

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM RESERVATÓRIO: UMA APLICAÇÃO PRÁTICA DO HEC-RAS 1D

*Camila Oliveira de Britto Salgueiro¹; Alexson Caetano da Silva²; Thaisa Dias de Castro Goulart³;
José Martins de França Neto⁴; André Pereira Lima⁵; Alonso Patrício Nolasco⁶; Jusciley Santos⁷ &
Sylvana Melo dos Santos.*

Abstract: Surface runoff from rainfall, especially in urbanized areas, results in the transport of sediments to reservoirs, thus contributing to their siltation and consequent loss of storage capacity. In this context, it becomes essential to estimate the amount of sediment reaching the reservoir, as well as to evaluate changes in sediment input over the years. This study consists of a practical application of the HEC-RAS 1D software in the hydrosedimentological modeling of a reservoir, aiming to assess sediment deposition and estimate the optimal cleaning frequency to ensure the efficient operation of the structure. The simulation was developed based on real bathymetric data, with discretization across calibration and verification stages, in order to guarantee the reliability of the proposed model against actual data. The results demonstrated good agreement between observed and simulated values, with a difference of only 44.40 m³ between the historically recorded sediment production (764.36 m³) and the deposition estimated for the calibration period (808.76 m³). Based on the modeling, the average annual sediment deposition rate was found to be 723.65 m³, leading to the recommendation of an annual minimum cleaning frequency. The study confirms the applicability of HEC-RAS 1D as an efficient tool to support reservoir management, especially in decision-making related to preventive maintenance and hydraulic safety.

Resumo: O escoamento superficial das águas pluviais, especialmente em áreas antropizadas, resulta no carreamento de sedimentos para os reservatórios, assim contribuindo para o seu assoreamento e consequente perda de capacidade de armazenamento. Diante desse contexto, torna-se fundamental a estimativa da quantidade de sedimentos que atinge o reservatório, bem como a avaliação das alterações no seu aporte ao longo dos anos. O trabalho em questão consiste em uma aplicação prática do software HEC-RAS 1D na modelagem hidrossedimentológica de um reservatório, visando a avaliação da deposição de sedimentos e estimar a frequência ideal de limpeza para garantir o funcionamento eficiente da estrutura. A simulação foi desenvolvida com base em dados reais de batimetria, com discretização entre etapas de calibração e verificação, visando a garantia da confiabilidade ao modelo proposto diante dos dados reais. Os resultados demonstraram boa aderência entre os valores observados e simulados, com diferença de apenas 44,40 m³ entre a produção de sedimentos registrada historicamente (764,36 m³) e a deposição estimada para o período de calibração (808,76 m³). A partir da modelagem, verificou-se que a taxa média de deposição anual é de 723,65

1) Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, 50740-530 - Recife – PE – Brasil. Fone: +55 81 2126-8223. E-mail: camila.salgueiro@ufpe.br

2) Doutor do PPGEC, UFPE, Recife – PE – Brasil. E-mail: alexson.caetano@tpfe.com.br

3) Mestra do POSMARH, UNIFEI, Itajubá – MG – Brasil. E-mail: thaisa.goulart@vale.com

4) Doutorando do PPGECAM, UFPE, Caruaru – PE – Brasil. E-mail: franca.neto@tpfe.com.br

5) Doutor da PUC-Rio, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. E-mail: andre.lima@tpfe.com.br

6) Engenheiro Geotécnico da PUC-Minas, Belo Horizonte – MG – Brasil. E-mail: alonso.nolasco@vale.com

7) Engenheiro Geotécnico da PUC-Minas, Belo Horizonte – MG – Brasil. E-mail: jusciley.santos@vale.com

8) Professora Titular do DECIV, PPGEC, UFPE, Recife – PE – Brasil. E-mail: sylvana.santos@ufpe.br

m^3 , resultando na recomendação de uma frequência mínima de limpeza anual. O estudo confirma a aplicabilidade do HEC-RAS 1D como ferramenta eficiente no suporte à gestão de reservatórios, especialmente na tomada de decisão relacionada à manutenção preventiva e à segurança hidráulica.

Palavras-Chave – Mineração. Sedimentos. HEC-RAS 1D.

INTRODUÇÃO

A análise do processo de sedimentação em reservatórios é de extrema importância para o manejo adequado dos recursos hídricos, influenciando aspectos relacionados à contenção de estruturas como barragens e diques, além de afetar parâmetros como a qualidade da água e a capacidade de armazenamento dos reservatórios. Zanin (2015) enfatizou que o funcionamento de uma bacia hidrográfica não se restringe apenas à captação das águas pluviais por meio do escoamento superficial, mas está intrinsecamente relacionado aos processos sedimentológicos. Nesse contexto, os sedimentos resultantes da erosão do solo provocada pela água da chuva são mobilizados pelo escoamento das águas e podem ser transportados ao longo dos rios e canais da bacia hidrográfica, eventualmente alcançando áreas fora de seus limites, o que pode gerar impactos ambientais adicionais em regiões adjacentes. Complementarmente, de acordo com Nogueira e Cabral (2023), a redução da velocidade de escoamento nos reservatórios favorece o acúmulo de sedimentos, provocando o assoreamento e, consequentemente, a redução da vida útil dessas estruturas. Diante disso, o monitoramento contínuo do processo de sedimentação torna-se fundamental, tanto para compreender as características dos sedimentos depositados quanto para definir uma frequência adequada de limpeza, garantindo a segurança estrutural, a funcionalidade hidráulica e a minimização dos impactos ambientais associados à perda da capacidade de armazenamento e à degradação da qualidade da água.

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) é um *software* amplamente reconhecido e utilizado para a modelagem hidrodinâmica, associada ao transporte de sedimentos em corpos d'água. Em sua versão unidimensional (1D), o HEC-RAS possibilita simulações detalhadas do escoamento e do comportamento sedimentológico, integrando ambos os processos em um ambiente computacional robusto e de fácil utilização. Assim, o trabalho em questão optou pela utilização do HEC-RAS 1D como ferramenta de modelagem hidrossedimentológica de um reservatório, sendo, assim, possível estabelecer uma frequência máxima de limpeza sem que a deposição de sedimentos interfira na segurança hidrológica e hidráulica do reservatório. Dessa forma, foram avaliados os processos de transporte e deposição de sedimentos, permitindo uma compreensão mais aprofundada da dinâmica fluvial da área de estudo.

METODOLOGIA

Condições Iniciais: Histórico de batimetria

Para a aplicação da metodologia proposta, tem-se, inicialmente, a necessidade da avaliação das condições do reservatório em questão, a partir da análise comparativa do histórico de batimetrias realizadas na região. Assim, foi desenvolvida a curva cota x volume do reservatório de estudo nas datas de 21/09/2023 e 21/05/2024, sendo possível entender a estimativa da sedimentação no período.

Estudo hidrossedimentológico

Para a avaliação, no contexto de sedimentação, do reservatório estudado, foram aplicadas duas metodologias distintas de estimativa da produção de sedimentos: (1) Taxa 1: método tradicional, baseado no uso e ocupação do solo da bacia de contribuição, conforme as taxas de produção de sedimentos propostas por Pinheiro (2011), comumente utilizado em obras de mineração; (2) Taxa 2:

método baseado em modelagem hidrodinâmica unidimensional (1D), utilizando o *software* HEC-RAS (versão 6.4.1), com calibração a partir dos dados referentes ao histórico da batimetria do reservatório.

- Taxa 1 - Método Tradicional: segundo a EPA (1976), a geração de sedimentos está diretamente relacionada a diversos fatores, como as características geográficas da bacia, o uso e a cobertura do solo, os padrões de precipitação e as condições físicas do solo. Esses elementos, em conjunto, influenciam o potencial erosivo da área e, consequentemente, o volume de material transportado até o reservatório. Para a definição da Taxa 1, foi considerada a bacia de contribuição referente ao reservatório, bem como as características de uso e ocupação do solo dessa área. Com base nessas informações, foi possível estimar a quantidade de sedimentos gerada por toda a bacia, utilizando as taxas de produção de sedimentos propostas por Pinheiro (2011). De acordo com o autor, as áreas destinadas às atividades mineradoras apresentam uma contribuição específica de sedimentos entre 300 e 600 m³/ha.ano, enquanto para as demais áreas adota-se um valor correspondente a 10% dessa taxa.
- Taxa 2 - Modelagem HEC-RAS 1D: a partir dos resultados encontrados na Taxa 1, verificou-se a necessidade de uma análise mais detalhada, baseada na modelagem hidrodinâmica unidimensional (1D) do funcionamento da estrutura, considerando suas características específicas, referente à Taxa 2. Para isso, foram considerados dois períodos distintos: o período de calibração, no qual levou-se em consideração a elaboração e a validação do modelo, por meio dos dados reais do histórico da batimetria do reservatório, e o período de verificação, no qual utilizou-se o mesmo modelo para simular a produção de sedimentos por meio de dados de precipitação média diária dos últimos 5 anos.

Foram consideradas 18 (dezoito) seções, sendo as 4 (quatro) mais próximas da crista utilizadas como parâmetro de finalização do fluxo, de forma a simular o limite de propagação do sedimento dentro do reservatório. Ressalta-se que para o estudo em questão foi utilizado como base a batimetria realizada em 21/09/23 e simulada a produção de sedimentos até o dia 21/05/24. Para cada período analisado, foi realizada a transformação chuva-vazão por meio do *software* HEC-HMS (versão 4.10), utilizando dados de precipitação correspondentes à área de estudo. Ressalta-se que, no período de verificação, foram empregados dados de precipitação média diária do intervalo entre os anos de 2020 e 2024. Já para o período de calibração, foram utilizados os dados reais de precipitação registrados entre as datas das batimetrias analisadas. Contudo, um ponto importante a ser destacado é que os 243 dias utilizados como base para a calibração (21/09/2023 a 21/05/2024) coincidem com um período de alta intensidade pluviométrica para a região de estudo. Por essa razão, optou-se por adotar a produção encontrada no período de verificação como referência anual. Considerar essa taxa de produção como constante ao longo do ano poderia levar a uma superestimativa da produção de sedimentos, uma vez que aplicaria o mesmo valor para os períodos secos e chuvosos.

Para o período de calibração, levou-se em consideração as características específicas do tipo de sedimento presente no reservatório, adotando como base a curva granulométrica associada, assim como a função transporte, método de classificação e método de velocidade de queda utilizado no modelo. Somado a isso, para o estabelecimento da taxa de produção associada, levou-se em consideração a taxa de 3,15 m³/dia, encontrada a partir do histórico de batimetrias. Diante disso, foi utilizada como taxa de produção o valor de 5,77 toneladas por dia, levando em consideração uma densidade saturada de 18 kN/m³, conforme preconizado por Lambe e Whitman (1979).

Vale destacar ainda, que as funções adotadas no modelo do *software* HEC-RAS foram definidas com base nas características do sedimento. Ressalta-se que esse processo teve como base a comparação entre o volume de sedimentos estimado a partir do histórico de batimetrias e aquele obtido por meio da modelagem numérica. De acordo com USACE (2023), o Método de Toffaleti é

comumente utilizado no HEC-RAS para estimar a capacidade de transporte de sedimentos em fluxos hídricos com predominância de carga suspensa. O método, estabelecido em Toffaleti (1968), consiste em uma divisão do perfil vertical em quatro zonas (superior, média, inferior e de leito), o que faz com que seja admitida uma representação mais precisa do transporte de sedimentos. Complementarmente, foi utilizado como método de classificação o Thomas Ex5, definido em Thomas (1982), bastante utilizada como base do algoritmo, uma mistura de leito com três camadas: uma camada de cobertura (*cover layer*), composta por sedimentos mais grossos, uma camada subsuperficial, que pode ser movimentada, e uma camada inativa, que permanece estática. USACE (2023) ressaltou que a aplicação deste método é bastante eficaz, gerando resultados mais precisos na simulação quando comparado com demais métodos simplificados. Já em relação ao método de velocidade de queda, foi aplicado o Report 12, método que, de acordo com USACE (2023), utiliza em sua metodologia curvas experimentais para o cálculo da velocidade de queda.

Após a calibração do modelo, foi realizada uma segunda simulação referente ao período de verificação. É importante destacar que, devido à calibração ter sido limitada a 243 dias (intervalo correspondente à diferença entre os levantamentos batimétricos), a simulação também foi restrita a esse mesmo período. Com a modelagem executada, estimou-se então o volume de sedimentação ocorrido no período estudado. Uma vez estimado o volume de sedimentação, optou-se por verificar a capacidade de retenção de sedimentos no reservatório ao longo dos anos, a partir do cálculo da eficiência de retenção para diferentes diâmetros de partículas associado ao Ano 0 e Ano 1, baseando-se no procedimento geral no dimensionamento de bacias de sedimentação, conforme experimentado e abordado em SRC (1986) e Haan *et al.* (1994). Santos *et al.* (2024) ressaltaram que o processo sedimentação de um reservatório conta com a existência de duas principais velocidades: a do reservatório, associada à vazão afluente, e a de sedimentação, que corresponde à velocidade que o sedimento leva para ser depositado.

A Lei de Stokes, que rege esse processo, determina que, para uma partícula esférica com determinada gravidade específica, é possível calcular a velocidade de sedimentação através da Equação 1, considerando a água a 20° C e a gravidade específica da partícula como 2,65.

$$Vs = 2,81 * D^2 * 3,28084 \quad (1)$$

Na qual: Vs é a velocidade de sedimentação (m/s); e D é o diâmetro da partícula (mm).

O próximo passo consistiu no cálculo de uma velocidade de sedimentação crítica associada à granulometria mínima que se busca ser retida na estrutura, que consiste no momento em que a velocidade do sedimento e a velocidade do reservatório se igualam. Essa velocidade, conforme explica SRC (1986), é determinada ao se presumir que para uma partícula ser retida, é necessário que sua velocidade de sedimentação seja suficiente para decantar toda a profundidade da estrutura dentro do seu tempo de detenção no reservatório. Após observações realizadas em bacias experimentais, SRC (1986) propôs a Equação 2 para a determinação desta velocidade.

$$Vc = \frac{K_1 QH}{V - K_2 V} \quad (2)$$

Na qual: Q é a vazão de referência (m^3/s); H é a profundidade média (m); K_1 representa um fator de condição não ideal para turbulência (adimensional); K_2 o mesmo fator, porém devido à geometria e às zonas inefetivas (adimensional). Para o fator K_1 , SRC (1986) recomenda o valor de 1,2 e para K_2 foi estabelecido como igual a 0,2, graças à geometria do reservatório de estudo.

De acordo com Hann *et al.* (1994), em um escoamento sem turbulência e sem ocorrência de ressuspensão, as partículas com velocidade de sedimentação VS (Equação 1) maior que a velocidade crítica VC serão retidas. De acordo com SRC (1986), ainda é possível afirmar que uma fração das partículas com velocidade de sedimentação (V_s) menor que V_C ainda será retida. A fração (X) das partículas com V_s menor que V_C pode ser expressa como a razão entre as velocidades (SRC, 1986), conforme Equação 3.

$$X = \frac{V_s}{V_c} \quad (3)$$

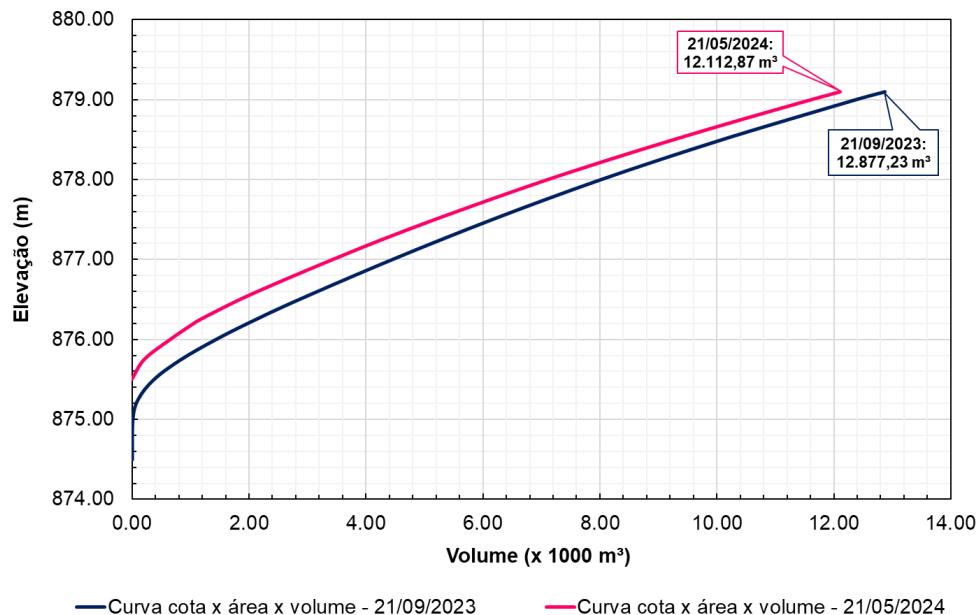
Para o estudo em questão, foram utilizadas como vazões de referência, os valores associados aos tempos de retorno de 2 e 10 anos, com duração de 24h, conforme recomendado por EPA (1976), sendo igual a $9,308 \text{ m}^3/\text{s}$ e $17,234 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, definidas com o auxílio do software HEC-HMS, versão 4.10, procedimento que é recomendado por Pinheiro (2011) para estudos hidrossedimentológicos. Uma vez definida a velocidade crítica para cada condição, foi determinado o diâmetro crítico associado, a partir da associação apresentada na Equação 1, que consiste no diâmetro máximo que sedimenta no reservatório, ou seja, a dimensão da partícula cuja velocidade de sedimentação iguala à velocidade do fluxo no reservatório. Assim, é possível estimar as faixas granulométricas que serão completamente retidas e a fração que será retida para as faixas abaixo do diâmetro crítico, a partir das vazões de referências associadas. Com a implementação do modelo HEC-RAS 1D foi possível realizar uma análise detalhada dos perfis do leito, das variações na concentração de sedimentos ao longo do tempo e da identificação de possíveis áreas mais propícias a processos de assoreamento. As informações em questão serviram como base para o estabelecimento de uma frequência mínima de limpeza para o reservatório de estudo, podendo contribuir para a garantia da segurança hidráulica.

RESULTADOS

Condições Iniciais: histórico de batimetria

Tem-se na Figura 1 as curvas cota vs volume do reservatório estudado, sendo identificados os volumes de $12.877,23 \text{ m}^3$ e $12.112,87 \text{ m}^3$ nos levantamentos realizados em 21/09/2023 e 21/05/2024, respectivamente, resultando em uma produção de sedimentos de $764,36 \text{ m}^3$ ao longo do período analisado. Essa análise permitiu compreender o comportamento da produção e do transporte de sedimentos na área, bem como sua deposição ao longo da extensão do reservatório. Vale ressaltar, ainda, que o volume disponível abaixo da cota da soleira do reservatório é na ordem de 1.550 m^3 .

Figura 1 – Curva cota vs volume do reservatório estudado.



Considerando o intervalo entre as datas dos levantamentos, foi estimada uma taxa média de sedimentação diária de $3,15 \text{ m}^3/\text{dia}$, e uma taxa significativa de assoreamento, o que, a médio e longo prazo, pode comprometer a capacidade de armazenamento e a funcionalidade do reservatório, assim reforçando a necessidade de uma frequência mínima de limpeza.

Taxa 1: Método tradicional

Para a Taxa 1, a produção de sedimentos na bacia foi determinada de acordo com o uso e ocupação da área, conforme taxas indicadas por Pinheiro (2011). Diante disso, foi encontrado um volume de sedimentação total de $49.796,11$ e $24.898,06 \text{ m}^3/\text{ano}$ para a taxa de 600 e $300 \text{ m}^3/\text{ha.ano}$, respectivamente. A partir dos resultados encontrados, observou-se que sedimentação total anual encontrada a partir de Pinheiro (2011) é bastante superior ao volume do reservatório, o que resultaria em uma frequência mínima de limpeza inferior a 1 ano, justificando a implementação da modelagem no HEC-RAS 1D.

Taxa 2: Modelagem HEC-RAS 1D

Considerando o período de calibração e os parâmetros adotados no estudo, foi possível estimar um volume de produção de sedimentos igual a $808,76 \text{ m}^3$, valor próximo ao obtido a partir do histórico batimétrico do reservatório ($764,36 \text{ m}^3$). Além disso, a Tabela 1 apresenta os resultados referentes ao volume total acumulado no reservatório no período de verificação, considerando os primeiros 243 dias de um ano qualquer, com base no modelo desenvolvido e calibrado. Nesse caso, a produção de sedimentos anual encontrada foi de $723,65 \text{ m}^3$.

Um ponto importante a ser destacado é que os 243 dias utilizados como base para a calibração (de 21/09/2023 a 21/05/2024) correspondem a um período de alta intensidade pluviométrica na região. Considerar a taxa de produção de sedimentos como constante ao longo de todo o ano poderia superestimar os valores anuais, ao aplicar a mesma taxa tanto para os períodos secos quanto para os

chuvosos. Diante disso, optou-se por adotar a produção de 723,65 m³ como referência para a estimativa anual.

Tabela 1 – Volumes totais acumulados para as datas referentes ao período de verificação.

01 de janeiro de 2023				243 dias depois			
Extensão (m)	Volume (m ³)	Extensão (m)	Volume (m ³)	Extensão (m)	Volume (m ³)	Extensão (m)	Volume (m ³)
4,8	0,49	55	749,2	4,8	0,05	55	704,47
14,9	54,05	60	823,55	14,9	50,11	60	774,09
20,1	123,64	65	898,73	20,1	115,64	65	844,08
25,1	213,69	69,9	975,62	25,1	200,79	69,9	915,45
29,9	310,63	75,1	1047,08	29,9	292,55	75,1	980,07
35	413,87	85,1	1128,2	35	390,17	85,1	1045,36
40	508,1	95	1159,2	40	478,84	95	1064,66
45,1	595,01	104,9	1172,04	45,1	560,1	104,9	1073,03
50	672,84	TOTAL	10845,93	50	632,83	TOTAL	10122,28

Considerando uma produção anual de sedimentos de 723,65 m³ e um volume útil disponível abaixo da cota da soleira do reservatório da ordem de 1.550 m³, estima-se que a frequência mínima necessária para a limpeza do reservatório seja anual. A partir do segundo ano, a acumulação de sedimentos passa a interferir significativamente no trânsito de cheias do reservatório, comprometendo a segurança hidráulica da estrutura.

Para o cálculo da eficiência de retenção da estrutura, é necessário conhecer as frações de partículas que compõem cada faixa de diâmetro, a fim de determinar o percentual retido. O sedimento associado ao reservatório em questão apresenta elevadas frações de silte e areia, além de pequenas frações de argila e pedregulho. De acordo com a metodologia SUCS, a amostra é classificada como CL (argila de baixa compressibilidade).

A partir dos resultados obtidos para a vazão de referência associada ao TR de 10 anos, com duração de 24h, observa-se a deposição total das partículas de areia muito fina e silte grosso tanto no ano 0 quanto no ano 1, indicando que a retenção dessas granulometrias não é significativamente impactada ao longo de um ano. No entanto, nota-se uma leve redução na deposição dos sedimentos associados às granulometrias de silte médio, silte fino e silte muito fino. Já para o TR de 2 anos, também com duração de 24h, observa-se, no ano 0, a deposição total da areia muito fina, silte muito grosso e silte médio, considerando que o diâmetro crítico é de 0,01530 mm, valor inferior ao limite de 0,016 mm. Após um ano de funcionamento, estima-se que a taxa de deposição das partículas de silte médio seja de 96,88%, restando uma fração de 3,12% não retida. A Tabela 2 apresenta o quadro resumo da retenção total dentro do reservatório.

Tabela 2 – Avaliação da retenção de sedimentos dentro do reservatório.

Período	TR 10 ANOS			TR 2 ANOS		
	Dc (mm)	Sedimento que passa (%)	Sedimento depositado (%)	Dc (mm)	Sedimento que passa (%)	Sedimento depositado (%)
Ano 0	0,021	33,45	66,55	0,015	28,72	71,28
Ano 1	0,022	34,83	65,17	0,016	29,73	70,27

Legenda: Dc = Diâmetro crítico.

CONCLUSÕES

Foi avaliada a aplicabilidade do HEC-RAS 1D para analisar a deposição de sedimentos em reservatórios. Com base em dados reais de batimetria e etapas de calibração e verificação, estimou-se a frequência mínima de limpeza necessária para garantir o funcionamento hidráulico sem comprometer o trânsito de cheias. O modelo mostrou-se eficiente, com uma diferença de apenas 44,40 m³ entre a produção histórica (764,36 m³) e a deposição simulada (808,76 m³). A deposição anual estimada foi de 723,65 m³, recomendando-se limpeza anual para manter a eficiência operacional.

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de Doutorado (nº. do processo:88887.134583/2025-00) da primeira autora. Complementarmente, os autores agradecem a TPF Engenharia e a VALE S.A. pela disponibilização dos dados.

REFERÊNCIAS

EPA - Environmental Protection Agency (1976). *“Erosion and Sediment Control. Surface Mining in the Eastern U.S. Volume I. Planning. Volume II. Design”*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, EPA/625/3-76/006a. Disponível em: <http://cfpub.epa.gov/si/ntislink.cfm?dirEntryID=50319> Acesso: 23/06/2025.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. (1994). *“Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments”*, Academic Press, 588 pp.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V.; Poulos, H. G. (1979). *“Soil mechanics”*, SI version. New York: John Wiley & Sons, xii, 553 pp.

NOGUEIRA, P. F.; CABRAL, J. B. P.. (2023). *“Caracterização Hidrossedimentológica do reservatório da usina hidrelétrica foz do Rio Claro - GO”*. Revista Brasileira de Geografia Física, 16 (5), pp. 2782–2797.

PINHEIRO, M.C. (2011). *“Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos em Obras de Mineração”*. Porto Alegre: ABRH, 308 pp.

SANTOS, I.; SILVA, A.; SANTOS, R.; BENEVENTE, C.; COSTA, T.; FREITAS, S. (2024). *“Contribuição e perspectivas sobre o dimensionamento de estruturas de contenção de sedimentos na mineração – SUMPS”*. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (ENES), 16.; Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica (FluHidros), 2., 8 pp.

SHOOK, C. A. et al. Development of the SRC model. In: Hydrotransport 10, Proceedings, 1986. (Saskatchewan Research Council, Canada).

TOFFALETI, F. B. A procedure for computation of the total river sand discharge and detailed distribution bed to surface. Vicksburg, Miss.: Committee on Channel Stabilization, U.S. Army Corps of Engineers; Springfield, Va.: National Technical Information Service, U.S. Dept. of Commerce, 1968. 187 f. Disponível em: Digital Public Library of America.

THOMAS, T. W. (1982). *“A Generalized Computer Program for the Computation of Sediment Transport in Open Channels”*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.

USACE - United States Army Corps of Engineers (2023). “*HEC-RAS 1D Sediment Transport Technical Reference Manual*”. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/erosion-and-sediment-transport-under-construction>. Acesso em: 26 maio 2025.

ZANIN, P. R. (2015). “*Modelagem Hidrossedimentológica De Bacia Hidrográfica Com Reservatórios*”. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 211 pp.