

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DA TAXA DE GERAÇÃO DE SEDIMENTOS E EFICIÊNCIA DE CONTENÇÃO DO DIQUE 3 DA ANGLO AMERICAN

Bharbara Ladeira¹; Luisa A. Ventura²; Aloysio Saliba³; Laís Silva⁴; Daniela Amorim⁵; Juliana Duarte⁶; Mariana Alcântara⁷.

Abstract: The study presents an assessment of the sediment yield rate and containment efficiency of Sediment Containment Dike 3 (Dike 3), operated by Anglo American, located in the municipality of Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais, Brazil. Sediment yield rates were obtained from topobathymetric surveys provided by the owner company. Subsequently, these calibrated rates were compared with values commonly reported in the literature, revealing significantly lower results. It is essential to note that the sediment yield rate is a multifaceted parameter influenced by several factors, including land use and cover, vegetation, climate, soil type, and management practices. Therefore, values commonly cited in the literature are not always sufficiently representative of the specific conditions of individual watersheds, especially in regions with unique characteristics and distinct dynamics. Furthermore, the lack of sediment monitoring in Brazilian watersheds limits the calibration of models and the generation of reliable data. The results underscore the importance of utilizing local and up-to-date data in planning containment structures, thereby contributing to solutions tailored to the site's actual conditions, enhancing its sediment management.

Resumo: O trabalho apresenta a avaliação da taxa de geração de sedimentos e da eficiência de retenção do Dique de Contenção de Sedimentos 3 (Dique 3) da Anglo American, localizado no município de Conceição do Mato Dentro, em Minas Gerais. As taxas de geração foram obtidas a partir de levantamentos topobatimétricos disponibilizados antes e após dragagem do reservatório. Os valores obtidos foram comparados aos usualmente indicados pela literatura, revelando-se significativamente inferiores. A taxa de geração de sedimentos é um parâmetro multicritério, influenciado por fatores como uso e ocupação do solo, cobertura vegetal, clima, tipo de solo e práticas de manejo. Por isso, valores de literatura nem sempre são representativos para condições específicas de bacias hidrográficas sujeitas a atividades minerárias, especialmente em regiões com características próprias e dinâmicas diferenciadas. Além disso, a escassez de monitoramento sedimentométrico em bacias brasileiras limita a calibração de modelos e a geração de dados confiáveis. Os resultados destacam a importância da utilização de dados locais e atualizados no planejamento de estruturas de contenção, o que contribui para soluções mais adequadas à realidade do empreendimento e para a melhoria do gerenciamento de sedimentos em bacias hidrográficas.

Palavras-Chave – hidrossedimentologia, descarga sólida, taxa de geração de sedimentos e retenção de sedimentos.

1) Engenheira Júnior (Hidróloga) da TEC3 Geotecnica e Recursos Hídricos (bharbaraladeira@gmail.com).

2) MSc. em Recursos Hídricos pela UFMG (luisa.al.ventura@gmail.com).

3) Diretor Técnico da TEC3 Geotecnica e Recursos Hídricos Ltda., Dr. Recursos Hídricos UFMG (asaliba@tec3engenharia.com.br).

4) Coordenadora de Geotecnica – Anglo American (laís.silva@angloamerican.com).

5) MSc. Engenheira Geotécnica – Anglo American (daniela.amorim@angloamerican.com).

6) MSc. Engenheira Hidróloga – Anglo American (juliana.duarte-externo@angloamerican.com).

7) MSc. Engenheira Hidróloga – Anglo American (mariana.alcantara@angloamerican.com).

INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade estratégica para a economia brasileira, com influência significativa nos âmbitos econômico, social e geopolítico. Porém, em decorrência da supressão vegetal, frequentemente associada à expansão da extração mineral, o solo se torna mais vulnerável aos processos erosivos. As implicações motivadas pelo aumento da produção de sedimentos são diversas, com desdobramentos ambientais, econômicos e sociais, tais como o assoreamento de cursos de água e a alteração de paisagens naturais, a redução da produtividade agrícola e o aumento de custos com infraestrutura, e o agravamento dos riscos às comunidades e à insegurança alimentar, respectivamente.

Portanto, o monitoramento da geração de sedimentos em áreas mineradoras é fundamental para mitigar os impactos associados. Segundo Pinheiro (2011), o método mais eficaz para estimar a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica baseia-se na aplicação de princípios da hidrossedimentologia aos dados obtidos por estações sedimentométricas. Contudo, a rede de monitoramento nacional apresenta uma cobertura espacial insuficiente, o que limita a capacidade de avaliação dos processos erosivos.

Ademais, vale mencionar o caráter dinâmico inerente à estimativa de taxas de geração de sedimentos. Embora existam valores de referência frequentemente mencionados na literatura, as taxas estão sujeitas a variações espaciais e temporais significativas, tais como o uso e ocupação do solo, o regime pluviométrico e as características geomorfológicas da bacia. A variabilidade reforça a limitação de abordagens simplificadas, que muitas vezes resultam em estimativas pouco representativas da realidade.

Uma alternativa eficaz para gerenciar o transporte de sedimentos é a utilização de reservatórios para retenção dos sedimentos transportados. Os dispositivos de retenção atuam como barreiras físicas que dissipam a energia do escoamento fluvial, o que favorece a deposição dos sedimentos transportados. A eficiência de retenção corresponde a relação entre o volume de sedimentos retidos e o volume total afluente.

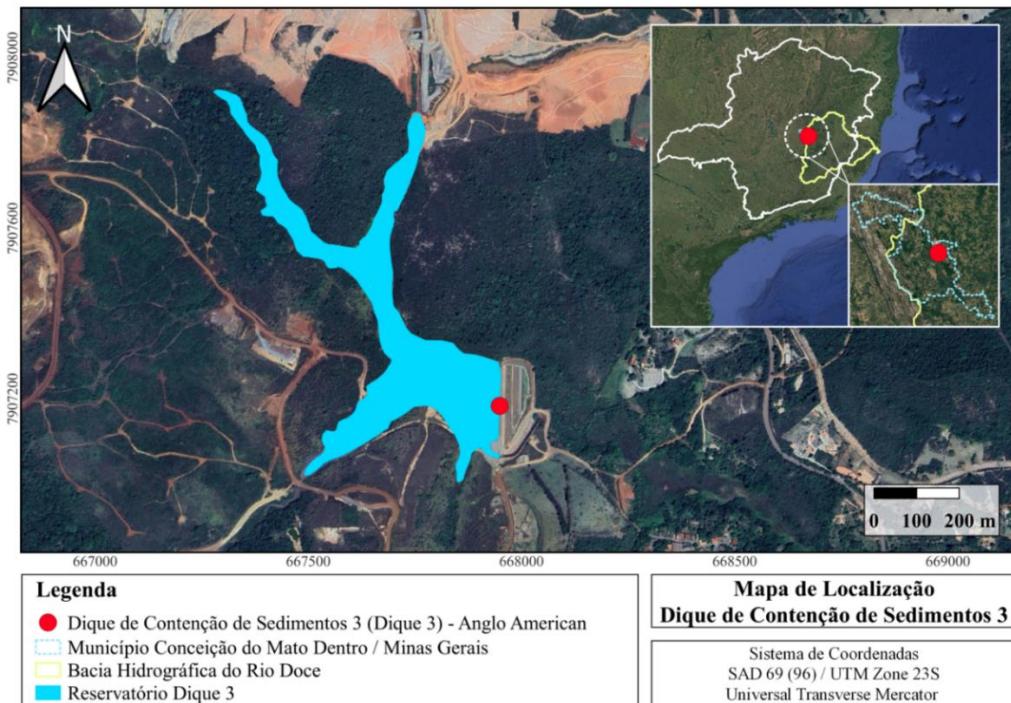
De acordo com Pinheiro (2011), o processo de deposição de sedimentos em um reservatório depende, de maneira relevante, dos seguintes fatores: (i) Produção específica de sedimentos da bacia hidrográfica ou da área que drena para o reservatório de retenção; (ii) Dimensão do reservatório em relação ao deflúvio médio anual da bacia; (iii) Composição granulométrica da descarga sólida; e (iv) Velocidade média do fluxo e tempo de residência ao longo do reservatório.

Com o objetivo de avaliar a produção específica de sedimentos, a partir da definição e aplicação de taxas calibradas e ponderadas, além de estimar a eficiência de retenção, será apresentado o estudo de caso do Dique de Contenção de Sedimentos 3 (Dique 3), pertencente à Anglo American Minério de Ferro Brasil (AAMFB).

O Dique 3 faz parte do Sistema Minas-Rio, está localizado no município de Conceição do Mato Dentro, no estado de Minas Gerais. Inserido na bacia hidrográfica do córrego Bom Sucesso, que por sua vez integra a bacia do Rio Doce, o Dique 3 desempenha múltiplas funções, como a contenção de sedimentos provenientes da expansão da cava na porção sul da Serra do Sapo e da PDE Norte, além da acumulação de água para uso nas atividades de mineração. O vertimento do Dique 3 ocorre a partir do vertedouro de soleira livre implantado na El. 656,27 m.

A Figura 1 apresenta a localização do Dique de Contenção de Sedimentos 3.

Figura 1 – Localização Dique 3 – Conceição do Mato Dentro/Minas Gerais.



METODOLOGIA

Taxa De Geração De Sedimento

Segundo Pinheiro (2011), o EPA (1976) indica, para áreas com atividades minerárias nos Estados Unidos, uma contribuição específica de sedimentos que varia entre $300 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$ e $600 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$. No Brasil, para fins de dimensionamento dos reservatórios tem sido prática adotar o limite superior para o cálculo da contribuição de sedimentos em áreas de mineração. Quanto às áreas naturais, é usual utilizar 10% do valor associado às áreas minerárias, nesse caso $60 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$.

Gomes (2012) apresenta um compilado de taxas médias de geração de sedimentos em pilhas de estéril, referentes ao período de 2004 a 2009, com valores que variam entre $250 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$ e $2.000 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$. Contudo, o autor ressalta a fragilidade na utilização das médias, visto que variações em fatores como pluviometria, geometria das estruturas e manejo da área natural podem ocasionar grandes discrepâncias nas taxas.

A evolução da taxa de geração de sedimentos pode ser determinada através do monitoramento batimétrico do reservatório de contenção. Para isso, a Anglo American disponibilizou os levantamentos batimétricos dos seguintes meses: Maio/2020, Junho/2021, Maio/2022, Outubro/2022, Maio/2023 e Março/2024.

As áreas de contribuição do Dique 3 foram delimitadas para os anos de 2021, 2022 e 2023, com base em topografias específicas para cada ano. A eficiência de retenção do reservatório foi calculada pela curva de Brune para os anos hidrológicos 2020-2021, 2021-2022 e 2022-2023. As taxas de geração foram determinadas a partir da relação entre o volume total de sedimentos armazenado no reservatório, definido nos levantamentos batimétricos, e a área de contribuição do Dique 3 em cada ano.

Além disso, uma taxa de geração ponderada foi calculada com base no tipo de cobertura do solo e nos valores usualmente recomendados pela literatura, adotando-se $600 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$ e $60 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$.

para áreas de mineração e natural, respectivamente. A classificação da cobertura do solo foi feita com o uso de imagens de satélite para os anos de 2021, 2022 e 2023. Assim, foi possível avaliar os resultados obtidos para as taxas calibradas e as taxas ponderadas, aplicadas à mesma área e em períodos semelhantes.

Eficiência De Retenção

De acordo com Pinheiro (2011), os reservatórios de contenção de sedimentos podem ser classificados como de pequeno, médio ou grande porte. O parâmetro utilizado na classificação pode ser representado pelo quociente entre volume total do reservatório (VT) e o deflúvio médio anual (D). A Tabela 1 mostra a relação entre o porte do reservatório e a relação (VT/D).

Tabela 1 – Classificação do porte de reservatórios.

Porte	Relação VT/D
Pequeno	$(VT/D) < 0,01$
Médio	$0,01 < (VT/D) < 0,1$
Grande	$(VT/D) > 0,1$

Ainda segundo Pinheiro (2011), dentre os métodos disponíveis para estimar a eficiência do reservatório em reter sedimentos, destacam-se as curvas de Brune e de Churchill (ANEEL, 2000), sendo o último aplicável a reservatórios de pequeno porte. Para a definição dos parâmetros necessários ao cálculo da relação (VT/D) foram caracterizados o deflúvio médio anual e o volume total do reservatório, a partir do levantamento batimétrico.

O Deflúvio Médio Anual ($L/s.km^2$) foi calculado a partir da vazão média de longo termo estimada para o Dique 3. Com os dados monitorados na estação fluviométrica do rio do Peixe, em Dom Joaquim (código ANA 56765000), entre os anos de 1947 e 2006, e a precipitação anual média na bacia de contribuição (1454 mm), constata-se que as perdas por evapotranspiração correspondem a 59,3% do total precipitado, o deflúvio corresponde aos 40,7% restantes. Assim, esse valor aplicado à precipitação anual média, resulta em um deflúvio igual a 610 mm ($344,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ou $3.020.448 \text{ m}^3/\text{ano}$) para o Dique 3.

O volume total (VT) armazenado até a soleira do vertedor variou entre 241.813 m e 374.105 m^3 entre 2021 e 2023, e a relação (VT/D) variou entre 0,062 e 0,132 devido ao assoreamento progressivo. Portanto, o reservatório seria classificado como de médio a grande porte (Tabela 1) e optou-se pela curva de Brune para descrever a eficiência de retenção (Pinheiro, 2011).

RESULTADOS

Eficiência de Retenção

A eficiência de retenção dos sedimentos foi estimada a partir do quociente (VT/D) aplicado à curva de Brune. A definição da eficiência permitiu o cálculo mais assertivo da taxa de geração nos anos hidrológicos avaliados.

O volume útil foi definido pelos levantamentos topobatimétricos ao final de cada ano hidrológico, as batimetrias consideradas foram: junho/2021 para o ano hidrológico 2020/2021;

outubro/2022 para o ano hidrológico de 2021/2022; e março/2024 para o ano hidrológico de 2022/2023. O deflúvio médio anual foi determinado como 344,8 m³/h para o Dique 3.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos para a eficiência de retenção do Dique 3 nos correspondentes anos hidrológicos.

Tabela 2 – Eficiência de retenção (%) do Dique 3.

Ano Hidrológico	2020/2021	2021/2022	2022/2023
Volume Útil – VT (m³)	398.272	384.098	320.889
Quociente (VT/D)	0,141	0,131	0,112
Eficiência de Retenção (%)	88,3	87,8	86,6

Os resultados de eficiência apresentados foram aplicados ao cálculo da taxa de retenção calibrada para cada ano hidrológico.

Taxas de Geração de Sedimentos

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam, respectivamente, a evolução da área de contribuição do Dique 3 nos anos de 2021, 2022 e 2023, bem como o uso e ocupação do solo. Os valores indicados na legenda, associados às diferentes tipologias, quantificam as áreas em cada ano.

Figura 2 – Área de contribuição e cobertura do solo para o ano de 2021.

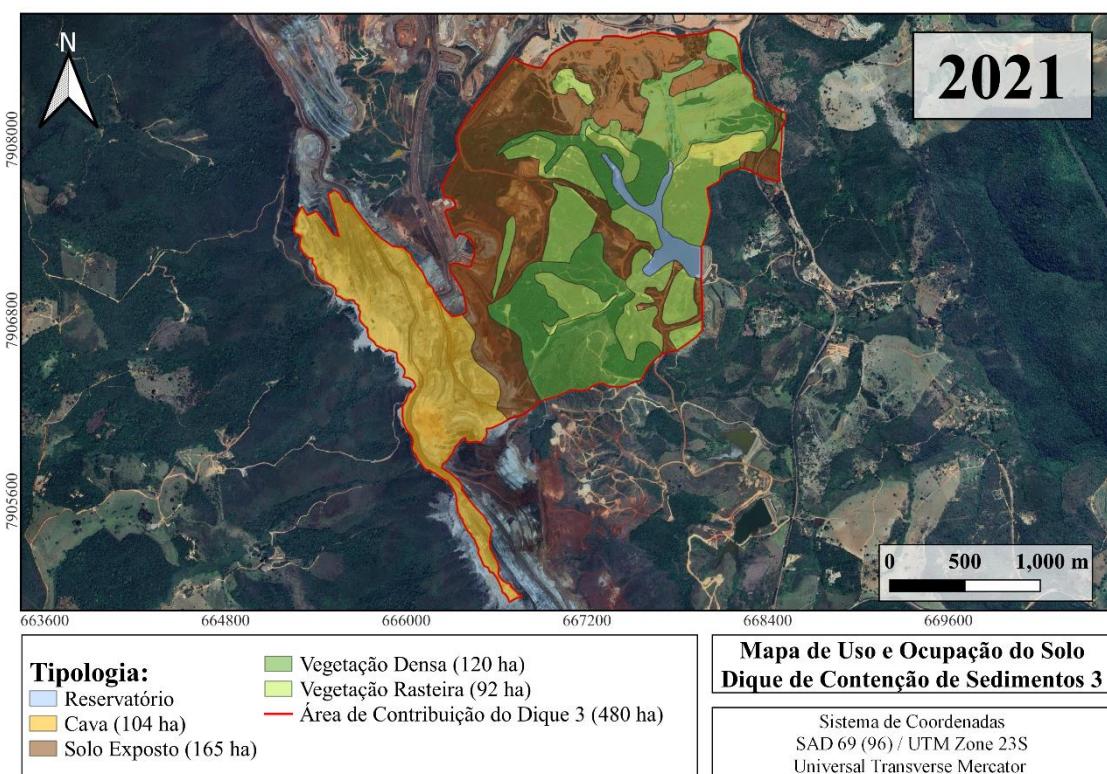


Figura 3 – Área de contribuição e cobertura do solo para o ano de 2022.

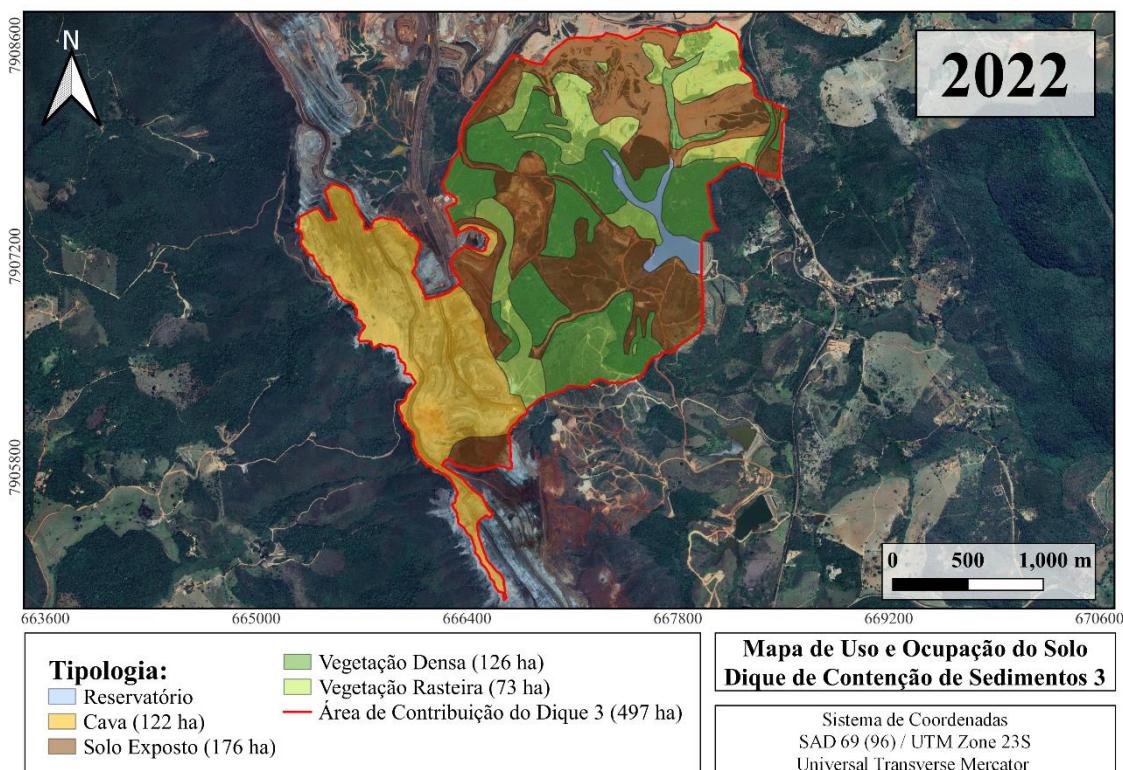
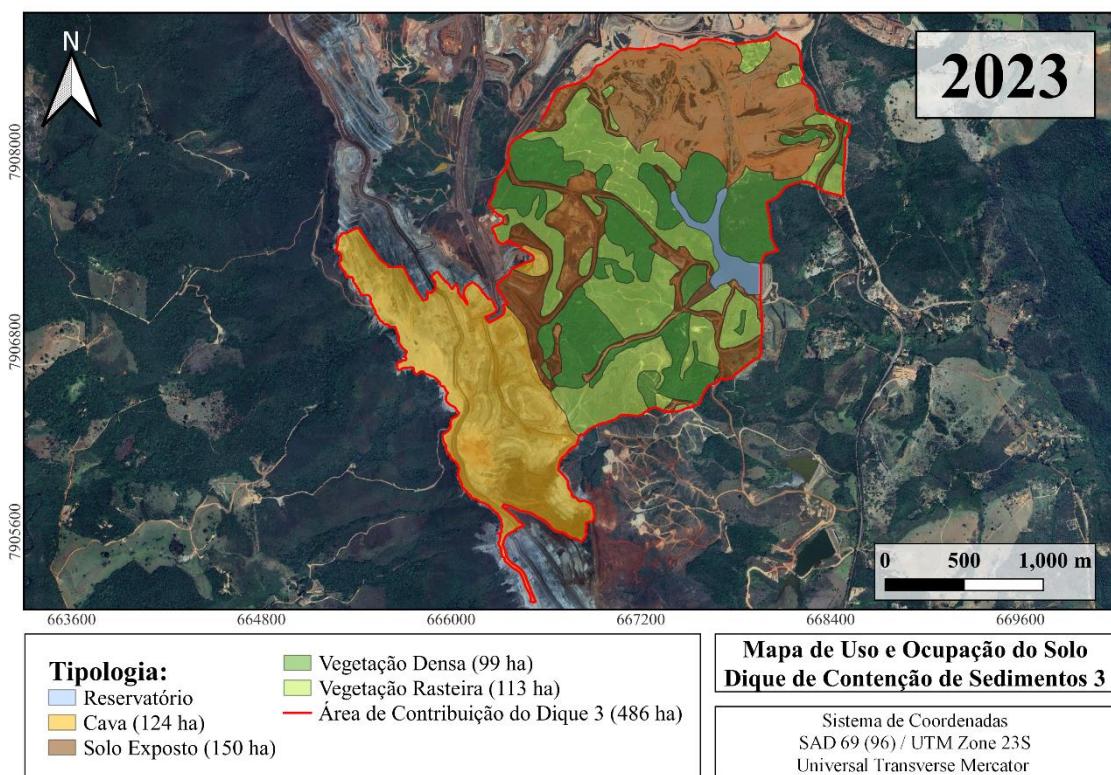


Figura 4 – Área de contribuição e cobertura do solo para o ano de 2023.



A área de contribuição do Dique 3 apresentou crescimento nos anos de 2021 e 2022, com 480 ha e 497 ha, respectivamente, seguido por leve decréscimo em 2023, quando passou para 486 ha. Esta variação se deve ao direcionamento de diferentes contribuições de empilhamentos e cavas ao reservatório do Dique 3. Classificam-se as áreas de Vegetação Densa e Vegetação Rasteira como áreas naturais, enquanto que as tipologias Cava e Solo Exposto são consideradas áreas de mineração.

Ressalta-se que a área ocupada pelo reservatório foi desconsiderada nos cálculos da taxa de geração, por não contribuir com a produção de sedimentos. Verifica-se, por fim, que a área de mineração apresenta crescimento contínuo e representa uma parcela significativa da bacia hidrográfica.

A partir dos levantamentos batimétricos, disponibilizados pela Anglo American, foi possível determinar as taxas de geração de sedimentos calibradas para o Dique 3 em cada ano hidrológico estudado, apresentadas na Tabela 3.

O cálculo do Incremento de Sedimento (m^3) foi realizado a partir da diferença entre os volumes identificados na batimetria para os períodos selecionados. O Sedimento Total Gerado (m^3) foi determinado com base nas eficiências estimadas pela curva de Brune para cada ano hidrológico. Por fim, a taxa calibrada de produção de sedimentos ($m^3/ha \cdot ano$) foi obtida pelo quociente entre Sedimento Total Gerado (m^3) e a área de contribuição do Dique (ha).

Tabela 3 – Taxas calculadas a partir dos levantamentos batimétricos.

Períodos entre Levantamentos Topobatimétricos	Maio/20 – Junho/21	Junho/21 – Outubro/22	Outubro/22 – Março/24
Ano Hidrológico	2020/2021	2021/2022	2022/2023
Capacidade Inicial do Reservatório na Crista (m^3)*	1.055.575	1.031.434	998.367
Capacidade Final do Reservatório na Crista (m^3)*	1.031.434	998.367	917.766
Volume de Sedimentos Retidos no Reservatório (m^3)	24.141	33.066	80.602
Volume de Sedimentos Gerados na Bacia (m^3)	27.324	37.682	93.090
Área de Contribuição (ha)	480	480	497
Intervalo de Tempo entre batimetrias	13 meses	15 meses	17 meses
Taxa Calculada ($m^3/ha \cdot ano$)	57	79	187

* Capacidade na El. 660,50 m (crista) para incorporar os sedimentos depositados na região do remanso do reservatório levantados nas topobatimetrias.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2 foi possível determinar uma taxa média para os anos hidrológicos. As taxas calculadas foram iguais a **57 $m^3/ha \cdot ano$** , **79 $m^3/ha \cdot ano$** e **187 $m^3/ha \cdot ano$** , respectivamente.

As taxas de geração ponderadas, segundo os valores definidos na literatura, estão apresentadas na Tabela 4. As taxas de geração de sedimentos de 600 $m^3/ha \cdot ano$ e 60 $m^3/ha \cdot ano$ foram adotadas

para as áreas de mineração e de cobertura natural, respectivamente. A ponderação foi realizada com base nas taxas mencionadas e nas áreas correspondentes para cada tipo de cobertura.

Tabela 4 – Taxas Ponderadas com valores usuais de literatura por ano.

Ano Hidrológico	2020/2021	2021/2022	2022/2023
Área Natural (ha)	211	199	212
Área Mineração (ha)	268	298	274
Taxa Ponderada (m³/ha·ano)	362	384	364

No ano hidrológico de 2020/2021, por exemplo, a taxa de geração de sedimentos calculada foi de 57 m³/ha·ano, valor significativamente inferior à taxa de geração ponderada de 362 m³/ha·ano. A mesma tendência foi observada para os demais anos hidrológicos, nos quais as taxas calculadas se mostraram consideravelmente menores do que os valores médios de referência.

Dois cenários foram avaliados com o objetivo de avaliar a sensibilidade das contribuições de áreas naturais na taxa de geração nas áreas de mineração, a partir das taxas calculadas: (i) A taxa de geração para áreas naturais corresponda a 10% da taxa de mineração e (ii) A taxa de geração para áreas naturais corresponda a 0,1% da taxa de mineração. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Taxas Ponderadas com valores usuais de literatura por ano.

Ano Hidrológico	2020/2021	2021/2022	2022/2023
Taxa Calculada (m³/ha·ano)	57	79	187
Taxa de Mineração – 10%	94	124	308
Taxa de Mineração – 0,1%	102	132	331

Constata-se que as taxas de geração para áreas de mineração são significativamente inferiores ao valor de 600 m³/ha·ano frequentemente adotado.

A discrepância reforça a elevada variabilidade espacial e temporal das taxas de geração. As taxas definidas na literatura para determinadas regiões e períodos nem sempre são aplicáveis a outras localidades ou contextos temporais. Diante dessa complexidade, torna-se evidente que a generalização de valores de literatura pode levar a estimativas imprecisas, inadequadas à realidade local, ou mesmo motivar a execução de reservatórios maiores, aos quais estão associados maiores riscos.

Assim, destaca-se a importância do monitoramento da geração de sedimentos como ferramenta essencial para subsidiar o planejamento e a gestão de estruturas de contenção, o que contribui para decisões mais eficazes e alinhadas às condições específicas de cada bacia hidrográfica.

CONCLUSÃO

Contata-se que as taxas de geração de sedimentos, calibradas a partir dos levantamentos batimétricos, resultaram em valores significativamente inferiores ao que é comumente indicado na literatura.

As taxas de geração calibradas foram de $57 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$, $79 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$ e $187 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$, e as ponderadas, com base em valores de referência da literatura, de $362 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$, $384 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$ e $364 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$, para os anos hidrológicos 20/21, 21/22 e 22/23, respectivamente. O sedimento total gerado na área de contribuição do Dique 3 cresceu ao longo dos anos, bem como a taxa de geração.

A partir das Figuras 2, 3 e 4, observa-se a evolução da área de contribuição e das alterações no uso e ocupação do solo no entorno do Dique 3. Verifica-se um avanço progressivo das atividades minerárias em detrimento das áreas naturais, o que contribui para o aumento da geração de sedimentos.

As taxas de geração encontradas para áreas de mineração foram iguais a $94 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$, $128 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$ e $308 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$ no primeiro cenário (taxa natural igual a 10% da taxa de mineração), para os anos hidrológicos de 20/21, 21/22 e 22/23, respectivamente. Para o segundo cenário (taxa natural igual a 0,1% da taxa de mineração), os resultados obtidos foram $102 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$, $132 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$ e $331 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$.

Constata-se que as taxas de geração para áreas de mineração, definidas a partir das taxas calibradas, foram menores do que o valor frequentemente utilizado de $600 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$. A variação observada na taxa de mineração pode ser atribuída à expansão da área minerada ou às mudanças na precipitação anual.

Os valores de taxas de geração de sedimentos frequentemente encontrados na literatura podem não refletir adequadamente as condições específicas de cada bacia hidrográfica. Essa divergência ressalta a importância de ampliar e aprimorar o monitoramento sedimentométrico regional, o que permite obter dados mais precisos e representativos.

Com informações calibradas e ajustadas à realidade da área, torna-se possível desenvolver modelos mais confiáveis e planejar estratégias de gestão e contenção de sedimentos eficazes e adaptadas às particularidades do ambiente estudado.

A aplicação de taxas superestimadas de geração de sedimentos em obras de engenharia pode resultar em sobredimensionamento de estruturas, aumento dos custos operacionais, perda de competitividade e comprometimento da viabilidade ambiental do projeto. O dimensionamento exagerado de componentes tais como bacias de retenção e sistemas de drenagem pode acarretar investimentos desnecessários.

Além disso, a previsão inflacionada de intervenções frequentes, como dragagens e manutenções de canais, introduz custos recorrentes que poderiam ser evitados. O excesso de precaução pode ainda distorcer a avaliação dos impactos ambientais, ao superestimar os danos potenciais e, consequentemente, levar à imposição de medidas compensatórias desnecessárias.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (2000). *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, Brasília – DF.

BRUNE, G. M. (1953). *Trap efficiency of reservoirs*. Transactions of the American Geophysical Union, v. 34, n. 3, p. 407–418.

USEPA – U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1976). *Erosion and sediment control: surface mining in Eastern U.S.* EPA-625/3-76-006.

GOMES, L. L. (2012). *Avaliação espacial da perda de solo por erosão pela Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) – Pilha de Estéril Sul – Carajás/PA*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnologia – NUGEO.

PINHEIRO, M. C. (2011). *Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração*. Potamos/Vale, 1. ed., 303 p.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Anglo American Minério de Ferro Brasil pelo fornecimento dos dados essenciais à realização do estudo.