

**Avaliação das barragens de rejeito brasileiras por meio da análise de agrupamentos k
médias**

Assessment of brazilian tailing dams by k means cluster analysis

Evaluación de los diques de residuos mineros brasileiros por análisis de cluster k means

Recebido: 22/08/2020 | Revisado: 30/08/2020 | Aceito: 03/09/2020 | Publicado: 05/09/2020

Eliezer Antonio Amaral de Paulo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5329-8504>

Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil

E-mail: eliezer.antonio@hotmail.com

Carla Maria Silva Felisberto Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6492-1605>

Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil

E-mail: carlamaria1996@hotmail.com

Tatiana Barreto dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5484-6675>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: tatiana.santos@ufop.edu.br

Rudinei Martins de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9571-7423>

Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil

E-mail: rudnei.oliveira@uemg.br

Resumo

Com a evolução tecnológica, tornou-se possível a lavra de minérios cada vez mais pobres em teor. Dessa forma, a produção de rejeitos oriundos do tratamento de minérios aumentou, levando à necessidade de ampliação das barragens em número e capacidade para armazenamento desses resíduos. Como consequência, rupturas barragens de grandes dimensões passaram a acontecer com uma frequência alarmante, como por exemplo os episódios de Brumadinho/MG em 2019 e Mariana/MG em 2015. Este artigo tem por objetivo a aplicação da técnica de estatística multivariada de agrupamento k médias para identificar as barragens de rejeito cadastradas no Cadastro Brasileiro de Barragens da Agência Nacional de Mineração que sejam semelhantes àquelas que romperam no país nos últimos anos. A técnica

foi aplicada com sucesso e foram identificados seis grupos de barragens. Os grupos 1 e 2 acondicionaram as três últimas barragens de rejeito de mineração que se romperam. Foi possível notar que muitas das barragens que se encontram em estado de emergência tem características semelhantes às que se romperam. Essa informação não significa que essas barragens se encontram em situação instável, mas as mesmas devem ser avaliadas cuidadosamente.

Palavras-chave: Barragem de rejeitos; Análise estatística de agrupamentos; k médias; Cadastro nacional de barragens.

Abstract

The exploitation of low content ores became possible due to the technological development. The tailing production from the mineral processing increased, leading the need of the number and capacity increase of the dams. As consequence, dam failure became more frequent, exemplified by Brumadinho/MG and Mariana/MG events in years 2019 and 2015. This article has the objective of applying the multivariate statistical cluster technique named k means to identifying the tailing dams registered in Brazilian Register of Dams of the National Mining Agency that presents similar characteristics to the failed dams from the last years. The technique was successfully applied and it was identified six cluster of dams. The failed dams were located in groups 1 and 2. Besides, the Brazilian tailing dams with high emergency level were located in the same cluster of failed dams and presents similar characteristics. This information does not attest that the dams from cluster 1 and 2 are unstable, but they must to be carefully evaluated.

Keywords: Tailing dams; Cluster analysis; k means; Brazilian register of dams.

Resumen

La explotación de minerales de bajo contenido se hizo posible debido al desarrollo tecnológico. La producción de residuos a partir del procesamiento de minerales aumentó, lo que llevó a la necesidad de aumentar el número y la capacidad de los diques. Como consecuencia, la falla de diques se hizo más frecuente, ejemplificada por los eventos de Brumadinho / MG y Mariana / MG en los años 2019 y 2015. Este artículo tiene el objetivo de aplicar la técnica estadística de conglomerados llamada k medias para identificar los diques de residuos mineros registrados en el Registro Brasileño de Diques de la Agencia Nacional de Minería que presentan características similares a los diques fallidos de los últimos años. La técnica fue aplicada con éxito y se identificaron seis grupos de diques. Los diques fallidos se

ubicaron en los grupos 1 y 2. Además, los diques de residuos brasileños con alto nivel de emergencia se ubicaron en el mismo grupo de diques fallidos y presentan características similares. Esta información no significa que estos diques se encuentren en una situación inestable, pero deben ser evaluados cuidadosamente.

Palabras clave: Diques de residuos mineros; Análisis de conglomerados; k medias; Registro brasileño de diques.

1. Introdução

Devido à crescente demanda mundial por minério e o avanço das tecnologias de beneficiamento mineral, a exploração de minérios de baixo teor tornou-se possível. Para isso, a mineração desenvolveu técnicas de refino cada vez mais eficientes, em que os processos geram pequenas quantidades de concentrado e grandes quantidades de rejeito. Normalmente, essas grandes quantidades de rejeito são alocadas em barragens, fazendo com que essas estruturas apresentem cada vez maiores alturas e volumes (Rico, et al., 2008).

As barragens de rejeito são estruturas civis construídas para se dispor o rejeito gerado no beneficiamento de minérios. O rejeito é disposto na mesma e, de acordo com a produção, o nível do dique inicial da estrutura é atingido, surgindo a necessidade de optar por um método de alteamento para prolongar a vida útil do reservatório. As três maneiras mais utilizadas para realizar o alteamento de uma barragem são: etapa única, montante, jusante e linha central.

Segundo o *International Committee of Large Dams* (Icold, 2014), os principais tipos de ruptura associados às barragens de rejeito são o galgamento que é compreendido como a extrapolação do rejeito acima do barramento, percolação seguida por *piping*, instabilidade de taludes, liquefação e falhas na fundação, compreendidos como variação da resistência da base do vale de depósito e falhas estruturais. É comum associar o fenômeno de ruptura à liquefação, porém os diversos mecanismos relacionados à liquefação são ainda pouco compreendidos tendo em vista que muitas destas variáveis são obtidas de formas indiretas.

Segundo a Agência Nacional de Mineração, o Brasil detém 769 barragens de rejeito de mineração, das quais 425 barragens estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (ANM, 2020). Essas barragens são avaliadas quanto ao risco de rompimento, potencial de dano associado, classe de risco e outras características. Em 2014 o *International Commission of Large Dams* realizou um estudo sobre os rompimentos de barragens registrados entre o período de 1915 à 2014, na época o Brasil ocupava a oitava posição do *ranking* e 44% dos incidentes foram registrados nos Estados Unidos, porém este

levantamento não inclui os recentes casos de ruptura de barragens brasileiras, como os casos das Barragens de Germano e Córrego do Feijão da Empresas Samarco S.A. e Vale S.A., respectivamente (Icold, 2014). Estudos mais recentes sobre barragens podem ser encontrados em Gomes et al. (2019), Scarpelin et al. (2020) e Silva et al. (2020).

Com o objetivo de determinar as atuais barragens de rejeito brasileiras que possam apresentar características semelhantes às barragens que romperam nos últimos anos no Brasil, análise estatística multivariada do banco de dados das barragens inseridas no Política Nacional de Segurança de Barragens foi realizada por meio da técnica de análise de agrupamentos pelo método k médias. O banco de dados utilizado nessa pesquisa é constituído de 425 barragens de rejeito localizadas em todo o território nacional, adicionada as três últimas barragens que se romperam no país.

2. Materiais e Métodos

2.1. Banco de dados: O Cadastro Nacional de Barragens de Mineração

O Cadastro Nacional de Barragens é administrado e disponibilizado publicamente pela Agência Nacional de Mineração do Governo Brasileiro. O mesmo é composto pelas principais informações de barragens de rejeito localizadas em todo o território nacional. A versão mais atualizada deste cadastro é de 2019, em que as 425 barragens inseridas na PNSB são caracterizadas segundo as seguintes variáveis: nome, nome do empreendedor, localização, minério principal, altura atual, volume atual, método construtivo, categoria de risco, dano potencial associado e classe (ANM, 2019a).

A Tabela 1 apresenta as variáveis utilizadas para confecção do banco de dados em que a análise de agrupamentos foi aplicada. Somente variáveis diretamente associadas à segurança das barragens foram utilizadas na análise, a saber: método construtivo, categoria de risco, dano potencial associado, volume atual e altura atual. A variável classe foi removida por se tratar de uma variável dependente da categoria de risco e dano potencial associado. Valores variando de 1 a 3, 1 a 4 e 1 a 5 foram atribuídos para características e faixas de valores, a depender da variável.

Tabela 1: Variáveis do banco de dados utilizado.

Variável					
Método construtivo					
Descrição	Indefinido	Montante ou desconhecido	Linha de centro	Jusante	Etapa única
Valor associado	5	4	3	2	1
Categoria de risco					
Descrição	Alto	Médio	Alto	Médio	Baixo
Valor associado	3	2	3	2	1
Dano potencial associado					
Descrição	Alto	Médio	Alto	Médio	Baixo
Valor associado	3	2	3	2	1
Volume atual (milhões de m ³) – valor quantitativo absoluto					
Altura atual (metros) – valor quantitativo absoluto					

Fonte: Os autores.

Uma breve caracterização das variáveis utilizadas para construção do banco de dados analisado é apresentada a seguir.

Método construtivo: os métodos construtivos comumente utilizados são jusante, linha de centro e montante. Quando o método é montante, a obra se move para montante e existe o aproveitamento dos rejeitos dispostos como parte da estrutura de contenção. No caso de jusante, a técnica é feita no sentido oposto à anterior, a contar do dique inicial, que é impermeável e dotado de drenagem interna. Por fim, o método de linha de centro é intermediário às técnicas a montante e jusante (Soares, 2010).

Categoria de risco: de acordo com a Lei que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, as barragens são classificadas quanto à categoria de risco de acordo com aspectos e características que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente, levando-se em conta características técnicas, estado de conservação e o plano de segurança da barragem (ANM, 2020). As barragens são classificadas quanto à categoria de risco conforme apresentado na Tabela 1.

Dano potencial associado: os critérios gerais utilizados para classificação quanto ao dano potencial associado em uma área que pode ser afetada por uma possível ruptura são existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas, existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários, existência de infraestrutura ou serviços, existência de equipamentos de serviços públicos essenciais, existência de áreas protegidas definidas em legislação, natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados e volume da barragem (ANM, 2020). As barragens são classificadas quanto ao dano potencial associado conforme apresentado na Tabela 1.

Volume atual: refere-se à quantidade de rejeito armazenado em milhões de metros cúbicos. A variável é quantitativa e o valor absoluto foi utilizado.

Altura atual: refere-se à altura total do barramento em metros. A variável é quantitativa e o valor absoluto foi utilizado.

As barragens brasileiras que se romperam nos últimos 10 anos foram adicionadas ao banco de dados, a saber: B1 (Córrego do Feijão), Germano e B1 (Herculano). A barragem B1 da mina Córrego do Feijão foi construída pelo método de alteamento a montante e a altura e comprimento da crista no momento de ruptura era igual a 86 metros e 720 metros, respectivamente. Os rejeitos eram armazenados em uma área de 249,5 milhares de metros cúbicos. Além dos danos ambientais, 259 pessoas morreram no desastre (Vale S.A., 2019).

Segundo ao laudo técnico publicado pela ANM em 5 de novembro de 2019, teve como principais causas de ruptura a presença de lençóis empoleirados e a necessidade de instalação de DHPs (ANM, 2019b).

A Barragem de Fundão da mina Germano da Samarco rompeu-se no ano de 2015. Mais de 43 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro causaram um grande dano ambiental, poluindo 668 km de cursos de água da bacia do Rio Doce até o oceano Atlântico. A barragem também foi construída pelo método a montante e a sua altura no momento de ruptura era igual a 86 metros. O volume de rejeitos e a extensão de ecossistemas afetados assumiram proporções nunca antes relatadas (Carmo et al., 2017). O parecer técnico publicado pelo Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão em 2016 aponta como causas imediatas do rompimento um deslizamento fluido provocado pela liquefação que se iniciou na ombreira esquerda da barragem (Morgenstern et al., 2016).

A Barragem B1 da Herculano mineração localizada em Itabirito se rompeu em 2014 devido ao grau de saturação e alta poropressão na estrutura (Supram, 2009). A Tabela 2 apresenta as características de cada uma das barragens exatamente antes da ocorrência da

ruptura.

Tabela 2: Características das barragens que se romperam nos últimos 10 anos.

ID	Barragem	Método construtivo	Categoria de risco	Dano potencial associado	Volume no momento de ruptura (m ³)	Altura no momento de ruptura (m)
426	Fundão (Germano)	Montante	Baixa	Alto	91866000	130
427	B1 (Herculano)	Montante	Baixa	Médio	4500000	61,5
428	B1 (Córrego do Feijão)	Montante	Baixa	Alto	11700000	86

Fonte: Os autores.

Por fim, o banco de dados analisado possui 428 barragens (as 425 barragens atualmente cadastradas no PNSB e as 3 barragens que se romperam e foram citadas acima). A Tabela 3 apresenta as 10 primeiras barragens do banco de dados com suas respectivas variáveis.

Tabela 3: Dez primeiras barragens do banco de dados.

ID	Barragem	Método construtivo	Categoria de risco	Dano potencial associado	Volume atual (m ³)	Altura atual (m)
1	0-1	1	1	2	27700000	22,00
2	103 (Cruz)	1	1	2	924000	10,30
3	111 (Índio)	1	1	2	48873	5,00
4	158 A-1	2	1	3	53380000	30,00
5	161 A-2	1	1	2	1018054	22,00
6	444 A-3	1	1	2	886241	14,70
7	81-1	1	1	2	75522	4,00
8	Pau D'Arco	1	1	2	52800	18,00
9	Barragem da cava	2	1	2	1755555	25,00
10	Mario Cruz	3	2	2	25366731	28,00

Fonte: Os autores.

2.2. Análise de agrupamentos pelo método k médias

A técnica estatística multivariada de análise de agrupamentos tem por finalidade agrupar observações levando em conta a distância entre elas. É um procedimento estatístico que organiza os elementos em grupos com base nas características que possuem. Os agrupamentos resultantes exibem alta homogeneidade interna (dentro dos grupos) e elevada heterogeneidade externa (entre os grupos) (Hair et al., 2018).

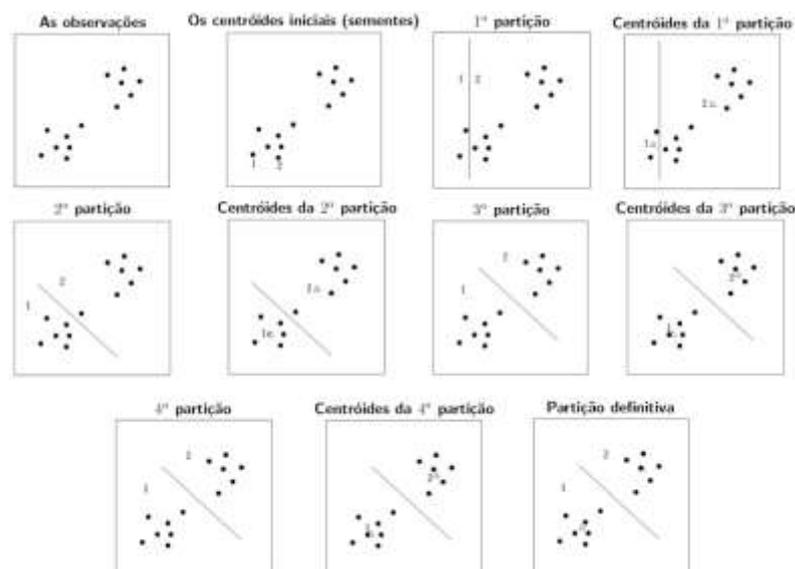
O método k médias é um dos métodos de agrupamento mais utilizados nos estudos práticos de agrupamento. Ele consiste na alocação de cada elemento da amostra ao cluster com menor distância ao centro ou centroide (Hartigan & Wong, 1979; Mingoti, 2013). O método pressupõe a definição a priori de k grupos.

O método é composto por 4 passos:

- 1º passo: selecionar aleatoriamente k centroides iniciais;
- 2º passo: calcular as distâncias entre cada elemento e o centroide de cada um dos k grupos e alocar o indivíduo no grupo mais próximo;
- 3º passo: recalculer o centroide de cada grupo e repetir o 2º passo considerando os novos centroides;
- 4º passo: repetir os 2º e 3º passos até que os centroides não apresentem mais mudanças em suas posições.

A Figura 1 apresenta os passos apresentados acima.

Figura 1: Método k médias.



Fonte: Adaptado de Hartigan & Wong, (1979).

A distância comumente utilizada em análises de agrupamento é a distância euclidiana. Ela consiste em uma distância geométrica entre dois elementos e é calculada por meio da Equação (1) (Hair et al., 2018).

$$d_{ij} = \sqrt{(\tilde{x}_i - \tilde{x}_j)^t (\tilde{x}_i - \tilde{x}_j)} \quad (1)$$

Em que:

d_{ij} é a distância entre os elementos i e j ;

\tilde{x}_i é o vetor de variáveis do elemento i ;

\tilde{x}_j é o vetor de variáveis do elemento j .

2.3 Metodologia de análise

O banco de dados foi construído conforme apresentado anteriormente na seção 2.1. A este banco de dados, foi aplicada a análise de agrupamentos utilizando o k médias para dois, três, quatro e cinco grupos. Após a construção do banco de dados onde foi acrescentado também as barragens que se romperam, o algoritmo k médias foi executado. Com isso, a cada iteração o método calculou as distâncias de cada elemento ao centro do grupo mais próximo. Ao final do processo iterativo os agrupamentos foram criados.

A definição dos grupos ideais foi realizada analisando o gráfico da distribuição espacial das barragens em duas dimensões. As dimensões foram separadas em Componente 1 e Componente 2 e são obtidas através de combinações lineares das cinco variáveis que compõem o banco dados. As barragens localizadas no mesmo grupo e, portanto, apresentam características semelhantes, foram identificadas.

Além disso, foi observado em qual grupo as barragens que se romperam ficaram alocadas. Por fim, foi feita a análise das atuais barragens que pertencem ao mesmo grupo das barragens que se romperam. Essa informação é importante pois identifica as barragens que possam estar em situação instável, próximas as barragens que se romperam. A análise de agrupamentos foi realizada com o auxílio do software R (R Core Team, 2015). A Figura 2 apresenta um fluxograma da metodologia realizada neste trabalho.

Figura 2: Metodologia da pesquisa.



Fonte: Autores.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 4 e Figura 3 apresentam os resultados obtidos nos agrupamentos realizados considerando a divisão das barragens em 2, 3, 4, 5 e 6 grupos. Analisando os resultados na Tabela 4 é possível observar a quantidade de barragens que pertencem a cada um dos grupos e também identificar em quais grupos as barragens que se romperam estão alocadas.

Tabela 4: Resultados das análises de agrupamento pelo método k médias.

2 GRUPOS							
	Grupo 1	Grupo 2	Barragem ID 426	Barragem ID 427	Barragem ID 428		
Tamanho dos grupos	90	338	Pertencem ao grupo				
			1	1	1		
3 GRUPOS							
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Barragem ID 426	Barragem ID 427	Barragem ID 428	
Tamanho dos grupos	11	145	272	Pertencem ao grupo			
				1	2	2	
4 GRUPOS							
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Barragem ID 426	Barragem ID 427	Barragem ID 428
Tamanho dos grupos	41	79	49	259	Pertencem ao grupo		
					1	2	1
5 GRUPOS							

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Barragem ID 426	Barragem ID 427	Barragem ID 428	
Tamanho dos grupos	38	72	63	127	128				
	Pertencem ao grupo								
						1	2	1	
6 GRUPOS									
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Barragem ID 426	Barragem ID 427	Barragem ID 428
Tamanho dos grupos	11	43	58	126	127	63			
	Pertencem ao grupo								
							1	2	2

Fonte: Os autores.

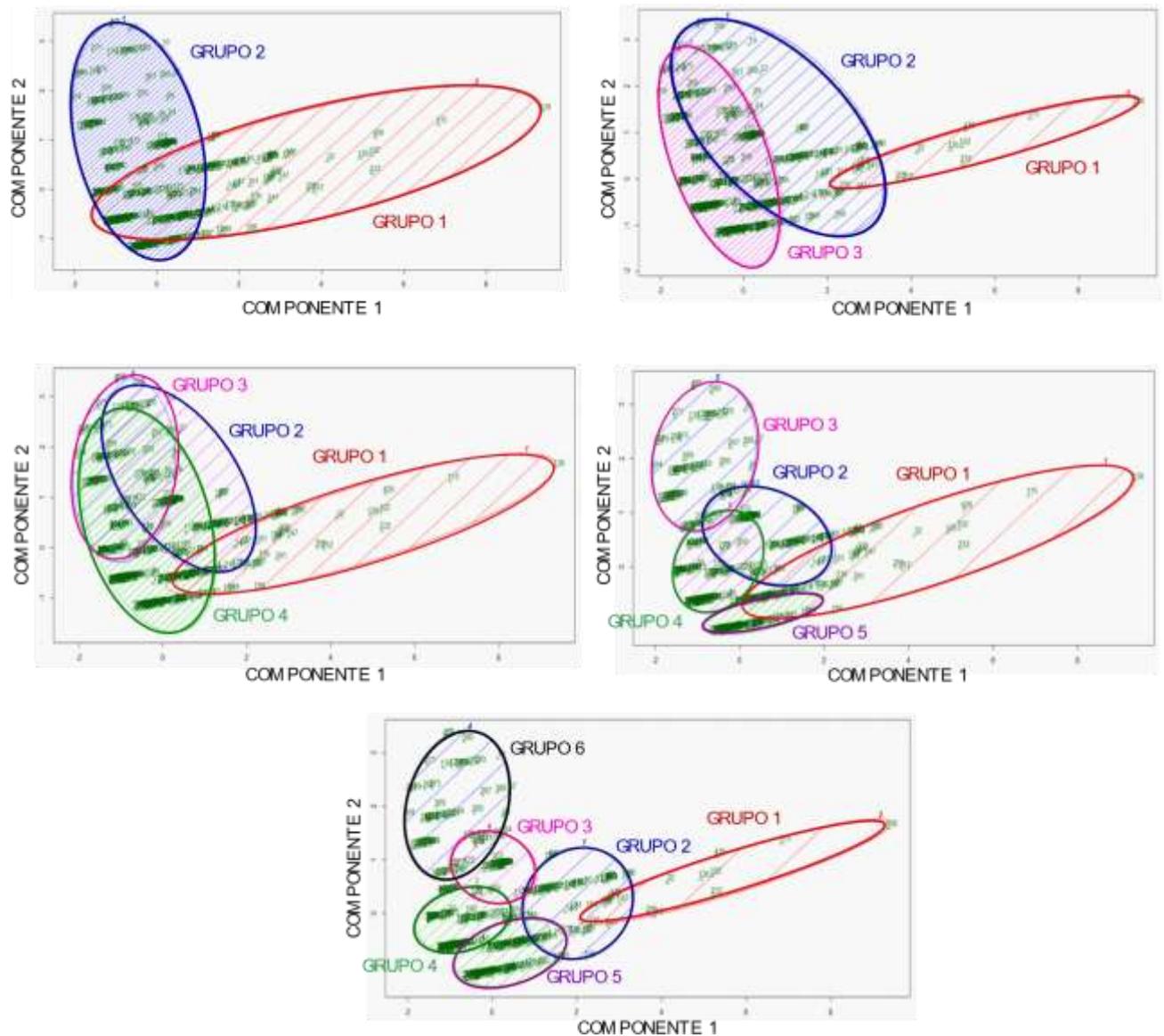
As barragens que se romperam nos últimos anos foram agrupadas no mesmo grupo (Grupo 1) somente na primeira análise considerando a divisão das barragens em dois grupos. Em todas as outras análises para divisão dos dados em 3, 4, 5, e 6 grupos, as barragens foram agrupadas em dois grupos distintos (Grupo 1 e 2).

A depender da análise, a Barragem B1 da Mina Córrego do Feijão (ID 428) é agrupada ora no mesmo grupo que a Barragem de Fundão (ID 426), ora no mesmo grupo que a barragem B1 da Mina Herculano (ID 427). Isso ocorre porque a barragem B1 da mina de Córrego do Feijão apresenta características intermediárias às outras duas barragens. Ela se aproxima da barragem de Fundão devido à variável dano potencial associado ser a mesma e se aproxima da barragem B1 da mina de Herculano por causa de seus volumes e alturas serem próximos.

Apesar do problema analisado apresentar cinco dimensões (5 variáveis), a Figura 3 consiste na apresentação da distribuição espacial das barragens em duas dimensões (Componente 1 e Componente 2).

Barragens próximas apresentam características semelhantes e são agrupadas no mesmo grupo. As variáveis Componente 1 e Componente 2 apresentadas nos eixos dos gráficos consistem em uma combinação linear das cinco variáveis analisadas no problema e correspondem a 58,39% da representação da variabilidade das barragens analisadas.

Figura 3: Análise de agrupamentos pelo método k médias.



Fonte: Os autores.

Ao observar a Figura 3, é possível observar que a análise de agrupamento utilizando o k médias gerou grupos sobrepostos, sendo que a análise com seis grupos gerou grupos menos sobrepostos do que nas outras análises. Esse resultado pode ser avaliado graficamente como o melhor resultado obtido.

Os grupos 1 e 2 agruparam as barragens que apresentam as características mais próximas das barragens de Fundão e as barragens B1 das minas de Córrego do Feijão e Herculano, respectivamente. Os grupos 1 e 2 contém 11 e 43 barragens (incluindo as três barragens rompidas), respectivamente. As Tabelas 5 e 6 apresentam as barragens pertencentes a cada um desses grupos.

Tabela 5: Barragens estatisticamente semelhantes a barragem de Fundão.

GRUPO1		
Barragem	Empreendedor	Município
Barragem de Rejeitos do Córrego Baco Pari	Mineração Maracá Industria e Comercio Sa	Alto Horizonte
Barragem BL-1	Mosaic Fertilizantes P&K S.A. Filial: Tapira	Tapira
Barragem de Germano	Samarco Mineração S A.	Mariana
Barragem Eustáquio	Kinross Brasil Mineração S A	Paracatu
Barragem Santo Antônio	Kinross Brasil Mineração S A	Paracatu
Itabiruçu	Vale S A Filial: Vale Itabira	Itabira
Maravilhas II	Vale S A Filial: Vale Itabirito	Itabirito
Pontal	Vale S A Filial: Vale Itabira	Itabira
BARRAGEM DO SOSSEGO	Vale S A Filial: Vale Mina Sossego	Canaã dos Carajás
Gelado	Vale S A Filial: Vale Carajas	Parauapebas
Fundão	Samarco Mineração S A.	Mariana

Fonte: Os autores.

Tabela 6: Barragens estatisticamente semelhantes as barragens de Fundão.

GRUPO2		
Barragem	Empreendedor	Município
Barragem 01	Jacobina Mineração e Comércio Ltda	Jacobina
BARRAGEM 02	Jacobina Mineração e Comércio Ltda	Jacobina
Barragem BR	Mosaic Fertilizantes P&K S.A. Filial: Catalao	Catalão
BARRAGEM DO BURACO	Copebras Indústria Ltda	Catalão
Barragem MSG	Mineração Serra Grande S.a.	Crixás

5 (MAC)	Vale S A Filial: Vale Paraopeba	Nova Lima
5 (Mutuca)	Vale S A Filial: Vale Paraopeba	Nova Lima
Alemães	Gerdau Açominas S.a.	Ouro preto
B3/B4	Minerações Brasileiras Reunidas Sa Filial: MBR Paraopeba	Nova lima
B4	Itaminas Comércio de Minérios S.a.	Sarzedo
B4	Nacional de Grafite Ltda	Itapecerica
Barragem B1	Herculano Mineração Ltda.	Itabirito
Barragem B1-Auxiliar - Mina Tico-Tico	Mineração Morro do Ipê S.a.	Igarapé
Barragem B1/B4	Mosaic Fertilizantes P&K S.A. Filial: Araxa	Araxá
Barragem B2 - Mina Tico-Tico	Mineração Morro do Ipê S.a.	Igarapé
BARRAGEM B4	Csn Mineração S.a.	Congonhas
Barragem B5	Mosaic Fertilizantes P&K S.A. Filial: Araxa	Araxá
Barragem BR	Mosaic Fertilizantes P&K S.A. Filial: Tapira	Tapira
BARRAGEM CASA DE PEDRA	Csn Mineração S.a.	Congonhas
Barragem Central	Mineração Usiminas S.a.	Itatiaiuçu
Barragem de Rejeitos	Arcelormittal Mineração Serra Azul S.a.	Itatiaiuçu
Barragem Mina Oeste (Somisa)	Mineração Usiminas S.a.	Itatiaiuçu
BARRAGEM REJEITOS	Nexa Recursos MineraiS S.a	Fortaleza de Minas
Barragem RG2W	Mineração Serras do Oeste Eireli	Caeté
Bocaina	Gerdau Açominas S.a.	Ouro Preto
CALCINADOS	Anglogold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S.a.	Nova Lima

*Campo Grande	Vale S A Filial: Vale Mariana	Mariana
CONTENÇÃO DE REJEITOS DE CDS II	Anglogold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S.a.	Santa Bárbara
CONTENÇÃO DE REJEITOS DE CUIABÁ	Anglogold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S.a.	Sabará
Doutor	Vale S A Filial: Vale Mariana	Ouro Preto
Forquilha I	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Ouro Preto
Forquilha II	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Ouro Preto
Forquilha III	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Ouro Preto
Forquilha IV	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Ouro Preto
I	Vale S A Filial: Vale Paraopeba	Brumadinho
Mirai	Companhia Brasileira de Alumínio	Mirai
Sul (Córrego do Canal)	Vale S A Filial: Vale Minas Centrais	São Gonçalo do Rio Abaixo
Sul Superior	Vale S A Filial: Vale Minas Centrais	Barão de Cocais
BARRAGEM DE REJEITOS	Salobo Metais Sa.	Marabá
Barragem 2	Mosaic Fertilizantes P&K S.A. Filial: Cajati	Cajati
CIMPOR	Mosaic Fertilizantes P&K S.A. Filial: Cajati	Cajati
B1 (Herculano)	Herculano Mineração Ltda.	Itabirito
B1 Corrego do feijão	Vale s a	Brumadinho

Fonte: Os autores.

Quanto ao nível de emergência, as barragens podem ser classificadas em Níveis 1, 2 e 3. A estrutura é classificada como nível 1 quando é detectada uma anomalia quanto ao estado de conservação ou para qualquer outra situação com potencial comprometimento da segurança da estrutura, não demandando a evacuação da área a jusante, porem passa a ser necessária a vistoria diária da estrutura.

O Nível 2 é quando as anomalias detectadas no nível 1 são classificadas como “não controladas” ou “não extintas”. Segundo a Defesa Civil, o protocolo exige treinamento de moradores para possíveis evacuações em caso de risco e instalação e acionamento de sirenes em caso de necessidades. Por fim, o Nível 3 é quando a estrutura se encontra com situação iminente de ruptura ou o rompimento já está acontecendo. A Tabela 7 apresentam as barragens brasileiras que atualmente são classificadas nos níveis de emergência 1, 2 e 3.

Tabela 7: Barragens com níveis de emergência 1, 2 e 3.

Nível de emergência	Barragem	Empreendedor	Cidade
Nível 3	B3/B4	Minerações Brasileiras Reunidas Sa Filial: MBR Paraopeba	Nova Lima
	Forquilha I	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Ouro Preto
	Forquilha III	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Ouro Preto
	Sul superior	Vale S A Filial: Vale Minas Centrais	Barão de cocais
Nível 2	Barragem de Rejeitos	Arcelormittal Mineração Serra Azul S.a.	Itatiaiuçu
	Capitão do mato	Vale S A Filial: Vale Vargem Grande	Nova Lima
	Doutor	Vale S A Filial: Vale Mariana	Ouro Preto
	Forquilha II	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Ouro Preto
	Grupo	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Ouro Preto
	Sul Inferior	Vale S A Filial: Vale Minas Centrais	Barão de Cocais
	B	Vale S A Filial: Vale Vargem Grande	Nova Lima
Nível 1	Barragem B1	Mineração Geral do Brasil S A	Brumadinho
	Barragem B1/B4	Mosaic Fertilizantes P&K S.A. Filial: Araxa	Araxá
	BARRAGEM B2 AUXILIAR	Nacional Minerios Sa	Rio Acima

Barragem Central	Mineração Usiminas S.a.	Itatiaiuçu
Campo Grande	Vale S A Filial: Vale Mariana	Mariana
Capim Branco	Minerações Brasileiras Reunidas Sa Filial: MBR Paraopeba	Brumadinho
Capitão do Mato	Vale S A Filial: Vale Vargem Grande	Nova lima
Forquilha IV	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Ouro Preto
Itabiruçu	Vale S A Filial: Vale Itabira	Itabira
Maravilhas II	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Itabirito
Marés II	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	Belo vale
Pontal	Vale S A Filial: Vale Itabira	Itabira
Santana	Vale S A Filial: Vale Itabira	Itabira
Sul Inferior	Vale S A Filial: Vale Minas Centrais	Barão de cocais
Vargem Grande	Vale S A Filial: Vale Vargem Grande	Nova lima
VI	Vale S A Filial: Vale Paraopeba	Brumadinho

Fonte: Neves et al., (2020).

Comparando as Tabelas 5 e 6 com a Tabela 7, observa-se que a barragem de Campo Grande em Mariana que aparece no grupo 2 encontra-se desativada, apresentando nível 1 em estado de emergência (ANM, 2019b).

As barragens Pontal e Santana localizadas no município de Itabira/MG apresentam nível 1 de emergência, ambas pertencem ao grupo 1. Pontal encontra-se desativada enquanto Santana encontra-se em operação com vida útil estimada em 16 anos (ANM, 2019b). A barragem de Maravilhas II, localizada no município de Itabirito, aparece no grupo 1, apresenta nível 1 de alerta e é alimentada pela usina e tem vida útil estimada em 110 anos (ANM, 2019b). A Barragem 5 (MAC), localizada em Nova Lima/MG, aparece no grupo 2, apresentando nível 1 de emergência e encontra-se desativada (ANM, 2019b). A Barragem B3/B4, localizada em Nova Lima/MG, aparece no grupo 2, apresentando nível 3 de emergência, vida útil estimada em 5 anos e encontra-se desativada. Em fevereiro de 2019 a Vale SA evacuou famílias residindo na zona de auto salvamento (ZAS) (ANM, 2019b). A

Barragem B1/B4, localizada no município de Araxá/MG, pertence ao grupo 2, apresentando nível 1 de emergência e atualmente desativada (ANM, 2019b). A Barragem de Rejeitos, localizada no município de Itatiaiuçu, operada pela ARCELORMITTAL BRASIL SA, pertence ao grupo 2, apresentando nível 2 de emergência e atualmente desativada (ANM, 2019b). A Barragem Sul Superior, localizada no município de Barão de Cocais, pertence ao grupo 2 e apresenta nível 3 de emergência, encontrando-se atualmente desativada (ANM, 2019b).

Quanto as barragens localizadas no município de Ouro Preto/MG, todas pertencentes ao grupo 2, podemos destacar a Barragem de Doutor, apresentando nível 2 de emergência, vida útil estimada em 18 anos, encontrando-se em operação e alimentada pela Usina de Timbopeba. As Barragem de Forquilha 1 e Forquilha 3, apresentando nível 3 de emergência, encontram-se desativas, porem Forquilha 3 possui uma vida útil estimada em 18 anos. A barragem de Forquilha II, apresentando nível 2 de emergência e atualmente desativada e por fim a barragem de Forquilha IV, que está desativada e apresenta nível 1 de emergência (ANM, 2019b).

Considerando a classificação por nível de emergência, é interessante destacar que todas as barragens classificadas como nível 2 e 3 e algumas barragens com nível 1 de emergência são estatisticamente semelhantes às barragens que se romperam nos últimos, ver grupo 1 e 2 das Tabelas 5 e 6.

4. Considerações Finais

Ao longo desse artigo foi desenvolvido o estudo do Cadastro Nacional concedido pela ANM, através das análises de agrupamento k médias utilizando o Software estatístico R. Inicialmente foi montado um banco de dados com 428 barragens de rejeito brasileiras, sendo que entre elas, estavam as barragens que se romperam nos últimos 10 anos. As variáveis constituintes desse banco de dados foram aquelas levantadas e disponibilizadas pela Agência Nacional de Mineração por meio do Cadastro Nacional de Barragens.

A análise de agrupamentos aplicada ao banco de dados forneceu como principal conclusão que as barragens que passaram por tragédias recentes no Brasil apresentavam características semelhantes, apesar da variação de grupo apresentada pela Barragem B1 da Mina Córrego de Feijão. Além disso, foi possível notar que muitas das barragens que se encontram em estado de emergência tem características semelhantes às que se romperam e a maior parte dessas estão localizada no estado de Minas Gerais, fato este devido à grande

presença da mineração no estado. Essa informação não significa que essas barragens se encontram em situação instável, mas por terem características semelhantes devem ser avaliadas mais cuidadosamente.

Como sugestão para trabalhos futuros, pretende-se aproveitar o banco de dados e utilizá-lo em novos métodos de otimização buscando encontrar melhores agrupamentos. Com isso, espera-se reduzir o número de sobreposições dos grupos.

Referências

ANM. (2019a). *Cadastro Nacional de Barragens de Mineração*.

ANM. (2019b). *Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração*. Retrieved from <https://app.anm.gov.br/sigbm/publico>

ANM. (2020). *Relatório anual de segurança de barragens de mineração 2019*. Retrieved from <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/relatorios-anuais-de-seguranca-da-barragens-de-mineracao-1/relatorio-anual-gsbm-2019-v-final>

Carmo, F. F. do, Kamino, L. H. Y., Junior, R. T., Campos, I. C. de, Carmo, F. F. do, Silvino, G., ... Pinto, C. E. F. (2017). Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(3), 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>

Gomes, N. C., Santos, R. K. dos, Cordeiro, J., Duarte, M. B. A., Quintão, P. L., & Cordeiro, J. L. (2019). Caracterização das barragens de contenção de rejeitos situadas no estado de Minas Gerais. *Research, Society and Development*, 8(2), e4382683. <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i2.683>

Hartigan, J. A., & Wong, M. A. (1979). Algorithm as 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28.

ICOLD. (2014). *Tailings Dams: Risk of Dangerous Occurrences: Lessons Learnt from Practical Experiences*. Paris: BULLETIN 121.

Mingoti, S. A. (2013). *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada*. Editora UFMG.

Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B., & Watts, B. D. Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão - Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão. 2016. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2017/10/relatorio-sobre-as-causas-imediatas-da-ruptura-da-barragem-de-fundao.pdf>. Acesso em: 01/09/2020.

Neves, L. P., Júnior, E. S. G., Santos, A. A. von G. dos, Sousa, G. D. B. de, Santos, A. C. B. dos, Cruz, C. O., ... Freitas, A. R. de. (2020). *Report Semanal Barragens de Mineração 02 - 08/06/2020*. Retrieved from <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/boletim-semanal-de-barragens-de-mineracao/boletim-semanal-2020-06-08-v5>

R Core Team. (2015). R: A language and environment for statistical computing. Retrieved November 3, 2017, <https://www.r-project.org/>

Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. G. (2008). Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 846–852. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>

Scarpelin, J., Herculano, L. M. L., Dias, L. C. P., & Chume, V. F. (2020). Rompimento de barragem e direito à moradia adequada: perspectivas do maior desastre socioambiental do setor de mineração Brasileiro. *Research, Society and Development*, 9(4), e80942517. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i4.2517>

Silva, P. R. da, Muller, R. F., & Cordeiro, J. S. (2020). Análise dos impactos no uso e ocupação do solo associados a possível ruptura da Barragem do Itabiruçu, Itabira (MG). *Research, Society and Development*, 9(4), e93942863. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i4.2863>

Soares, L. (2010). Barragem de rejeitos. In *Tratamento de minérios*, 5.ed, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.19. p. 831-888.

SUPRAM. (2009). Parecer Único, 337/2009. Retrieved from

http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/Robson/Velhas/17.5_herculano_mineracao_pu.pdf

Vale S.A. (2019). Brumadinho.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Eliezer Antonio Amaral de Paulo – 25%

Carla Maria Silva Felisberto Pereira – 25%

Tatiana Barreto dos Santos – 25%

Rudinei Martins de Oliveira – 25%