

RELAÇÃO ENTRE CHUVAS E ROMPIMENTOS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIOS: ESTUDO DE CASO PARA MINAS GERAIS.

Douglas do Amaral Goulart e Silva¹ (IC), Arcilan Trevenzoli Assireu (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Desastres ambientais. Monitoramento climático. Precipitação. Prevenção de rompimentos.

Introdução

A mineração é uma atividade econômica fundamental no Brasil há mais de 300 anos, desempenhando um papel vital na economia do país, contribuindo com 1,4% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (IBRAM, 2016). Minas Gerais se destaca como um dos principais estados mineradores, com a extração mineral impulsionando a economia local. No entanto, o crescimento acelerado dessa atividade trouxe desafios consideráveis, principalmente no que diz respeito à gestão de barragens de rejeitos. Essas estruturas, que armazenam os resíduos do processo de mineração, têm sido palco de grandes desastres ambientais e sociais (Ávila et al., 2011).

Nos últimos anos, Minas Gerais foi cenário de uma série de rompimentos de barragens, resultando em graves consequências socioambientais, como a destruição de ecossistemas e a perda de vidas. Entre os eventos mais emblemáticos estão os rompimentos das barragens Cava C-1 (2001), Cataguases (2003), São Francisco (2006 e 2007), Herculano B1 (2014), Fundão (2015) e Brumadinho (2019). Esses eventos evidenciam a vulnerabilidade das barragens frente a falhas estruturais e a eventos de chuvas intensas.

Estudos pretéritos indicam que a causa do rompimento de Fundão foi uma sucessão de erros ocorridos na construção da barragem e alterações realizadas que não foram previstas no projeto inicial (Souza et al. 2021). Da mesma forma, pode-se dizer em relação a Brumadinho (Metsul, 2019). Em Cataguases, segundo Laudo 1.362/2003, do Instituto Nacional de Criminalística (INC), as causas do acidente foram problemas como a falta de manutenção e de fiscalização e o excessivo prolongamento da vida útil da barragem, o que resultou em um processo erosivo da obra. Segundo o laudo, a barragem tinha sido edificada em 1990 com uma estrutura provisória, que deveria durar apenas dois anos (Unicamp, 2018).

Diante desse cenário, o objetivo principal deste estudo é investigar, por meio de dados de precipitação medidos e

modelados, a relação entre chuvas intensas e os rompimentos de barragens de rejeitos de minérios em Minas Gerais. Como objetivos específicos, pretende-se compilar dados pluviométricos de oito barragens que romperam a partir do ano 2000 e analisar a intensidade das chuvas que ocorreram antes dos rompimentos. A justificativa para este estudo reside na necessidade de se compreender a influência das condições climáticas, particularmente de eventos meteorológicos extremos, sobre a estabilidade das barragens, com vistas a desenvolver novas estratégias de monitoramento e mitigação.

Metodologia

Neste estudo, foram analisados eventos de precipitação registrados entre 2000 e 2019 no estado de Minas Gerais, concentrando-se em oito barragens específicas. A análise focou nas duas semanas anteriores aos rompimentos dessas barragens. Foram utilizados dados pluviométricos das estações automáticas do SNIRH e do CEMADEN, além de dados diários e horários do modelo MERGE, fornecido pelo CPTEC/INPE.

1. Área de Estudo

O estudo foi realizado no estado de Minas Gerais, conhecido por sua intensa atividade mineradora e pela recorrência de rompimentos de barragens. As sete barragens analisadas estão localizadas em diferentes municípios: a Barragem Rio Verde Cava C1 em Nova Lima (-20.031, -43.962), a Barragem Cataguases em Cataguases (-21.356, -42.623), a Barragem São Francisco em Mirai (-21.210, -42.715), a Barragem Vigia em Ouro Preto (-20.435, -43.835), a Barragem B1 Herculano em Itabirito (-20.251, -43.937), a Barragem Fundão em Mariana (-20.210, -43.460) e a Barragem Brumadinho em Brumadinho (-20.120, -44.121). Essas barragens estão distribuídas em áreas suscetíveis a eventos de precipitação extrema, refletindo a vulnerabilidade ambiental e social da região.

2. Dados

Os dados utilizados no estudo foram obtidos das seguintes fontes:

- **Estações Pluviométricas Automáticas (SNIRH e CEMADEN):** Os dados foram acessados via Hidroweb e pelo mapa interativo do CEMADEN, especialmente para os rompimentos ocorridos após 2014. Esses dados permitiram a análise dos acumulados de precipitação próximos aos eventos de rompimento.
- **Dados MERGE (CPTEC/INPE):** O produto MERGE combina observações terrestres e estimativas de satélite do GPM (IMERG). Para os eventos anteriores a 2009, foram utilizados dados diários; para os eventos ocorridos a partir de 2009, foram analisados dados horários.

3. Análises Realizadas

As análises foram realizadas utilizando Python no Google Colab, empregando bibliotecas como Pandas, NumPy, Matplotlib, Xarray e Plotly.

3.1 Dados Pluviométricos

A análise dos dados de precipitação foi realizada em duas escalas: acumulados de 24 horas e por hora.

- **Acumulado de 24h:** Gráficos foram gerados para cada estação, mostrando a precipitação acumulada diariamente.
- **Acumulado por Hora:** Gráficos foram gerados para eventos específicos, ilustrando a distribuição horária da precipitação.

Além disso, foram gerados gráficos comparativos entre diferentes estações, consolidando dados diários para um mês e para um trimestre.

3.2 Dados de Satélite (MERGE)

A análise dos dados de satélite foi realizada da seguinte forma:

- **Download e Preparação dos Dados:** Os dados horários foram baixados em formato GRIB2 e organizados utilizando a biblioteca Xarray.
- **Recorte Espacial:** Os dados de precipitação foram recortados para a área de Minas Gerais, permitindo focar na região de interesse para a

análise de risco de rompimento das barragens.

- **Visualização:** Mapas com limites municipais foram gerados utilizando a biblioteca Cartopy, incluindo as localizações das estações pluviométricas próximas às barragens. Essa visualização facilitou a identificação das áreas mais afetadas pela precipitação.

Resultados e discussão

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos ao longo do estudo, organizados de acordo com os eventos de rompimento das barragens e a análise dos dados de precipitação diária e horária. O estudo focou na correlação entre os eventos pluviométricos e os rompimentos das barragens em Minas Gerais, com base em dados do produto MERGE (CPTEC/INPE) e de estações do CEMADEN.

Rio Verde Cava C1 (Nova Lima, 2001): Não houve precipitação significativa registrada no período anterior ao rompimento da barragem. A ausência de chuvas indica que, neste caso, o rompimento não foi associado a eventos pluviométricos intensos. Conforme divulgado por Bertachini (2001), o rompimento da barragem Rio Verde Cava C1 foi atribuído ao alteamento de 20 metros sobre uma cava previamente preenchida com rejeitos, transformando o que poderia ter sido uma recuperação de área minerada em uma tragédia, sugerindo que outros fatores, como falhas estruturais, possam ter desempenhado um papel predominante.

Cataguases (2003): Os dados diários do MERGE indicaram chuvas constantes desde 13/03/2003, com um pico acima de 20 mm em 17/03. Embora o rompimento tenha ocorrido dias após essa série de chuvas, sugerindo que o solo possivelmente já estava saturado, o que pode ter contribuído para a falha da barragem, destacando-se a precipitação de mais de 18 mm em 23/03, cinco dias antes do evento.

São Francisco (Miraí, 2006 e 2007): Em 2006, houve precipitação considerável nos dias 23 e 27 de fevereiro antes do rompimento, enquanto em 2007, chuvas intensas entre dezembro e janeiro antecederam o colapso.

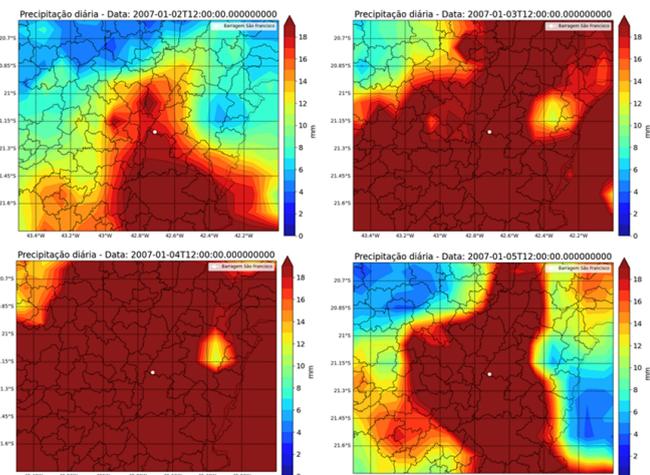


Figura 1 – Precipitação acumulada em 24h para Mirai-MG nos dias 02, 03, 04 e 05 de Janeiro de 2007.

Miguel Burnier (Ouro Preto, 2008): Os dados diários mostraram uma sequência de chuvas moderadas, com picos nos dias de 12 a 15 de março, apresentando acumulados entre 12 mm e valores que superaram 18 mm. O rompimento ocorreu logo após essa concentração de chuvas, sugerindo que a saturação do solo e o aumento da pressão hídrica interna na barragem contribuíram para o evento, como mostra a Figura 2.

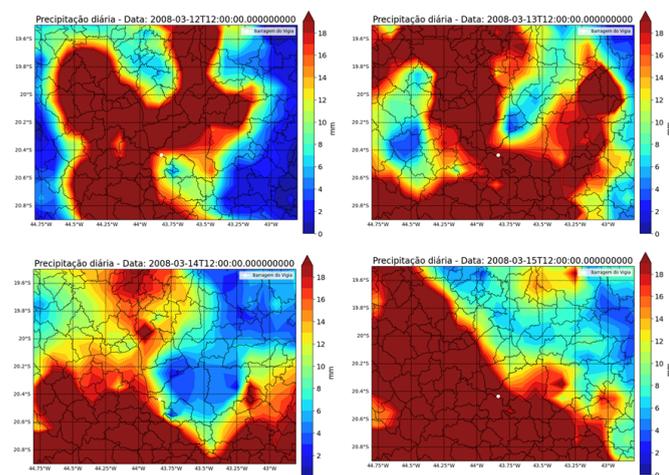


Figura 2 – Precipitação acumulada de 12 a 15 de março de 2008.

Itabirito (Herculano B1, 2014): A análise dos dados do CEMADEN mostrou uma precipitação de 6 a 10 mm em 03/09, acumulada em 3 horas. Não houve chuvas significativas nos dias seguintes, sugerindo que a saturação do solo pode não ter enfraquecido a barragem, que se rompeu em 10/09/2014. Conforme amplamente

divulgado pela mídia e pelo Ministério Público de Minas Gerais (MPMG), o rompimento foi atribuído a erros de gestão e à disposição irregular de rejeitos em área desativada.

Fundão (Mariana, 2015): A precipitação moderada nos dias que antecederam o rompimento, especialmente entre 22 e 28 de outubro, indicou sinais que possam ter contribuído para a instabilidade da estrutura.

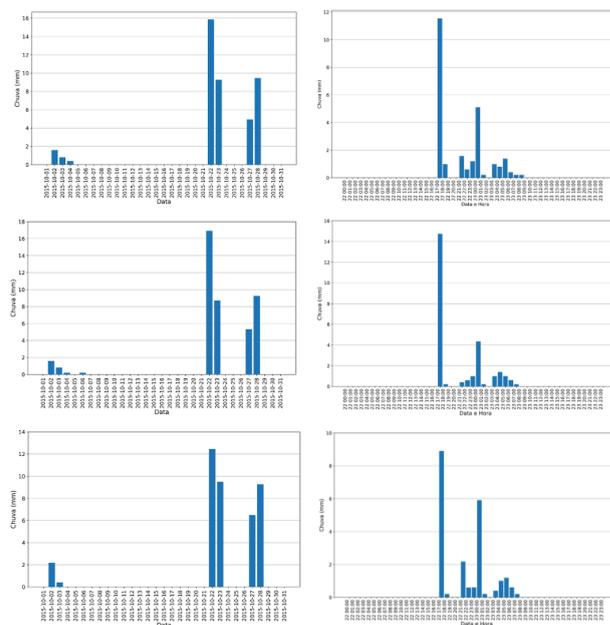


Figura 3 – Precipitação acumulada em 24h para o mês de Outubro (à esquerda) e precipitação horária para os dias 22 e 23 (à direita) nas estações Vila Maquiné, Rosário e Centro em 2015 respectivamente.

Brumadinho (2019): Dois eventos de chuva intensa entre os dias 18 e 21 de janeiro de 2019 aumentaram a pressão interna da barragem, segundo o laudo pericial da Polícia Federal (2019), contribuindo para o rompimento.

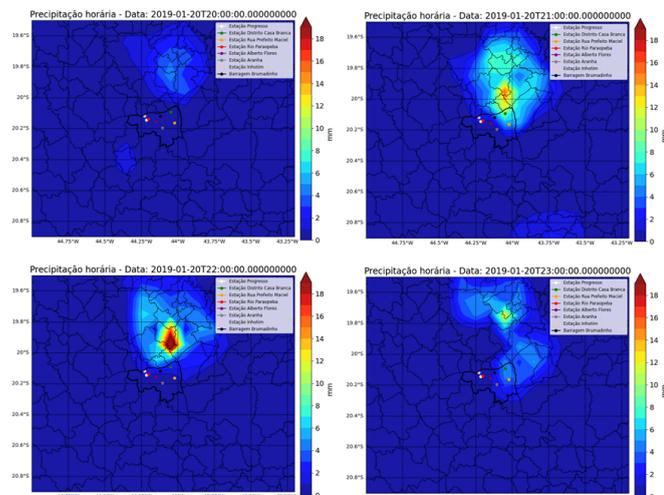


Figura 4 – Precipitação acumulada em 24h, dia 20 de Janeiro de 2019 às 20:00h, 21:00h, 22:00h e 23:00h .

Os rompimentos de barragens ocorreram frequentemente após períodos de chuvas intensas ou moderadas. O Quadro 1 resume as principais informações desses eventos em Minas Gerais, incluindo o município, data, dias de chuvas relevantes antes do rompimento, acumulados diários de precipitação e os danos causados.

NOME DA BARRAGEM	MUNICÍPIO	DATA DO ROMPIMENTO	DIAS ANTES COM CHUVA	DESCRIÇÃO DOS DIAS COM CHUVA (acumulados diários)	DANOS
Rio Verde Cava C1	Nova Lima - MG	22/06/2001	0	Não houve chuvas antes do rompimento	5 Mortes.
Florestal Cataguases	Cataguases - MG	29/03/2003	10	Chuva persistente de 13 a 24/03, picos em 17/03 (+20mm) e 23/03 (+18mm)	Vazamento de lixívia negra, contaminação da água a jusante.
São Francisco	Mirai - MG	01/03/2006	6	Chuvas em 23/02 (+18mm), 27/02 (+18mm), 28/02 e 01/03 (16-18mm)	Vazamento de rejeito de bauxita, contaminação da água a jusante.
São Francisco	Mirai - MG	10/01/2007	18	Chuvas intensas entre 23/12 e 10/01, com picos acima de 18mm nos dias 24/12, 25/12, 02/01 e 10/01	Vazamento de rejeito de bauxita, contaminação da água a jusante.
Auxiliar de Vigia	Miguel Burnier, Ouro Preto - MG	15/03/2008	9	Chuva significativa em 13/03 (+18mm) e 15/03 (+18mm)	Atingiu cerca de 40 residências de Ouro Preto e Congonhas.
Herculano B1	Itabirito - MG	10/09/2014	1	Precipitação em 03/09 (6-10mm em 2h), sem chuvas antes do rompimento	3 Mortes.
Fundão (Samarco)	Mariana - MG	05/11/2015	7	Acumulados de chuva em 22/10 a 28/10, com picos de 6-15mm	19 mortes, contaminação da água a jusante.
Brumadinho (Corrego do Feijão)	Brumadinho - MG	25/01/2019	3	Chuva intensa em 18/01 (18mm em 6h) e 20/01 (12mm em 3h)	270 mortes, contaminação ambiental a jusante.

Quadro 1 – Resumo dos principais rompimentos de barragens em Minas Gerais e a correlação com chuvas intensas.

Conclusões

Embora o rompimento ocorrido nas oito barragens

analisadas neste trabalho tenha sido amplamente creditado na mídia e em artigos científicos, como sendo devido a falhas estruturais e de gerenciamento de tais barragens, os resultados aqui indicam que chuvas após período de estiagens, para 5 dos oito reservatórios analisados, e chuvas intensas e persistentes para dois deles, tiveram alguma contribuição. Os resultados deste estudo, embora não permitam afirmar que as chuvas tenham sido o fator determinante para o rompimento das barragens analisadas, indicam que as mesmas tiveram alguma contribuição em sete dentre os oito casos analisados. A saturação do solo, devido a chuvas persistentes e eventos intensos, como em Brumadinho e São Francisco (2007), contribuiu significativamente para a instabilidade das barragens. Em aproximadamente 75% dos casos, observou-se que o rompimento ocorreu após chuvas. Mas, as falhas estruturais e gestão inadequada, como nos casos de Rio Verde Cava C1 e Herculano B1, continuam sendo os fatores determinantes. Assim, o monitoramento contínuo das chuvas em áreas de barragens de rejeitos é essencial para prevenir futuros desastres. Recomenda-se que trabalhos futuros integrem essas análises a informações sobre o relevo ao redor dessas barragens.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e CNPq ao suporte para o desenvolvimento do estudo. Os autores agradecem também o (a) revisor pelas importantes sugestões e correções.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório Anual de Segurança de Barragens, 2021.** Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/documentos-e-capacitacoes/rsb>> Acesso em: 11 set. 2024.

ÁVILA, J. P.; SAWAY, M.; SAYÃO, A. S. F.; FERREIRA, L. A. **Segurança de barragens de rejeitos no Brasil: avaliação dos acidentes recentes, 2021.** Disponível em: <<https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/10013/7338>> Acesso em: 11 set. 2024.

BERTACHINI, Antônio Carlos. **Tragédia e desastre em Minas Gerais. Boletim Informativo da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, São Paulo, n. 116, jul. 2001.** Disponível em: <<https://www.abas.org/abasinforma/116/paginas/05.htm>> Acesso em: 20 set. 2024.

CPTEC/INPE. **Descrição do produto MERGE, 2023.**

Disponível em: <<ftp.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 12 set. 2024.

HUFFMAN, G. J., et al. **NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Document**, 2015. Disponível em: <http://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V4.5.pdf> Acesso em: 15 set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e manejo de rejeitos da mineração**. Brasília, BR: IBRAM, 2016. 128 p.

METSUL. **Catástrofe de Brumadinho não teve excesso de chuva como causa**. 2019. Disponível em: <<https://metsul.com/catastrofe-de-brumadinho-nao-teve-excesso-de-chuva-como-causa/>> Acesso em: 05 nov. 2024.

POLÍCIA FEDERAL. **Laudo Pericial nº 1070/2019 - SR/PF/MG: Investigação do rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão, Brumadinho**, 2019. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/blogs/blog/wp-content/uploads/sites/41/2019/11/laudo_1070_2019_setec_sr_pf_mg_assinado-2.pdf> Acesso em: 08 set. 2024.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. A. **Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over South America**. *Weather and Forecasting*, v. 25, n. 3, p. 885–894, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>.

SOUZA, Eduardo Nassar de; SOUZA, Gabrielle Amorim Sena; SILVA, Igor Ferreira da; TATTO, Kelly Santos; LUZ, Paulo Afonso de Cerqueira. **Estudo de caso da ruptura da Barragem de Fundão (Mariana-MG)**. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 92-117, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.5935/RMEC.v21n1p92-117>> Acesso em: 05 nov. 2024.

UNICAMP. **Samarco e o poder público**. *Jornal da Unicamp*, 05 fev. 2018. Disponível em: <<https://unicamp.br/unicamp/ju/noticias/2018/02/05/samarco-e-o-poder-publico/>> Acesso em: 05 nov. 2024.