

PROPAGAÇÃO DE ENCHENTE EM RESERVATÓRIO DE REGULARIZAÇÃO POR MEIO DE PLANILHAS DE CÁLCULO E SUAS IMPLICAÇÕES EM AGLOMERAÇÃO URBANA – ESTUDO DE CASO

Nilton Santos Paes Junior¹ ; Paulo Takashi Nakayama²

RESUMO – Este estudo buscou avaliar a capacidade de amortecimento da barragem do Ribeirão dos Motas a partir da análise do evento hidrológico ocorrido em 22 de fevereiro de 2024, no município de Guaratinguetá (SP). Foram utilizados dados de quatro estações pluviométricas próximas, com estimativas de períodos de retorno médio variando bastante em função da metodologia empregada. A precipitação média foi determinada para seis cenários distintos, com base em metodologias consagradas da hidrologia. Para a modelagem hidrológica, empregaram-se o hidrograma unitário da bacia e o método do Curve Number (SCS), possibilitando a geração de hidrogramas afluentes à barragem. Os níveis e hidrogramas efluentes foram obtidos pelo método de Puls e propagados a jusante pelo método de Muskingum-Cunge. A avaliação da capacidade hidráulica foi realizada com base na teoria de canais abertos. Os resultados indicam que o cenário 3 apresentou maior aderência ao evento observado, evidenciando inundações com lâmina d'água entre 1,5 e 1,8 m na área analisada.

Palavras-Chave – Simulação Numérica, Cheias, Amortecimento.

ABSTRACT– This study aimed to evaluate the damping capacity of the dos Motas Stream dam based on the analysis of the hydrological event that occurred on February 22, 2024, in the municipality of Guaratinguetá (SP). Data from four nearby rain gauge stations were used, with estimates of average return periods varying considerably depending on the methodology employed. Average precipitation was determined for six distinct scenarios, based on established hydrological methodologies. For hydrological modeling, the basin unit hydrograph and the Curve Number (SCS) method were employed, enabling the generation of inflow hydrographs to the dam. Outflow levels and hydrographs were obtained using the Puls method and propagated downstream using the Muskingum-Cunge method. The hydraulic capacity assessment was performed based on open channel theory. The results indicate that scenario 3 showed the greatest adherence to the observed event, evidencing floods with water depths between 1.5 and 1.8 m in the analyzed area.

Key-words – Numerical Simulation, Floods, Damping.

INTRODUÇÃO

Com a expansão e popularização da internet e consequentemente dos meios de comunicação digitais, os desastres naturais estão cada vez mais presentes no cotidiano das pessoas, tendo em vista as inúmeras ocorrências registradas e veiculadas nos últimos anos, tanto no Brasil como em outras partes do mundo.

1) Engenheiro MSc. da Agência de Águas do Estado de São Paulo-SPÁguas – nilton.paes@spaguas.sp.gov.br

2) Professor Dr. do curso de Pós-Graduação em Segurança de Barragens-Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT – [paulo.nakayama2@gmail.com](mailto: paulo.nakayama2@gmail.com)

Contudo, os desastres naturais mais comuns que ocorrem no território brasileiro são os escorregamentos e as inundações, fenômenos estes relacionados diretamente com as variáveis hidrológicas, dentre elas a precipitação (Medeiros, 2013).

Com o aumento da urbanização se agravam também as ocupações antrópicas do meio ambiente de forma desorganizada, buscando o mínimo custo e o máximo benefício dos seres humanos, resultando assim na ocupação de áreas de encostas e ribeirinhas que, na maioria das vezes, tem alto potencial para a ocorrência de desastres naturais.

As inundações urbanas causam, frequentemente, grandes prejuízos, tanto de ordem econômica, por meio de danos materiais, como social, traduzidos em perda de vidas humanas e proliferação de doenças, além ainda da destruição da infraestrutura urbana e interrupção dos serviços públicos essenciais (Terra, 2021).

Desta forma, o estudo e monitoramento das variáveis hidrológicas tem se mostrado de grande importância para o entendimento destes desastres, podendo auxiliar no seu gerenciamento, prevenção e mitigação, traduzidos, por exemplo, na previsão de eventos extremos bem como na implementação e operação de sistemas de alerta, que são ferramentas de gestão de áreas de risco, além de indicarem a necessidade de implementação de obras de controle ou melhoria do escoamento e até mesmo no planejamento urbano, impedindo assim a ampliação das áreas de risco.

Neste sentido, a modelagem hidrológica é utilizada como ferramenta para a análise e obtenção de conhecimentos mais aprofundados a respeito dos fenômenos físicos envolvidos e na previsão de cenários (Moraes *et al*, 2003).

Segundo Vergutz *et al* (2019) atualmente buscam-se soluções para amenizar os problemas das inundações de forma que não se transfira o problema de um ponto de montante para jusante. Destaca-se a existência de vários mecanismos com o objetivo de minimizar os impactos causados pela chuva, conhecidos como técnicas compensatórias de drenagem urbana, dentre eles, os reservatórios de retenção. Estes podem ser entendidos como estruturas destinadas a reservar as águas advindas do escoamento pluvial, temporariamente, e proporcionam um escoamento gradativo após a precipitação, evitando a transferência de cheias para outros pontos.

A operação otimizada de reservatórios apresenta grandes desafios técnicos, porém torna-se necessária para a melhoria do aproveitamento, gestão e controle dos recursos hídricos, dado que a construção de novos sistemas hídricos de grande escala é, muitas vezes, inviável, devido às crescentes pressões ambientais e políticas, além dos altos custos envolvidos (Labadie, 2004).

ÁREA DE ESTUDO

De acordo com Simões *et al* (2007), o Ribeirão dos Motas se constitui num afluente da margem direita do rio Paraíba do Sul, nascendo na Serra Quebra Cangalha (integrante do sistema que compõem a Serra do Mar), a uma altitude aproximada de 1000 m. Até sua foz, compreende uma área de cerca de 102,4 Km², inserida nos municípios de Aparecida e Guaratinguetá, Estado de São Paulo.

Já a barragem, com eixo central sob as coordenadas geográficas Datum SIRGAS 2000 em 22° 53' 15,4" de Latitude Sul e 45° 13' 8,2" de Longitude Oeste, regulariza uma área de 77,5 Km², estando a primeira aglomeração urbana a jusante da barragem e objeto deste estudo, localizada sob as coordenadas 22° 49' 45,5" de Latitude Sul e 45° 11' 49,1" de Longitude Oeste, com uma área de drenagem remanescente de 23,9 Km² (Figura 1).

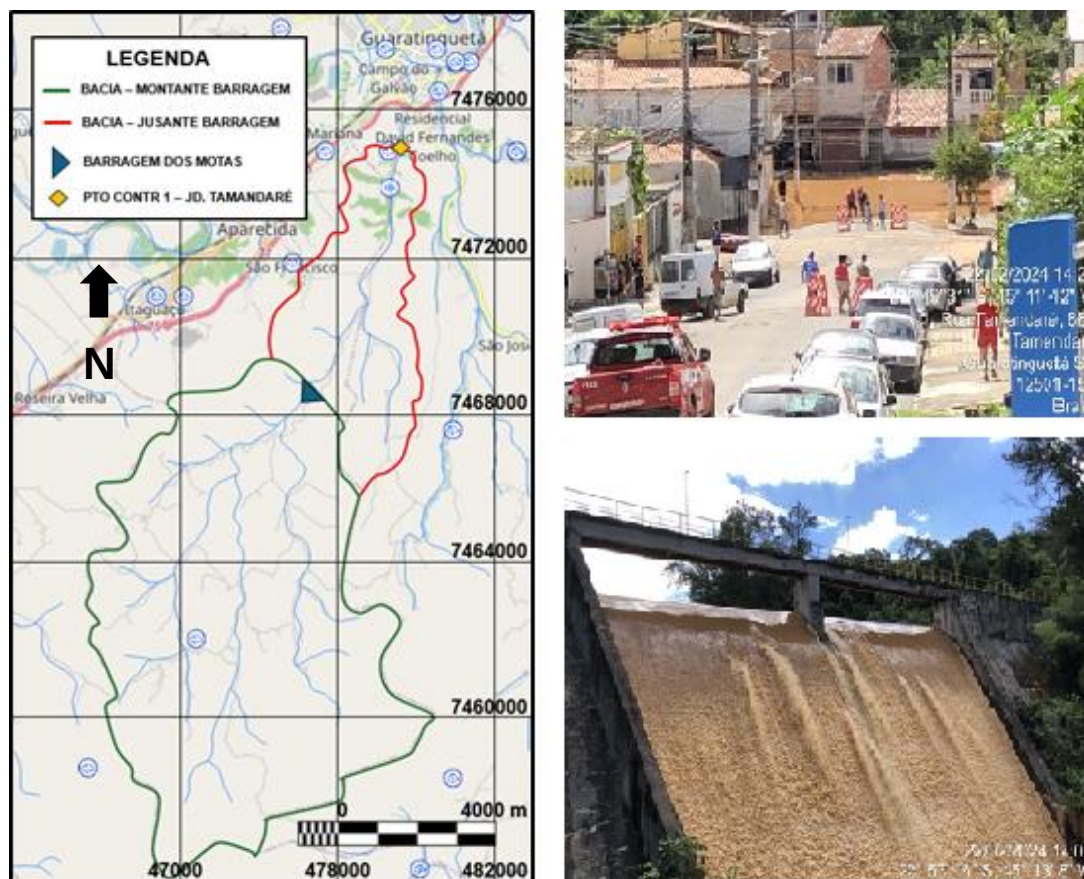


Figura 1 – Visualização esquemática da bacia (montante e jusante da barragem) e registros do evento

A Barragem dos Motas, construída na década de 60 para minimizar inundações em algumas regiões do município de Guaratinguetá, é do tipo gravidade, em concreto “simples maciço” com juntas de vedação/contração verticais. Possui altura de 22,1 m, comprimento da crista de 82,0 m e

volume total do reservatório de cerca de 6 hm³, para uma área de inundação de 15 ha. O vertedor é de perfil tipo Creager, ao centro do barramento, com largura de 25,0 m, possuindo ainda duas galerias de descarga tipo bueiro celular com comportas, localizadas junto às margens/ombreiras, de dimensões de 1,50 m de base x 2,50 m de altura (DAEE, 2022).

No dia 22 de fevereiro de 2024, segundo dia consecutivo de chuvas, ocorreu o extravasamento pelo vertedor de superfície da barragem e inundação de parte do bairro Tamandaré (Figura 1).

Conforme constatado em campanha de campo posterior, as comportas estavam com aberturas de cerca de 10 cm para a ombreira direita e 1 cm para a ombreira esquerda.

METODOLOGIA E DADOS UTILIZADOS

Para este estudo, foram selecionadas as estações pluviométricas em operação mais próximas, de onde foram obtidos os hietogramas da chuva (figura 2). Foi utilizado o hidrograma unitário determinado no anteprojeto da barragem (DAEE-SVP, 1961), além dos hidrogramas unitários sintéticos, determinados pelo método do Soil Conservation Service (SCS), para a bacia de contribuição da barragem e para a bacia a jusante. A precipitação média da área de estudo foi determinada pelos métodos da Média Aritmética e de Thiessen, bem como pela aplicação do coeficiente de abatimento ponto-área da chuva (α) do modelo do United States Weather Bureau, aos dados pluviométricos das quatro estações selecionadas, definindo assim 6 (seis) cenários para simulação:

1. Chuva na bacia igual a chuva determinada pelo Método de Thiessen;
2. Chuva na bacia igual a chuva determinada pela Média Aritmética;
3. Chuva na bacia igual a chuva na estação 354430101A x α ;
4. Chuva na bacia igual a chuva na estação 350250701A x α ;
5. Chuva na bacia igual a chuva na estação 350250703A x α ;
6. Chuva na bacia igual a chuva na estação 352630802A x α ;

A precipitação efetiva foi determinada pelo método do Soil Conservation Service – SCS, onde o principal parâmetro relacionado é a determinação do CN ou número da curva. Os valores de CN podem ser consultados em tabelas publicadas pelo United States Department of Agriculture (USDA) e está relacionado com três fatores: grupo do solo, cobertura do solo e condições de umidade antecedente do solo.

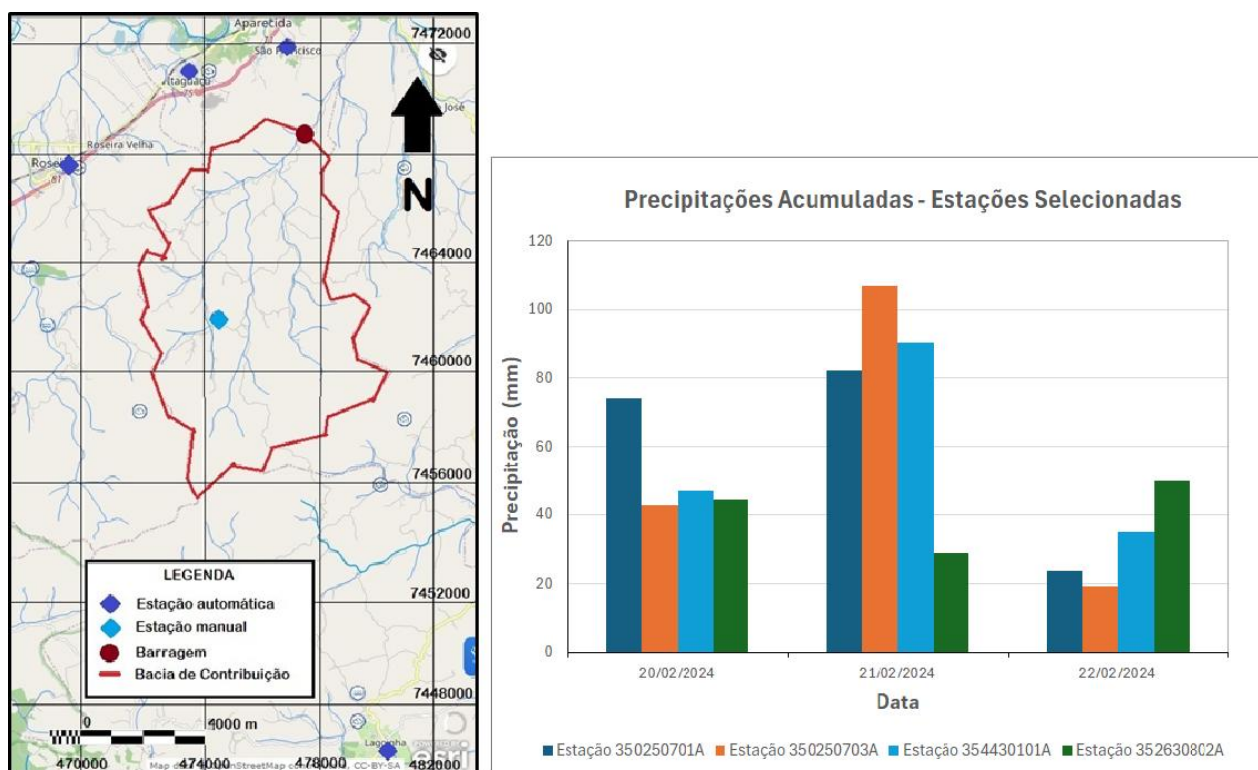


Figura 2 – Localização das estações pluviométricas e respectivas precipitações acumuladas

O método do Número de Curva (CN) determina inicialmente a chuva excedente ou efetiva (aquela que escoar superficialmente), pelas seguintes fórmulas, obtidas empiricamente:

$$\begin{aligned}
 P_{eac} &= 0 && \text{para } P_{ac} \leq 0 \\
 P_{eac} &= (P_{ac} - 0,2.S)^2 / (P_{ac} + 0,8.S) && \text{para } P_{ac} > 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde P_{eac} é a precipitação excedente acumulada; P_{ac} a precipitação acumulada e S a retenção potencial que depende do tipo de solo.

Como as perdas iniciais ou abstrações iniciais são inicialmente consideradas como sendo uma parcela fixa de S , o parâmetro CN é associado apenas ao armazenamento potencial de água no solo, conforme Equação 2:

$$S = 25400 / CN - 254 \quad \text{para } 0 < CN \leq 100 \quad (2)$$

Onde S é a retenção potencial, que depende do tipo de solo e CN é o curve number.

Existindo diferentes tipos de solo e coberturas para a bacia em análise, o valor da retenção potencial – S pode ser calculado por meio de um CN médio obtido pela média ponderada das áreas.

Assim, o curve number (CN) da bacia de contribuição, foi determinado a partir da base hidrográfica otocodificada da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA, 2018).

Dos dados relativos ao reservatório, parte foram obtidos junto ao Anteprojeto de Regularização do Ribeirão dos Motas (DAEE-SVP, 1961), e parte junto aos projetos e levantamentos constantes do Plano de Segurança da Barragem (DAEE, 2022). Também foram realizadas algumas campanhas de campo para determinação da abertura das comportas e estimativa das dimensões da seção hidráulica do curso d'água junto ao bairro Tamandaré, no município de Guaratinguetá (SP) (Figura 3 - esq.), permitindo posteriormente a determinação da curva “cota x vazão” efluente do reservatório e a capacidade hidráulica do canal do curso d'água. Os níveis, antes, durante e após o evento, foram obtidos de registros fotográficos, também obtidos em campanhas de campo (Figura 3 – dir.).



Figura 3 – Dimensões estimadas da seção hidráulica - Bairro Tamandaré (esq.) e estimativas das cotas atingidas pelo reservatório (dir.)

A área inundada foi estimada por meio da cartografia do Instituto Geográfico e Cartográfico-IGC, em escala 1:10.000, tendo como referência as ruas que foram inundadas no dia do evento. Posteriormente, a partir da capacidade de escoamento estimada do canal, obteve-se os volumes excedentes extravasados e, por meio da equação do volume de um tronco de cone invertido, foram determinadas as alturas das lâminas d'água atingidas para cada cenário.

Para a simulação, em planilhas eletrônicas no software Excel®, do amortecimento ou “routing”, foi utilizado o Método de Puls, o qual foi modificado por Akan (1993), para prescindir de iterações.

Segundo Tucci (2013), é um dos métodos mais conhecidos para simulação do escoamento em reservatórios.

O método se baseia na equação da continuidade concentrada, dada pela Equação 3.

$$I - Q = ds/dt \quad (3)$$

onde I é a vazão afluente; Q é a vazão efluente; S é o volume armazenado e t o tempo.

Após a discretização a equação assume a forma da Equação 4.

$$(S(t+1) - S_t)/\Delta t = (I_t + I(t+1))/2 - (Q_t + Q(t+1))/2 \quad (4)$$

onde I_t e I_{t+1} são as vazões afluentes ao reservatório nos tempos t e t+1; Q_t e Q_{t+1} são as vazões efluentes do reservatório nos tempos t e t+1; S_t e S_{t+1} são os volumes armazenados no reservatório nos tempos t e t+1 e Δt o intervalo de tempo para discretização da equação.

Os valores de I_t e I_{t+1} são conhecidos para qualquer intervalo, pois provêm do hidrograma de entrada no reservatório, assim como o são Q_t e S_t , que podem ou não ser nulos nas suas condições de contorno iniciais.

As incógnitas são, portanto, Q_{t+1} e S_{t+1} , que podem ser obtidas pelas relações das curvas (cota x volume), (cota x vazão efluente) (Canholli, 2005).

Já para a propagação dos hidrogramas efluentes à barragem até o ponto de análise na região urbana, foi utilizado o método de Muskingum-Cunge, amplamente utilizado para cálculos de propagação de vazão em rios. Na sua forma não linear, este método permite representar a propagação de cheias em rios, inferindo, com mais eficácia, as vazões extremas (Pontes e Collishconn, 2012).

A vazão, num determinado intervalo de tempo, em função das vazões no intervalo de tempo anterior e seção de montante é dada pela Equação 5:

$$Q_{(i+1)}(t+1) = C_1 \cdot Q_i^t + C_2 \cdot Q_i^{(t+1)} + C_3 \cdot Q_{(i+1)}^t \quad (5)$$

Na qual Q é a vazão; i+1 e i são as seções de jusante e montante do subtrecho do rio; t+1 e t o início e final do intervalo de tempo e C_1 , C_2 e C_3 os coeficientes de cálculo, onde $C_1 + C_2 + C_3 = 1$.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Hidrogramas afluentes à barragem

Os hidrogramas afluentes à barragem para os cenários estabelecidos são apresentados na figura 4, onde é possível observar a variação da magnitude dos picos do primeiro e do segundo dia da chuva.

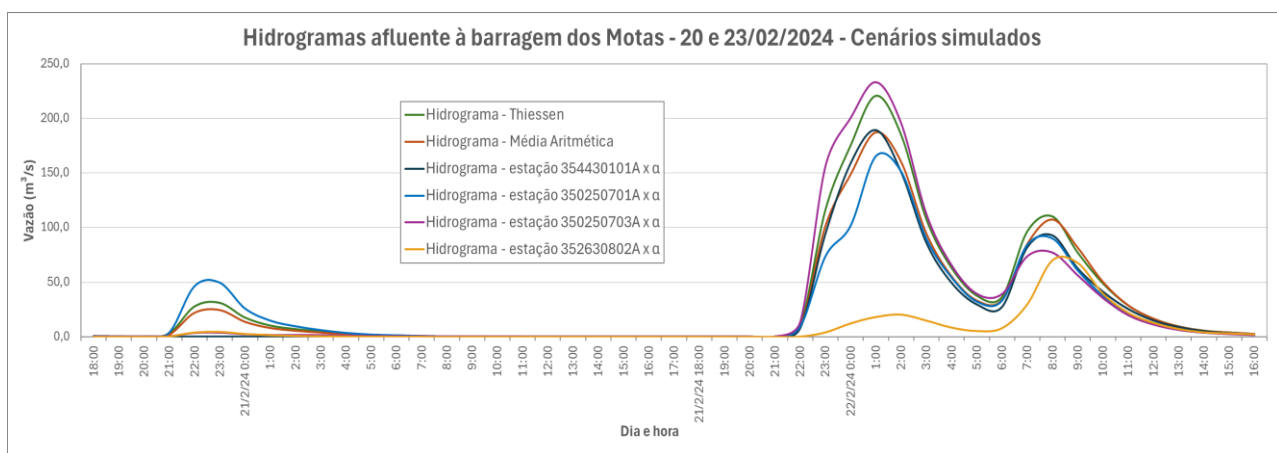


Figura 4 – Hidrogramas afluentes à barragem para os cenários estabelecidos

Routing e propagação dos hidrogramas

A figura 5 apresenta o resultado da simulação que melhor retratou o evento, à nível de cotas atingidas e período de operação do vertedor de superfície. Esta simulação refere-se ao cenário 3, o qual utilizou a chuva na bacia igual a chuva na estação 354430101A, reduzida pela aplicação do coeficiente de variação espacial do United States Weather Bureau (α), onde atingiu nível máximo do reservatório na cota 574,50 metros e manteve o reservatório cheio por mais tempo, se aproximando mais do retratado na figura 3 – dir., datada de 29/02/2024. A vazão a jusante foi da ordem de 28 m³/s.

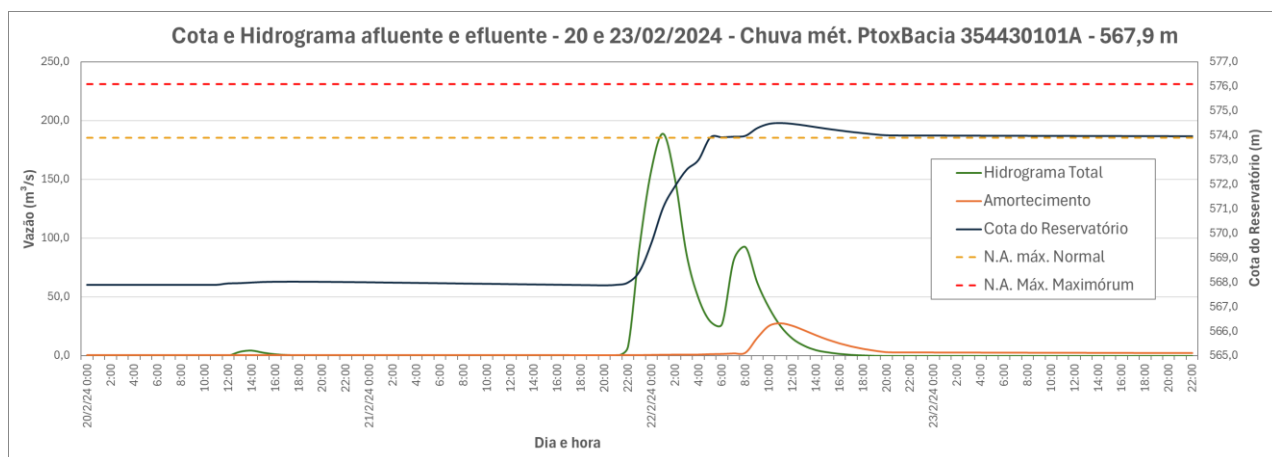


Figura 5 – Routing – Chuva na bacia igual a chuva medida na estação 354430101A x α (Cenário 3)

Verificação hidráulica de seção junto à região urbana

Para os cenários simulados, observou-se que o primeiro pico da onda de cheia não teve influência da vazão afluente à barragem, sendo somente gerado pela chuva da bacia a jusante, incluindo uma parte do Ribeirão dos Motas e o Córrego dos Bicudos. Na figura 6 são plotados para o ponto de interesse, o hidrograma afluente à barragem e propagado, o da bacia de jusante e o total,

para a mesma chuva da figura 5, além ainda da capacidade hidráulica estimada para o canal. Observa-se que a vazão amortecida pelo reservatório não contribuiu para o extravasamento do canal no bairro.

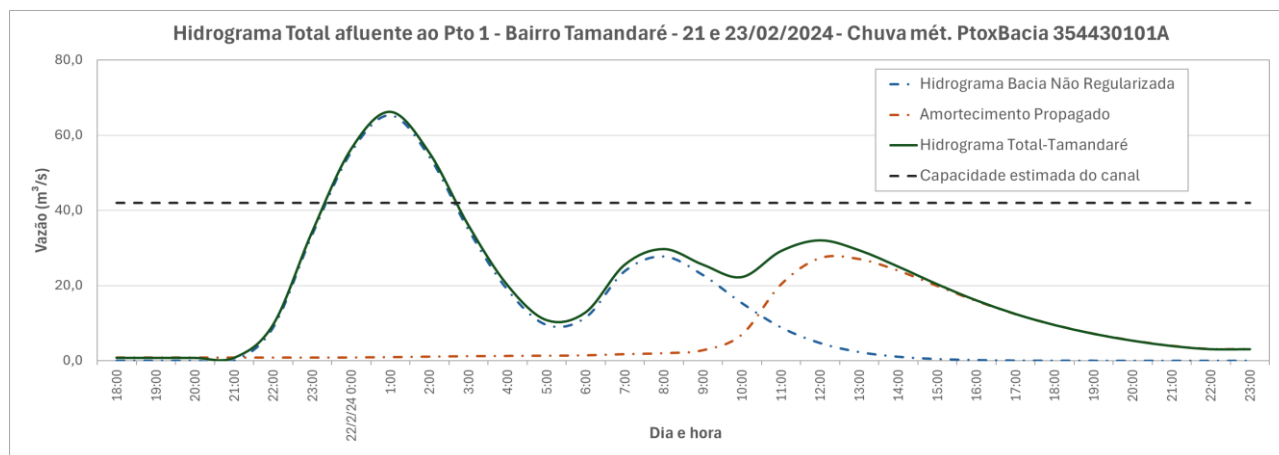


Figura 6 – Hidrograma afluente ao bairro – Cenário 3 (estação 354430101A x α)

A estimativa do volume extravasado do hidrograma acima, pela delimitação da área inundada e aplicação de conceitos matemáticos volumétricos, resultou uma lâmina d'água da ordem de 1,5 metros acima da cota de extravasamento, da mesma ordem que o nível atingido pela água nas proximidades do ponto em análise, que foi da ordem de 1,8 metros.

CONCLUSÕES

A determinação da precipitação média, pela aplicação do coeficiente de variação espacial do United States Weather Bureau (α), bem como o modelo do SCS, para a determinação das precipitações efetivas e respectivos hidrogramas, para a bacia em questão, além do emprego do Método de Puls e do método de Muskingum-Cunge, para o amortecimento e propagação da cheia, demonstraram-se adequados para a simulação proposta, uma vez que sua aplicação não é de alta complexidade, apresentando ainda resultados compatíveis com o observado no evento.

A verificação hidráulica da seção no ponto de controle demonstrou que o canal tinha capacidade para veicular uma vazão da ordem de 42 m³/s, valor este maior que o amortecido pela barragem, porém menor que o pico gerado pela bacia a jusante da barragem (da ordem de 66 m³/s), demonstrando que a onda de cheia, oriunda do reservatório, não foi responsável pelo extravasamento e consequente inundação do bairro Tamandaré.

A aplicação da metodologia proposta, demanda de uma quantidade de dados expressiva, tanto numérica como observacional, porém de baixo custo, evidenciando que a gestão de risco de inundações pode ser orientada por estudos técnicos como este, que demonstrou a necessidade de uma

integração mais assertiva entre gestores vinculados ao planejamento urbano, infra estrutura, meio ambiente e Defesa Civil, estabelecendo regras operativas e de manutenção para as estruturas hidráulicas, gestão responsável da ocupação urbana e a implantação de sistema de alerta para a área.

REFERÊNCIAS

- AKAN, A. O. (1993). *Urban Stormwater Hydrology: a guide to engineering calculations*. Lancaster: Crc Press, 268 p.
- ANA - Agência Nacional de Águas (org.) (2018). *Nota Técnica nº 46/2018/SPR: Produção de base vetorial com o curve number (CN) para BHO 2014 (BHO_CN)*. Brasília, 13 p.
- CANHOLI, A. P. (2005). *Drenagem Urbana e Controle de Enchentes*. São Paulo: Ofitextos, 302 p.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica (org.) (2022). *Elaboração do PSB – Plano de Segurança da Barragem dos Mottas*. Aparecida: DAEE, 4 v.
- DAEE-SVP - Departamento de Águas e Energia Elétrica - Serviço do Vale do Paraíba (org.) (1961). *Estudos e Anteprojeto de Regularização dos Ribeirões dos Motas e São Gonçalo no Estado de São Paulo: hidrologia e anteprojeto de soluções*. Rio de Janeiro: HIDROSERVICE, 2 v.
- LABADIE, J. W. (2004). *Optimal Operation of Multireservoir Systems: state-of-the-art review*. Journal Of Water Resources Planning and Management. Washington, Dc, p. 93-111.
- MEDEIROS, V. S. (2013). *Análise estatística de eventos críticos de precipitação relacionados a desastres naturais em diferentes regiões do Brasil*. 207 f. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MORAES, J. M. et al. (2003). *Propriedades Físicas dos Solos na Parametrização de um Modelo Hidrológico*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.
- PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. (2012). *Conservação de Volume em Modelos Simplificados de Propagação de Vazão*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 83-96.
- SIMÕES, S. J. C. et al. (2007). *Variabilidade Espacial do Potencial de Erosão e seus Efeitos na Sedimentação de um Pequeno Reservatório*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 177-187. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v12n3.p177-187>.
- TERRA, T. A. (2021). *Análise do processo chuva-vazão utilizando o hidrograma unitário conceitual de Nash na bacia hidrográfica do Rio Santana*. 49 f. Dissertação (Mestrado), UNIFAL, Poços de Caldas.
- TUCCI, C. E. M. (org.) (2013). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed., Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 943 p.
- VERGUTZ, L. A. A.; PEREIRA, C. E.; SCHMIDT, M. A. R. (2019) *Análise da implantação de reservatórios de retenção de forma que sejam minimizados os impactos causados por inundações*. Engenharia Sanitária e Ambiental, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 1267-1277.