), por medir a diferença altimétrica entre qualquer ponto da grade do MDE e o respectivo ponto de escoamento na drenagem mais próxima. Matematicamente, a utilização do HAND nos fornece a variação de amplitude do relevo.

Para assegurar que ruídos do MDE fossem eliminados e que somente os cumes de encostas com amplitude suficiente para gerar deslizamentos fossem computados na definição do limite de abrangência das barragens, foram utilizados os critérios e parâmetros de classificação de padrões de relevo definidos por IPT/Emplasa (1990). Esta ação tem a função de limpar o ruído do arquivo de pontos para só admitir a permanência de cumes com amplitude superior a 40 metros, ou seja, maiores ou iguais ao padrão "colinas".

O raio de abrangência de cada barragem foi calculado com base na média aritmética da distância dos cumes mais próximos do seu respectivo ponto de cadastro da ANM, utilizando a função *generate near table*. Por fim, aplicou-se a função *buffer* nos pontos de cadastro para a delimitação dos limites de abrangência, utilizando como raio o valor da média calculado na tabela de atributos. Assim, o limite de abrangência adequa-se ao terreno do entorno da barragem, de modo que uma barragem localizada em um vale mais dissecado

(fechado) terá um raio de abrangência menor do que uma barragem localizada em um vale mais aberto, por exemplo. Tal dinâmica permitiu a definição de um limite de abrangência capaz de

englobar proporcionalmente os sítios de locação das estruturas e as encostas mais próximas, com potencial de deflagração dos processos analisados (figura 5).

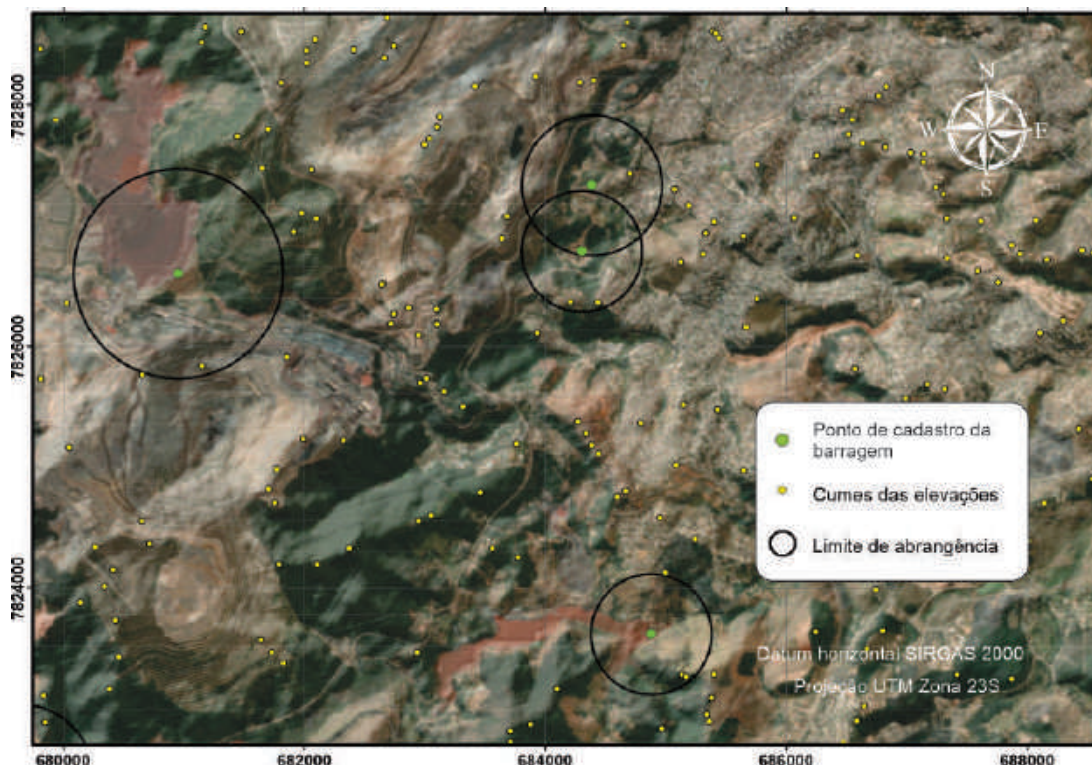


Figura 5. Porção da área de estudo mostrando barragens de mineração no município de Itabira (MG), as quais tiveram seus limites de abrangência delimitados com área proporcional à média das distâncias dos cumes do entorno.

6.4 Parametrização dos dados e construção de um panorama das suscetibilidades das barragens de mineração de MG

Para normatizar a classificação das barragens de mineração, a Portaria DNPM nº 70.389/2017 utiliza matrizes de pontuação que expõem características relacionadas à barragem e seu entorno, as quais funcionam como descritores da probabilidade de falha e das consequências. Dependendo do grau de contribuição dessas características são atribuídas pontuações. Assim, se a característica pouco contribui terá pontuação zero ou baixa, aumentando à medida que aumenta a contribuição da característica para a probabilidade de falha e consequências.

Uma vez que os procedimentos metodológicos descritos nas etapas anteriores permitiram

a inserção das informações de suscetibilidade a movimentos de massa nas áreas de abrangência das barragens de mineração, bem como permitiram o cálculo da representatividade de cada zona em termos de área e proporção, executou-se parametrização desses dados, através da construção de uma matriz inspirada e potencialmente aplicável na sistemática de notas presente na Portaria DNPM nº 70.389/2017 (tabela 4). É plenamente compatível, por exemplo, a inclusão da matriz aqui proposta no cálculo da nota final da Categoria de Risco (CRI) de uma barragem, de modo que esta seria formada pelo somatório final das pontuações atingidas nas matrizes de Características Técnicas (CT), Estado de Conservação (EC), Plano de Segurança (PS) e Suscetibilidade Geológica (SG): $CRI = CT + EC + PS + SG$.

Tabela 4. Matriz de pontuação de Suscetibilidade Geológica, inspirada e potencialmente aplicável na sistemática de notas presente na Portaria DNPM nº 70.389/2017.

MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À SUSCETIBILIDADE GEOLÓGICA (SG)	
Deslizamentos (em relação à proporção de ocorrência da classe baixa - CB no limite de abrangência da barragem) (o)	Corridas de Massa e Enxurradas (em relação à incidência da barragem em bacia de drenagem suscetível) (p)
CB > 90% (0)	Não incide (0)
70% < CB ≤ 90% (1)	Bacia suscetível a enxurradas (2)
50% < CB ≤ 70% (2)	Bacia suscetível a corridas de massa (4)
CB ≤ 50% (3)	
SG = ∑ (o até p)	

Para os deslizamentos, utilizou-se a porcentagem de ocorrência da classe de baixa suscetibilidade no interior do limite de abrangência das barragens como balizador para a definição das notas da coluna “Deslizamentos” da matriz de “Suscetibilidade Geológica”. Tal escolha baseia-se na premissa de que uma barragem construída em um sítio com predomínio de baixa suscetibilidade a deslizamentos encontra-se em um cenário de maior estabilidade geológica frente à deflagração desses processos nas encostas naturais de seu entorno, acarretando menor propensão de impactos negativos à estrutura.

No caso das enxurradas e corridas de massa, o fator determinante para as notas é a incidência ou não da barragem em uma bacia de drenagem suscetível. Corridas e enxurradas são processos de alta energia hidrodinâmica, entretanto, por sua elevada concentração de sólidos, bem como por seu amplo raio de alcance, as corridas apresentam

grande potencial destrutivo (Tominaga 2012). Por esse motivo, em caso de incidência das barragens em bacias de drenagem suscetíveis, a nota deverá ser diferenciada em relação ao processo e proporcional ao seu potencial destrutivo, impondo menor ou maior impacto negativo à estrutura. Tal abordagem resulta na coluna “Corridas e Enxurradas” da matriz de “Suscetibilidade Geológica”.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O zoneamento da suscetibilidade a movimentos de massa na área de estudo permitiu a divisão do terreno em 3 classes homogêneas (alta, média e baixa) com diferentes propensões à deflagração natural dos processos geológicos analisados, além da delimitação de bacias de drenagem propensas à deflagração de enxurradas e corridas de massa (figura 6).

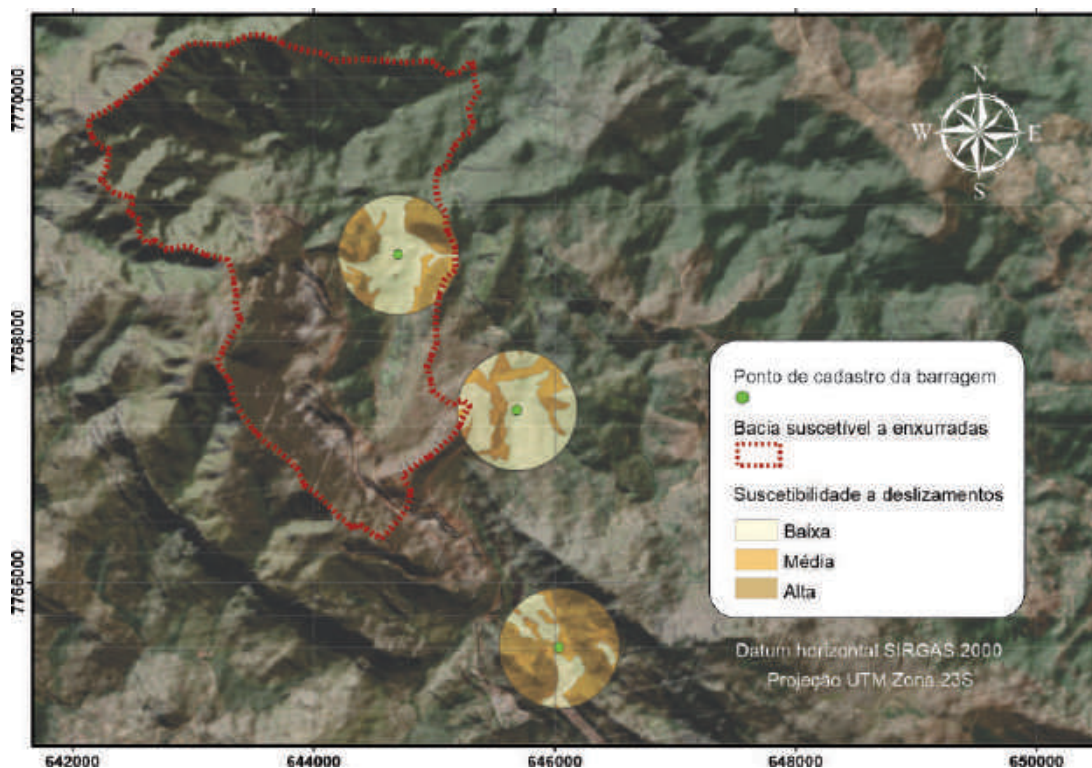


Figura 6. Porção da área de estudos mostrando as zonas de suscetibilidade geológica a deslizamentos inseridas no limite de abrangência de cada barragem de mineração. Nesta área também é possível identificar a incidência de barragem de mineração em bacia suscetível a enxurradas.

A partir de tais cenários, inicialmente, foram geradas estatísticas que mostram um panorama geral com base na representatividade de cada classe, em porcentagem (figura 7), ou na incidência das barragens de mineração em bacias suscetíveis (figura 8).

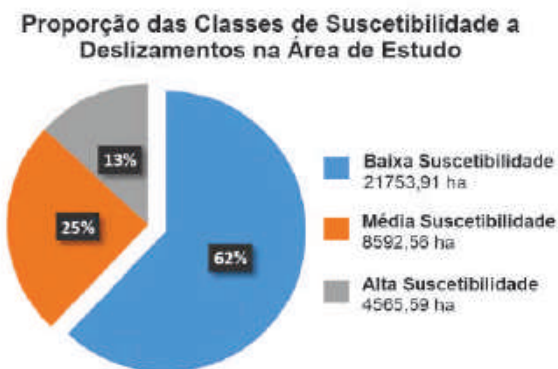


Figura 7. Representatividade de cada classe de suscetibilidade a deslizamentos em relação à área de estudo.

Os resultados mostraram uma maior representatividade global da classe de baixa suscetibi-

lidade a deslizamentos, representando 62% dos terrenos analisados. Os terrenos com média e alta suscetibilidade a deslizamentos somam os 38% restantes da área de estudo, sendo 25% de relevos que apresentam média suscetibilidade e 13% traduzidos por encostas com alta propensão a deslizamentos.

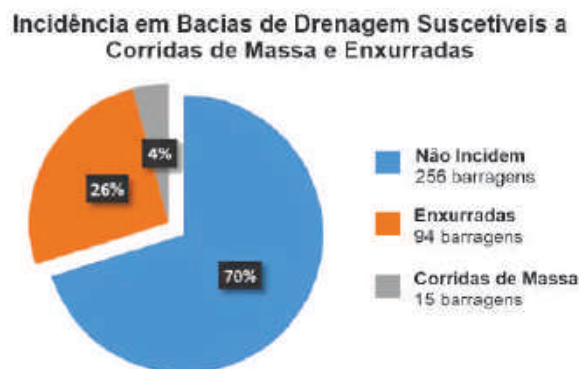


Figura 8. Situação da localização das barragens de mineração de MG em relação à suscetibilidade aos processos de corridas de massa e enxurradas.

Com relação às corridas de massa e enxurradas, as análises demonstraram que 70% das barragens de mineração cadastradas se encontram inseridas em bacias de drenagem não suscetíveis ou com baixa suscetibilidade a esses processos. Entretanto, destaca-se que 94 barragens (26%) estão localizadas em bacias com alta suscetibilidade a enxurradas e que 15 barragens (4%) estão localizadas em terrenos com alta suscetibilidade a corridas de massa.

Este panorama geral chama a atenção por demonstrar que mais de 30% do universo amostral dos terrenos de entorno das barragens de mineração de MG apresentam suscetibilidade média a alta aos processos geológicos e hidrológicos analisados. A deflagração desses processos pode afetar negativamente a segurança das barragens, por este motivo, os dados aqui mostrados podem servir de balizadores para a realização de estudos geotécnicos e hidrológicos mais detalhados, com a avaliação da influência da barragem no grau de suscetibilidade natural dos terrenos e, onde necessário, elaborar análise de riscos, carta de riscos e plano de gerenciamento de riscos, incluindo-se a execução de medidas preventivas estruturais e não estruturais.

7.1 Distribuição dos dados de suscetibilidade parametrizados

A discretização dos dados de suscetibilidade segue as notas propostas na tabela 4. Embora saiba-se que na legislação as matrizes de notas não se aplicam às barragens fora da PNSB, optou-se por incluí-las nesta parametrização somente para que a sua distribuição frente à suscetibilidade geológica também fosse delineada.

No caso da suscetibilidade a deslizamentos, a categorização se deu conforme faixas de pontuação que consideram a representatividade dos terrenos mais estáveis (classe baixa) no interior dos limites de abrangência das barragens, como balizador das notas (figura 9). Assim, quanto maior a proporção da classe de baixa suscetibilidade no entorno da barragem, menor será a propensão de deflagração de deslizamentos no limite de abrangência da barragem e, em consequência, menor

será a propensão de impactos negativos decorrentes desses processos à segurança da estrutura.

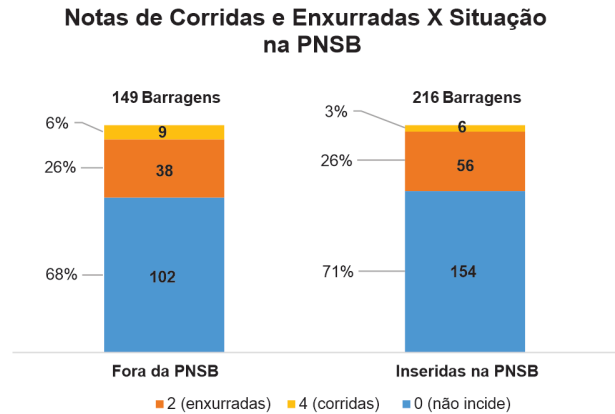


Figura 9. Situação das barragens de mineração de MG em relação às notas de suscetibilidade a deslizamentos.

Notadamente nas duas situações frente à PNSB, a maior frequência de barragens de mineração de MG insere-se na nota 3 ($CB \leq 50\%$), sendo 74 barragens fora da PNSB (50%) e 99 barragens inseridas na PNSB (45,8%). Isto equivale a dizer que quase a metade das barragens cadastradas pela ANM no estado de MG encontram-se em uma situação na qual os terrenos potencialmente mais instáveis (classes média e alta) podem estar representando mais de 50% das áreas de entorno dessas estruturas.

As barragens dentro e fora da PNSB apresentam uma distribuição semelhante frente às notas para incidência em bacias de drenagem suscetíveis a corridas de massa e enxurradas (figura 10).

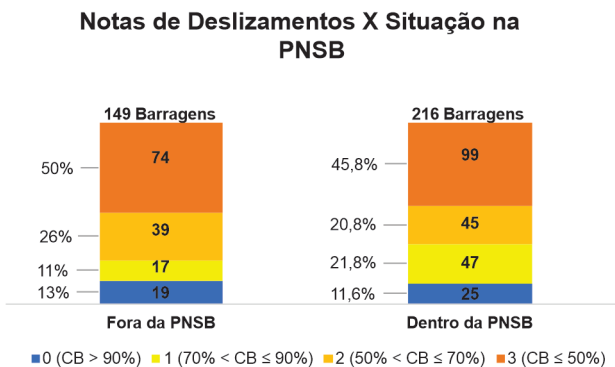


Figura 10. Situação das barragens de mineração de MG em relação às notas de suscetibilidade a corridas de massa e enxurradas.

Cerca de 70% de todas as barragens cadastradas foram construídas em bacias não suscetíveis ou com baixa suscetibilidade. Entretanto, considerando a grande energia e o alto potencial destrutivo destes processos, é importante destacar que 38 barragens de mineração não inseridas na PNSB (26%) e 56 que fazem parte da Política (26%) encontram-se em relevos com alta suscetibilidade a enxurradas. No caso das corridas de massa, apesar do número ser bem menor para ambos os grupos, registra-se que 9 barragens não inseridas na PNSB e 6 dentro da Política inserem-se em bacias com alta suscetibilidade, constituindo 6% e 3%, respectivamente.

7.1.1 Suscetibilidade geológica em relação aos atributos do sistema de classificação das barragens de mineração (portaria DNPM 70.389/2017)

Para as barragens inseridas na PNSB foram geradas estatísticas relacionando as notas propostas para a suscetibilidade geológica com os atributos do sistema de classificação das barragens, previsto na Política e regulamentada pela Portaria DNPM 70.389/2017, tais como a classificação de risco propriamente dita, a CRI isoladamente, o DPA isoladamente e o nível de emergência isoladamente (figuras 11 e 12).

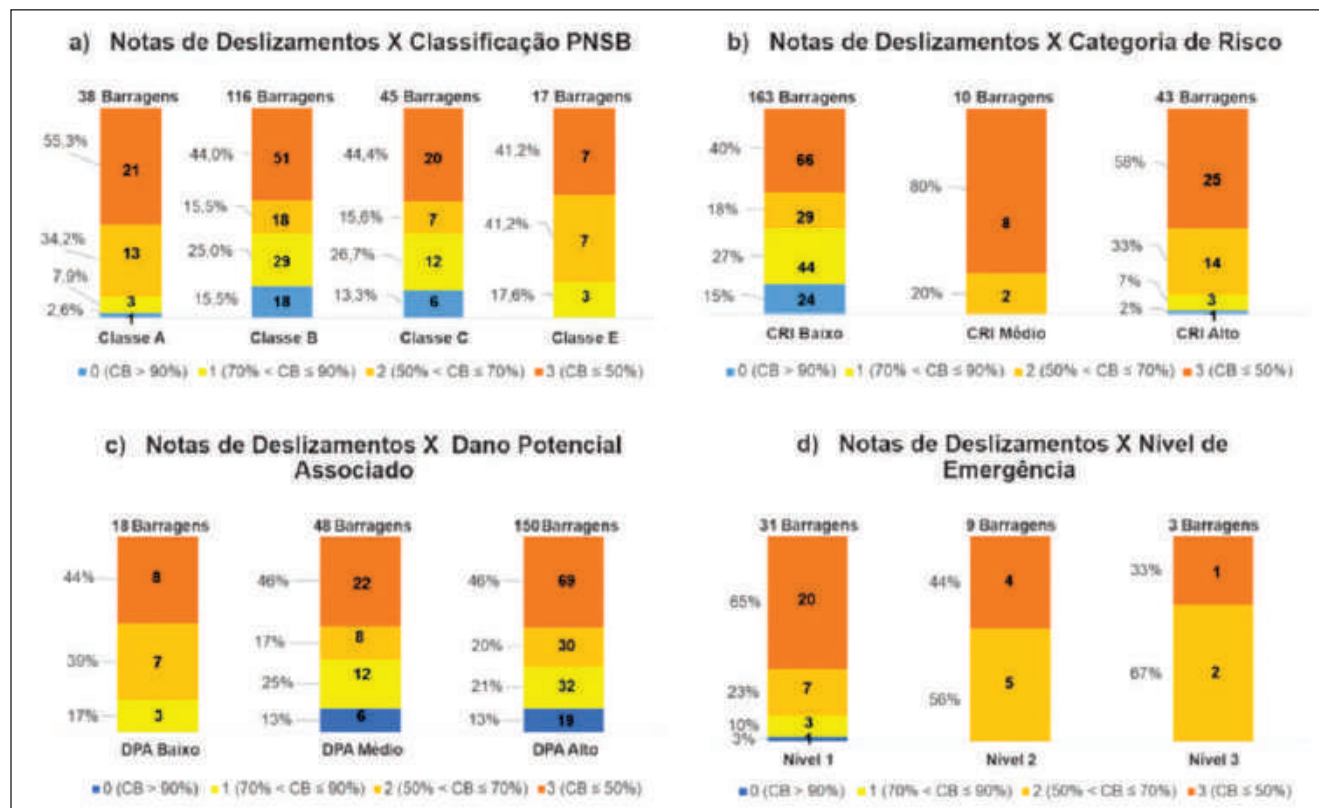


Figura 11. Distribuição das notas de suscetibilidade a deslizamentos relacionando: a) a classificação final de risco; b) a CRI isoladamente; c) o DPA isoladamente; e d) o nível de emergência.

Em relação às notas de deslizamentos, embora não representem o maior grupo em número absoluto de estruturas, constata-se que as barragens com classificação “A”, situação de maior risco da PNSB, são aquelas que apresentam a maior proporção da nota 3 (CB ≤ 50%), representando 55,3% dessas estruturas (figura 11a). As demais classes

seguem esta tendência, com a nota 3 para deslizamentos representando 44% da classe “B”, 44,4% da classe “C” e 41,2% da classe “E”. No cadastro de barragens de mineração da ANM utilizado neste trabalho, período de referência novembro de 2020, não há registro de barragem classe “D” em MG.

Isoladamente, DPA e CRI também refletem a tendência de distribuição das notas de deslizamento observada na classificação da PNSB, haja vista que esta é definida pelo cruzamento entre DPA e CRI (figura 11b e c). Tomando-se as piores situações em termos de segurança como exemplo, as estruturas com nota 3 representam 58% do grupo de barragens com CRI alto e 46% das estruturas com DPA alto. Justamente nas situações nas quais as barragens aspiram maior atenção (DPA e CRI altos), ocorre a maior proporção de terrenos mais propensos a deslizamentos no entorno das barragens.

O artigo 37 da Portaria DNPM 70.389/2017, em seus incisos I, II e III define os níveis de emergência:

“I. Nível 1 - Quando detectada anomalia que resulte na pontuação máxima de 10 (dez) pontos em qualquer coluna do Quadro 3 - Matriz de Classificação Quanto à Categoria de Risco (1.2 - Estado de Conservação), do Anexo V, ou seja, quando

iniciada uma ISE e para qualquer outra situação com potencial comprometimento de segurança da estrutura;

II. Nível 2 - Quando o resultado das ações adotadas na anomalia referida no inciso I for classificado como “não controlado”, de acordo com a definição do § 1º do art. 27 desta Portaria; ou

III. Nível 3 - A ruptura é iminente ou está ocorrendo”.

O gráfico da figura 11d mostra que quase a totalidade das barragens que se encontram em situação de emergência possuem notas 2 e 3 para deslizamentos. Mesmo que tal estado de emergência muito provavelmente não tenha como causa os processos de deslizamentos, o atingimento por um eventual deslizamento tem maior potencial para configurar um gatilho para a ruptura de estruturas com este grau de fragilidade.

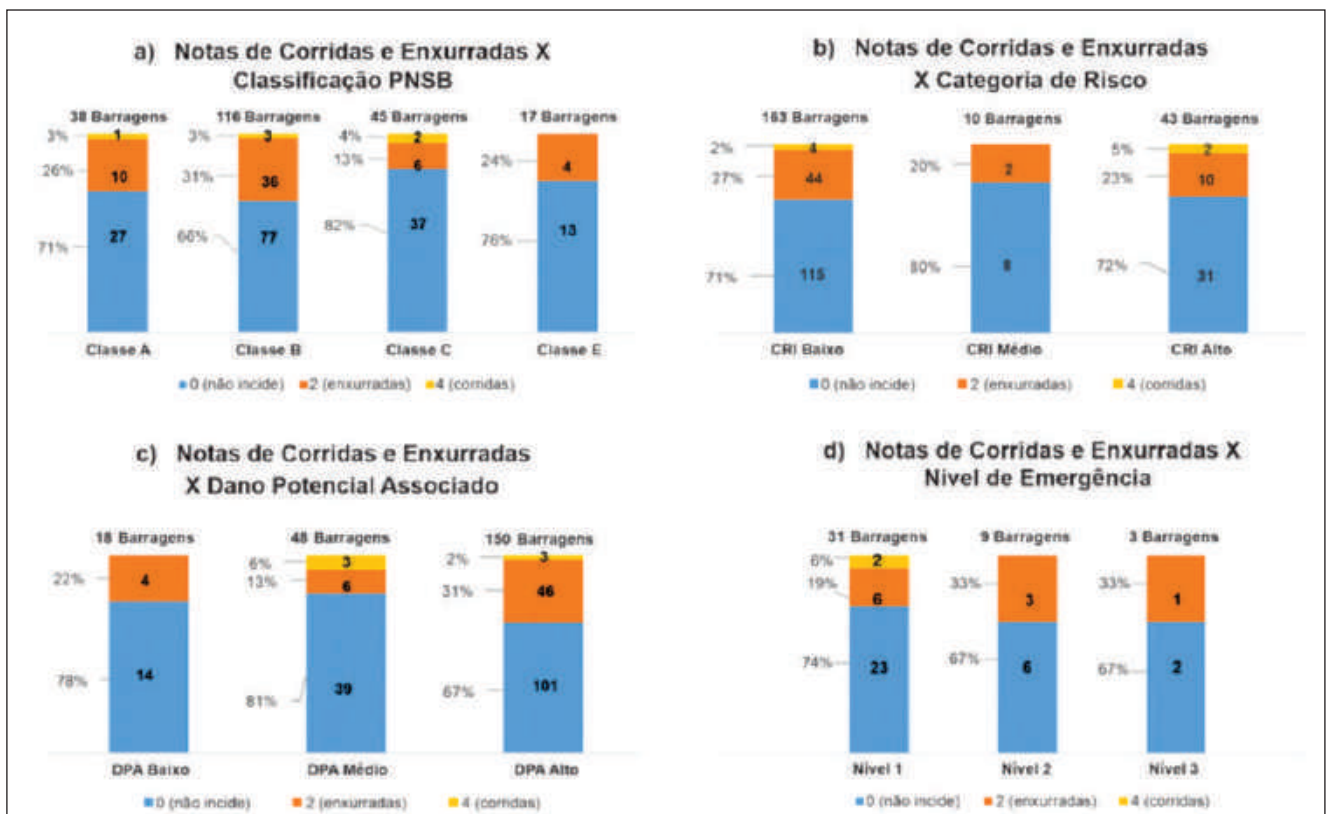


Figura 12. Distribuição das notas de suscetibilidade a corridas e enxurradas relacionando: a) a classificação final de risco; b) a CRI isoladamente; c) o DPA isoladamente; e d) o nível de emergência.

Ao analisarmos a figura 12a é possível constatar que a maior parte das barragens com nota 2 (suscetível a enxurradas) encontra-se na classificação “B”, representando 31%, seguido pela classe “A”, perfazendo 26%. As barragens com nota 4 (suscetível a corridas de massa) representam um reduzido grupo de 6 estruturas e distribuem-se da seguinte forma: 1 na classe “A”, 3 na classe “B” e 2 na classe “C”.

Tomando-se a CRI isoladamente (figura 12b), as barragens suscetíveis a corridas de massa e enxurradas predominam na CRI baixo, sendo que 27% deste grupo possui nota 2 e 2% a nota 4. No que diz respeito ao grupo com CRI alto, constata-se que 10 barragens estão localizadas em terrenos com alta suscetibilidade a enxurradas, enquanto que 2 estruturas se situam em bacias com alta suscetibilidade à deflagração de corridas de massa. Já quando averiguamos o DPA isoladamente (figura 12c), 46 barragens suscetíveis a processos de enxurradas (nota 2) encontram-se enquadradas com DPA alto, representando 31% deste grupo. As barragens suscetíveis a corridas (nota 4) estão igualmente distribuídas em DPA médio e alto, com 3 estruturas em cada grupo.

Quanto à situação de emergência (figura 12d), 2 barragens no nível 1 encontram-se em terrenos com alta suscetibilidade a corridas. Com nota 2 (enxurradas) há 6 barragens em emergência nível 1, 3 estruturas em nível 2 e uma em nível 3.

7.1.2 Suscetibilidade geológica em relação ao método construtivo das barragens de mineração

Outra importante análise realizada a partir das estatísticas é com relação à distribuição das notas de deslizamentos e as notas de corridas e enxurradas, frente ao método construtivo das barragens. Desta vez a análise agrupou todo o universo de barragens estudado, ou seja, as incluídas e as fora da PNSB.

A forma de construção da barragem de mineração está diretamente relacionada ao seu grau de segurança. Barragens de mineração construídas com o método à montante são criticadas por apresentar alto risco de ruptura por liquefação e por dificultar a implantação de sistema de dre-

nagem (Araújo 2006). A própria Portaria DNPM 70.389/2017 atribui notas diferentes ao tipo de método construtivo para o cálculo da CRI. Assim, as barragens com o método à montante possuem as maiores notas, contribuindo mais para o aumento do risco da barragem.

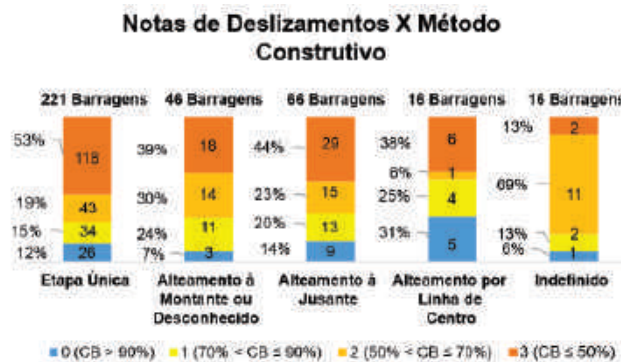


Figura 13. Distribuição das notas de suscetibilidade a deslizamentos relacionando os métodos construtivos das barragens de mineração.

A partir da figura 13, o quadro geral mostra a maior ocorrência da nota 3 (CB ≤ 50%) de deslizamentos, com exceção das barragens cadastradas como “método indefinido”, nas quais há o claro predomínio da nota 2 (50% < CB ≤ 70%). Cabe destaque que 69% das barragens construídas pelo método à montante, as quais demandam especial atenção dos órgãos fiscalizadores em razão de sua maior fragilidade geotécnica, possuem notas 2 e 3 para deslizamentos.

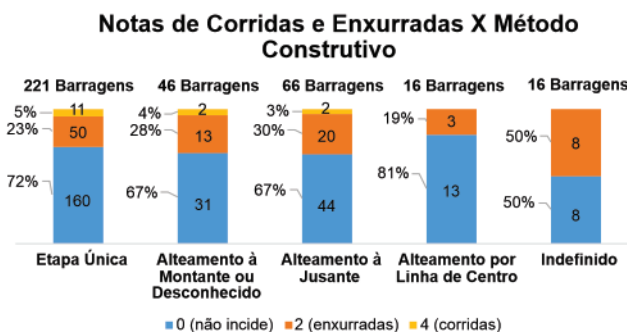


Figura 14. Distribuição das notas de suscetibilidade a corridas de massa e enxurradas relacionando os métodos construtivos das barragens de mineração.

A maior incidência de barragens de mineração em bacias com alta suscetibilidade a corridas de massa se dá no grupo das estruturas construídas em etapa única, com 11 casos (figura 14).

Em tese, este grupo é o que apresentaria a menor vulnerabilidade geotécnica, por não ter sofrido alteamentos, denotando um maior controle construtivo e robustez. Já no grupo com maior vulnerabilidade aos processos aqui analisados, com alteamento à montante, é digno de nota que 28% das barragens estão locadas em terrenos com alta suscetibilidade a enxurradas e 4% em bacias com alta suscetibilidade a corridas.

7.1.3 Análise da distribuição conjunta das notas de deslizamentos e notas de corridas e enxurradas

Aproveitando o poder de análise proporcionado pelo SIG elaborado neste trabalho, fez-se uma análise da distribuição conjunta das notas de deslizamentos com as notas de corridas e enxurradas, de modo a avaliar a sinergia de sua distribuição.

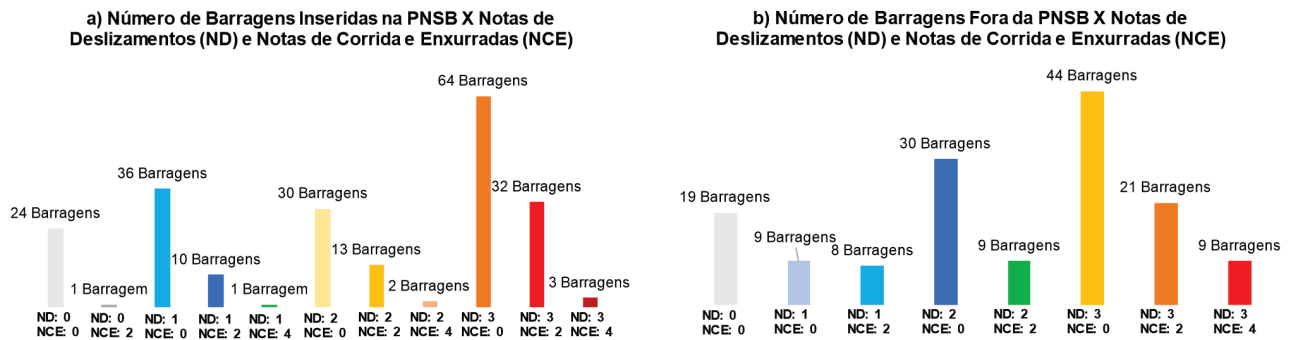


Figura 15. Distribuição conjunta das notas de deslizamentos com as de corridas e enxurradas nas barragens: a) inseridas na PNSB e b) fora da PNSB. NCE = nota de corridas e enxurradas. ND = nota de deslizamentos.

Em ambos os grupos de barragens de mineração apresentados na figura 15, a maior frequência das estruturas apresenta conjuntamente a nota 3 para deslizamentos (ND) e nota 0 para corridas e enxurradas (NCE), seguido das frequências de barragens que apresentam a combinação de nota 0 para corridas e enxurradas com variações das notas de deslizamentos. Tal comportamento sugere que a suscetibilidade a deslizamentos não tem forte correlação com a ocorrência de bacias suscetíveis a enxurradas e corridas, no universo de barragens analisado.

Em contrapartida, quando tomamos a suscetibilidade a corridas de massa (NCE: 4), verificamos que no grupo das barragens fora da PNSB a sua ocorrência se dá exclusivamente em terrenos com a maior nota de deslizamentos (ND: 3). No grupo de barragens inseridas na PNSB, as corridas estão relacionadas com as notas de deslizamentos (ND) 3 e 2, principalmente. Para as enxurradas (NCE: 2), as maiores frequências também se

relacionam às notas de deslizamentos (ND) 3 e 2, respectivamente.

Os gráficos sugerem que a suscetibilidade a corridas e enxurradas tende a ocorrer em terrenos que apresentam maior proporção das classes de deslizamento média a alta. Esta constatação vem ao encontro dos pressupostos enunciados por Bitar (2014) para o mapeamento dos terrenos suscetíveis a enxurradas e corridas de massa, os quais, segundo o autor, caracterizam-se por apresentar amplitudes e declividades elevadas e, no caso das corridas de massa, as bacias devem, necessariamente, compreender terrenos de alta suscetibilidade a deslizamentos.

Observa-se na figura 15a que 2 barragens não seguem esta correlação, pois agregam a incidência de bacias de corridas e enxurradas com notas baixas de deslizamento. Verificou-se que os limites de abrangência dessas barragens se posicionam junto ao exutório das bacias suscetíveis, no único trecho onde predominam os terrenos mais suaves, explicando tal combinação (figura 16).

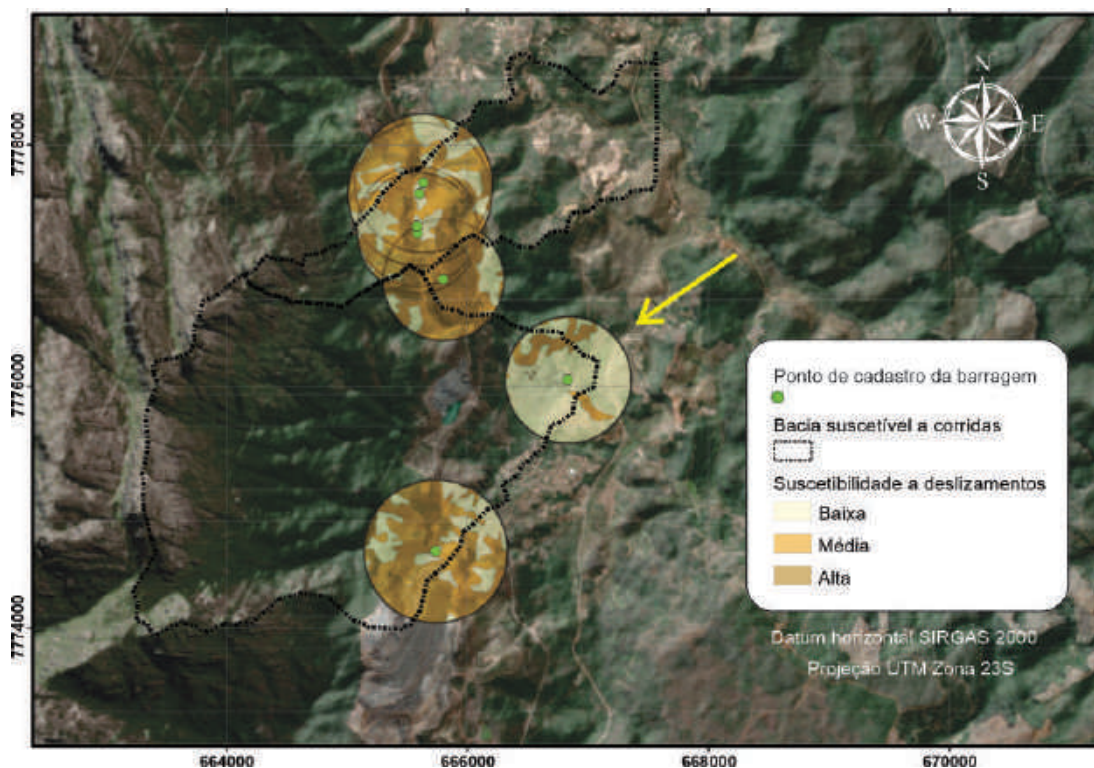


Figura 16. A seta indica um caso de barragem inserida em bacia suscetível a corridas, porém circundada por terrenos mais suaves, por se encontrar junto ao exutório.

8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados e discutidos foram bastante relevantes para a montagem de um panorama preliminar da suscetibilidade geológica das barragens de mineração no estado de Minas Gerais. A metodologia aplicada neste estudo permitiu a identificação dos cenários de suscetibilidade natural à deflagração de deslizamentos, corridas de massa e enxurradas nos quais estas estruturas foram construídas.

A opção por trabalhar esses dados em formato SIG permitiu agregar ferramentas de geoprocessamento para a parametrização dos dados de suscetibilidade e geração de estatísticas, revelando importantes informações para a gestão da segurança de barragens. Desse modo, confirma-se o potencial de se compatibilizar critérios de suscetibilidade geológica para a classificação de barragens na PNSB e Portaria DNPM nº 70.389/2017, de modo a contribuir para o aumento da segurança dessas estruturas.

Aponta-se o grande potencial do mapeamento de suscetibilidade geológica para o planejamento da locação de novas barragens, a nível de plano diretor, bem como a sua utilização pelos órgãos fiscalizadores e licenciadores como uma ferramenta de gestão territorial.

É importante destacar que segundo Bitar (2014) o mapeamento de suscetibilidade limita-se a atividades de gestão territorial e de planejamento e não se destina à análise de estabilidade de terrenos a nível de projeto. Entretanto, não se pode minimizar o seu potencial uso para que, por exemplo, os órgãos fiscalizadores exijam dos empreendedores estudos geotécnicos de detalhe nas áreas identificadas como de média a alta suscetibilidade, incluindo medidas preventivas.

Com principal limitação deste trabalho cita-se o fato de não ter contado com a etapa de campo para a validação das informações produzidas, determinando o caráter preliminar do trabalho. Outra limitação importante é o fato do cadastro de barragens de mineração da ANM trabalhar apenas com pares de coordenadas (pontos), o que inicialmente dificultou a avaliação da extensão es-

pacial das estruturas. Como forma de contornar essa dificuldade, neste estudo desenvolveu-se uma metodologia para definir as áreas de abrangência das barragens. Embora isto tenha permitido o desenvolvimento das análises, salienta-se que são áreas teóricas, não representando exatamente o polígono formado pelos sítios de locação de cada barragem.

Contudo, considera-se que os resultados produzidos foram capazes de atingir os objetivos propostos neste trabalho.

Como considerações finais, é importante salientar que os critérios de corte e as respectivas notas da matriz de suscetibilidade foram aqui propostas empiricamente, não tendo passado por consulta pública ou sob o crivo de um painel de especialistas, tal como foram as notas das matrizes existentes na legislação.

AGRADECIMENTOS

Registram-se agradecimentos especiais ao geólogo Ricardo Abrahão, consultor e professor do Curso de Especialização em Segurança de Barragens da UFBA/PTI, pela contribuição e orientação. Agradecimentos também ao geólogo José Luiz Kepel Filho da CPRM, pelo apoio prestado nas etapas de geoprocessamento.

Agradece-se, ainda, à CPRM, IPT e ANM pela disponibilização de material de consulta e insumos para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANM – Agência Nacional de Mineração. 2020. Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas. Brasília, Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>. Acessado em: 29 nov. 2020.

Araújo C. B. de. 2006. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 143f.

Bitar O. Y. (Coord.) 2014. Cartas de suscetibilidade de a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000 – Nota técnica explicativa. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (Publicação IPT, 3016).

Brasil. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2012. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial. Brasília, 21 set. 2010.

Brasil. Portaria 70.389 do Departamento Nacional de Mineração – DNM, de 17 de maio de 2017. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB. Diário Oficial. Brasília, 19 mai. 2017.

Brasil. Resolução 13 da Agência Nacional de Mineração – ANM, de 08 de agosto de 2019. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Diário Oficial. Brasília, 01 out. 2020.

Brasil. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de

1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Diário Oficial. Brasília, 01 out. 2012.

Corsi A.C., Gramani M.F., Ogura A.T. 2015. Desenvolvimento de método para delimitação de bacias de drenagem suscetíveis a corrida de massa e enxurrada em regiões serranas. São Paulo. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) – Volume 5, n.1, 2015.

Costa, W. D. 2012. Geologia de barragens. 1ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 352p.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil 2018. Manual de mapeamento de perigo e risco a movimentos gravitacionais de massa. Rio de Janeiro: CPRM.

ELETROBRÁS/CBDB 2003. Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas.

Fonseca, D. D. F. 2019. Panorama das barragens de rejeito mineral dos estados do Pará e Amapá. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 63 p.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, EMPLASA – Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo 1990. Carta de aptidão física ao assentamento urbano, escala 1:50.000 – guia de utilização. São Paulo: IPT/ Emplasa.

Jansen, R.B. 1983. Dams and Public Safety. US Govt. Printing Office, US Bureau of Reclamation. Denver, USA, 332 p.

Macedo E.S. & Bressani L.A. (Org.). 2013. Diretrizes para o zoneamento da suscetibilidade, perigo e risco de deslizamentos para planejamento do uso do solo. São Paulo: ABGE; ABMS, 88 p.

Machado, M. F. & Silva, S. F. da (Orgs.) 2010. Geodiversidade do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade, 94 p.

Oliveira, H. V. B. de, Vaz, L. F., Carneiro, C. D. R. 2013. Avaliação de Risco Geológico em barragens. São Paulo: Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) – Volume 3, nº1.

Pereira, G. M. 2020. Acidentes e rupturas de barragens de armazenamento de água. São Paulo: ABGE, 307p.

Rennó, C. D. et al. 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. Remote Sensing of Environment, 112(9), pp. 3469-3481.

Stabile R.A., Ferreira A. L., Carvalho A. M. de, Siqueira, A.G., Bitar O. Y. 2013. Análise de fatores condicionantes de instabilizações em encostas como subsídio para a modelagem estatística da suscetibilidade a deslizamentos. In: In: ABGE, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 14, Anais, Rio de Janeiro: CD-ROM.

Tominaga, L., Santoro, J., Amaral, R. (orgs.). 2009. Desastres naturais; conhecer para prevenir. São Paulo : Instituto Geológico, 196 p.