

DETECÇÃO DE FALHAS NO SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIOS DE PEQUENAS BARRAGENS: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM BREJO GRANDE - MINAS GERAIS

Igor Gonzaga Martins Santos¹; Paloma Avila Junges²; André Carlos Silva³; Roberto Dimas dos Santos⁴; Adriano Silva Bastos⁵ & Carlos Barreira Martinez⁶

RESUMO – Os reservatórios se constituem numa das principais formas de moldar o ciclo hidrológico ao armazenar água para usos futuros. Nesse contexto, pequenos reservatórios desempenham papel estratégico no abastecimento de água em comunidades no mundo todo e em especial no Brasil, uma vez que, aumentam a disponibilidade hídrica durante o período de estiagem. Para que isso aconteça é fundamental se ter maior conhecimento dos diferentes processos que interferem a dinâmica hidráulica nessas estruturas. O objetivo desta investigação foi apresentar um procedimento metodológico para que, a partir do balanço hídrico, seja possível detectar eventuais falhas no sistema de captação de água da barragem Brejo Grande no município de Paraisópolis, Minas Gerais. Para tanto, associada a metodologia de balanço hídrico, foi utilizado o software GoldSim para identificar a probabilidade de o nível do reservatório atingir a cota de restrição operativa de acordo com a variação da vazão captada pelo sistema de bombeamento. Como resultado foi possível construir um gráfico de probabilidades versus vazão considerando a faixa nominal de operação da Estação de Tratamento de Água – ETA. Para o cenário de demanda de vazão acima de 110 m³/h a probabilidade de o nível do reservatório atingir o nível mínimo operacional torna-se acentuado indicando, assim, que o município necessita prospectar demais pontos de disponibilidade hídrica para o abastecimento público de água.

ABSTRACT – Reservoirs are one of the main ways to shape the hydrological cycle by storing water for future uses. In this context, small reservoirs play a strategic role in water supply in communities around the world and especially in Brazil, since they increase water availability during the dry season. For this to happen, it is fundamental to have a better knowledge of the different processes that interfere with the hydraulic dynamics in these structures. The objective of this research was to present a methodological procedure to detect possible failures in the water catchment system of the Brejo Grande Dam in the municipality of Paraisópolis, Minas Gerais, based on the water balance. For this, associated with the water balance methodology, the GoldSim software was used to identify the probability of the reservoir level reaching the level of operational restriction according to the variation of the flow captured by the pumping system. As a result, it was possible to build a probability versus flow graph considering the nominal range of operation of the Water Treatment Plant - WTP. For the scenario of demand flow above 110 m³/h, the probability of the reservoir level reaching the minimum level of operation becomes accentuated, thus indicating that the city needs to prospect other points of water availability for public water supply.

Palavras-Chave – Pequenos reservatórios, Balanço hídrico, GoldSim.

1) Universidade Federal de Itajubá - gonzaga.ehd@gmail.com – (12) 987019637

2) Universidade Federal de Itajubá - palomajunges@outlook.com – (31) 983909303

3) Universidade Federal de Itajubá - andrecsilva58@gmail.com – (12) 98816-6408

4) Universidade Federal de Itajubá - robertosantosjr92@gmail.com – (35) 999498482

5) Universidade Federal de Itajubá - adriano.bastos@unifei.edu.br – (35) 98448 3133

6) Universidade Federal de Itajubá - cmartinez@unifei.edu.br – (31) 99991-5275

INTRODUÇÃO

No Brasil, milhões de pessoas dependem de barragens para obter água em condições adequadas, em termos de quantidade e qualidade, localização e tempo, o que torna as barragens elementos de infraestrutura importantes para o desenvolvimento sustentável (ANA, 2017). A Comissão de Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) tem atualmente, no seu Registro Mundial, cadastradas cerca de 40.000 barragens com pelo menos 15 metros de altura acima da fundação. Contudo, o número de barragens de menores dimensões não está contabilizado, mas é muito grande (ANA, 2017). A Resolução CNRH n° 143 de 10 de julho de 2012 classifica as barragens para acumulação de água no país quanto ao volume do seu reservatório. A barragem é considerada pequena quando o reservatório é igual ou inferior a 5 milhões de metros cúbicos (CNRH, 2012). O planejamento e a operação dessas estruturas dependem, principalmente, da previsão de vazões afluentes, que resultará nas estimativas de volume disponível no futuro. Essa ação pode ser otimizada através de modelo hidrológico, como por exemplo, balanço hídrico. Pinheiro (2011) define em linhas gerais o balanço hídrico como a aplicação da equação da continuidade de massas, quando a matéria em análise é a água. O presente artigo visa, a partir do balanço hídrico, juntamente com a utilização do software GoldSim detectar eventuais falhas na captação de água no reservatório da barragem Brejo Grande. A investigação será guiada pela vazão de projeto da Estação de Tratamento de Água – ETA, sabendo que a barragem é um importante ativo no abastecimento público do município de Paraisópolis em Minas Gerais. Para isso, o estudo compreende o cenário onde são utilizados dados hidrológicos e meteorológicos secundários disponibilizados em órgãos públicos, batimetria do reservatório e levantamento topográfico do local a partir metodologias consagradas na literatura e abordadas, por exemplo, nos trabalhos de Searcy *et al.* (1960), Villela e Mattos (1975), Pinto *et al* (1976), Chow *et al* (1988), Tucci (1993) e Pinheiro (2011).

MATERIAL E MÉTODO

Caracterização da Área de Interesse

A barragem Brejo Grande localiza-se em Paraisópolis em Minas Gerais. A principal forma de acesso, a partir do município, se dá pela rodovia estadual MG – 173 sentido São Bento do Sapucaí. A estrutura tem objetivo de acumular água para abastecimento público e atualmente é gerenciada pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Paraisópolis – SAAE. Encontra-se fundada na elevação 1.407 m nas coordenadas UTM, Longitude 416269,47 e Latitude 7502227,84. A área de contribuição do reservatório é 1,23 km². A bacia hidrográfica é majoritariamente coberta por vegetação densa. A Figura 1 exhibe a localização do empreendimento em relação a rede de drenagem.

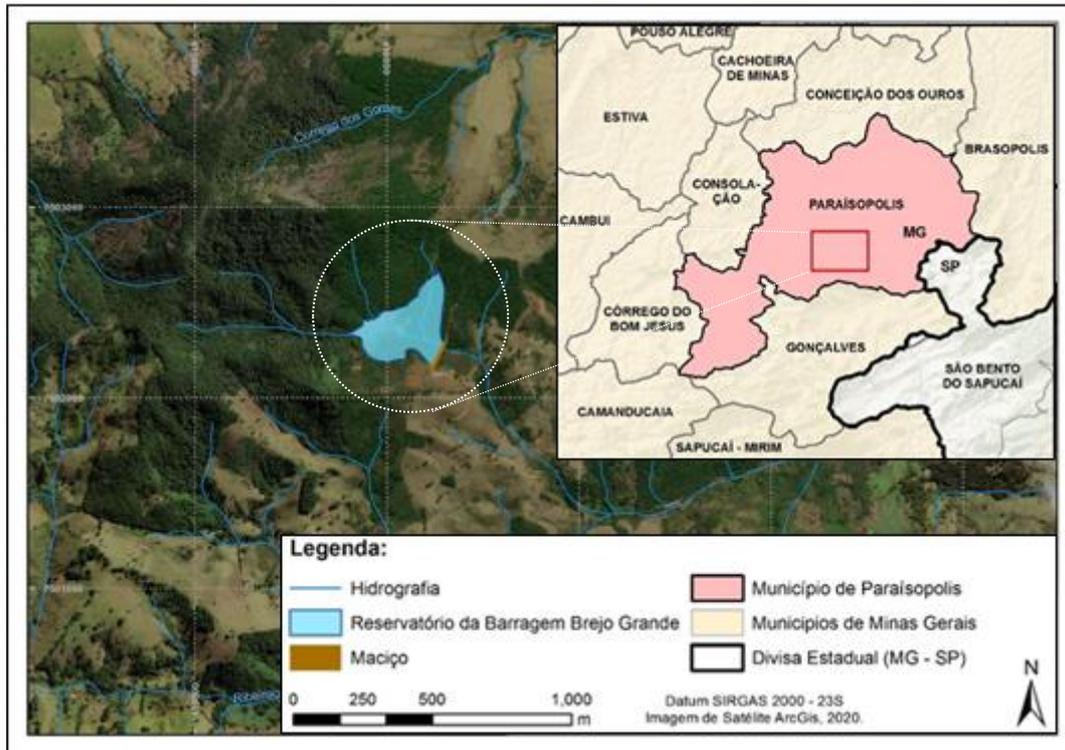


Figura 1 - Localização da barragem Brejo Grande. Fonte: Autor

Pluviologia

Como não existem medições de precipitação no local foram analisados os registros de precipitação de estações pluviométricas próximas ao empreendimento a partir do banco de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (ANA, 2022). Selecionou-se dados de doze estações pluviométricas sem interseção com divisores climáticos, sendo que as principais informações a respeito destas estações estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estações pluviométricas selecionadas.

Código	Estação	Município	Altitude (m)	Período de Dados	Coordenadas	
					Latitude	Longitude
2245070	Brasópolis	Brasópolis	880	De 01/01/1941 a 01/09/2021	-22,4714	-45,6219
2245011	São Bento Do Sapucaí	São Bento Do Sapucaí	895	De 01/04/1937 a 01/09/2021	-22,6858	-45,7353
2245077	Pouso Alegre	Pouso Alegre	831	De 01/07/1941 a 01/09/2021	-22,2447	-45,9597
2245083	São João De Itajubá	Itajubá	845	De 01/01/1966 a 01/09/2021	-22,3756	-45,4469
2245084	Bairro Do Analdino	Consolação	880	De 01/09/1966 a 01/09/2021	-22,5656	-45,8833
2245104	Sapucaí-Mirim	Sapucaí-Mirim	-	De 01/08/1975 a 01/09/2021	-22,7453	-45,7447
2246050	Cambuí (Csme)	Cambuí	900	De 01/07/1941 a 01/09/2021	-22,6078	-46,0394
2245029	Zé Da Rosa	Santo Antônio Do Pinhal	980	De 01/03/1943 a 01/05/2020	-22,7667	-45,700
2245090	Conceição Das Pedras	Conceição Das Pedras	536	De 01/08/1975 a 01/08/2021	-22,1622	-45,4581

Tabela 1 – Estações pluviométricas selecionadas.

2246127	Borda Da Mata	Borda Da Mata	-	De 01/08/1975 a 01/09/2021	-22,2772	-46,1639
2245024	Fazenda Capituva	Guaratinguetá	550	De 01/09/1957 a 01/10/2014	-22,75	-45,2333
2245054	Monteiro Lobato	Monteiro Lobato	680	De 01/05/1939 a 01/03/2020	-22,9333	-45,8333

Fonte: Adaptado de ANA (2022).

Sabendo a necessidade de trabalhar com séries contínuas as falhas de dados de precipitação foram preenchidas a partir do método da ponderação regional. A metodologia é comumente utilizada e pode ser observada nos trabalhos de Villela e Matos (1975), Pinto *et al.* (1976), Ometto (1981) e Tucci (1993).

Tendo em conta os períodos de registros diferenciados em cada estação, foi realizada a homogeneização das séries de dados pluviométricos para um período comum de análise, que permitisse mais adiante, a construção de isolinhas de igual precipitação para toda a área de interesse. Foi possível homogeneizar 49 anos de dados de todas as estações selecionadas compreendendo o período de 01/1968 a 12/2017. Após o preenchimento foi feita a análise e consistência dos dados do ponto de vista regional para validar a premissa de homogeneidade hidrológica entre as estações selecionadas. Para tal, foi empregado o método da dupla massa que conforme apresenta Searcy *et al.* (1960).

A partir da consistência dos dados das estações pluviométricas e considerando a necessidade de modelar o balanço hídrico do reservatório da barragem Brejo Grande definiu-se a estação Bairro do Analdino (2245084) como mais representativa para o objetivo dos estudos. A escolha se deu principalmente pela relação de proximidade com o empreendimento, altitude elevada e série contínua de dados no período homogeneizado. Os totais médios característicos após o preenchimento e consistência pelas metodologias apresentadas anteriormente estão ilustrados na Figura 2.

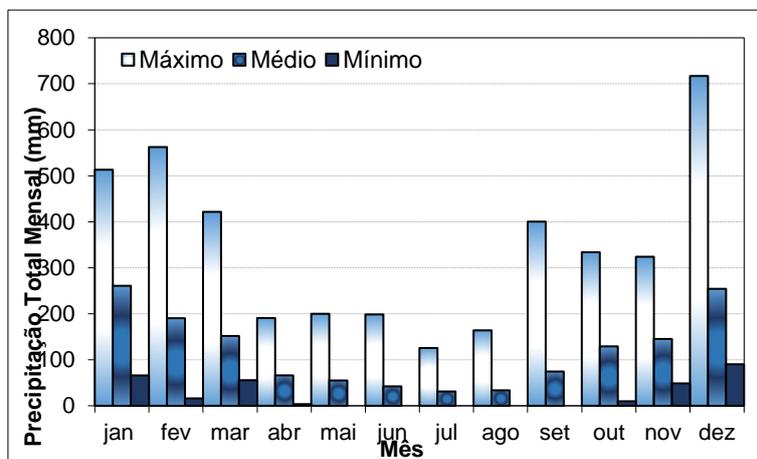


Figura 2 - Totais mensais de precipitação característicos na estação Bairro do Analdino. Fonte: Autor

Visando auxiliar o processo de regionalização de vazão, que será discutido adiante, foram espacializados sobre a área de interesse os dados de precipitação total anual média das estações pluviométricas no período homogeneizado. Para tal, foi utilizada a ferramenta QGIS 3.10, que é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de Código Aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU (QGIS, 2021). Para a construção das isolinhas foi utilizada a função IDW (*Inverse Distance Weighting*), que por definição implementa explicitamente o pressuposto de que as coisas mais próximas entre si são mais parecidas do que as mais distantes (JAKBO e YOUNG, 2006). O mapa de isoietas criado para a área da barragem Brejo Grande é apresentado na Figura 3.

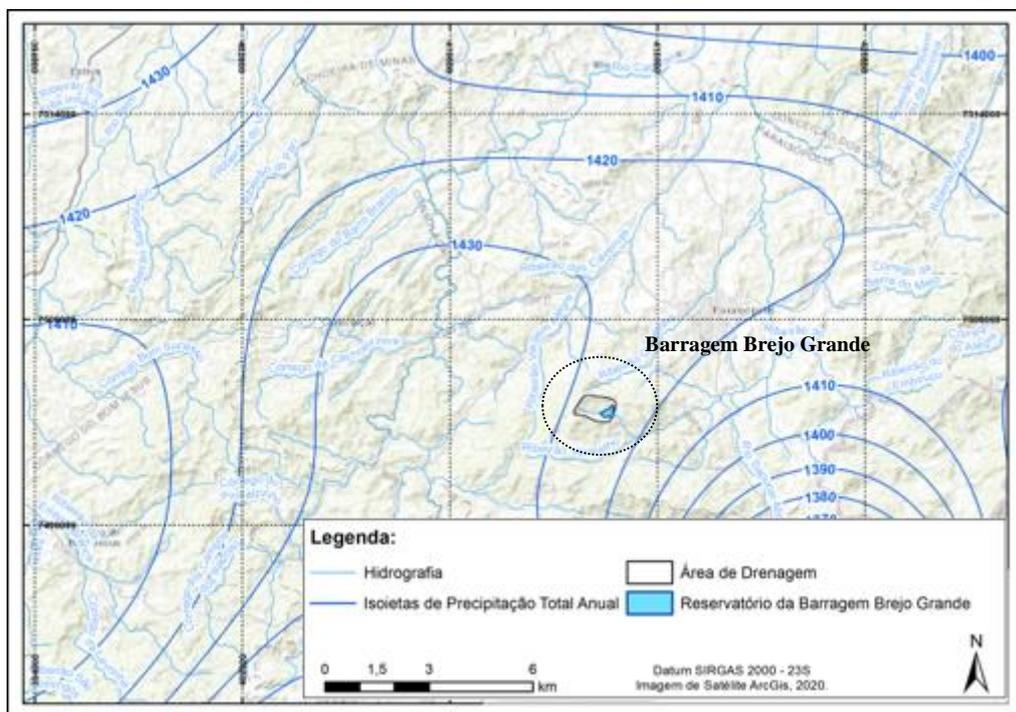


Figura 3 - Isolinhas de precipitação total anual média sobre a área da barragem Brejo. Fonte: Autor

Fluviologia

Não existem medições de vazão no curso de água afluente da barragem Brejo Grande, assim, optou-se pelo processo de regionalização de dados de vazões para compor a variável de contribuição superficial no balanço hídrico. Os dados de fluviometria foram obtidos a partir do inventário das estações fluviométricas da ANA (2022) localizadas no entorno da região de interesse. A estação fluviométrica mais representativa ficou definida com sendo Bairro do Analdino (61343000) por estar inserida na mesma bacia hidrográfica e possuir série de dados contínuos no período similar aos dados de chuva homogeneizados. A Tabela 2 apresenta as principais informações da estação fluviométrica.

Foi realizada a consistência de dados da estação de forma similar aos passos exemplificados no trabalho de Piscoya *et al.* (2013) onde são verificados erros grosseiros, fichas de campo, verificação das descargas líquidas e análise da separação das curvas-chaves.

A estação selecionada não possui falhas no período compatível ao homogêneo para as chuvas, a não ser para o mês de dezembro de 1988, que é comum as outras estações da região. O preenchimento do dado faltante foi feito pela média dos meses anteriores.

Tabela 2 - Estações fluviométricas analisadas.

Código	Estação	Município	Disponibilidade de Dados	Área de Drenagem (km ²)	Latitude	Longitude
61343000	Bairro Do Analdino	Paraisópolis	De 01/07/1941 a 01/11/2014	247	-22,5575	-45,8825

Fonte: Adaptado ANA (2022).

Após a consistência de dados foi possível definir a série de vazões mensais para o período de 11/1966 a 11/2014. De posse da estação base consistida foi empregado a regionalização de vazão média de longo termo abordada em Pinheiro (2011), onde diz que em uma região hidrologicamente homogênea, a vazão média de longo termo - MLT pode ser estimada com base no balanço hídrico simplificado das bacias hidrográficas. Dessa forma, a partir o mapa de isolinhas de precipitação total anual média e da metodologia supracitada foi possível, através da transferência de dados hidrológicos, construir a série de vazões mensais para bacia da barragem Brejo Grande.

Evaporação

Conforme mencionado, a barragem Brejo Grande está implantada na elevação 1407 m no sul de Minas Gerais e aliado ao fato da região possuir escassez de dados meteorológicos a evaporação da lâmina de água reservatório foi estimada a partir da equação proposta por Linacre (1977). A metodologia leva em consideração a altitude, temperatura média do ar, temperatura do ponto de orvalho e latitude, com aplicabilidade em diversos climas (Equação 1).

$$E = \frac{\frac{700(T_a + 0,006h)}{100 - \phi} + 15(T_a - T_d)}{(80 - T_a)} \quad (1)$$

Em que E é a evaporação em mm/dia; T_a a temperatura média do ar °C; h a altitude em metros; φ latitude em graus decimais e T_d a temperatura do ponto de orvalho em °C.

Foram utilizados dados da estação meteorológica Maria da Fé (A531) disponibilizados no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021). A estação foi selecionada por estar em patamares altos de elevação assim como a área de estudo (1280 m) e possui dados históricos de maio de 2007 a janeiro de 2022. A partir da aplicação da metodologia supracitada foi possível estimar a série de evaporação de lâmina de água média mensal conforme apresenta a Figura 4. Importante ressaltar que a optou-se pela média mensal pelo fato das falhas nos dados da estação.

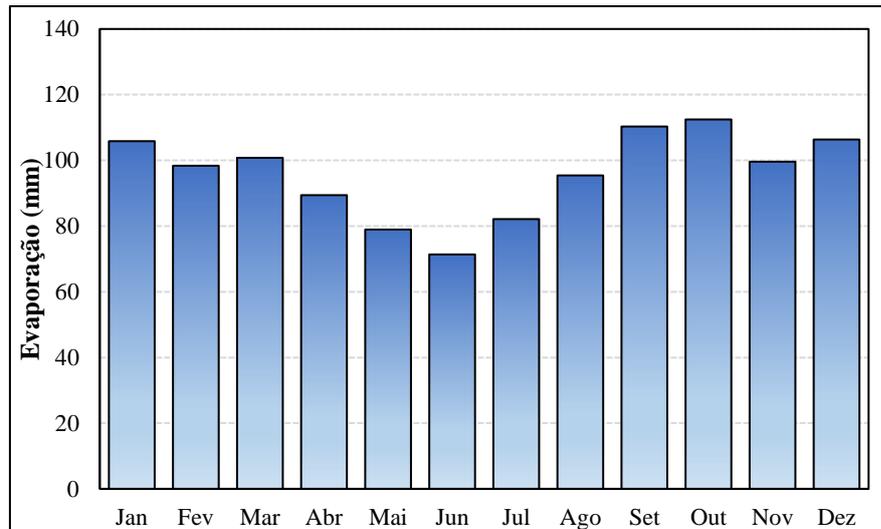


Figura 4 - Médias mensais totais de evaporação de lâmina de água na área de interesse. Fonte: Autor.

Balanço Hídrico

O modelo hidrológico construído para a detecção de eventuais falhas no sistema de captação de água da barragem Brejo Grande utilizou o conceito de balanço hídrico associado ao software GoldSim. De acordo com GoldSim Technology Group (2022), trata-se de um simulador de probabilidade múltipla que utiliza o método de Monte Carlo para as simulações de sistemas complexos. Segundo Wade (2014) o GoldSim é comumente utilizado na área da mineração, mas outros trabalhos mostram que também é apropriado para balanço hídrico.

No contexto do estudo, as principais entradas consideradas foram: (i) vazão afluyente; e, (ii) precipitação direta sobre o lago. Já as saídas consideradas foram: (i) vazão captada; e, (ii) evaporação direta do lago no passo de tempo mensal. Importante ressaltar que não é prevista vazão residual na estrutura. As principais características topográficas da área de estudo foram determinadas por levantamento topográfico realizado pelo SAAE - Paraisópolis em dezembro de 2021. A Figura 5 exibe o arranjo dos elementos lógicos do GoldSim e as informações características do reservatório da barragem Brejo Grande.

Na modelagem hidrológica foi utilizada a versão para estudantes e pesquisadores do software GoldSim e foram consideradas 1.000 realizações de Monte Carlo, dado que, maior número realizações aumenta a precisão do modelo. Para a modelagem foi admitido um horizonte de planejamento de 3 anos a partir de dezembro de 2021 e de acordo com SAAE - Paraisópolis (2022) a estação de tratamento de água – ETA opera em média com 162 m³/h. O GoldSim permite localizar e distribuir probabilisticamente as cotas atingidas nas realizações dos cenários de Monte Carlo, assim, foi avaliada a condição onde nível mínimo operacional foi atingido (El. 1388,6 m) para faixas de vazão até 162 m³/h.

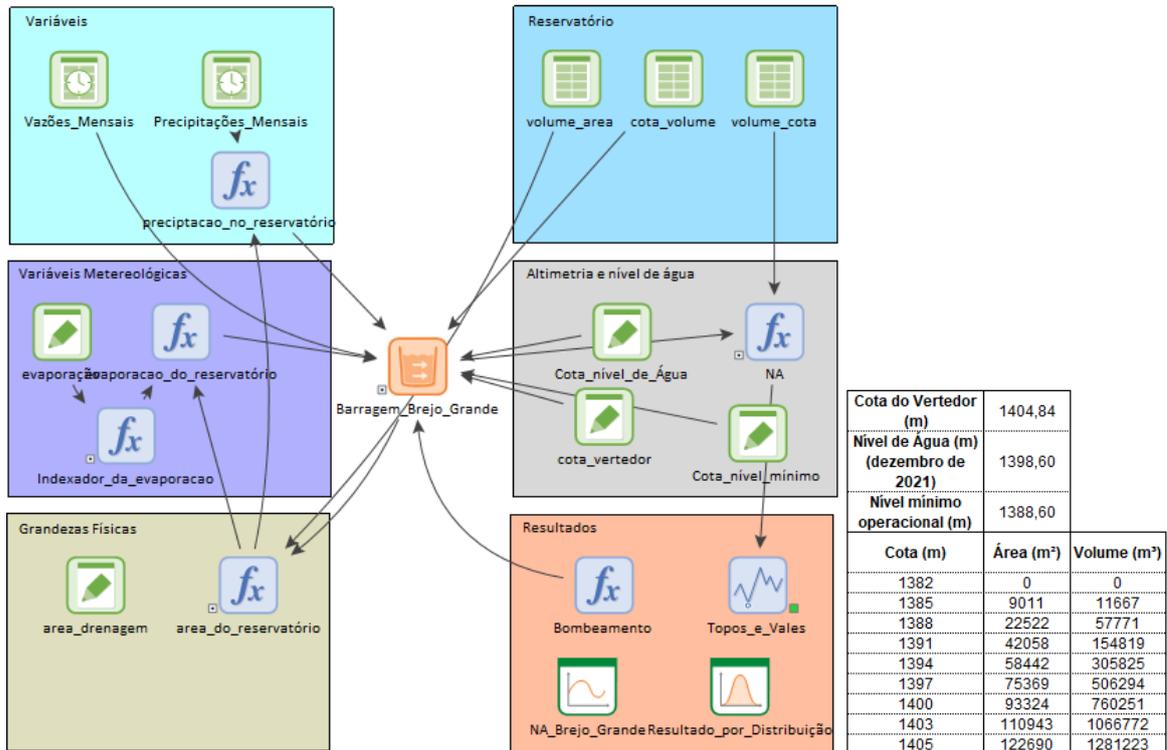


Figura 5 - Elementos lógicos do GoldSim e características da barragem Brejo Grande. Fonte: Autor

Resultados

Como resultado do estudo a Figura 6 apresenta o gráfico que relaciona a probabilidade de o nível do reservatório atingir o nível mínimo operacional da barragem (ocorrência de falha no sistema de captação de água) de acordo com variação da vazão captada.

Nesse sentido, é possível observar que se torna acentuada as chances de o sistema não conseguir captar água para vazões acima de 110 m³/h. Assim como, o reservatório da Barragem Brejo grande não oferece condições de abastecimento de água para a vazão nominal da ETA.

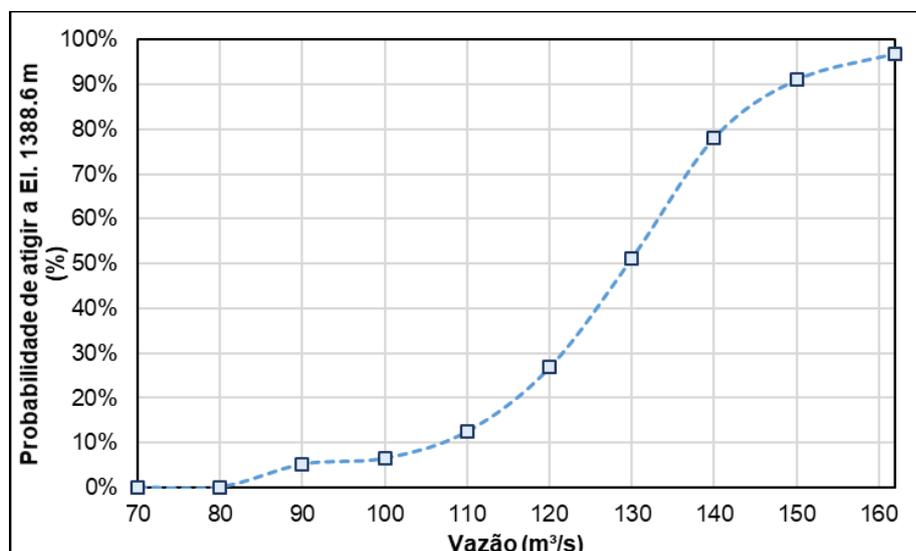


Figura 6 – Variação de nível para vazão média e nominal do reservatório da Barragem Brejo Grande.

Conclusão

O estudo de caso da Barragem Brejo Grande teve como objetivo avaliar, através do balanço hídrico e juntamente com o *software* GoldSim, as chances do reservatório se deplecionar até o nível mínimo operacional.

Como entradas foram considerados dados hidrológicos e meteorológicos públicos e dados altimétricos da estrutura. Além disso, a modelagem se deu na faixa nominal de vazão da ETA do município de Paraisópolis.

O GoldSim tem aplicabilidade em modelagens probabilísticas envolvendo variáveis estocásticas, como por exemplo, precipitação e vazão. Assim, diferente dos modelos determinísticos buscou-se identificar o comportamento do balanço hídrico através de milhares de realizações de Monte Carlo.

A partir dos diversos cenários para a variação de nível do reservatório da Barragem Brejo Grande o software, a partir da função de densidade de probabilidade, permitiu identificar a probabilidade de ocorrência para o cenário de nível mínimo operacional.

Dessa forma, foi possível construir um gráfico relacionando as chances de o reservatório atingir o nível mínimo operacional de acordo com a variação da vazão captada pela ETA de Paraisópolis. Para tal, concluiu-se que para vazões na ordem de 80 m³/h a probabilidade de o nível do reservatório atingir o nível mínimo de operação é baixa dentro do horizonte de planejamento de 3 anos.

Ainda nesse sentido, se a demanda para o abastecimento público for acima de 110 m³/h as chances do reservatório atingir a restrição operacional aumenta substancialmente até a faixa nominal considerada na modelagem. Assim, ocorrendo falhas no sistema de captação de água.

Importante ressaltar que o estudo utiliza dados secundários, dessa forma, entende-se a necessidade de calibração do modelo em caso de posse de dados primários de monitoramento no empreendimento.

A metodologia e os resultados extraídos do estudo podem, principalmente, auxiliar no planejamento de empreendimentos que utilizam reservatórios para captação de água. Os resultados probabilísticos podem direcionar e orientar as ações dos operadores na tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens para Entidades Fiscalizadoras**. Brasília – DF: ANA, 2017.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), **HIDROWEB**, 2022. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied Hydrology, MacGraw-Hill. **Inc., New York**, 1988.

CNRH (2012). Resolução nº 143/2012. Seção 1 do D.O.U de 4 de setembro de 2012.

DE SOUZA, PINTO Nelson L. et al. Hidrologia Básica. **Editora Edgar Blücher Ltda**, v. 6, 1976.

GOLDSIM TECHNOLOGY GROUP. GoldSim Probabilistic Simulation Environment. Student application. 2022, Washington, USA.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia - **BDMEP**. 2021. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>> Acesso em outubro de 2021.

JAKOB, Alberto Augusto Eichman; YOUNG, Andrea Ferraz. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. **Anais**, p. 1-22, 2016.

LINACRE, Edward T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural meteorology**, v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

OMETTO, José C. Bioclimatologia vegetal. 1981.

PINHEIRO, Mário Cicareli. Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração. **Porto Alegre: ABRH**, 2011.

PISCOYA, R. C. C. C. et al. Análise de consistência de dados fluviométricos de estações de monitoramento da ANA localizadas nas sub-bacias hidrográficas 10 (Rios Solimões, Javari e Itaquai) e 11 (rios Solimões, Içá e Jandiatuba). **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013.

QGIS Development Team, 2021. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: < https://www.qgis.org/pt_BR/site/index.html > Acesso em outubro de 2021.

SAAE PARAISÓPOLIS. Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Paraisópolis Estação de Tratamento de Água. 2022. Disponível em: < <https://www.saaeparaisopolis.mg.gov.br/estacao-de-tratamento-de-agua> > Acesso em: Acesso em janeiro de 2022.

SEARCY, James Kincheon; HARDISON, Clayton H. **Double-mass curves**. US Government Printing Office, 1960.

VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur. **Hidrologia aplicada**. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1975.

TUCCI, Carlos EM. Hidrologia: ciência e aplicação. rev. **da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 1993.

WADE, Lisa. **A probabilistic water balance**. Montana Tech of The University of Montana, 2014