

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/124

Barragem I da mina do córrego do Feijão em Brumadinho: uma análise sistêmica da literatura utilizando o PROKNOW-C

Mariana Rezende de Carvalho

Discente, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Varginha, Brasil, mariana.rezende9@gmail.com

Armando Belato Pereira

Prof. Dr., Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Varginha, Brasil, armandobelato@cefetmg.br

Thiago Bomjardim Porto

Prof. Dr., Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Curvelo, Brasil, thiago.porto@cefetmg.br

RESUMO: Desde o período colonial a mineração tem grande influência na economia brasileira, sendo os rejeitos, um notório passivo resultado dessa atividade e sua disposição deve ser feita de maneira apropriada. A barragem de rejeito alteada a montante foi um método de dispor os resíduos por um menor custo por utilizar o próprio material para a sua construção, porém, devido as suas grandes proporções geométricas e as incertezas associadas as propriedades do material, o método se tornou um perigo ao meio ambiente e sociedade. Minas Gerais possui cerca de 38,7% das barragens nacionais e presenciou recentemente dois grandes sinistros devido ao rompimento de barragens. Em 2015 a barragem da Samarco, em Mariana e em 2019 a barragem B1 da mina Córrego do Feijão da VALE, em Brumadinho. O desastre ocorrido em Brumadinho deixou 272 pessoas mortas, grande impacto ambiental e grande prejuízo material. Para o entendimento de como ocorreu esse sinistro é necessária a caracterização dessa barragem antes do rompimento. Esse artigo mostra a caracterização da Barragem por meio da metodologia ProKnow-C (Knowledge Development Process - Constructivist). O trabalho tem como resultado o histórico e a caracterização da Barragem, bem como o levantamento dos possíveis gatilhos que desencadearam a sua ruptura.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, rejeito, mineração, Brumadinho, ProKnow-C.

ABSTRACT: Since colonial times, mining has had a great influence on the Brazilian economy, with tailings dams being a notorious liability resulting from this activity and their disposal must be done appropriately. The tailings dam raised upstream was a method of disposing of waste at a lower cost by using the material itself for its construction, however, due to its large geometric proportions and the uncertainties associated with the properties of the material, the method became a danger to the environment and society. Minas Gerais has around 38.7% of the national dams and recently witnessed two major accidents due to dam failures. In 2015 the Samarco dam, in Mariana, and in 2019 the B1 dam of the Córrego do Feijão mine at VALE, in Brumadinho. The disaster that occurred in Brumadinho left 272 people dead, a huge environmental impact, and great material damage. It is necessary to characterize the dam before the failure to understand how this incident occurred. This article shows the characterization of the Dam using the ProKnow-C (Knowledge Development Process - Constructivist) methodology. The research work results in the history and characterization of the Dam, as well as the survey of possible triggers that triggered its failure.

KEYWORDS: Dam; tailings, mining, Brumadinho, ProKnow-C.

1 INTRODUÇÃO

Desde a Idade dos Metais, a exploração de minérios tornou-se uma atividade importante para a humanidade, inicialmente com o propósito de desenvolver ferramentas para realizar as atividades da época, e com o passar do tempo, com novos objetivos devido ao avanço tecnológico e econômico da sociedade. No Brasil, a mineração possui grande impacto econômico e gera ao país cerca de 4% do PIB (IPEA, 2023; Reis *et al.*, 2020).

O processo de mineração gera resíduos como sedimentos, rejeitos e até água, para o armazenamento desses resíduos existem vários métodos, sendo um deles as barragens, que represam os chamados aterros hidráulicos ou lagos de decantação (Thomé e Passini, 2018).

Em 25 de Janeiro de 2019, a barragem de rejeitos B-I, administrada pela Vale SA, localizada a 9 quilômetros a nordeste do centro urbano do município de Brumadinho em Minas Gerais, rompeu-se e, como resultado, originou um movimento gravitacional de massa denominado fluxo de lama que levou a 270 mortos (Robertson *et al.*, 2019).

Após o rompimento da Barragem I de Brumadinho, como também da Barragem de Fundão em Mariana, foi atualizada a Política Nacional de Segurança de Barragens e aumentou-se o monitoramento deste tipo de estruturas geotécnicas. Existem no território brasileiro 928 barragens de mineração monitoradas com 467 em estado de risco. Em Minas Gerais, são 344 barragens registradas e 203 na categoria de risco (ANM, 2024).

Mostra-se assim a necessidade do entendimento dos mecanismos de rompimentos ocorridos nos últimos anos, pois esse pode ser utilizado para a fiscalização de barragens existentes. A análise do histórico do local de construção, das etapas da obra, do monitoramento anterior ao rompimento de uma barragem é importante para que se possa chegar às possíveis causas que levaram ao colapso de sua estrutura.

Ao longo dos últimos anos foram publicados diversos trabalhos acadêmicos relacionados a barragem B1 da mina Córrego do Feijão da VALE, em Brumadinho, destacando-se as pesquisas de Souza (2023), Bortolli (2023), Carvalho (2022), Sandroni e Guidicini (2022) e Miranda e Santos (2020).

Desse modo, esse trabalho tem como objetivo uma revisão sistêmica da literatura da Barragem I do Córrego do Feijão de Brumadinho por meio da metodologia de pesquisa ProKnow-C para a obtenção do histórico e da caracterização da barragem pré-rompimento, e dos possíveis gatilhos que levaram a sua ruptura.

2 METODOLOGIA

A Barragem 1 de Brumadinho rompida 2019 foi objeto de estudo para a análise por intermédio do método ProKnow-C, criado pelo Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão na Universidade Federal da Santa Catarina, que possibilita a análise sistêmica bibliométrica de artigos disponíveis em bases de dados (Isaton, 2014).

O estudo iniciou-se com a escolha das palavras-chave. Por meio dessas, foi realizada a pesquisa de artigos com até de dez anos de publicação no portal de periódicos da CAPES para a seleção dos bancos de dados. Segundo Azevedo e Ensslin (2020), o método ProKnow-C indica fazer um corte de 80% dos resultados para definir as bases a serem utilizadas, porém optou-se pela utilização de todos os resultados encontrados.

Para a seleção do portfólio de artigos, foi feita a importação dos dados para o software *End Note*, no qual, eliminou-se títulos duplicados ou não alinhados ao tema. A partir dos artigos que passaram no primeiro processo foi obtido, por meio do *Google Acadêmico*, o número de citações correspondentes e retirou-se artigos que possuíam poucas citações e que não possuíam alinhamento entre resumo e o tema. Na etapa seguinte, revalidou-se os artigos com baixo reconhecimento científico, para isso foram adicionadas publicações com até dois anos e dessas eliminou-se as que não possuíam alinhamento do resumo com a pesquisa. Por fim, foi feita a validação final com a leitura dos artigos. O processo de seleção do portfólio é retratado na Figura 1.

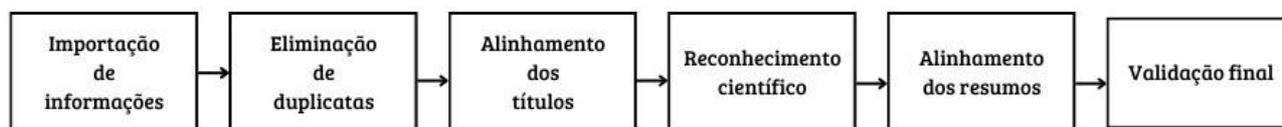


Figura 1. Seleção do portfólio.

Para a análise bibliométrica, foi feita a contagem de citações dos periódicos, autores e artigos no portfólio e nas suas referências. Os artigos selecionados foram, também, analisados quanto o número de citações no meio acadêmico. Por fim, foi retirado dos trabalhos selecionados os pontos “chave” de interesse e esses foram analisados e, posteriormente, resumidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No portal de periódico da CAPES, por meio das palavras chaves “Brumadinho”, “Brumadinho *tailings dam*”, “Brumadinho *dam*” e “Córrego do Feijão, foram encontrados 368 artigos com o assunto da pesquisa. Os resultados estavam divididos em 19 bases como indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Resultado das bases de dados.

Base de dados	Artigos
DOAJ Directory of Open Access Journals	278
Science Citation Index Expanded (Web of Science)	25
ScienceDirect	13
SpringerLink	7
Wiley Online Library Journals	7
AUC Wiley Frozen Package in 2012	4
IEE Electronic Library (IEL) Journals	4
Journals@Ovid Fulltext	4
Open Access	4
ScIELO	4
Wiley-Blackwell Full Collection 2013	4
arXiv.org	3
American Society of Civil Engineer ASCE Journals	2
Emerald	2
Emerald Backfiles	2
HighWire Press (Free Journals)	2
Taylor & Francis Online	1
American Chemical Society	1
Open edition Open Access Journal	1

Os resultados encontrados foram importados das bases de dados e 44 artigos passaram no processo de eliminação de títulos duplicados ou não alinhados ao tema. Foi feita a análise das citações e um corte de 85% destas, 13 artigos com 11 ou mais citações foram selecionados. Dos 13 trabalhos, quatro possuíam o resumo alinhado ao tema da pesquisa. Os artigos de baixo reconhecimento científico foram reavaliados e tiveram cinco aprovações. A validação final garantiu ao portfólio cinco artigos que discutem sobre a pré e pós ruptura da B-1 de Brumadinho. O processo foi resumido na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo da seleção de artigos.

Etapas	Artigos
Dados importados	368
Títulos não duplicados e alinhados ao tema	44
Títulos com relevância acadêmica	13
Resumos alinhados	4
Artigos recuperados	5
Validação final	5

A análise bibliométrica mostrou que o periódico *Remote Sensing* possui a maior parte dos artigos de referência e do portfólio (Figura 2), somente dois artigos possuem relevância quanto às citações, então, os demais artigos foram escolhidos pela relevância do autor no portfólio (Figura 3 e 4).

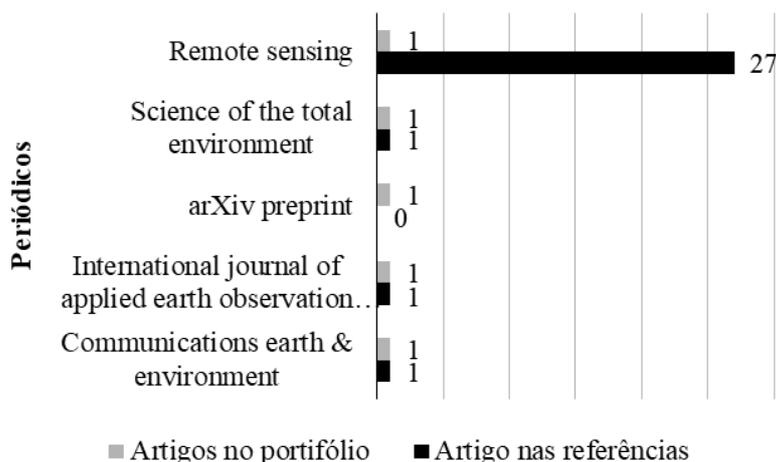


Figura 2. Análise dos periódicos.

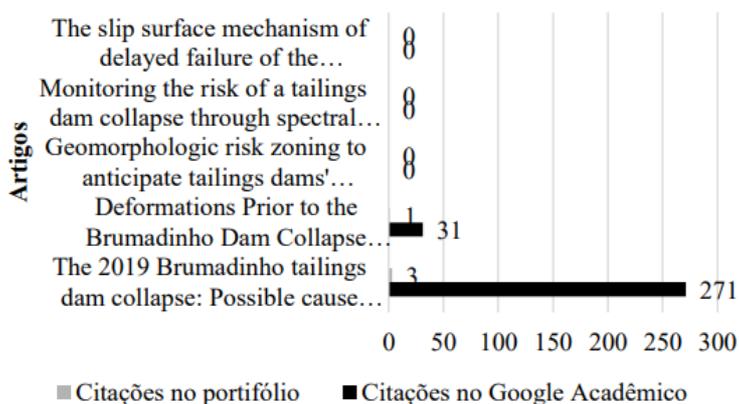


Figura 3. Análise de relevância dos artigos.

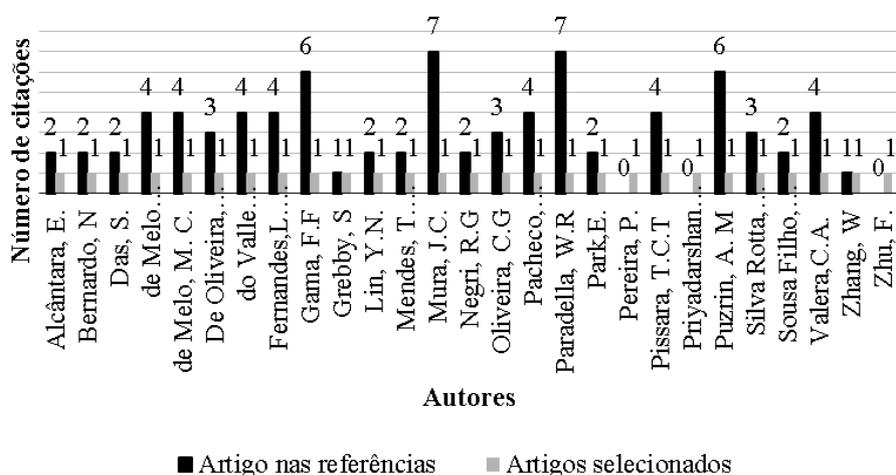


Figura 4. Análise de relevância dos autores.

Os artigos selecionados elucidam o histórico pré e pós rompimento da B-1 de Brumadinho, porém ao analisar alguns desses trabalhos identifica-se que esses não possuem a barragem como o tema central. O Quadro 1 apresenta o resumo dos artigos do portfólio.

Quadro 1. Resumo dos artigos do portfólio.

Artigo	Autor	Objetivo	Histórico e caracterização	Possíveis gatilhos e causas
<i>The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil</i>	Rotta <i>et al.</i> , 2020	Realizar uma investigação sistêmica sobre as causas e consequências do rompimento da Barragem 1 de Brumadinho-MG	Não há histórico pré-rompimento	Acúmulo de água na superfície levou ao aumento do teor de umidade da Barragem e à erosão por infiltração
<i>Deformations Prior to the Brumadinho Dam Collapse Revealed by Sentinel-1 InSAR Data Using SBAS and PSI Techniques</i>	Gama <i>et al.</i> , 2020	Detectar deformações antes do rompimento da Barragem I por meio das técnicas SBAS e PSI	<ul style="list-style-type: none"> • Início em 1963 • Construída 1976 a 2013 em 15 etapas à montante • Altura 86 m e comprimento 270m • Capacidade máxima de 12 milhões de m³ 	A presença de água cooperou para a instabilidade da barragem
<i>Geomorphologic risk zoning to anticipate tailings dams' hazards: A study in the Brumadinho's mining area, Minas Gerais, Brazil</i>	Pereira <i>et al.</i> , 2024	Avaliar a vulnerabilidade geológica por um modelo de enquadramento segundo parâmetros morfométricos	Não há histórico pré-rompimento	A vulnerabilidade geomorfológica e as chuvas intensas em 2018 cooperaram para o rompimento
<i>Monitoring the risk of a tailings dam collapse through spectral analysis of satellite InSAR time-series data</i>	Das <i>et al.</i> , 2023	Propor um algoritmo para a detecção e caracterização do risco de ruptura de um talude a partir de análise espectrais correlacionadas aos dados de deslocamentos temporais	<ul style="list-style-type: none"> • Inativa desde 2015 • Altura de 86 m • 720 m de largura • Feita à montante 	As deformações a partir de julho cooperaram para a instabilidade da barragem
<i>The slip surface mechanism of delayed failure of the Brumadinho tailings dam in 2019</i>	Zhu <i>et al.</i> , 2024	Proposição de um mecanismo físico básico de crescimento tardio da superfície de deslizamento sob camada de rejeitos finos em uma barragem	<ul style="list-style-type: none"> • 10 alteamentos • Disposição de rejeitos teve fim em 2016 • Alteamentos de 5 a 18 m • 86m de altura • 942 m acima do nível do mar 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragilidade dos rejeitos • O aumento da superfície de deslizamento causada pelo <i>creep</i>

Com base na análise dos artigos do portfólio, a Barragem 1 possuía dez alteamentos construídos em 15 etapas de 1976 a 2013 pelo método à montante, seus alteamentos possuíam de cinco a oito metros de altura, a barragem ao todo possuía 86 metros de altura, capacidade máxima de 12 milhões de m² e se localizava a 942

metros acima do nível do mar, houve divergência quanto sua inatividade. Na análise dos artigos selecionados, percebe-se que a maioria indica que a saturação devido à infiltração de água na barragem foi um dos gatilhos para seu colapso. Também são indicadas deformações verticais de -30 cm antes de seu rompimento e que a fragilidade dos rejeitos e o aumento da superfície de deslizamento, devido ao *creep*, foram indicados como causa do rompimento (Das *et al.*, 2023; Gama *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2024; Rotta *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2024).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma revisão sistêmica e uma análise bibliométrica da literatura da Barragem 1 de Brumadinho pela metodologia ProKnow-C e, por meio dos artigos selecionados, caracterizou e apresentou o histórico pré-rompimento dessa barragem.

Os produtos da revisão sistêmica elucidaram que as pesquisas sobre a Barragem 1 são recentes, pois os resultados encontrados foram poucos comparados a outros temas. Dos 368 artigos, somente 5 foram utilizados no portfólio e dois não caracterizavam ou apresentavam histórico pré-rompimento, esse aspecto mostra que são necessárias mais pesquisas sobre o assunto.

Segundo os artigos selecionados, a Barragem 1 possuía dez alteamentos de cinco a oito metros e foi construída à montante de 1976 à 2013 em 15 etapas. O período do fim da operação da barragem foi divergente entre os artigos. A saturação da Barragem de Brumadinho, devido a infiltração em sua superfície, foi em grande parte apontada como um gatilho para sua ruptura. Do portfólio apenas um artigo informa a causa da ruptura, que seria o *creep*, que gerou as deformações na superfície até o colapso da barragem (Das *et al.*, 2023; Gama *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2024; Rotta *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2024).

O estudo do histórico e da caracterização da Barragem 1 de Brumadinho-MG antes de sua ruptura sob o ponto de vista geotécnico é fundamental para entender os mecanismos que levaram ao seu colapso e, assim utilizá-los para o entendimento de como monitorar barragens inativada e prevenir ou mitigar novas falhas. A importância da análise do sinistro e da barragem abrange além da geotecnia sendo pertinente a diversas áreas como ciências sociais, geografia, biologia, química, entre outras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG) na viabilização do presente artigo e também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de iniciação científica concedida para a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANM (2024) *Relatórios anuais de segurança das barragens de mineração*. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/relatorios-anuais-de-seguranca-da-barragens-de-mineracao-2/>>. Acesso em: 17 mar. 2024.
- Azevedo, R. C., Ensslin, L. (2020) *Metodologia da pesquisa para engenharias*, 1st ed., CEFET -MG, Belo Horizonte, MG, BR, 196 p.
- Bortolli, L. R. D. S. P. (2023) *Análise computacional de liquefação estática da barragem B1 na mina Córrego do Feijão em Brumadinho*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 165 p.
- Carvalho, M. R. (2022) *Barragem I da Mina do Córrego do Feijão – Panorama geral pré-ruptura e das causas do rompimento*. Iniciação científica, Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 47 p.
- Das, S., Priyadarshana, A., Grebby, S. (2023) Monitoring the risk of a tailings dam collapse through spectral analysis of satellite InSAR time-series data. *arXiv e-prints*, 2, p. 2302.00781

- Gama, F. F., Mura, J. C., Paradella, W. R., Oliveira, C.G. (2020) Deformations Prior to the Brumadinho Dam Collapse Revealed by Sentinel-1 InSAR Data Using SBAS and PSI Techniques. *Remote Sensing*, 12(4), p. 3664.
- IPEA (2023) Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/14835-ipea-e-mme-lancam-estudo-sobre-a-extensao-da-cadeia-produtiva-da-mineracao-no-pib-brasileiro/>>. Acesso em: 17 mar. 2024.
- Isaton. C. (2014) *Método ProKnow–c desenvolvido pelo laboratório MCDA da UFSC: ferramenta para seleção de artigos – auxiliar na revisão integrativa*. Disponível em: <<https://deolhonopaper.wordpress.com/2014/11/30/metodo-proknow-c/>>. Acesso em: 17 mar. 2024.
- Miranda, M. I., Santos, T. B. N. D. (2020) Retroanálise de estabilidade sobre acidente na barragem de rejeito do córrego do feijão em Brumadinho mg. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 20. *Anais... XX COBRAMSEG*. v. 1, p. 120935
- Pereira, P., Fernandes, L. F. S., Do Valle Junior, R. F., De Melo Silva, M. M. A. P., Pacheco, F.A.L., De Melo, M. C., Valera, C.A., Pissara, T.C.T (2024) Geomorphologic risk zoning to anticipate tailings dams' hazards: A study in the Brumadinho's mining area, Minas Gerais, Brazil. *Science of The Total Environment*, 912, p. 169136.
- Reis, M.O., Moura, A. C. M. B., Cota, G.E.M., Magalhães Junior, A.P. (2020) Panorama dos rompimentos de barragens de rejeito de minério no mundo. *Caderno de Geografia*, 30 (61), p. 368–368.
- Robertson, P. K., Melo, L., Williams, D. J., Wilson, G. W. (2019). *Relatório do painel de especialistas sobre as causas técnicas do rompimento da barragem i do córrego do feijão painel de especialistas*. Disponível em:< <http://www.b1technicalinvestigation.com/pt/report.html/>>. Acesso em: 17 mar. 2024.
- Rotta, L. H. S., Alcântara, E., Park, E., Negri, R. G., Lin, Y. N., Bernardo, N., Mendes, T. S. G., Souza Filho, C. R. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 90, p. 102119.
- Sandroni, S. S., Guidicini, G. (2022). *Barragens de terra e enrocamento*. 1st ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, BR, 168 p.
- Souza, L. A. E. (2023). *Avaliação geotécnica da estabilidade de uma barragem de rejeitos por métodos probabilísticos e determinísticos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 154 p. Disponível em: https://sig.cefetmg.br/sigaa/public/programa/defesas.jsf?lc=pt_BR&id=629
- Thomé, R., Passini, M. L. (2018) Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em minas gerais. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, 18 (34), p. 49–65.
- Zhu, F., Zhang, W., Puzrin, A. M. (2024). The slip surface mechanism of delayed failure of the Brumadinho tailings dam in 2019. *Communications Earth & Environment*, 5(1), p. 33.