

Estimativa da vida útil de reservatórios na América do Sul

*Hugo de Oliveira Fagundes*¹; *Fernando Mainardi Fan*²; *Ayan Santos Fleischmann*³; *Rodrigo Cauduro Dias de Paiva*⁴; *Diogo Costa Buarque*⁵; *Vinicius Alencar Siqueira*⁶; & *Walter Collischonn*⁷

Palavras-Chave – MGB-SED; Erosão; Sedimentos.

RESUMO

Reservatórios tem sido um tema central em diversos assuntos atuais como crise hídrica, geração de energia, retenção de sedimentos, redução da conectividade de rios e impacto nos ecossistemas. O objetivo do presente trabalho foi estimar pela primeira vez a vida útil dos grandes reservatórios da América do Sul, buscando compreender o impacto dos reservatórios de montante sobre os de jusante. Para isso, 234 em todo o continente foram simulados com o modelo continental MGB-SED. Foram considerados três cenários: i) consideração do efeito dos reservatórios de montante sobre os de jusante; ii) utilização de cargas afluentes naturalizadas, ou seja, sem o impacto antrópico dos reservatórios; iii) deposição total da carga afluente (retenção máxima das partículas). Os resultados mostraram que as diferentes classes de partículas (areia, silte e argila) apresentam taxas diferentes de deposição; que a vida útil dos reservatórios é bem maior se em seu cálculo é considerado o impacto dos reservatórios a montante, podendo chegar a dobrar de valor, como no caso de Itaipu após a implantação do reservatório de Porto Primavera. Os resultados permitiram concluir que no geral a taxa de deposição dos sedimentos é superior a 60% e que abordagens mais realistas devem considerar as diferentes texturas dos sedimentos transportados e, principalmente, o impacto dos reservatórios de montante sobre os reservatórios de jusante.

INTRODUÇÃO

A América do Sul tem se destacado mundialmente quando o tema é sobre reservatórios, pois além de ser uma região que transporta elevada carga de sedimentos (Latrubesse et al., 2005), regiões ambientalmente sensíveis como a Amazônia têm sido fortemente ameaçadas pelo impacto de futuros empreendimentos que podem ser instalados na região (Latrubesse et al., 2017). Os reservatórios afetam a conectividade dos rios, alterando os fluxos de água e de sedimentos, os ciclos biogeoquímicos e a mobilidade de peixes (Grill et al., 2019). Ao mesmo tempo, eles exercem importantes funções econômicas e sociais. O uso de água doce dos reservatórios artificiais em todo o mundo, para os propósitos de geração de energia, irrigação, abastecimento industrial e humano,

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; h.o.fagundes@hotmail.com; 51 33086670
2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre fernando.fan@ufrgs.br; 51 33086670
3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; ayan.fleischmann@gmail.com; 51 33086670
4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre rodrigodpaiva@gmail.com; 51 33086670
5) Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, Goiabeiras, 514, Vitória; diogo.buarque@gmail.com; 27 33352853
6) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; vinisiquera@gmail.com; 51 33086670
7) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; waltercollischonn@gmail.com; 51 33086670

proteção contra cheias, pesca e recreação está avaliado em US\$ 265×10⁹ anuais (Hogeboom et al., 2018). No Brasil, nas últimas décadas esse assunto esteve presente na vida dos cidadãos em diversos momentos, especialmente durante crises hídricas no país, incluindo o ano de 2021.

De acordo com Best (2019), embora nos Estados Unidos e Europa o processo de desativação de algumas barragens já tenha iniciado, em países em desenvolvimento essa questão ainda carece de maior atenção. Estudos como o de Borrelli et al. (2017) têm indicados que as taxas de erosão na América do Sul vêm aumentando. Se essa tendência se mantiver, isso implica no fato que mais sedimentos ficarão aprisionados nos reservatórios, diminuindo a vida útil desses.

No meio do debate sobre as vantagens e desvantagens da presença de reservatórios nos rios, surgem questões que ainda precisam ser avaliadas com uma visão de escala continental, tais como: Qual a eficiência de retenção dos reservatórios? Qual a vida útil dos reservatórios? Por quanto tempo poderemos confiar neles para armazenamento de água e geração de energia enquanto país ou continente? Responder essas questões são importantes para o planejamento e uso dos recursos hídricos e energéticos. Contudo, estas respostas são especialmente difíceis devido à grande escassez de dados, mesmo na chamada na era do *big data* e *big Science* (Best, 2019).

Uma forma de estimar a vida útil de reservatórios seria realizando inúmeras medições das concentrações a montante e jusante de reservatórios, processo que é oneroso monetariamente. Outra forma mais confiável seria o levantamento batimétrico periódico, que também pode ser custoso, mas já vem sendo empregado em alguns reservatórios da América do Sul (e.g. Cabral et al., 2009; Paulek et al., 2018). Outros trabalhos têm realizado a estimativa da vida útil dos reservatórios a partir de dados secundários e equações empíricas (e.g. Lopes et al., 2009).

Uma quarta via para obtenção destas estimativas é o emprego de modelos matemáticos de simulação da dinâmica de sedimentos, que, apesar das incertezas, podem fornecer uma primeira aproximação de vida útil para vários locais. É exatamente nesta linha que o presente trabalho busca fornecer uma estimativa da vida útil para os grandes reservatórios da América do Sul a partir da modelagem matemática dos fluxos de sedimentos. Foram considerados na análise 234 reservatórios em todo o continente.

MATERIAIS E MÉTODOS

A América do Sul (AS) é responsável por 20% dos sedimentos que chegam aos oceanos (Syvitski et al., 2005). De acordo com Fagundes et al. (2021), 44%, 14%, e 11% vêm dos rios Amazonas, Orinoco e La Plata. As bacias hidrográficas dos rios Paraná, São Francisco e Tocantins são as que têm os fluxos de sedimentos mais afetados devido à presença de reservatórios (Syvitski et al., 2005). Grill et al. (2019) mostram que os barramentos presentes na porção alta da bacia do rio Magdalena também apresentam grande potencial de retenção de sedimentos, visto que esses rios drenam a região Andina com elevadas cargas de sedimentos. Destaca-se também que o número elevado de reservatórios para abastecimento, irrigação e controle de cheias no semiárido brasileiro

contribuem significativamente para a diminuição do aporte dos sedimentos que chegam aos Oceanos.

O conceito de vida útil de reservatório adotado neste trabalho é aquele apresentado por Julien (2010): a vida útil de um reservatório é o tempo esperado no qual o reservatório será completamente cheio por sedimentos. Para esse cálculo, é necessário conhecer o volume do reservatório, a carga de sedimentos afluente e a eficiência de retenção (ou o volume de sedimentos depositado).

Em toda a América do Sul, utilizou-se informações (e.g. volume) de 234 grandes reservatórios (capacidade de armazenamento $>10^6\text{m}^3$) provenientes da base de dados de Yigzaw et al. (2018) e das bases de dados brasileiras da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Só foram considerados os reservatórios: (i) em operação; (ii) que tivessem disponíveis as informações de cota (ANA/ONS)/ altura(Yigzaw)-área-volume; e (iii) que, devido a escala e concepção do modelo, não estavam em bacias de cabeceira ($\sim 1.000\text{ km}^2$ de área de drenagem).

A carga de sedimentos afluente e depositada foi simulada com o modelo continental MGB-SED, apresentado inicialmente por Fagundes et al. (2021) e posteriormente no trabalho intitulado “Modelagem de sedimentos com reservatórios em escala continental” apresentado neste mesmo evento, onde mais detalhes são apresentados sobre a construção e a avaliação da performance do modelo. O modelo simula as cargas diárias de sedimentos separando-as em areia, silte e argila.

No presente trabalho foram considerados três cenários apresentados a seguir.

- Cenário 1 (Cen1) – teve como objetivo fazer uma estimativa da vida útil dos reservatórios considerando a influência que os reservatórios de montante exercem sobre os reservatórios de jusante. Para isso as cargas depositadas e, conseqüentemente, a eficiência de retenção das partículas de silte e argila, foram estimadas a partir da carga afluente simulada, utilizando a equação proposta por Julien (2010) e considerando que os reservatórios começam a ser simulados a partir da data de operação do mesmo. Para areias, considerou que 100% da carga afluente aos grandes reservatórios ficam depositadas.
- Cenário 2 (Cen2) – teve como objetivo principal descobrir o impacto de se realizar estimativas considerando séries mais naturalizadas, ou seja, sem considerar o efeito de reservatórios de montante. Para tal, as cargas afluentes foram simuladas sem considerar a presença dos reservatórios e as cargas depositadas foram estimadas considerando as eficiências de retenção estimadas no Cen1.
- Cenário 3 (Cen3) – teve como objetivo obter estimativas da vida útil considerando um cenário mais conservador em relação ao Cen2, a fim de avaliar o impacto de se usar altas taxas de eficiência de retenção para reservatórios. Para isso, considerou-se que toda a carga afluente estimada, conforme o Cen2, foi depositada no reservatório, ou seja, 100% das partículas de areia, silte e argila são depositadas.

A partir das informações apresentadas por Carvalho et al. (2000), considerou-se o peso específico dos sedimentos depositados como sendo $1,3 \text{ t/m}^3$.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta os valores da eficiência de retenção das partículas para cada classe e a média geral para cada reservatório simulado. Como esperado, uma vez que foi definido como premissa, 100% da carga de areia que chega aos reservatórios fica retida. Com relação as partículas de silte, a grande maioria dos reservatórios retém valores acima de 90%. Por exemplo, os reservatórios nas bacias do rio Doce e do rio Paraíba do Sul são algumas exceções em que isso não ocorre. Já para argila, a maioria dos reservatórios apresentam valores muito baixos de retenção, inferiores a 10%. Destaca-se a região nordeste brasileira e sul da Argentina que apresentam alguns reservatórios com valores mais elevados de retenção de argila. No nordeste brasileiro, muitos desses reservatórios são de uso de abastecimentos humano, possuindo grande capacidade de armazenamento se comparada as vazões afluentes.

No geral, os valores médios de eficiência de retenção dos reservatórios são acima de 60%, como valores mais próximos de 100% nas regiões em que a retenção de argila também é maior. É importante destacar que esse tipo de resultado permite considerar, por exemplo, que regiões com maiores teores de argila em seus solos apresentarão menores valores de eficiência de retenção para a maioria dos reservatórios, valores que poderiam ser mascarados ao considerar métodos empíricos que não diferenciam a granulometria da carga afluente.

A estimativa de vida útil dos 234 grandes reservatórios é apresentada na Figura 2. No geral, os reservatórios do nordeste brasileiro são aqueles que apresentam maiores valores de vida útil, com valores superiores a 100.000 anos. Menores valores são encontrados nas bacias do rio Doce e Paraíba do Sul e nos rios com pequenas áreas de drenagem localizados nas regiões das cordilheiras dos Andes, tanto na porção sul, como na porção norte. Esses resultados são coerentes com os valores de descarga sólida apresentada por Fagundes et al. (2021), que indicam que essas regiões apresentam valores elevados. Observa-se que há uma diferença significativa nos valores encontrados quando o Cen1 é comparado aos demais, com alguns locais apresentando uma diferença de cerca de duas ordens de grandeza. Essa diferença é bem evidente nos reservatórios localizados na bacia do rio Paraná, em que os valores passam da ordem de grandeza de 10^5 no Cen1 para 10^3 no Cen2 e Cen3. Isso ocorre devido as diferentes metodologias empregadas. Os valores encontrados no Cen3 são visualmente bem parecidos com aqueles encontrados no Cen2. Embora estejam na mesma ordem de grandeza, os valores do Cen2 podem ser até quase duas vezes maior que os valores do Cen3 para alguns reservatórios.

Figura 1. Eficiência de retenção (%) das partículas de sedimentos para os reservatórios estudados.

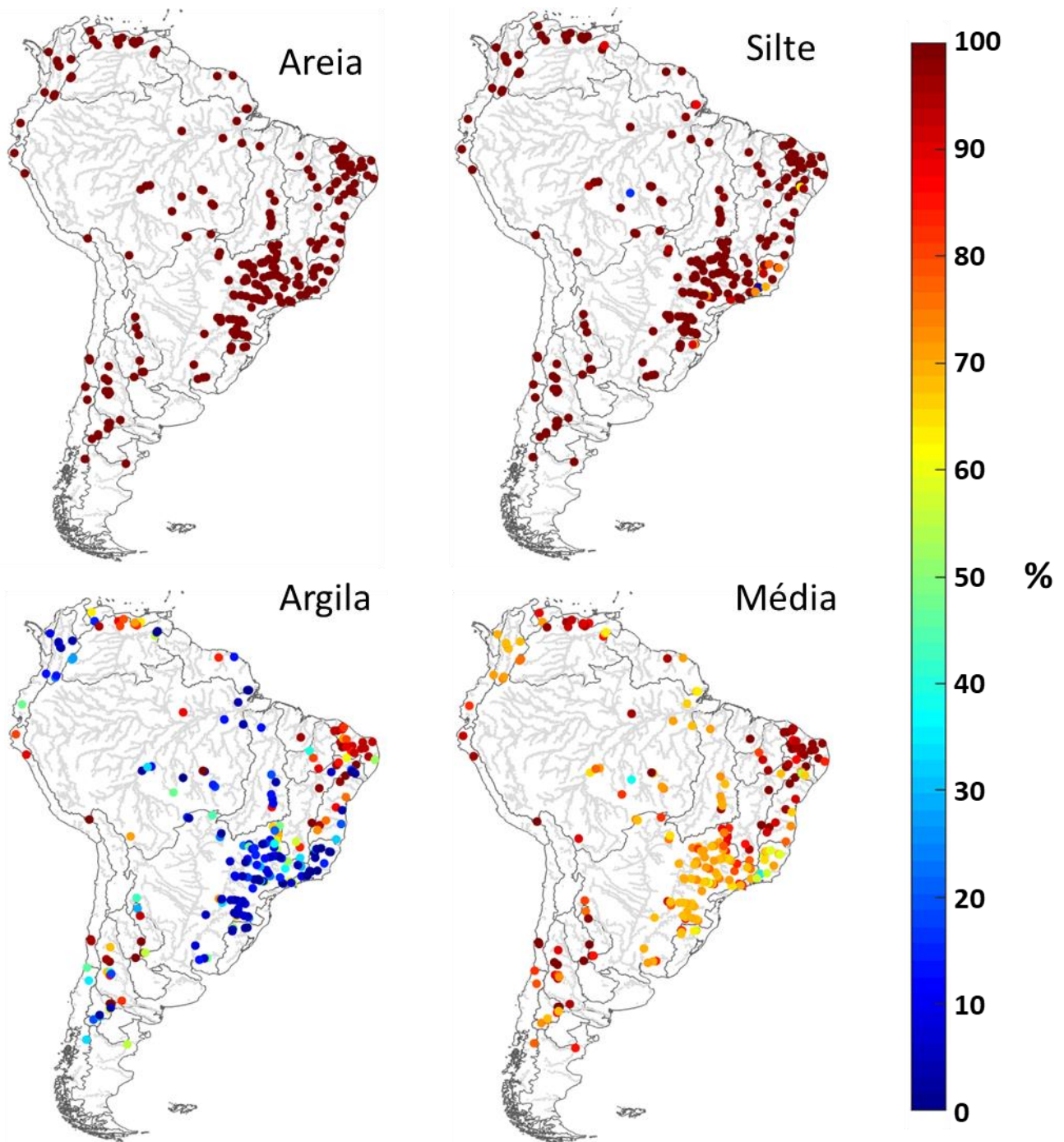
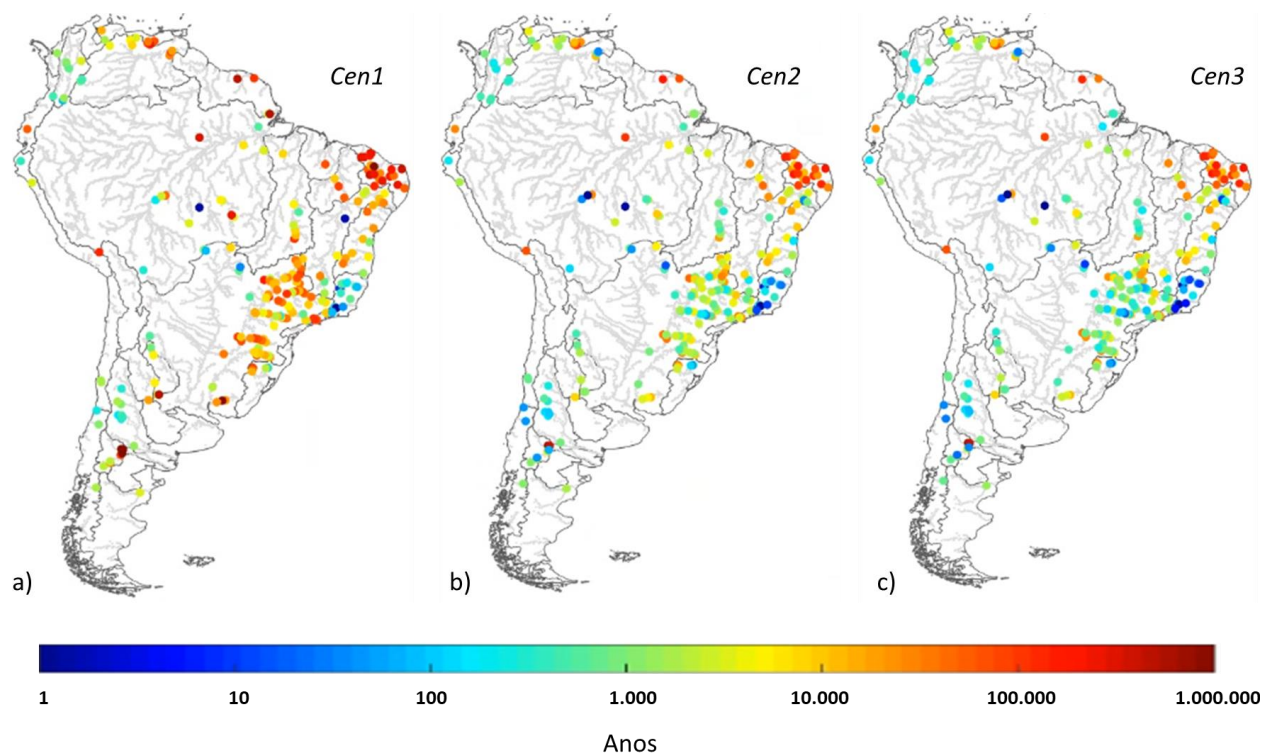


Figura 2. Vida útil dos grandes reservatórios da América do Sul para a) Cen1 – reservatórios de montante influenciam os reservatórios de jusante; b) Cen2 – Cargas afluentes simuladas de 1980-2019 sem considerar a presença de reservatórios e utilizando as taxas de retenção apresentadas na Figura 1; c) Cen3 – toda a carga afluente calculada para o Cen2 é depositada.



Na Tabela 1 se apresenta algumas comparações entre os valores dos cenários simulados e aqueles encontrados na literatura. Dos 12 reservatórios analisados, 50% apresentaram melhores valores quando comparados com o Cen2 e 50% se aproximaram dos valores encontrados no Cen3 e nenhum teve resultado mais parecido com o do Cen1. Entende-se que a razão desse resultado é que as metodologias apresentadas nos trabalhos realizados na literatura se aproximam mais das abordagens também utilizadas nos Cen2 e Cen3, que não levam em conta o impacto dos reservatórios a montante. Além disso, outros fatores que podem contribuir para que as estimativas apresentadas na literatura resultem em valores menores são: utilização da curva de Brune, que pode resultar em maiores valores de eficiência de retenção; adoção de um valor percentual do quanto a carga de areia representa em relação a carga atual; consideração de aumento progressivo da carga afluente devido ao desmatamento, o que não necessariamente é um fato na América do Sul (e.g. Clark et al., 2012).

Assim, ao compararmos os resultados da Figura 2 e Tabela 1, percebemos que a simulação realizada com o modelo continental MGB-SED, considerando que os reservatórios de jusante são afetados pelos reservatórios de montante, percebemos que a vida útil estimada pode ser consideravelmente superior do que quando estimada considerando descargas simuladas naturalizadas (Cen2 - sem a presença de reservatório). Isso indica que os reservatórios de montante apresentam um papel significativo sobre os reservatórios de jusante. Mendes (2018) mostrou que

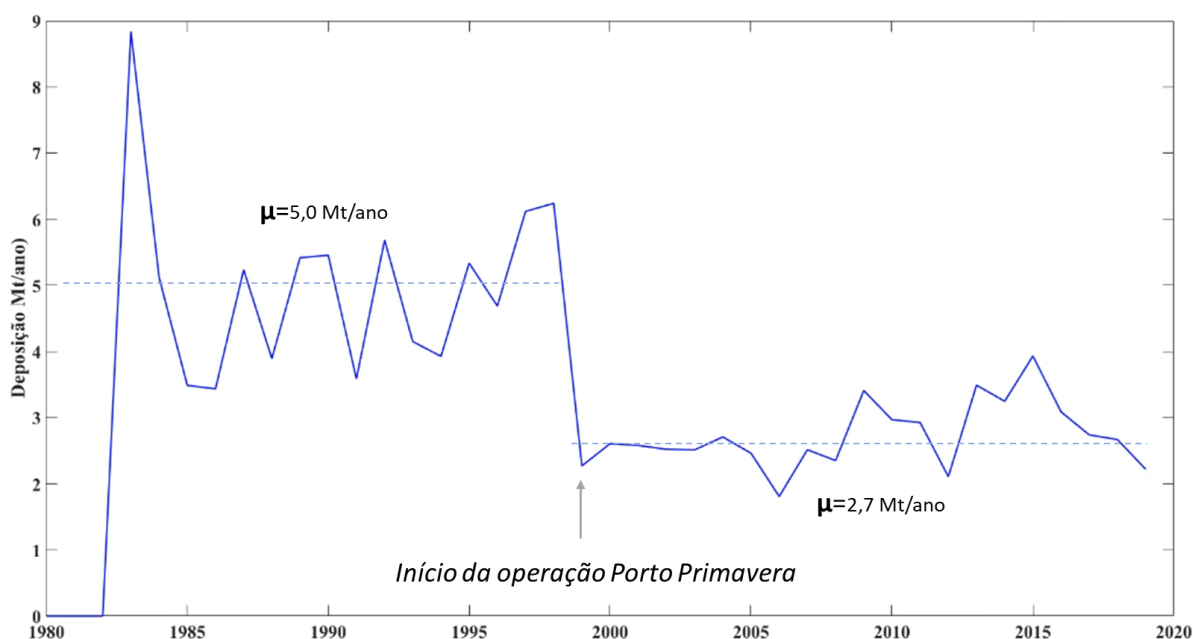
a implantação da UHE Porto Primavera no rio Paraná causou um impacto relevante na diminuição do aporte de sedimentos na UHE Itaipu. Esse impacto também é apresentado na Figura 3.

Tabela 1: Comparação entre estimativas de vida útil de diversos reservatórios brasileiros. Em negrito, os valores que mais se aproximam dos valores encontrados na literatura para cada reservatório.

	CEN1	CEN2	CEN3	LITERATURA / FONTE
CAÇU	2027	881	485	667 / Braga et al., 2017
FOZ DO AREIA	11936	6786	3356	3780 / Paulek et al., 2018
ESTREITO	55621	1003	386	204/ ANA, 2009
AIMORÉS	438	96	37	38/ Cortez et al., 2013
CASCHOEIRA DOURADA	10271	266	127	145 / Cabral et al., 2009
TRÊS IRMÃOS	139839	5722	3192	232 / Miranda, 2017
PORTO PRIMAVERA	15585	1549	793	2326/ Celeri et al., 2005
ITAIPU	10128	1535	775	1240 / Carvalho et al., 2000
SOBRADINHO	15126	10879	2634	311 / Lopes et al., 2005
ITIQUIRA CASA DE FORÇA	34	14	10	14 / Carvalho et al., 2000
SEGREDO	41124	2872	1372	11500 / COPEL, 2012
SALTO CAXIAS	24943	2449	1166	5920/ COPEL, 2012

A UHE Itaipu iniciou sua operação no ano de 1983, enquanto a UHE Porto Primavera apenas em 1999. Nota-se que antes de Porto Primavera, a média simulada de sedimentos depositadas foi de 5,0 Mt/ano, enquanto depois do início da operação o valor diminuiu para 2,7 Mt/ano, uma redução de quase 50%.

Figura 3. Comparação da deposição anual (Mt/ano) de sedimentos no reservatório de Itaipu antes e após a operação da UHE Porto Primavera, no rio Paraná. Valores referentes a simulação do Cenário 1.



Apesar de os cenários 2 e 3 apresentarem valores mais parecidos com aqueles observados na literatura, menciona-se que os resultados encontrados no primeiro cenário são considerados aqui como coerentes com a situação atual. Sabe-se que existem diversas incertezas no processo de modelagem de sedimentos e que os dados de descarga de leito são escassos, o que dificulta ainda mais esse processo. No Cen1, utilizou-se uma abordagem mais realista, em que os reservatórios começam a ser simulados após o início de sua operação, considerando que as que as partículas de silte e argila são depositadas de forma diferente das partículas de areia. No Cen2, por exemplo, considera-se que os reservatórios não influenciam as cargas afluentes aos reservatórios, mas sabemos que isso não é verdade. No Cen3, consideramos que toda a carga afluente se deposita, mas também sabemos que em muitos reservatórios essa premissa não é verdadeira.

Dessa forma, destaca-se a importância de uma avaliação integrada dos fluxos de sedimentos como a realizada nesse trabalho, considerando que os solos apresentam diferentes texturas e percentuais de areia, silte e argila em suas composições; que as planícies exercem uma importante função na retenção de sedimentos e que nem sempre o aumento da descarga líquida também implicará no aumento da descarga sólida (Fagundes et al., 2021); e que os reservatórios de montante podem interferir significativamente na carga afluente aos reservatórios de jusante.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou pela primeira vez a estimativa de vida útil (ocupação total por sedimentos) para os grandes reservatórios da América do Sul a partir de modelagem hidrológica-hidrodinâmica de sedimentos. Foram simulados três cenários que mostraram o impacto de diferentes abordagens na estimativa de vida útil dos reservatórios. Através dos resultados apresentados, observou-se que:

- No geral, a eficiência de retenção de argilas em reservatórios usados para a geração de energia é muito pequena quando comparada às classes de silte e areia. Em quase todos os reservatórios, a eficiência de retenção média foi superior a 60%.
- A maioria dos reservatórios apresentou valores de vida útil superior a mil anos, conforme o Cenário 1, que considerou a influência dos reservatórios de montante sobre os reservatórios de jusante. Os menores valores foram encontrados para os reservatórios localizados, por exemplo, nas bacias do rio Doce e Paraíba do Sul, e em bacias localizadas em ou próximas das Cordilheiras dos Andes.
- Os valores de vida útil foram mais próximos daqueles estimados pela literatura quando abordagens semelhantes foram consideradas: descargas sólidas simuladas sem a influência de reservatórios a montante e/ou deposição total da carga afluente.
- Uma avaliação pontual para o reservatório de Itaipu mostrou a importância de considerar os reservatórios a montante no cálculo da vida útil. A taxa de deposição anual no reservatório de Itaipu reduziu quase pela metade a partir da operação do reservatório de Porto Primavera, a montante do primeiro.

AGRADECIMENTOS

O primeiro e o Segundo autor agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelas bolsas de pesquisa números 167867/2018-0 e 305636/2019-7.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas – ANA, 2009. *Nota Técnica n.º 177/2009/GEREG/SOF-ANA*. Declarações de Reserva de Disponibilidade Hídrica para os aproveitamentos hidrelétricos Ribeirão Gonçalves, Uruçuí, Cachoeira, Estreito e Castelhana, localizados no rio Parnaíba.

Best, J., 2019. *Anthropogenic stresses on the world's big rivers*. Nat. Geosci. 12, 7–21. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0262-x>

Borrelli, P.; Robinson, D.A.; Fleischer, L.R.; et al., 2017. *An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion*. Nat. Commun. 8, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>

Braga, C. C., 2017. *Análise espaço-temporal dos processos hidrossedimentológicos e sedimentação no reservatório da UHE Caçu*. 2017. 155 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

Cabral, J. B. P.; Fernandes, L. A.; Scopel, I.; Becegato, V. A.; Fiori, A. P., 2009. *Avaliação do estado de assoreamento do reservatório de Cachoeira Dourada (GO/MG)*. Sociedade & Natureza, 21(1), 97-119.

Carvalho, N. O.; Júnior, N. P. F.; Santos, P. M. C.; Lima, J. E. F. W., 2000. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Agência Nacional de Energia Elétrica. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. Brasília/DF: ANEEL.

Celeri, A.; Castro Alves, C. F.; Carvalho, N. O., 2005. *Reassessment of Porto Primavera reservoir sedimentation in view of updated sediment measurements*. IAHS-AISH publication, 308-314.

Clark, M. L.; Aide, T. M.; Riner, G., 2012. *Land change for all municipalities in Latin America and the Caribbean assessed from 250-m MODIS imagery (2001–2010)*. Remote Sensing of Environment, 126, 84-103.

Companhia Paranaense de Energia – COPEL, 2012. *Reavaliação do assoreamento no reservatório da usina hidrelétrica de Salto Caxias (UHE Governador José Richa)*.

Companhia Paranaense de Energia – COPEL, 2012. *Reavaliação do assoreamento nos reservatórios das usinas hidrelétricas de Foz do Areia (UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto) e Segredo (UHE Governador Ney Braga)*.

Cortez, J. R.; Pinheiro, M. C.; Baptista, M. B., 2013. *Desempenho de modelos numéricos em estudos de assoreamento de reservatórios – Estudo na UHE Aimorés*. Anais... XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

Fagundes, H. O.; Fan, F. M.; Paiva, R. C. D.; et al., 2021. *Sediment flows in South America supported by daily hydrologic-hydrodynamic modeling*. Water Resources Research, 57, e2020WR027884. <https://doi.org/10.1029/2020WR027884>

- Grill, G; Lehner, B.; Thieme, M.; et al., 2019. *Mapping the world's free-flowing rivers*. Nature. 569, 215–221. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>
- Hogeboom, R. J., Knook, L. & Hoekstra, A. Y. *The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection and recreation*. Adv. Wat. Resources 113, 285–294 (2018).
- Julien, P. Y. *Erosion and Sedimentation*. 2º ed. Cambridge University press. 2010.
- Latrubesse, E.M., Arima, E.Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V.R., D'Horta, F.M., Wight, C., Wittmann, F., Zuanon, J., Baker, P.A., Ribas, C.C., Norgaard, R.B., Filizola, N., Ansar, A., Flyvbjerg, B., Stevaux, J.C., 2017. *Damming the rivers of the Amazon basin*. Nature 546, 363–369. <https://doi.org/10.1038/nature22333>
- Latrubesse, E.M.; Stevaux, J.C.; Sinha, R., 2005. *Tropical rivers*. Geomorphology 70, 187–206. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.005>
- Lopes, H. L., Neto, A. R., & Cirilo, J. A. (2015). *Modelagem batimétrica no reservatório de sobradinho: II-avaliação do volume atual e da taxa de sedimentação no espaço de tempo entre 1978 e 2009*. Revista Brasileira de Cartografia, 67(6).
- Mendes, A. B., 2018. *Ampliação Da Vida Útil Da UHE Itaipu devido à implantação da UHE Porto Primavera*. Anais... XIV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Vitória.
- Paulek, D. M.; Freitas, M.; Almeida, M. I., 2018. *Análise da evolução da curva cota x área x volume de um reservatório de cabeceira*. Anais...XIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Vitória.
- Syvitski, J.P.M.; Vörösmarty, C.J.; Kettner, A.J.; Green, P., 2005. *Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean*. Science (80-). 308, 376–380.
- Yigzaw, W.; Li, H.-Y.; Demissie, Y.; et al., 2018. *A New Global Storage-Area-Depth Dataset for Modeling Reservoirs in Land Surface and Earth System Models*. Water Resour. Res. Tech. 54, 10,372–10,386.
- Miranda, R. B., 2017. *A influência do assoreamento na geração de energia hidrelétrica: estudo de caso na Usina de Três Irmãos-SP*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.