

ANÁLISE HIDRODINÂMICA DO DESASTRE DA BARRAGEM DE DERNA (LÍBIA)

Alexandre Germano Marciano¹, Elias Zgheib², Vera C. Scheller dos S. Rocha³, Franciele Marilies Estevam³, André Luiz Vieira Barouch⁴, Pollyana dos Reis Mendes Marciano⁴

1. Estudante do curso de Geografia da UNINTER
2. Mestrando em Engenharia Urbana da Universidade de Bruxelas
3. Professor Orientador da UNINTER
4. Técnico da Universidade Federal de Itajubá

Grupo de trabalho: GT 03 - EAD, PRESENCIAL E O HÍBRIDO: VÁRIOS CENÁRIOS DE DOCÊNCIA, DE GESTÃO, DE HISTÓRIA, DE CURRÍCULO, DE APRENDIZAGEM E DE POLÍTICAS

RESUMO

Em 10 de setembro de 2023 na cidade de Derna (Líbia) ocorreu um desastre hidrológico de grandes proporções, provocado por chuvas extremas da tempestade Daniel, que causou o rompimento das barragens de Abu Mansour e Derna. As barragens, estavam comprometidas pela falta de manutenção e foram submetidas a chuvas intensas provocadas pela tempestade Daniel, que colapsaram sucessivamente, liberando um volume devastador de água que resultou na destruição de bens materiais em larga escala e milhares de mortes. Este estudo apresenta uma análise hidrodinâmica do desastre causado pelo rompimento da barragem de Derna, utilizando o modelo numérico bidimensional do programa HEC-RAS. Foi simulada a propagação da onda de cheia, com o objetivo de avaliar a extensão da inundação, a velocidade do escoamento e os impactos hidrodinâmicos. A simulação baseou-se em dados topográficos, parâmetros hidráulicos e regressões empíricas para estimar a evolução da ruptura e a vazão de pico. Os resultados geraram cartas de inundação com dados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda. A partir desses dados, foi calculado o Índice de Periculosidade (IP), permitindo identificar áreas de risco elevado, que revelou forte correlação entre zonas de alto risco e áreas de maior destruição. Contudo, este estudo destaca a importância de ferramentas de simulação numérica para apoiar o planejamento urbano, a gestão de riscos e a elaboração de estratégias de resposta em áreas propensas a desastres de ruptura de barragens.

INTRODUÇÃO

As barragens constituem infraestruturas essenciais para o armazenamento de água, controle de enchentes, geração de energia hidrelétrica e irrigação. No entanto, sua falha pode ocasionar consequências catastróficas para populações e ecossistemas situados a jusante (Foster et al., 2000; Stedinger et al., 1996). Entre os diversos mecanismos de falha, destaca-se o galgamento e a ruptura por fragilidade estrutural, que frequentemente resultam em propagação rápida de ondas de cheia e inundações intensas (Wahl, 1998; Xu & Zhang, 2009).

A compreensão dos processos envolvidos no colapso de barragens e nas consequências hidrodinâmicas associadas é de fundamental importância para ações de mitigação de riscos, planejamento emergencial e aumento da resiliência das infraestruturas hidráulicas (Rico et al., 2008). Nesse contexto, ferramentas de modelagem numérica avançadas, como o *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS), têm se consolidado como instrumentos

indispensáveis na simulação de cenários de ruptura de barragens, permitindo prever a extensão espacial, profundidade e velocidade da inundação (Brunner, 2020; Scheuner et al., 2011).

O presente estudo tem como foco o desastre ocorrido na cidade de Derna, na Líbia, em 10 de setembro de 2023, quando duas barragens, a superior (Abu Mansour) e a inferior (Derna), colapsaram após eventos hidrometeorológicos extremos provocados pela tempestade Daniel. O rompimento das estruturas gerou inundações súbitas de grande magnitude, resultando em milhares de mortes e destruição em larga escala (UNOSAT, 2023; Ismail et al., 2024). Investigações preliminares indicam que as causas da falha estão relacionadas a uma combinação de fatores técnicos e administrativos, como a ausência de manutenção preventiva e a intensidade das chuvas (Al-Shoubaki & Ghoneim, 2023).

A análise foi conduzida por meio de simulações hidráulicas utilizando o software HEC-RAS, adotando uma abordagem bidimensional (2D), que permite uma representação mais precisa da propagação da onda de cheia em terrenos complexos (Horritt & Bates, 2002). O objetivo é quantificar a extensão da inundação e avaliar os impactos hidrodinâmicos, fornecendo subsídios para a formulação de políticas de segurança de barragens e estratégias de resposta a desastres.

Com isso, a presente pesquisa busca contribuir para o aprofundamento do conhecimento sobre os efeitos de falhas barragens em ambientes urbanos e semiáridos, destacando a importância da modelagem computacional na gestão de riscos e no fortalecimento da resiliência comunitária frente a desastres hidrológicos extremos.

METODOLOGIA

Área de estudo

A cidade de Derna, situada no nordeste da Líbia, entre o Mar Mediterrâneo e as Montanhas Akhdar, é cortada por curso d'água sazonal que, aliado ao desenvolvimento urbano concentrado em seu entorno, torna a região altamente vulnerável a inundações. Com cerca de 90 mil habitantes antes do desastre de 2023 (World Bank, 2023), a cidade era protegida por duas barragens a montante, Abu Mansour, com capacidade de 22,5 milhões de m³, e Derna, com 1,5 milhão de m³ (Al-Shoubaki & Ghoneim, 2023; UNOSAT, 2023). Construídas entre as décadas de 1970 e 1980 para o controle de cheias, essas estruturas sofreram deterioração por falta de manutenção (Timakova, 2023). Em 10 de setembro de 2023, ambas colapsaram sucessivamente após chuvas intensas da tempestade Daniel, liberando um fluxo devastador que percorreu rapidamente o vale e atingiu o centro urbano, com danos humanos e materiais. Esses danos foram amplificados pela topografia encaixada e pela densidade populacional (Ismail et al., 2024).

Modelagem hidrodinâmica

Modelos de simulação hidrodinâmica, como o HEC-RAS, são amplamente utilizados para prever hidrogramas e mapas de inundação após o rompimento de barragens (Al-Salahat et al., 2024). Na simulação aplicada ao caso de Derna, na Líbia, foi utilizado a geometria do terreno, com uma malha computacional com resolução de 5 m × 5 m na calha principal e 20 m × 20 m na secundária, equilibrando precisão e custo computacional. As condições de contorno incluíram vazões representativas da bacia e declividades médias estimadas, com parâmetros hidráulicos definidos de acordo com a pesquisa de Annunziato et al., 2024. Com esses dados, foi possível

simular o escoamento gerado pelo colapso da barragem de Derna, analisando a propagação da onda de cheia, que permitiu avaliar a dinâmica da inundação e os impactos associados ao desastre.

Ruptura da barragem de Derna

O programa HEC-RAS foi utilizado para modelar a falha da barragem de Derna, com base em equações empíricas de regressão. Essas equações foram adaptadas considerando a tipologia das barragens de terra e enrocamento presentes em Derna, possibilitando estimar a progressão temporal da falha (15 minutos), o volume liberado (24 milhões de metro cúbicos) e a intensidade da onda de cheia. A partir dessas estimativas, a simulação permitiu representar com maior realismo a dinâmica da ruptura e seus impactos sobre a cidade, contribuindo para a compreensão dos mecanismos do desastre.

Cartas de Inundação

Após a conclusão da simulação do rompimento da barragem de Derna, foram geradas cartas temáticas representando a velocidade do escoamento, a profundidade da lâmina d’água e o tempo de chegada da onda de cheia. Esses resultados foram integrados a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), permitindo identificar as áreas inundadas e avaliar os riscos às populações e infraestruturas urbanas.

Conforme a metodologia proposta por Mattas et al., (2023), aplicou-se a álgebra de mapas para calcular o Índice de Periculosidade (IP), definido como o produto entre a profundidade da água (h) e o quadrado da velocidade do escoamento (v²), ou seja, $IP = h \cdot v^2$. Essa abordagem, baseada em princípios de energia cinética, é mais sensível à força do fluxo e fornece estimativas mais realistas dos danos potenciais em cenários de inundação extrema (Brunner, 2015). A Tabela 1 mostra a classificação do IP.

Tabela 1 – Classificação do Índice de Perigosidade

IP = (h × v ²)	Nível de Perigo	Impactos Potenciais	Cor
< 1	Baixo risco	Fluxo raso e lento; geralmente seguro para evacuação a pé.	Branca
1 – 4	Risco moderado	Possível arraste de crianças, objetos leves e erosão em estruturas frágeis.	Amarela
4 – 6	Risco alto	Arraste de adultos e veículos leves; risco estrutural considerável.	Vermelha
> 6	Risco muito alto/extremo	Forte impacto hidráulico; alto risco de morte e destruição de edificações.	Roxa

Fonte: Adaptado de Arrighi et al., (2018).

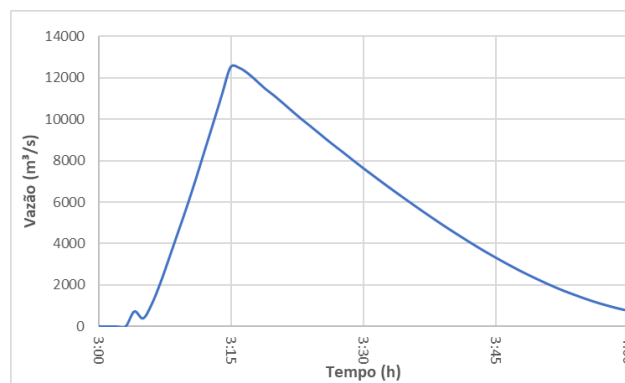
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ruptura da barragem de Derna

O processo de ruptura de barragens é altamente complexo e carece de um método unificado e universalmente aceito para descrever sua evolução (Marciano et al., 2025). Em simulações como a do rompimento das barragens de Derna, na Líbia, o formato da brecha foi assumido como um trapézio invertido, com base em análises de eventos reais semelhantes (Paşa et al., 2024). A simulação considerou que a falha da barragem ocorreu por galgamento, iniciando-

se no centro da estrutura, próximo ao vertedouro, quando o volume do reservatório ultrapassava 24 milhões de m³. A formação da brecha foi modelada com um tempo de desenvolvimento de 15 minutos, atingindo uma largura de 70 metros na crista e 30 metros na base, representando uma abertura significativa que permitiu a liberação rápida e destrutiva do volume acumulado. Essa representação foi essencial para estimar a descarga de pico e a propagação da onda de cheia no leito do rio Derna, permitindo avaliar com maior realismo os impactos da ruptura sobre a cidade.

A Figura 1 mostra o hidrograma do rompimento 100 m da barragem, a análise do hidrograma, ocorrido em 11 de setembro de 2023, revelou um comportamento típico de eventos de falha súbita em estruturas hidráulicas. O gráfico apresenta uma ascensão acentuada da vazão entre 3:00 h e 3:15 h, com o pico atingindo aproximadamente 12.500 m³/s (50%), o que evidencia a rápida formação da brecha e a liberação quase instantânea de grande volume de água do reservatório. A fase de declínio da curva, observada entre 3:15 h e 4:00 h, mostra uma redução gradual da vazão, indicando o esvaziamento progressivo da bacia de retenção. Mesmo após o pico, os valores mantêm-se elevados por cerca de 45 minutos, prolongando o tempo de exposição da cidade aos impactos da inundação. Essa dinâmica hidrológica é compatível com os danos registrados em Derna, como destruição de edificações, colapso de infraestrutura urbana e alto número de vítimas.



A Figura 2 apresenta o mapa do Índice de Periculosidade (IP) resultante da simulação do rompimento da barragem de Derna. A análise revela que as zonas mais críticas, com índices de periculosidade elevados (valores de IP superiores a 7 m³/s²), estão concentradas ao longo do eixo principal do rio Derna, particularmente na região central da cidade. Essas áreas (em roxo e vermelho) indicam grande profundidade e alta velocidade da onda de cheia, correspondendo a locais com maior risco de arraste de pessoas, destruição de edificações e perda de vidas. Regiões em amarelo e lilás representam faixas intermediárias de risco, ainda significativas para impactos em infraestrutura urbana. Áreas periféricas, indicadas em branco, correspondem a zonas com pouca inundação, representando zonas de menor risco. Também foi possível analisar o padrão de alastramento do fluxo, que demonstra a concentração e canalização da onda de cheia, intensificada pela geometria encaixada do vale, o que dificultou a dissipação da energia do escoamento e aumentou os efeitos destrutivos.

Em comparação com o mapa de destruição de Derna (Armon et al., 2025), corrobora com uma forte correlação espacial entre as áreas com maior risco hidrodinâmico e os setores com maior

densidade de edificações destruídas. As regiões mais afetadas, apresentam altíssimos valores de IP (acima de $30 \text{ m}^2/\text{s}^2$) e coincidem com zonas de severa destruição identificadas no mapa de danos. A mancha de inundação simulada acompanha fielmente a extensão do impacto registrado, validando o uso do IP como preditor eficaz de perdas estruturais e humanas. Essa consistência entre modelagem e observações (Armon et al., 2025) reforça o potencial do IP para subsidiar o planejamento urbano, a definição de rotas de evacuação e estratégias de mitigação de riscos em áreas vulneráveis a rompimentos de barragens.

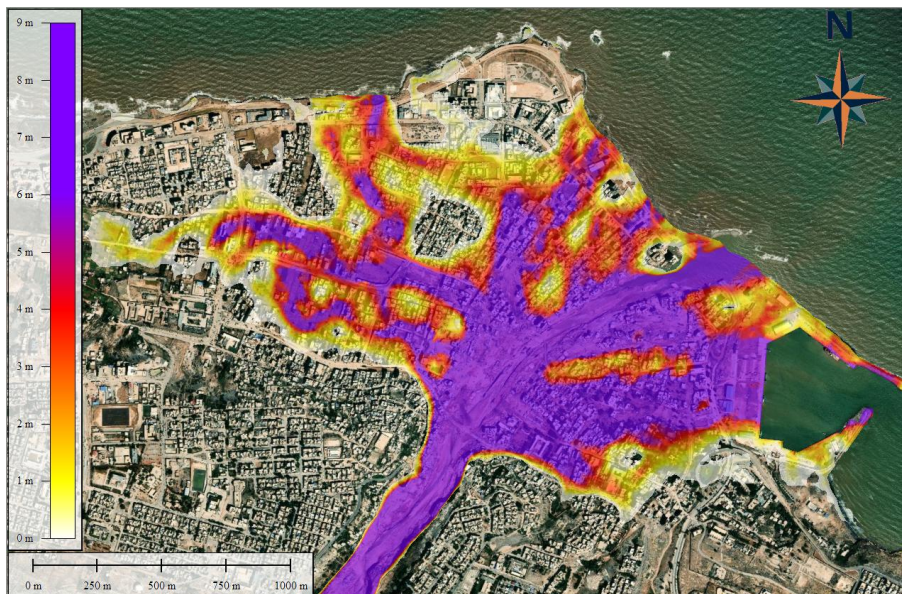


Figura 2 – Mapa de índice de periculosidade na cidade de Derna (Libia).

CONCLUSÕES

A simulação hidrodinâmica mostrou-se eficaz para representar com realismo a propagação da onda de cheia, permitindo identificar zonas críticas de inundação e compreender os mecanismos que potencializaram os impactos sobre a cidade de Derna.

A integração dos dados de simulação aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possibilitou a elaboração de cartas temáticas de velocidade, profundidade e tempo de chegada da onda, além do cálculo do Índice de Periculosidade (IP). O IP identificou áreas críticas com elevado potencial de dano, que apresentaram forte correlação espacial com os setores de destruição observados em imagens de satélite pós-evento. Esses resultados reforçam a importância da modelagem como instrumento preditivo e estratégico para a proteção de áreas urbanas situadas a jusante de barragens, especialmente em regiões com infraestrutura deficiente e exposição a eventos climáticos extremos.

Este estudo aponta que falhas estruturais e institucionais que antecederam a tragédia, como a ausência de manutenção periódica e a carência de planos de evacuação (caso de Derna) serve como alerta para a necessidade de políticas públicas para a gestão de riscos, na preparação da prevenção, da resposta e da recuperação em caso de um desastre semelhante ao de Derna. Dessa forma, conclui-se que a combinação entre modelagem hidrodinâmica, planejamento urbano

e governança eficiente são fundamentais para mitigação dos efeitos de desastres futuros e para preservar vidas humanas.

REFERÊNCIAS

- Al-Salahat, M., Al-Weshah, R., & Al-Omari, S. (2024). Dam break risk analysis and flood inundation mapping: a case study of Wadi Al-Arab Dam. **Sustainable Water Resources Management**, 10(2), 74. <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01051-0>
- Al-Shoubaki, W., & Ghoneim, E. (2023). The 2023 Derna flood disaster: Dam failures in Libya and the role of climate change and governance. **Environmental Hazards**. <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01051-0>
- Anunziato, A., Santini, M., Proietti, C., de Girolamo, L., Lorini, V., Gerhardinger, A., & Tucci, M. (2024). Modelling and validation of the derna dam break event. **GeoHazards**, 5(2), 504-529. <https://doi.org/10.3390/geohazards5020026>
- Armon, M., Shmilovitz, Y., & Dente, E. (2025). Anatomy of a foreseeable disaster: Lessons from the 2023 dam-breaching flood in Derna, Libya. **Science Advances**, 11(13), eadu2865. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adu2865>
- Arrighi, C., Castelli, F., & Oumeraci, H. (2018). Safety criteria for people in flood events: a literature review and a new consistent approach. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 18, 3089–3101. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3089-2018>
- Brunner, G. W. (2015). **2D Modeling and Mapping with HEC-RAS v. 5 Monticello Dam Breach**. US Army Corps of Engineers: Davis, CA, USA, 2015. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest/working-withhec-ras>
- Brunner, G. W. (2020). **HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual (Version 5.0)**. U.S. Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000–1024. <https://doi.org/10.1139/t00-030>
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of Hydrology**, 268(1–4), 87–99. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00121-X)
- Ismail, F., Farag, A., & Haq, S. (2025). Managing the health effects of floods in Libya. **Journal of Flood Risk Management**, 18(1), e13054. <https://doi.org/10.1111/jfr3.13054>
- Marciano, AG, Bérghamo, AL, Oda, PSS, Ribeiro, MM, Takeo, A., Barouch, ALV, & Rodrigues, A. (2024). Analysis of the hypothetical rupture of the PCH REPI reservoir dam (Wenceslau Braz–MG). **Journal of Environmental Studies**, 26 (1), 65-90. <https://doi.org/10.7867/1983-1501.2024V26N1P65-90>
- Mattas, C., Karpouzou, D., Georgiou, P., & Tsapanos, T. (2023). Two-dimensional modelling for dam break analysis and flood hazard mapping: A case study of papadia dam, northern greece. **Water**, 15(5), 994. <https://doi.org/10.3390/w15050994>
- Paşa, Y., Peker, İ. B., Hacı, A., & Gülbaz, S. (2023). Dam failure analysis and flood disaster simulation under various scenarios. **Water Science & Technology**, 87(5), 1214-1231. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.052>

- Rico, M., Benito, G., & Díez-Herrero, A. (2008). Floods from tailings dam failures. **Journal of Hazardous Materials**, 154(1–3), 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.110>
- Stedinger, J. R., Heath, D. C., & Thompson, K. (1996). Risk analysis for dam safety evaluation: hydrologic risk. US Army Corps of Engineers, **Water Resources Support Center, Institute for Water Resources**. https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Cn7-2dAFH64C&oi=fnd&pg=PR8&dq=Risk+Analysis+for+Dam+Safety+Evaluation:+Hydrologic+Risk&ots=1j2FB_K5IX&sig=916wzDV3NgmyRYD88zwhTpXSfx4#v=onepage&q=Risk%20Analysis%20for%20Dam%20Safety%20Evaluation%3A%20Hydrologic%20Risk&f=false
- Timakova, O.A. (2023). Targeting Environmental Infrastructure: Libya Conflict Case Study. In: Semenov, A.V., Zonn, I.S., Kostianoy, A.G., Zhiltsov, S.S., Negm, A. (eds) Environmental Consequences of International Conflicts. **The Handbook of Environmental Chemistry**, vol 137. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/698_2023_973
- UNOSAT (2023). Flooding in Derna, Libya – Satellite-based damage assessment. **United Nations Satellite Centre**. <https://unosat.org/products/3672>
- Wahl, T. L. (1997, August). Predicting embankment dam breach parameters-A needs assessment. **In Proceedings of the Congress-International Association for Hydraulic Research** (pp. 48-53). Local Organizing Committee of the XXV Congress. https://www.researchgate.net/profile/Tony-Wahl/publication/254347750_Predicting_Embankment_Dam_Breach_Parameters_-_A_Needs_Assessment/links/0deec534c0ad0471ee000000/Predicting-Embankment-Dam-Breach-Parameters-A-Needs-Assessment.pdf
- World Bank (2023). Libya Population Data (2022–2023). **World Bank Open Data**. <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&country=LBY>
- Xu, Y., & Zhang, L. M. (2009). Breaching parameters for earth and rockfill dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 135(12), 1957–1970. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000162](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000162)