



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Aplicação do Método da Simulação da Operação para Determinação de Curvas de Regularização de um Futuro Reservatório de Abastecimento

Rossano Belladona^{1*}; Vinícios Turella Fiorini²; Volnei Dal Bosco³; Tiago De Vargas⁴; Luiz Alberto Vedana⁵

¹Pesquisador da Superintendência de Recursos Hídricos, Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMA E), Caxias do Sul (RS), Brasil. (ORCID: 0000-0003-2806-6629). ***autor correspondente:** e-mail: rbelladona101@gmail.com. ²Acadêmico de Engenharia Ambiental e estagiário em recursos hídricos, SAMA E, Caxias do Sul (RS), Brasil. (OECID: 009-000-3516-7140) e-mail: vfiorini@samaecaxias.com.br. ³Agrônomo da Superintendência de Recursos Hídricos, SAMA E, Caxias do Sul (RS), Brasil. (ORCID: 0009-0005-0369-4110). e-mail: vdalbosco@samaecaxias.com.br. ⁴Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre (RS), Brasil. (ORCID: 0000-0003-2205-8708). e-mail: tiago.devargas@ufrgs.br. ⁵Professor da Universidade Federal de Sergipe, Aracajú (SE), Brasil. (ORCID: 0000-0002-0273-5866). e-mail: luizvedana@gmail.com.

Artigo recebido em 09/05/2024 e aceito em 03/02/2025

RESUMO

O planejamento urbano deve contemplar a disponibilidade hídrica e as infraestruturas necessárias para suprir a demanda crescente de água no futuro. Em regiões onde a geomorfologia não favorece a presença de rios, a utilização de barragens em cursos d'água menores é essencial para assegurar o abastecimento público urbano, especialmente em grandes cidades. Essas barragens são construídas para formar reservatórios capazes de regular as vazões dos cursos d'água, que são naturalmente variáveis no tempo e no espaço. Diferentes métodos têm sido propostos para estimar e dimensionar esses reservatórios, como o diagrama de massa ou métodos baseados em matrizes de probabilidade. Neste estudo, é apresentada uma aplicação inovadora do Método da Simulação da Operação para determinar o volume de reservatórios destinados ao abastecimento público. O método foi testado para o dimensionamento de um futuro reservatório gerado pelo represamento de um pequeno córrego no município de Caxias do Sul, RS. Os resultados indicam que é possível garantir uma vazão de 1.540 L/s durante 90% do tempo com a regularização das vazões no córrego estudado, em comparação com apenas 48% sem essa regularização. Além disso, ao apresentar as probabilidades de falha na oferta em relação à demanda, o modelo contribui para o planejamento das operações das empresas responsáveis pelo abastecimento, promovendo uma maior segurança hídrica nas áreas urbanas.

Palavras-chave: Abastecimento urbano; Barragem; Segurança hídrica.

Application of the Simulation Analysis Method to Determine a Future Water Supply Reservoir Yield

ABSTRACT

Urban planning should consider water availability and the required infrastructure for future public supply in the face of increasing demand. In regions where geomorphology does not allow the existence of major rivers, the dependence on damming smaller creeks is crucial to ensure urban water supply, especially in large cities. Because flow rates vary in time and space, dams have been used in such locations to form impoundments which are capable of regulating these flows. Various methods have been proposed to design and estimate the size of reservoirs, such as the mass diagram or methods based on probability matrices. This study presents an innovative application of the Simulation Analysis Method to determine the reliability of yield of reservoirs whose water is destined to public supply. The method is applied in an area where a future reservoir is planned to be generated from damming a small stream in the municipality of Caxias do Sul, southern Brazil. The results demonstrate that it is possible to ensure a flow rate of 1,540 L/s during 90% of time with the regulation of the flows in the studied stream, compared to only 48% without this regulation. By presenting the probabilities of supply failure relative to demand, the model contributes to the planning of water utilities in ensuring urban water security.

Keywords: Urban water supply; Dam; Water security.

Introdução

Barragens são reconhecidas por regularizar a água de córregos e rios para diversos usos, fornecendo água para diferentes finalidades, como irrigação, geração de energia, indústria e uso urbano. A crescente demanda por água tem despertado o interesse na construção de novos barramentos. Entretanto, a oferta deste recurso está sujeita a uma enorme quantidade de incertezas como, por exemplo, as mudanças climáticas, a urbanização, os padrões de potabilidade, o uso do solo e as tecnologias de tratamento, que podem comprometer a tomada de decisão (Belladona, 2023). Apesar dos benefícios, a construção de uma nova barragem é um empreendimento de alto custo em termos de estudo, projeto e construção.

O planejamento urbano deve levar em conta a disponibilidade hídrica local e as estruturas necessárias para o abastecimento público. O aumento da demanda urbana requer investimentos em estratégias que aumentem a exploração dos recursos hídricos existentes ou busquem novos mananciais, como a construção de novos reservatórios por meio do barramento de cursos d'água (Policena, Belladona, Ballardin, Dal Bosco, & De Vargas, 2023). Determinar onde construir uma nova barragem para o abastecimento público é uma das tarefas difíceis no processo de tomada de decisão no setor público. Para conceber um novo manancial, a demanda de água é um dos primeiros fatores a serem considerados. Além disso, o estudo hidrológico e a qualidade da água do manancial são componentes fundamentais para avaliar a condição do recurso hídrico em garantir a oferta e a concepção da nova barragem (Tsutiya, 2005).

O volume de um reservatório, além de satisfazer as exigências da demanda, depende do tamanho do córrego e da variabilidade de suas vazões (McMahon & Mein, 1978). Há diversos métodos disponíveis na literatura para o dimensionamento deste tipo de estrutura como, por exemplo, o método do diagrama de massa, como o proposto por Rippl (1883), que depende da análise de eventos em que a produção do reservatório excede a demanda. Ou os métodos baseados em matriz de probabilidades, como o proposto por Gould (1961), em que as capacidades de armazenamento são conhecidas e a probabilidade de falha do reservatório é determinada por tentativa e erro a partir de uma condição anterior.

A utilização do método de diagrama de massa é limitada para estimar a capacidade de armazenamento de futuros reservatórios, pois parte do pressuposto que as descargas são constantes de

um mês para o outro e que a evaporação, que é dependente do nível do reservatório, não pode ser computada na análise (Mays & Tung, 1992), uma vez que essa perda não é constante. O Método da Simulação da Operação é capaz de compensar as limitações desse método.

O Método da Simulação da Operação possui a capacidade de atender às necessidades de dimensionamento de volumes de armazenamento de futuros reservatórios para a regularização das vazões médias. Este modelo prevê que os volumes afluentes e efluentes do reservatório são finitos e seu dimensionamento pode ser realizado por meio de um balanço hídrico, permitindo calcular probabilidades de falha em suprir uma demanda mensal constante (Paiva & Paiva, 2016). Embora este método seja consolidado para a determinação de volume de reservatórios, são poucos os estudos que o aplicam para a determinação de reservatórios destinados ao abastecimento público. Este artigo contribui para preencher essa lacuna, aplicando esse método em uma análise em um futuro reservatório gerado a partir do barramento de um pequeno córrego no município de Caxias do Sul, RS, onde há previsão legal de captação em novo manancial denominado Mulada (Caxias do Sul, 2005).

O planejamento dos recursos hídricos para o uso urbano deve ser capaz de avaliar e comparar adequadamente o desempenho de diferentes alternativas (Belladona, De Vargas, Dalcin, Stefanon, & Marques, 2023). A capacidade do Método da Simulação da Operação em apresentar as probabilidades de falha de oferta em relação à demanda permite melhor planejar a operação das empresas responsáveis pelo abastecimento nos períodos de escassez hídrica, garantindo maior segurança hídrica urbana.

Material e métodos

Área de estudo

Caxias do Sul (Figura 1b) está localizada na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, com sua área urbana situada a uma altitude média de aproximadamente 750 metros. No entanto, altitudes variando de 30 a 1.000 metros são identificadas no município. As características geomorfológicas da região do Planalto das Araucárias, nas Unidades Geomorfológicas Planalto dos Campos Gerais e da Serra Geral (IBGE, 1986), não propiciam a presença de rios caudalosos no município. Devido à maior influência dos sistemas tropicais marítimos, com os sistemas frontais sendo responsáveis pela maior

parte das precipitações (Rossato, 2011), combinados com os efeitos do relevo de altitude, a distribuição espacial e temporal das chuvas é irregular (Belladonna e De Vargas 2017), com variação anual entre 1.750 e 2.300 mm da região nordeste para a oeste do município, respectivamente.

Devido a essa combinação geomorfológica e climática, os 463.501 habitantes (IBGE, 2022) dependem do represamento dos pequenos córregos para garantir a regularização das vazões para seu abastecimento. As bacias hidrográficas, formadas a montante dos barramentos destinados a esse fim, são conservadas pela Lei Municipal n.º 246 de 2005 (Caxias do Sul, 2005), que regula e restringe a ocupação do solo para diversos usos. O manancial do arroio Mulada (Figura 1c), embora atualmente não tenha barragem e suas águas não sejam destinadas ao uso público urbano, é considerado reserva hídrica para a cidade, sendo

sua bacia hidrográfica é igualmente preservada por essa lei municipal.

A bacia do Mulada possui uma área de 110,62 km² e um perímetro de 53,68 km. As cotas mais elevadas são observadas junto ao divisor de águas, próximas aos 950 metros, enquanto a mínima é verificada no exutório, a 704 metros, resultando em uma declividade de 18,25 m/km. Os usos e ocupações atuais do solo consistem em campo (70,28%), mata (28,07%), agricultura (0,83%) e corpos hídricos (0,68%), evidenciando uma forte caracterização rural. A maior parte da área da bacia do Mulada apresenta vulnerabilidade alta à contaminação da água subterrânea (De Vargas, Belladonna, Sgorla, & Sbabo, 2022), muito embora a ocupação antrópica seja muito baixa, com apenas 0,14% da sua área coberta por edificações esparsas.

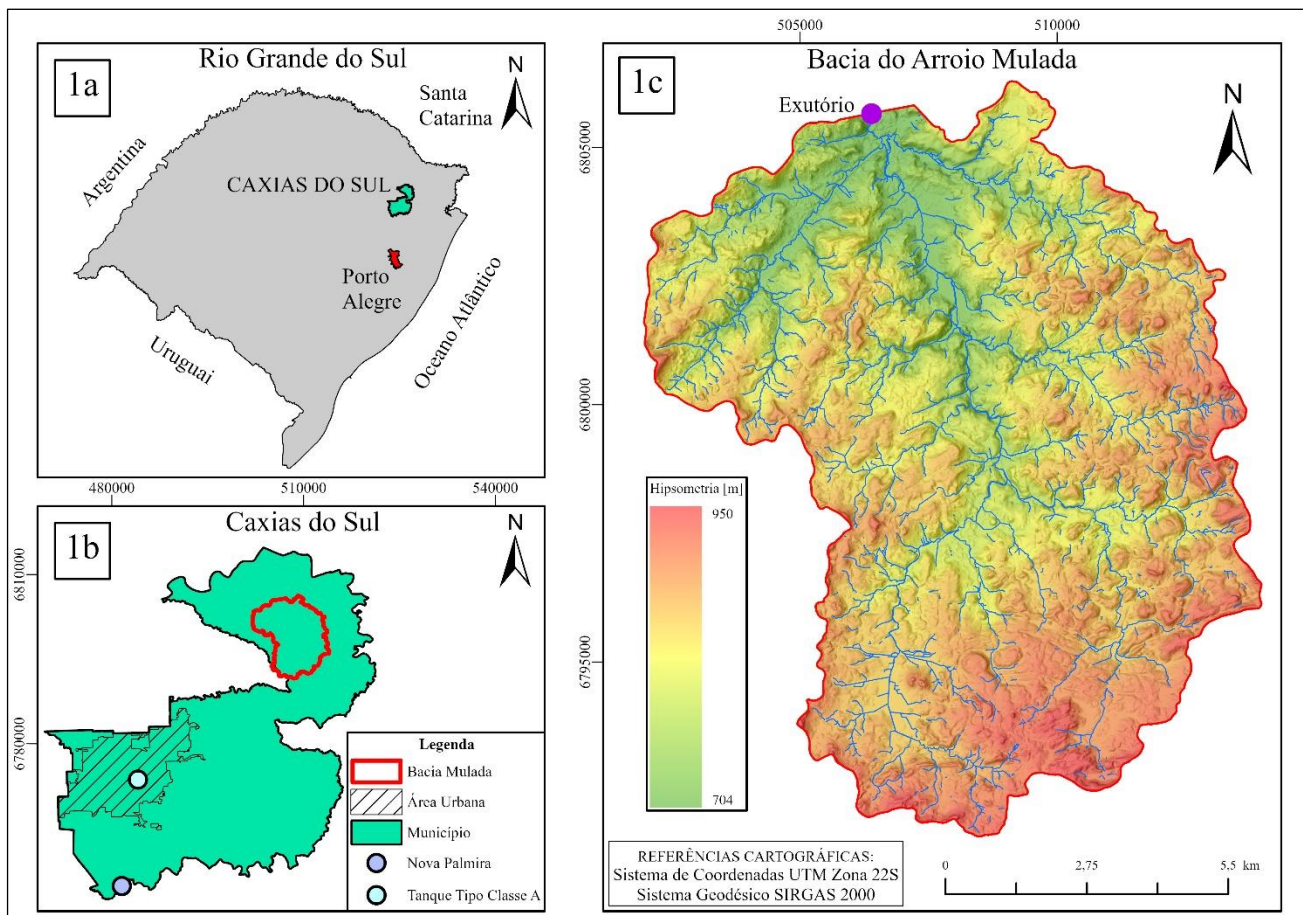


Figura 1: Localização da área de estudo.

Determinação da vazão média

A vazão média (Q_{med}) representa a máxima disponibilidade de água que a bacia pode fornecer. No caso da bacia do Mulada, essa vazão foi determinada por meio da regionalização da

vazão média utilizando o método da vazão específica (Paiva e Paiva 2016). Para isso, foram utilizados os dados das vazões médias mensais de janeiro de 1943 até dezembro de 2022 da Estação Fluviométrica 87160000 (ANA, 2023), que

monitora o Rio Caí na localidade de Nova Palmira, em Caxias do Sul, localizada nas coordenadas geográficas $-29,3356^\circ$ e $-51,1819^\circ$ (Figura 1b). Essa estação é representativa para a região, pois monitora uma bacia hidrográfica com características edafoclimáticas similares à bacia do arroio Mulada. O hidrograma das vazões médias mensais da Estação 87160000 é apresentado na Figura 2.

A demanda que pode ser explorada da bacia é expressa como uma porcentagem da vazão média, geralmente com valores entre 50% e 70%, e raramente excede 90% devido às perdas por

evaporação (Paiva & Paiva, 2016). De forma geral, a demanda não é inferior a 50% da vazão média, pois para essa faixa de demanda um pequeno aumento no volume útil do reservatório resultaria em um significativo aumento na demanda, sendo economicamente recomendável elevar o volume do reservatório. Por outro lado, demandas superiores a 70% da vazão média geralmente estão em uma situação em que um pequeno aumento na vazão regularizada requer um grande aumento do volume útil do reservatório, o que na maioria dos casos é antieconômico.

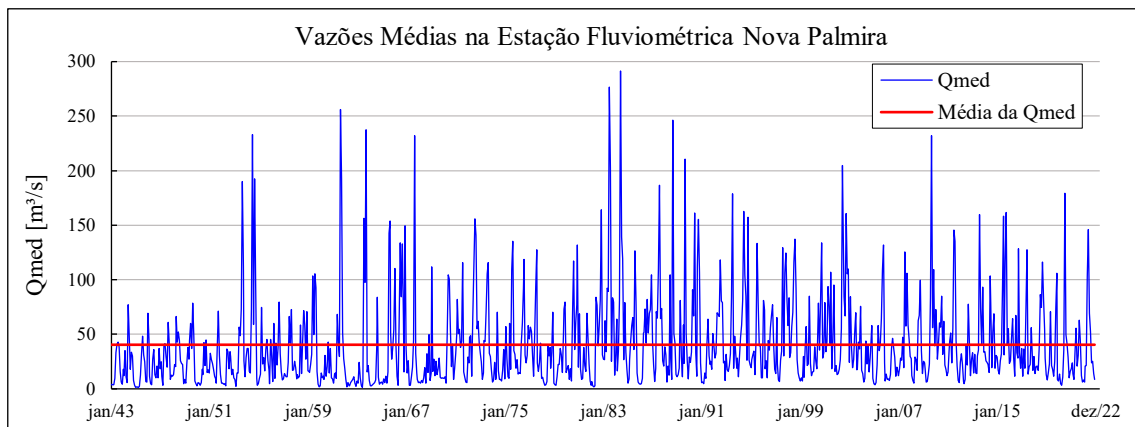


Figura 2: Vazão média mensal histórica da estação fluviométrica Nova Palmira (87160000).

Evaporação

A evaporação é uma variável importante na composição do balanço hídrico dos reservatórios formados pelos barramentos. Neste estudo, foram utilizados os registros obtidos de medição evaporimétrica direta em um tanque evaporimétrico Tipo Classe A, gerenciado pelo Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMA E) de Caxias do Sul.

As medições de evaporação são superiores no tanque Classe A do que no ambiente natural, pois a taxa de evaporação medida no tanque é ajustada para levar em conta a redução causada pelos animais que podem beber a água, pelo calor armazenado no tanque em comparação aos reservatórios e pela escala da área superficial do equipamento com relação àquelas dos lagos. Um coeficiente do tanque (k_p) é usado para ajustar a evaporação medida em um tanque Classe A para refletir a evaporação em um reservatório (Lowe, Webb, Nathan, Etechells, & Malano, 2009). Nas medições do tanque gerenciado pelo SAMA E é aplicado um k_p de 0,70.

O instrumento está instalado junto às coordenadas geográficas $-29,165654$ e $-51,162536$ (Figura 1b). Os registros foram obtidos entre o

período de janeiro de 2019 e dezembro de 2022, e a média mensal é apresentada na Figura 3.

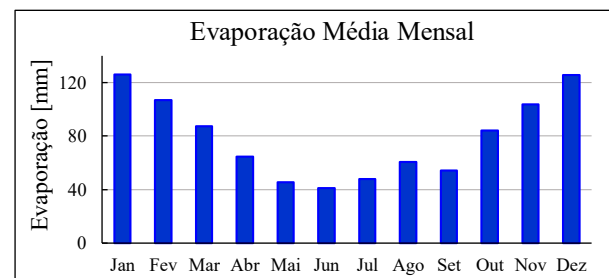


Figura 3: Evaporação média mensal no tanque evaporimétrico do SAMA E em Caxias do Sul.

Relevo

A análise topográfica da bacia desempenha uma parte fundamental do estudo. O modelo digital de elevação permite quantificar a cota, área e volume de alague, bem como o perfil transversal do terreno onde está prevista a construção da barragem. Para determinar as elevações topográficas na bacia, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica do arroio Mulada, elaborado a partir de aerolevantamento de dados altimétricos por sensor laser Light Detection And Ranging (LiDAR), com uma captura mínima de 2 pontos por m^2 e uma *ground sample distance*

(GSD) de 11 cm. O aerolevanteamento foi realizado em 2021 por uma empresa especializada contratada pelo SAMAE.

Método da Simulação da Operação

O método utilizado para a determinação das vazões regularizadas para o futuro lago do Mulada foi o Método da Simulação da Operação. Este método calcula as mudanças no volume contido em um lago através de um balanço hídrico. Parte-se da premissa de que inicialmente (em t_0) o reservatório está cheio. No primeiro mês (t_1), somam-se os volumes de entrada no lago e subtraem-se as perdas, ou seja, as saídas. O balanço é a diferença entre os volumes afluentes e as perdas, conforme descrito na Equação (1).

$$S_{t+1} = (S_t + Q_t) - (Y + E_t + Q_{vertida})$$

Equação (1)

Onde, S_{t+1} é o armazenamento [hm^3] contido no lago no final do período t [mês]; S_t é o armazenamento no lago no início do tempo t [hm^3]; Q_t corresponde à soma de todas as vazões afluentes [$\text{hm}^3/\text{mês}$] durante o tempo t ; Y é a vazão regularizada [$\text{hm}^3/\text{mês}$]; E_t é a perda por evaporação do lago [hm^3] para cada período t ; $Q_{vertida}$ é a vazão [$\text{hm}^3/\text{mês}$] que pode extrapolar o volume máximo normal do reservatório e sair pelo seu respectivo vertedor no período t .

A evaporação para cada t é a média mensal das evaporações, sendo que os valores são repetidos para cada mês ao longo dos 80 anos de dados, devido à falta de dados históricos para essa componente da equação. Esses valores de evaporação são relacionados com a área superficial do reservatório para cada altura da lâmina d'água no lago. Esse ajuste é dado pela função linear oriunda da plotagem área x volume.

No método utilizado, a $Q_{vertida}$ faz os ajustes matemáticos para qualquer t , sempre que em S_{t+1} o volume do reservatório for superior ao máximo normal. Por exemplo, quando, pelo método, o reservatório em $t+1$ estiver com o volume acima do máximo (está vertendo), o modelo reduz o volume para o seu valor máximo. Adicionalmente, o volume útil em S_{t+1} também é matematicamente corrigido para não ser inferior a zero. O volume útil [hm^3] corresponde ao volume máximo normal do reservatório menos o seu volume morto [hm^3]. Para esse efeito, o volume morto foi considerado como o volume correspondente aos primeiros 10 metros da profundidade do reservatório.

Esse método permite obter as probabilidades de falha para cada volume útil

simulado. Também, permite simular diversas demandas, o que permite estabelecer restrições (acionamento) no fornecimento de água (regra de operação). Uma falha é considerada sempre que o volume útil do lago (S_t) for menor que a vazão regularizada (vazão retirada/demanda, Y) [$\text{hm}^3/\text{mês}$].

Resultados e discussão

Vazão média da bacia do Mulada

A partir da regionalização, foi determinada a média histórica da vazão média (Figura 4) do arroio Mulada em 2.204 L/s. A Tabela 1 evidencia a faixa de vazões que podem ser explotadas da bacia do Mulada. Nela, observa-se que a bacia tem condições de fornecer entre 1.100 L/s, correspondendo a 50% da vazão média, e 1.540 L/s, equivalente a 70% da vazão média, para o abastecimento do município.

Tabela 1: Porcentagens da vazão média da bacia do Mulada.

% da $Q_{média}$	m^3/s	$\text{hm}^3/\text{mês}$
100%	2,20	5,79
95%	2,09	5,50
90%	1,98	5,21
85%	1,87	4,92
80%	1,76	4,63
75%	1,65	4,34
70%	1,54	4,06
65%	1,43	3,77
60%	1,32	3,48
55%	1,21	3,19
50%	1,10	2,90
45%	0,99	2,61
40%	0,88	2,32

Pela análise do gráfico da curva de permanência das vazões médias nos 80 anos avaliados (Figura 5), essas vazões correspondem a uma permanência de 63% e 48% do tempo, respectivamente. Nestas condições, caso a demanda do município for de 1.100 L/s, a bacia garante esse volume durante 63% do tempo, sendo que no restante do tempo (37%) as vazões ofertadas à população serão inferiores. Da mesma forma, considerando a demanda municipal de 1.540 L/s, a bacia garante o fornecimento desse volume somente durante 48% do período. Em 80 anos, a população sofrerá com restrição hídrica por mais da metade deste tempo. Uma condição em que as vazões ofertadas ficam abaixo daquelas demandadas representa escassez hídrica e, conseqüentemente, uma insegurança hídrica no abastecimento. Essa incompatibilidade entre a oferta hídrica da bacia com a possível demanda de

50% e 70% da vazão média pode ser suavizada com a implantação de reservatório capaz de regularizar

as vazões e permitir uma maior garantia de fornecimento.

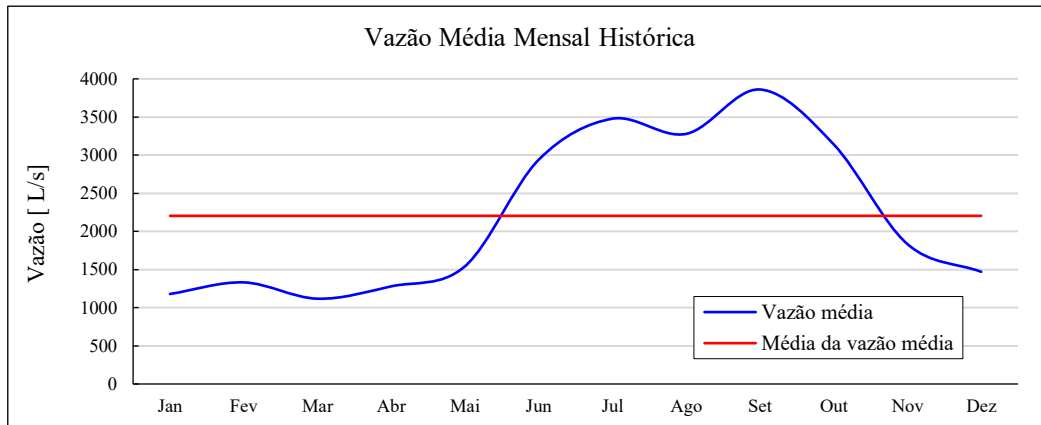


Figura 4: Vazões médias mensais históricas do arroio Mulada.

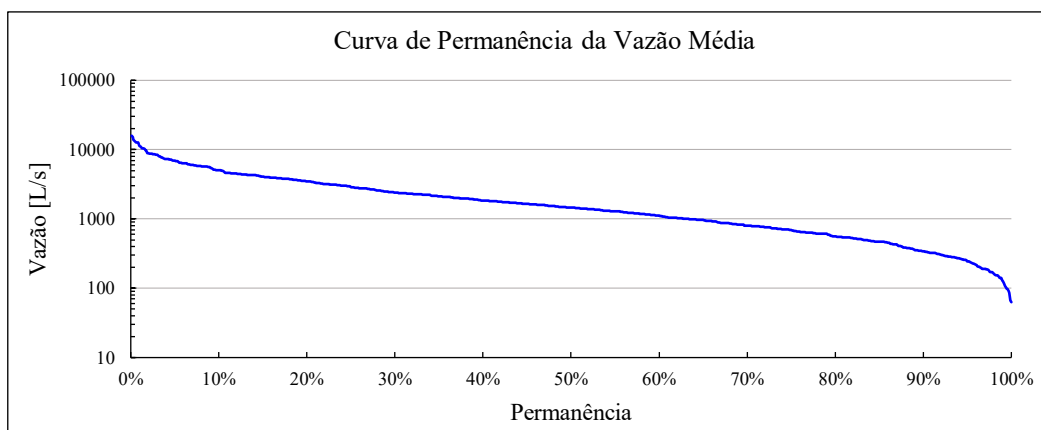


Figura 5: Curva de permanência da vazão média do arroio Mulada.

Curvas cota x área x volume

As características geomorfológicas do local influenciam diretamente os volumes de armazenamento e as extensões das áreas alagadas. A Figura 6 ilustra como o volume do futuro reservatório e sua área alagada correspondente variam em função das diferentes elevações. Por exemplo, nos primeiros 20 metros (até a cota de 724 m), o reservatório alcança um volume de 14,25 hm³, cobrindo uma área de superfície de 240,64 hectares. Nessa elevação, a capacidade de armazenamento relativamente baixa do reservatório pode desencorajar os tomadores de

decisão a prosseguir com o projeto. Por outro lado, a Figura 6 também revela que, ao atingir um volume de 110,33 hm³ para uma profundidade de 40 metros (na cota de 744 m), a área alagada se estende por 679,03 hectares. No entanto, empreendimentos de barragens que atinjam essa cota podem ser desfavoráveis devido aos custos financeiros, sociais e ambientais significativos, especialmente relacionados às necessárias desapropriações de terras para a formação do lago e a preservação de áreas de proteção permanente adjacentes.

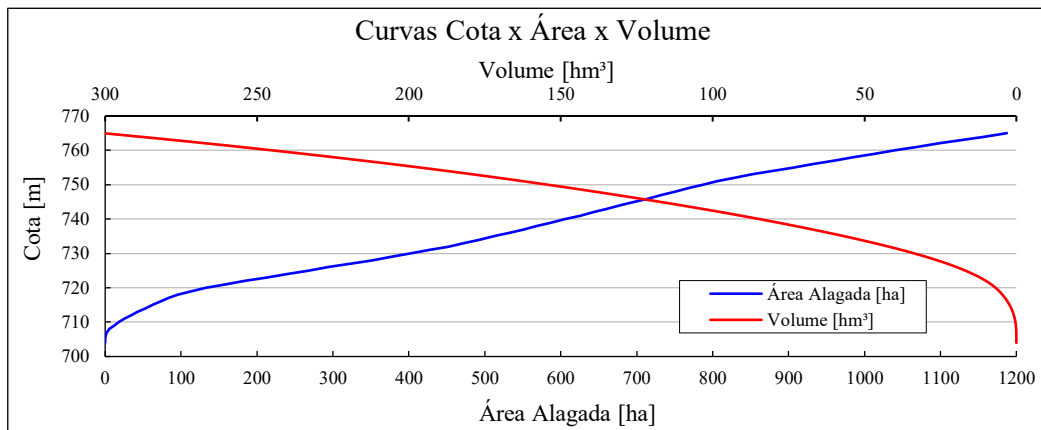


Figura 6: Curvas cota x área x volume do futuro reservatório do arroio Mulada.

Determinação das curvas de regularização

A partir do Método da Simulação da Operação e do ajuste linear (Figura 7) para cálculo das evaporações médias mensais, que corrige o

volume evaporado do reservatório para cada tempo t , foi possível gerar as curvas de regularização de reservatório de diferentes profundidades formado pelo barramento do arroio Mulada.

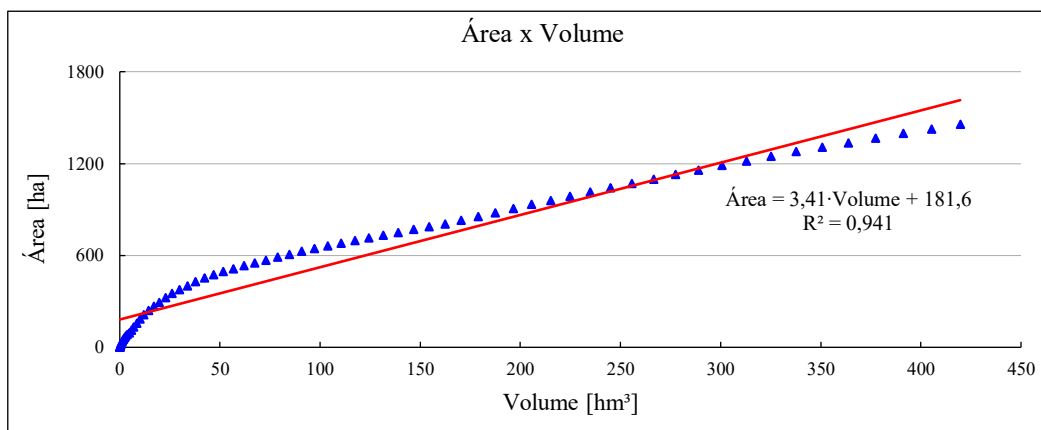


Figura 7: Ajuste linear da variação da área em função do volume do futuro reservatório do arroio Mulada.

As Figuras 8 e 9 apresentam as garantias de oferta de água em diferentes níveis e volumes do reservatório projetado para atender diversas demandas. Através do Método de Simulação da Operação, fica evidente que, para garantir uma demanda constante de 1.540 L/s durante 100% do tempo, o reservatório precisa ter uma profundidade igual ou superior a 47,5 m, armazenando mais de 162,70 hm³. Sob essas condições, a área alagada pode ultrapassar os 806 hectares, representando 7,3% da área total da bacia do Mulada. Para garantir essa vazão durante 90% do tempo, a altura do reservatório deve ser de 28,5 metros, armazenando 44,8 hm³ e alagando 463 hectares (equivalente a 4,1% da bacia). Em todas as quatro garantias simuladas, observa-se um comportamento assintótico da altura e do volume do reservatório conforme a demanda se aproxima

de 1.600 L/s. Isso sugere que, para alturas e volumes maiores do reservatório, há um aumento marginalmente insignificante na quantidade de água que pode ser disponibilizada. Nessas condições, construir uma barragem maior seria economicamente inviável.

A Figura 10a mostra uma projeção do lago para as cotas de 732,5 m (com 28,5 m de profundidade) e 751,5 m (com 47,5 m de profundidade) para a barragem planejada, que será construída perto do exutório da bacia, cujo perfil longitudinal do terreno é apresentado na Figura 10b.

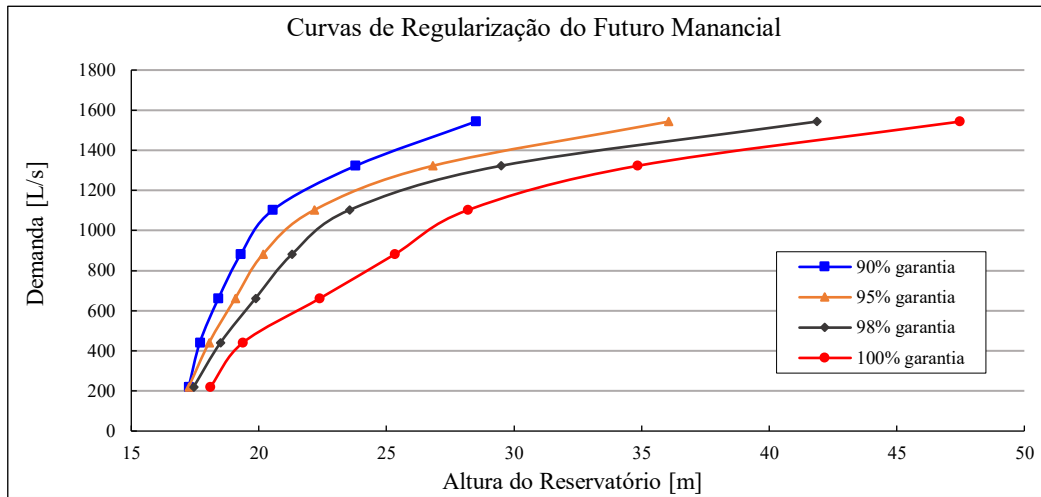


Figura 8: Curva de regularização: demanda x altura do lago.

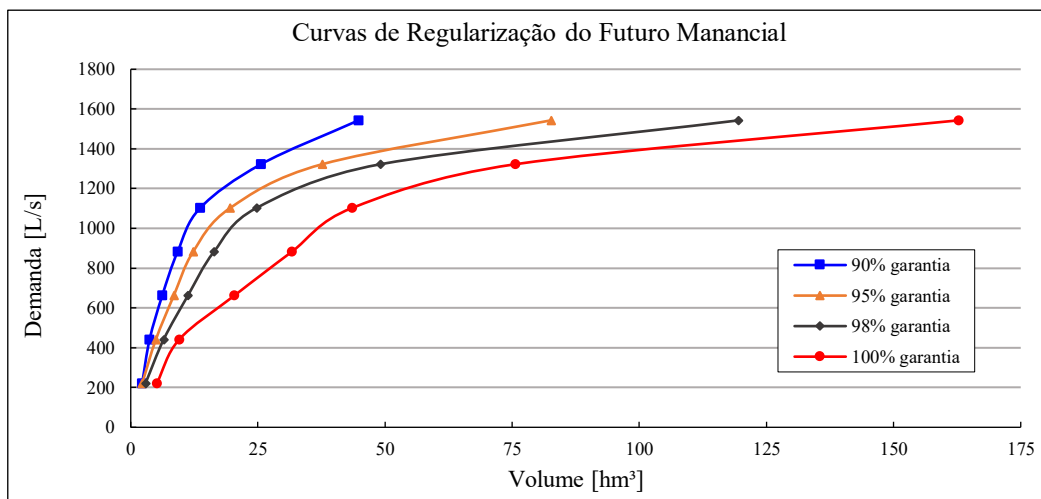


Figura 9: Curva de regularização: demanda x armazenamento do lago.

Para o período de 80 anos de registros utilizado neste estudo, as garantias de oferta de água aumentam substancialmente quando as vazões do arroio Mulada são regularizadas pela construção de uma barragem. Os resultados mostram que garantias de 90 a 100% do tempo

podem ser mantidas para o fornecimento de 1.540 L/s com a regularização das vazões, diferentemente da condição sem o barramento, quando a bacia do Mulada garante essa vazão somente durante 48% do tempo.

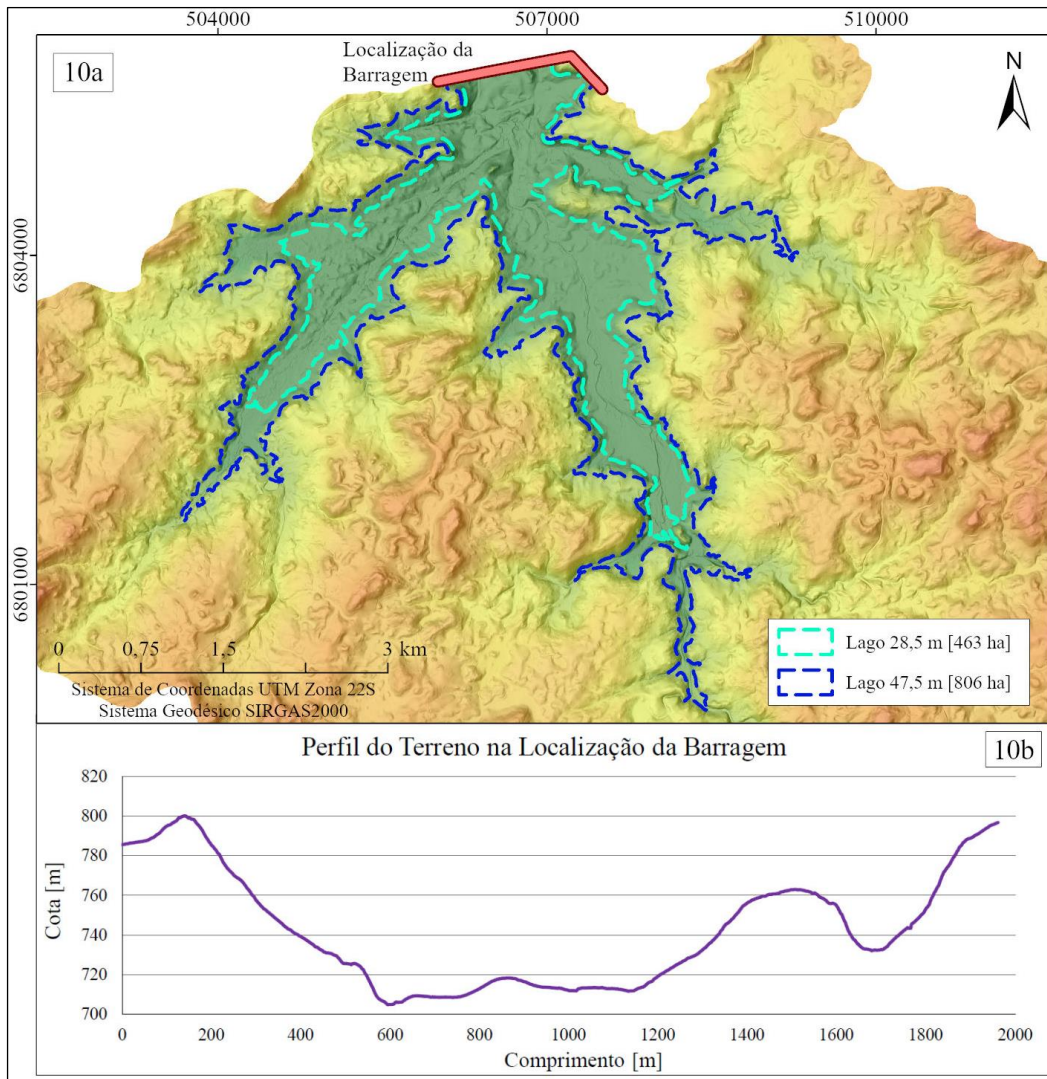


Figura 10: Previsão de área de alague para o reservatório nas cotas 732,5 m e 751,5 m.

Conclusões

Este estudo destacou a relevância da construção de barragens para regularizar as vazões de um arroio situado na região do Planalto das Araucárias, em Caxias do Sul, RS. Os reservatórios formados pelo represamento do arroio Mulada apresentam dimensões consideráveis em relação ao tamanho da bacia hidrográfica, uma característica atribuída à geomorfologia local.

O dimensionamento das curvas de regularização foi conduzido por meio do Método da Simulação da Operação. A equação de balanço hídrico empregada na simulação representou de forma adequada as entradas e saídas do sistema. No entanto, uma limitação observada na equação foi a ausência da componente infiltração. A falta de dados na literatura sobre a infiltração de lagos nas Unidades Geomorfológicas Planalto dos Campos Gerais e da Serra Geral impediu sua inclusão na análise integrada à equação, evidenciando assim

uma lacuna que requer abordagem em estudos futuros.

Os resultados deste estudo reforçam a importância das barragens na criação de reservatórios para o abastecimento público urbano. Ao formar um lago com 28,50 metros de profundidade, as garantias de oferta do arroio Mulada (1.540 litros por segundo) aumentam de 48% para 90% do tempo. No entanto, o estudo também demonstrou que, para essa profundidade, o reservatório armazena 44,8 hm³ e alaga uma área de 463 hectares. Essa condição sugere a necessidade de uma avaliação preliminar dos custos ainda na fase de planejamento desse tipo de empreendimento, o que está além do escopo deste artigo, mas evidencia a importância de estudos financeiros e econômicos futuros.

Agradecimentos

Os autores expressam gratidão pelo apoio fornecido pelo Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul durante a realização da pesquisa. Adicionalmente, agradecemos pela disponibilidade dos dados e pelo fornecimento do produto LiDAR.

Referências

- ANA, (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). (2023). HidroWeb. Retrieved April 9, 2023, from ANA website: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>
- Belladonna, R. (2023). *The opportunity cost of watershed conservation: the decisions on urban water supply management* (Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil). Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10183/264006>
- Belladonna, R., & De Vargas, T. (2017). Space-time precipitation distribution and the relevance of the orography of Caxias do Sul, Brazil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69/3, 607–620. <https://doi.org/https://doi.org/10.14393/rbcv69n3-44353>
- Belladonna, R., De Vargas, T., Dalcin, A. P., Stefanon, A. P., & Marques, G. F. (2023). Improving small watersheds socioeconomic indicators with nighttime light satellite data to support water management decisions. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(3), 1436–1449. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1436-1449>
- Caxias do Sul. *Lei Complementar nº 246, de 6 de dezembro de 2005.*, Pub. L. No. Lei Complementar nº 246/2005, 48 (2005). Brazil: Caxias do Sul.
- De Vargas, T., Belladonna, R., Sgorla, V., & Sbabo, L. C. (2022). Vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea como alicerce na gestão do uso do solo em bacias de captação. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(2), 710–720. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p710-720>
- Gould, B. W. (1961). Statistical methods for estimating the design capacity of dams. *Journal of the Institution of Engineers*, 33(12), 405–416.
- IBGE, (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). (1986). *Folha SH.22 Porto Alegre: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra*. Rio de Janeiro, Brazil.
- IBGE, (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). (2022). Panorama. Retrieved August 30, 2023, from <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/caxias-do-sul/panoram>
- Lowe, L. D., Webb, J. A., Nathan, R. J., Etchells, T., & Malano, H. M. (2009). Evaporation from water supply reservoirs: An assessment of uncertainty. *Journal of Hydrology*, 376(1–2), 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.037>
- Mays, L. W., & Tung, Y.-K. (1992). *Hydrosystems engineering and management*. New York: McGraw-Hill.
- McMahon, T. A., & Mein, R. G. (1978). *Reservoir capacity and yield*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Paiva, J. B. D. de, & Paiva, E. M. C. D. de. (2016). *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre, Brazil: ABRH.
- Policena, G. R., Belladonna, R., Ballardin, S., Dal Bosco, V., & De Vargas, T. (2023). Estimativa do custo de implantação de barragem de saneamento e sistema de adução : uma previsão para o abastecimento público de Caxias do Sul , RS. *7º Congresso Internacional de Tecnologias Para o Meio Ambiente*, 9. Bento Gonçalves, Brazil.
- Rippl, W. (1883). The capacity of storage reservoirs for water supply. *Institution of Civil Engineers*, 71, 270–278.
- Rossato, M. S. (2011). *Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade , tendências e tipologia* (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Retrieved from <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/32620/000782660.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tsutiya, M. T. (2005). *Abastecimento de água* (2nd ed.). São Paulo, Brazil: USP.