

EVENTOS EXTREMOS DE CHEIA EM UMA DENSA REDE DE RESERVATÓRIOS USANDO SIG

Emilly Martins Silveira¹

George Leite Mamede²

RESUMO

Neste trabalho, analisou-se a geração de eventos extremos de cheia em uma densa rede de 733 reservatórios superficiais na bacia do açude Pentecoste. Utilizando técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), caracterizou-se a rede de reservatórios e avaliou-se a influência de chuvas intensas com base nos dados da curva de intensidade-duração-frequência (IDF) do posto Pentecoste. Para estimativa das vazões máximas para diferentes tempos de retorno, utilizou-se o método do SCS-CN (*Soil Conservation Service - Curve Number*), considerando o tempo de concentração nas sub-bacias estimadas pelo método de Kirpich. Os resultados mostram o comportamento hidrológico nas sub-bacias dos 733 reservatórios, indicando áreas mais susceptíveis à ocorrência de eventos extremos de escoamento. Por fim, este estudo é de extrema importância para melhor entendimento dos processos hidrológicos extremos na bacia do açude Pentecoste, pois auxilia o planejamento e dimensionamento de infraestruturas hidráulicas, e contribui para o desenvolvimento de políticas de segurança hídrica.

Palavras-chave: Rede de reservatórios; Eventos extremos de escoamento; SIG.

¹ Discente da Especialização em Gestão de Recursos Hídricos Ambientais e Energéticos, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), emillymartinssilveira@gmail.com.

² Docente do Programa de Pós-graduação, PGEA da UNILAB, mamede@unilab.edu.br.

ABSTRACT

This study analyzed the generation of extreme flood events in a dense network of 733 surface reservoirs in the Pentecoste reservoir basin. Using Geographic Information Systems (GIS) techniques, the reservoir network was characterized and the influence of heavy rainfall was evaluated based on data from the intensity-duration-frequency (IDF) curve of the Pentecoste station. To estimate maximum flows for different return times, the SCS-CN (Soil Conservation Service - Curve Number) method was used, considering the time of concentration in the sub-basins estimated by the Kirpich method. The results show the hydrological behavior in the sub-basins of the 733 reservoirs, indicating areas more susceptible to the occurrence of extreme runoff events. Finally, this study is extremely important for a better understanding of extreme hydrological processes in the Pentecoste reservoir basin, as it helps in the planning and dimensioning of hydraulic infrastructures, and contributes to the development of water security policies.

Keywords: Reservoir network; Extreme runoff events; SIG.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm intensificado a frequência de eventos extremos, particularmente em regiões semiáridas como o Ceará. Segundo o IPCC (2021), esses fenômenos já impactam sistemas naturais e humanos em escala global, exigindo ações imediatas para mitigação de seus efeitos. Devido a isso, eventos como secas prolongadas em áreas áridas e chuvas intensas em regiões úmidas se tornaram mais comuns, exigindo um gerenciamento de recursos hídricos que contemple futuros cenários climáticos (TORTORELLI et al., 2024).

As inundações repentinas são tipicamente associadas a tempestades curtas e de alta intensidade (PENNA; BORGA; ZOCATELLI, 2013). São eventos caracterizados por um aumento rápido e intenso do nível da água em áreas específicas, ocorrendo principalmente em áreas urbanas, solos impermeáveis ou próximos a rios. A frequência e a intensidade desses episódios de cheias estão aumentando devido às mudanças climáticas e seu impacto nas comunidades (AL-RAWAS; NIKOO; AL-WARDY, 2024).

Sendo assim, o estudo de eventos extremos de cheia em uma densa rede de reservatórios é de grande importância para a gestão dos recursos hídricos em regiões que estão sujeitas a este

fenômeno. Compreender esses eventos permite prever e mitigar os impactos negativos, como inundações, erosão e a degradação dos ecossistemas aquáticos. Uma rede de reservatórios bem monitorada e gerenciada também possibilita a adaptação às mudanças climáticas, garantindo a segurança hídrica e a eficiência dos sistemas de abastecimento e irrigação em períodos de elevada precipitação.

O estado do Ceará, localizado na região Nordeste do Brasil, apresenta um clima semiárido em grande parte de seu território, caracterizado por altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar ao longo do ano. A precipitação média (1993–2012) varia de 500 mm a 900 mm (DE ARAÚJO; BRONSTERT, 2016). O período chuvoso ocorre predominantemente entre janeiro e junho, no entanto, a variabilidade interanual da precipitação pode ocasionar períodos de estiagem prolongada e até secas severas, afetando a disponibilidade hídrica do estado. Os rios cearenses são, em sua maioria, intermitentes, fluindo apenas na estação chuvosa.

Devido a isso, o Estado promoveu sua política de gestão dos recursos hídricos baseada no desenvolvimento de uma sólida infraestrutura de ampliação da oferta de água, por meio da construção de uma rede de reservatórios como forma de garantir o abastecimento das populações que vivem na região (CEARÁ, 2023). Muitas dessas estruturas foram construídas de forma empírica, sem o embasamento em estudos de engenharia, visando captar e armazenar o maior volume de água possível durante a estação chuvosa para garantir algum abastecimento nos períodos de estiagem. Contudo, a ausência de critérios técnicos e a falta de manutenção adequada comprometem a segurança e a eficiência de muitas dessas barragens, aumentando o risco de rompimentos e desperdício de água.

Além disso, o Ceará possui um grande número de barragens dispostas em cascata, onde várias barragens são construídas sucessivamente ao longo do mesmo curso d'água, aumentando significativamente o risco de efeitos em cadeia no caso de rompimento de uma estrutura. Se uma barragem superior falhar, a barragem localizada no vale a jusante será diretamente impactada pela onda de ruptura hipotética da barragem situada a montante (DE PAULA CARVALHO et al., 2024). Esse tipo de falha em cascata representa um risco elevado para as comunidades ribeirinhas, a infraestrutura e os ecossistemas locais, além de causar prejuízos socioeconômicos expressivos.

Portanto, o objetivo deste trabalho será analisar o processo de geração de eventos extremos de cheia na densa rede de reservatórios superficiais da bacia hidrográfica do açude Pentecoste, localizada no estado do Ceará. Para isso, será feita uma caracterização da rede de reservatórios superficiais e suas bacias hidrográficas, o estudo das chuvas intensas e a quantificação das vazões máximas associadas a diferentes tempos de retorno e seus impactos

na rede de reservatórios.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os reservatórios superficiais são estruturas de extrema importância para a gestão de recursos hídricos, devido ao seu papel essencial para o abastecimento urbano, irrigação, controle de cheias e geração de energia. O aumento da população em regiões de terras secas e o consequente crescimento da demanda por água expandiram a construção de pequenos reservatórios, gerando nessas regiões uma densa rede de reservatórios, o que aumenta a complexidade da modelagem desses sistemas hidrológicos (RABELO et al., 2021). No Nordeste, a construção de reservatórios tanto pelos governos estaduais e federal, quanto por moradores é a técnica mais utilizada, resultando em uma densa rede de pequenos, médios e grandes reservatórios (PINHEIRO DO NASCIMENTO; GURGEL MACAMBIRA; AUGUSTO MEDEIROS, 2016) .

Entre as vantagens desse sistema, destaca-se a distribuição mais eficiente dos recursos hídricos, ou seja, a interligação de reservatórios gera uma maior flexibilidade operacional, possibilitando que volumes de água sejam deslocados de regiões com abundância para regiões deficitárias. Devido a isso, este sistema tem sido bastante utilizado em cenários de mudanças climáticas, onde os eventos hidrológicos estão cada vez mais extremos e imprevisíveis.

Em relação aos eventos hidrológicos extremos, estes estão cada vez mais frequentes em cenários de mudanças climáticas, e tem afetado drasticamente infraestruturas, ecossistemas e comunidades humanas. Segundo a CNN Brasil (2023), o Brasil teve 12 eventos climáticos extremos em 2023, de acordo com relatório publicado pela Organização Meteorológica Mundial, agência especializada da ONU, com destaque para o desastre ocorrido em Rio Grande do Sul, onde chuvas intensas provocaram inundações e deslizamentos de terra.

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR6) elaborado pelo IPCC (2023), a mudança climática causada pelo homem já está afetando muitos extremos climáticos e de tempo em todas as regiões do globo. Isso levou a impactos adversos generalizados, perdas e danos relacionados à natureza e às pessoas. Entre 2010 e 2020, a mortalidade humana por inundações, secas e tempestades foi 15 vezes maior em regiões altamente vulneráveis, em comparação com regiões com vulnerabilidade muito baixa (IPCC, 2023).

O AR6 também reconheceu um aumento nos eventos globais de inundações repentinas

causados por níveis extremos de precipitação, como consequência do aquecimento global (IPCC, 2023). Uma inundação repentina é um tipo de risco natural que ocorre em um período relativamente curto, caracterizado por alta vazão de pico, o intervalo de tempo estimado entre o evento causador potencial (por exemplo, tempestades) e a ocorrência de uma inundação repentina é menor que 4–6 h (AL-RAWAS; NIKOO; AL-WARDY, 2024).

Inundações repentinas são impossíveis de evitar. No entanto, obter insights profundos sobre inundações repentinas por meio de análises adequadas por diferentes métodos pode reduzir danos futuros (CHOWDHURY, 2024). Nesse sentido, o mapa de suscetibilidade surge como uma importante ferramenta na gestão de riscos hidrológicos, já que ajuda a identificar áreas mais propensas a sofrerem inundações, auxiliando o planejamento adequado por parte dos tomadores de decisão.

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode ser usado no início do processo de avaliação de risco, para a identificação de perigos e mapeamento de suscetibilidade (IBRAHIM et al., 2024) Os modelos digitais de elevação (DEMs) são representações digitais da elevação da superfície terrestre, cruciais para a modelagem hidrológica e hidráulica. Os DEMs têm sido amplamente utilizados na avaliação de risco de inundação, permitindo simulação e mapeamento precisos de inundação (GACUL et al., 2024). Melhorias significativas na tecnologia SIG permitem o manuseio e a análise de dados espaciais grandes e complexos.

Essa tecnologia sofisticada, devido à sua alta precisão nos resultados, tem sido popularmente usada na ciência de desastres. (CHOWDHURY, 2024). Um dos principais pontos fortes do SIG é sua capacidade de analisar e visualizar relações espaciais complexas, permitindo que pesquisadores e formuladores de políticas identifiquem áreas de alto risco e priorizem esforços de mitigação (IBRAHIM et al., 2024).

Diversos estudos utilizaram técnicas de SIG para realizar o mapeamento da suscetibilidade a inundações e secas. Ibrahim et al. (2024) apresentou um mapa de suscetibilidade a inundações e secas na Malásia usando uma abordagem multicritério baseada no Sistema de Informação Geográfica. Riaz e Mohiuddin (2024) utilizaram os modelos AHP e ANP baseados em SIG para mapeamento de suscetibilidade a inundações repentinas em Bangladesh. Jia et al. (2024) analisou o impacto das mudanças climáticas no risco de inundações em locais de patrimônio cultural na China usando um método SCS-CN baseado em GIS. Kumari et al., (2024) utilizou o método SCS-CN baseado em SIG na modelagem de precipitação e escoamento na bacia hidrográfica de Umiam, uma importante bacia hidrográfica em Meghalaya, Índia.

A avaliação de risco é vital para as humanidades, especialmente na avaliação de perigos

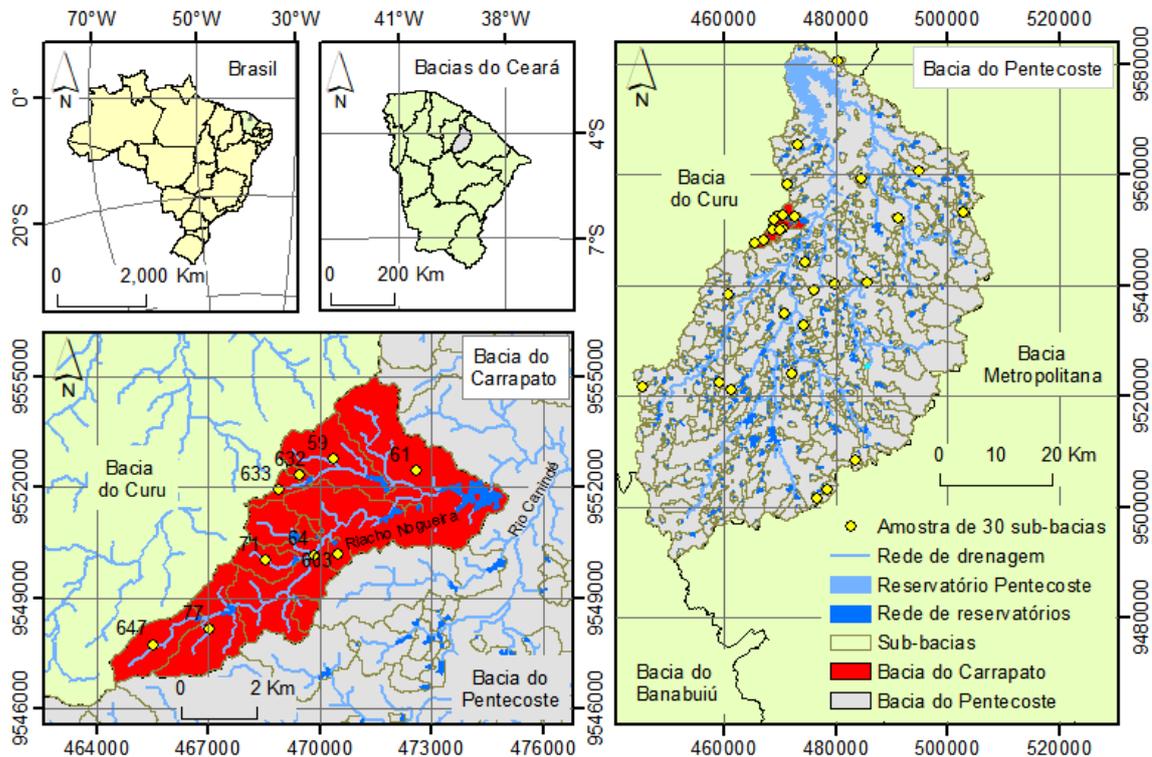
naturais e artificiais. A identificação de zonas de risco de inundação é crucial para mitigar os impactos adversos das inundações (GACUL et al., 2024). Sendo assim, devido à sua rápida evolução e alta destrutividade, inundações repentinas necessitam de estratégias de prevenção e resposta imediata, especialmente em um cenário de mudanças climáticas.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho é a bacia hidrográfica do açude Pentecoste, conforme mostrado na Figura 1, localizada na região semiárida do estado do Ceará, que conta com uma área de aproximadamente 3.230 km². Ela está inserida na bacia hidrográfica do Rio Curu, um importante sistema hídrico do Estado. A Figura 1 também destaca o conjunto de 30 sub-bacias usado para validação do método de caracterização hidrológica e 14 sub-bacias aninhadas (9 delas presentes no conjunto das 30 selecionadas), pertencentes à bacia hidrográfica do açude Carrapato, drenada pelo riacho Nogueira, afluente da margem esquerda do rio Canindé, foram usadas na validação dos estudos de eventos hidrológicos extremos de escoamento superficial na área de estudo (ver Seção de Metodologia).

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do açude Pentecoste com a rede de 733 reservatórios.



Fonte: De autoria própria.

O clima característico é o semiárido, com chuvas concentradas entre fevereiro e maio, sendo comum a ocorrência de longos períodos de estiagem. A maioria dos rios que compõem a bacia são efêmeros, ou seja, que apresentam fluxo de água apenas durante ou imediatamente após um evento de chuva, ou seja, como resposta direta à precipitação (VILLELA e MATTOS, 1975).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DA REDE DE RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS

Foram utilizadas ferramentas dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para obtenção de características da rede de reservatórios da bacia do açude Pentecoste, tais como comprimento e declividade do rio principal, assim como área e perímetro das sub-bacias dos 733 reservatórios. Essas características serão utilizadas posteriormente para modelagem das vazões máximas. Com o auxílio de um modelo digital de elevação (DEM) da base Copernicus

(EUROPEAN SPACE AGENCY; AIRBUS, 2022), foi feita a delimitação das sub-bacias que compõem a rede de reservatórios via processamento em SIG.

Os comprimentos dos rios principais foram obtidos pelo produto do comprimento da sub-bacia pelo fator de sinuosidade, dado pela relação entre comprimento da bacia e do rio, analisado para uma amostra de 30 sub-bacias, sendo 9 delas pertencentes à bacia do açude Carrapato e outras 21 escolhidas aleatoriamente (ver Figura 1). O comprimento da sub-bacia foi obtido através de um processamento em SIG, onde foi definido um conjunto de pontos em uma malha de 30m de resolução, onde o de menor elevação foi considerado o exutório, e o ponto mais distante foi considerado a nascente.

3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA DE EVENTOS EXTREMOS COM O MODELO SCS-CN

O modelo SCS-CN (*Soil Conservation Service - Curve Number*) é bastante utilizado na hidrologia para estimar a quantidade de escoamento superficial gerado em um evento de chuva. Para isso, é levado em consideração diversos fatores, como características do solo, cobertura vegetal e condições iniciais de umidade. Com isso o escoamento superficial, ou precipitação efetiva, é calculado usando a Equação 1:

$$Pe = \frac{(P - 0,2 .S)^2}{(P + 0,8 .S)} \quad (1)$$

Em que:

Pe = Precipitação efetiva ou escoamento superficial (mm);

P = Precipitação total (mm);

S = Capacidade de armazenamento da camada superior do solo (mm).

Para obter a capacidade de armazenamento, foi utilizada a Equação 2 a seguir:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Em que:

CN = Número de curva (*Curve Number*), que depende do tipo de solo.

O CN é um parâmetro bastante utilizado para estimar o escoamento superficial direto em bacias hidrográficas. É um valor adimensional, solos com alta capacidade de armazenamento de água possuem baixos valores CN e vice-versa (CARVALHO; RODRIGUES, 2021). Para determinação desse valor, são consideradas características como tipo de solo, uso e cobertura do solo e condições de umidade antecedente. Os valores de CN são tabelados e fornecidos na literatura. Neste estudo, utilizaram-se os dados de CN disponibilizados pela ANA (Agência Nacional de Águas), que foram publicados para os anos de 1985, 2014 e 2022.

Para este trabalho, optou-se por utilizar os valores de CN do ano de 2022, em formato raster, com resolução espacial de 30m, para retratar as condições mais atuais de escoamento na bacia hidrográfica do açude Pentecoste. O mapa foi recortado com o auxílio de ferramentas SIG para a área de estudo. Após isso, foi calculada uma média ponderada dos valores de CN para cada sub-bacia analisada com base na ocorrência de células de uma mesma classe.

Para estimativa do tempo de concentração das sub-bacias, que é o tempo necessário para que a água da parte mais distante da bacia chegue até seu ponto de exutório, utilizou-se a equação de Kirpich (Equação 3) expressada da seguinte forma:

$$t_c = 0,0663 \cdot \frac{(L^{0,77})}{(y^{0,385})} \quad (3)$$

Em que:

t_c = tempo de concentração (em horas),

L = comprimento do curso d'água principal (em km),

y = declividade média do curso d'água principal (adimensional, expressa como razão entre a diferença de elevação e o comprimento).

Os tempos de pico e de base do hidrograma da cheia de projeto em cada uma das sub-bacias foi estimado com base no método do SCS-CN, considerando um formato triangular, conforme Equações 4 e 5, respectivamente, com L em metros e y em unidade absoluta:

$$t_p = \frac{2,6 L^{0,8} \left[\left(\frac{S}{25,4} \right) + 1 \right]^{0,7}}{1900 y^{0,5}} \quad (4)$$

$$t_b = 2,67 t_p \quad (5)$$

Na estimativa da intensidade de chuva máxima diária para os períodos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos, convertidos para duração de 1h, foi utilizada a curva IDF de Pentecoste (RODRIGUES *et al.*, 2008), localizado no entorno da área, de acordo com a Equação 4:

$$i = \frac{2246 \cdot Tr^{0,185}}{(D + 18)^{0,950}} \quad (6)$$

Em que:

i = intensidade associada ao tempo de concentração da bacia (mm/h);

Tr = período de retorno (anos);

D = duração da chuva de projeto (min), igual ao tempo de concentração de cada sub-bacia. A precipitação máxima é calculada pelo produto da intensidade da chuva (mm/h) pela duração da chuva (h).

Para validação do método de estimativa das vazões máximas em uma densa rede de reservatórios, aplicou-se o modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System; USACE, 2000), um sistema de modelagem hidrológica amplamente reconhecido pela comunidade técnico-científica e foi desenvolvido para a simulação da conversão de chuva em deflúvio em bacias hidrográficas, considerando os principais processos hidrológicos e sua distribuição espaço-temporal. A validação é necessária para verificar se o modelo é consistente, confiável e atende aos requisitos esperados. O modelo HEC-HMS foi utilizado para simular a cheia de projeto em uma amostra de 14 reservatórios da bacia do açude Carrapato, drenada pelo riacho Nogueira, afluente da margem esquerda do rio Canindé (principal curso d'água da bacia hidrográfica do açude Pentecoste). A estratégia de considerar um conjunto de bacias aninhadas permite considerar um sistema hídrico reduzido, representativo de uma bacia hidrográfica, e inserido na bacia do Pentecoste. O modelo considera o método do SCS-CN e hietograma de chuva derivado da curva IDF do posto pluviométrico de Pentecoste (Equação 6) para os tempos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos, conforme sintetizado no Quadro 1.

Quadro 1 - Precipitações máximas para os tempos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos e diferentes durações derivadas da curva IDF do Posto Pentecoste.

Duração (min)	Precipitação máxima (mm)					
	10	25	50	100	1000	10000
5	14,57	17,27	19,63	22,31	34,17	52,31
10	24,18	28,65	32,57	37,02	56,68	86,79
15	31,03	36,76	41,79	47,51	72,74	111,37
30	43,47	51,50	58,55	66,56	101,91	156,03
60	54,82	64,94	73,83	83,93	128,50	196,75
120	63,76	75,54	85,87	97,62	149,47	228,85
180	67,87	80,41	91,41	103,92	159,11	243,61
360	73,44	87,01	98,91	112,45	172,16	263,60
720	77,79	92,16	104,77	119,11	182,36	279,21
1440	81,48	96,53	109,74	124,75	191,01	292,45

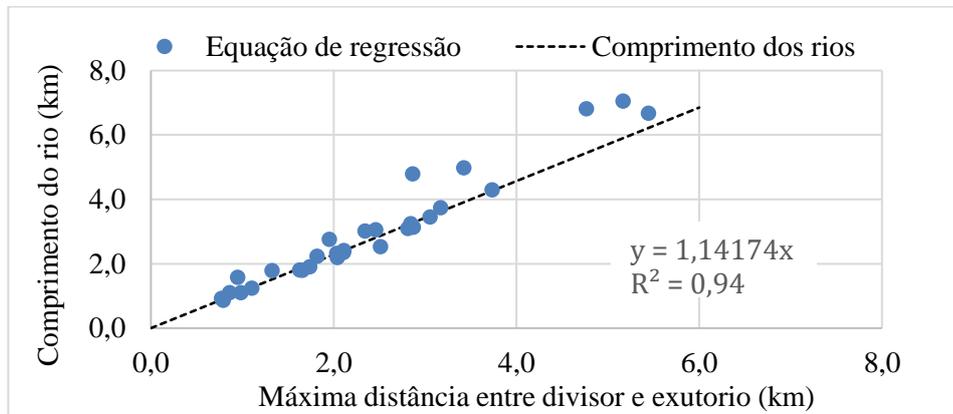
Fonte: De autoria própria.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA SINUOSIDADE DOS CURSOS D'ÁGUA PRINCIPAIS DAS SUB-BACIAS

Na Figura 2 é mostrada a relação entre comprimento da bacia e do rio, analisado para uma amostra de 30 sub-bacias, indicando uma sinuosidade média de aproximadamente 1,14. Este fator de sinuosidade foi, então, aplicado para toda a rede de 733 sub-bacias com o objetivo de estimar os comprimentos dos rios principais nestas áreas a partir das distâncias entre o ponto do divisor de águas mais afastado do exutório.

Figura 2 - Correlação entre a máxima distância entre o divisor de águas e o exutório e o comprimento do rio principal (L).

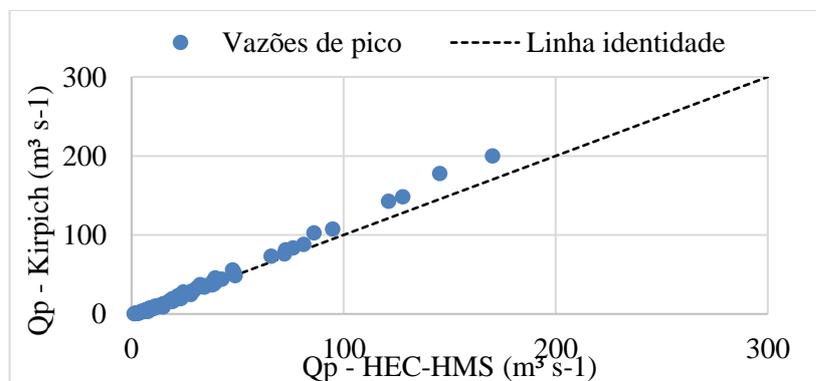


Fonte: De autoria própria.

4.2 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE ESTIMATIVA DA CHEIA DE PROJETO EM REDES DE RESERVATÓRIOS

Na Figura 3 é mostrada uma análise comparativa das vazões de pico estimadas pelo método de Kirpich e do SCS-CN com o modelo HEC-HMS. Os resultados obtidos indicam uma notável similaridade nos picos de vazões dos eventos extremos analisados para as 14 sub-bacias testadas e tempos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos.

Figura 3 – Análise comparativa das vazões de pico (Q_p) estimadas pelo método de Kirpich e do SCS-CN com o modelo HEC-HMS para as 14 sub-bacias testadas e tempos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos.

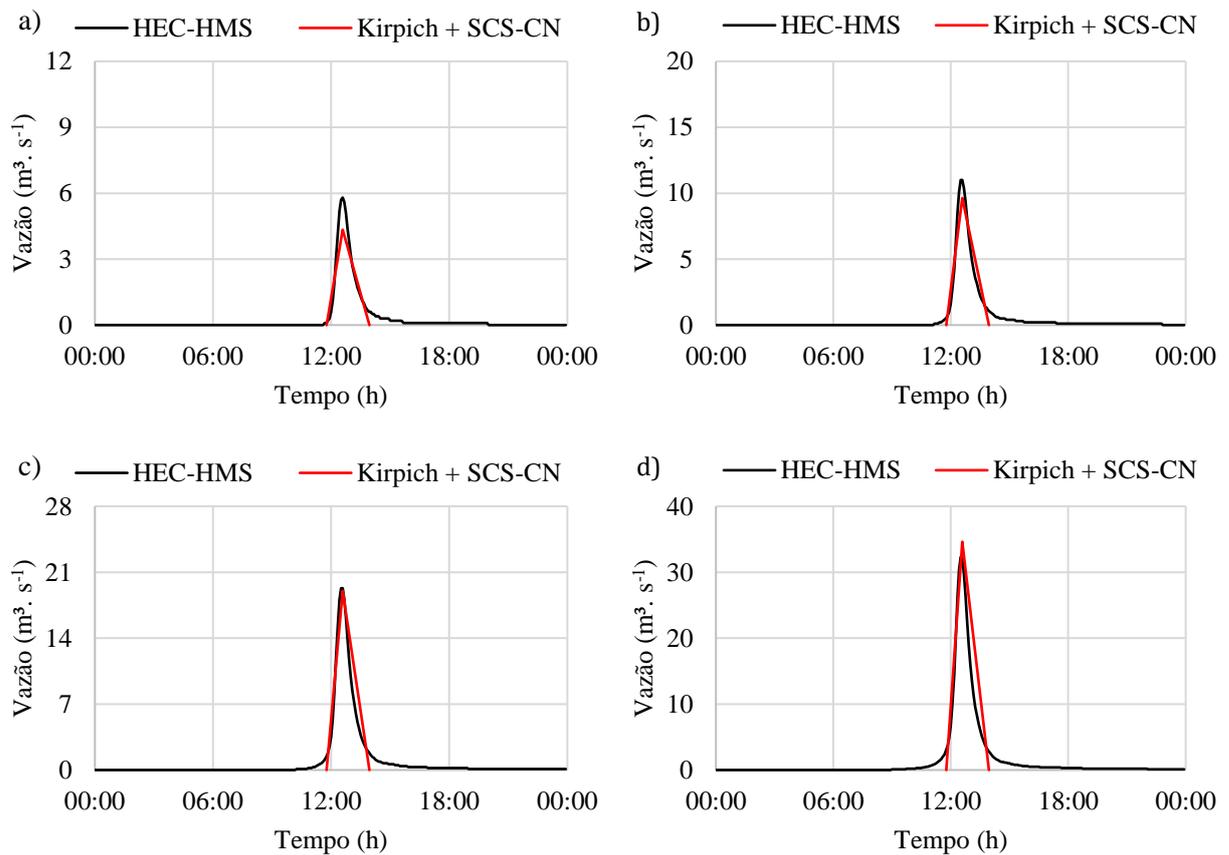


Fonte: De autoria própria.

Os hidrogramas de cheia gerados com o modelo HEC-HMS foram comparados com os

hidrogramas triangulares gerados para as sub-bacias estudadas (em uma amostra de 14 sub-bacias testadas na bacia do Pentecoste) para tempos de retorno de 10, 100, 1.000 e 10.000 anos, conforme ilustrado na Figura 4, exemplarmente para o açude com código 633 (ver Figura 1). Os resultados indicaram que os hidrogramas se apresentam bem coincidentes em termos da vazão e do tempo de pico, assim como do tempo de base, o que sugere que o método simplificado proposto neste estudo pode ser uma boa alternativa para simular eventos extremos em sub-bacias de densas redes de reservatórios superficiais como a da bacia hidrográfica do açude Pentecoste.

Figura 4 - Análise comparativa do hidrograma estimado com o modelo HEC-HMS e o hidrograma triangular com vazão de pico estimada pelo método de Kirpich e os tempos de pico e de base pelo método do SCS-CN para o açude com código 633, considerando os tempos de retorno de: a) 10 anos; b) 100 anos; c) 1.000 anos; e d) 10.000 anos.

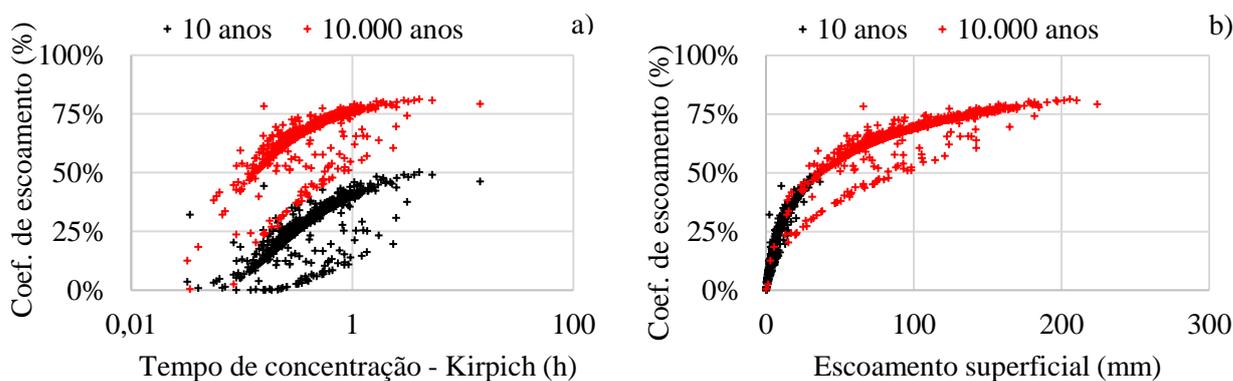


Fonte: De autoria própria.

4.3 ESTIMATIVA DA CHEIA DE PROJETO NA REDE DE RESERVATÓRIOS DA BACIA DO AÇUDE PENTECOSTE

Aplicando-se o método proposto neste estudo para a rede de 733 reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pentecoste, com suas respectivas sub-bacias, foi possível estimar alguns parâmetros hidrológicos associados aos eventos extremos de cheia na área. Na Figura 5a é mostrada a relação entre o coeficiente de escoamento (%) e o tempo de concentração estimado pelo método Kirpich (h). Percebe-se que em bacias pequenas, com um tempo de concentração menor, tem-se coeficientes de escoamento menores, uma vez que a precipitação acumulada também é menor para aquela duração. No entanto, outros fatores podem influenciar esse coeficiente, como o uso do solo, tipo de vegetação e infiltração. Observa-se, ainda, ao se comparar os resultados para os tempos de retorno de 10 e 10.000 anos, que os eventos mais extremos ($Tr = 10.000$ anos) apresentam maiores coeficientes de escoamento quando comparados a eventos mais frequentes ($Tr = 10$ anos), o que pode ser explicado pela menor capacidade de armazenamento no solo de eventos com maiores intensidade.

Figura 5 – Relações entre variáveis hidrológicas considerando 733 sub-bacias e tempos de retorno de 10 e 10.000 anos, comparando o coeficiente de escoamento com: a) o tempo de concentração de Kirpich; b) o escoamento superficial no evento de cheia.



Fonte: De autoria própria.

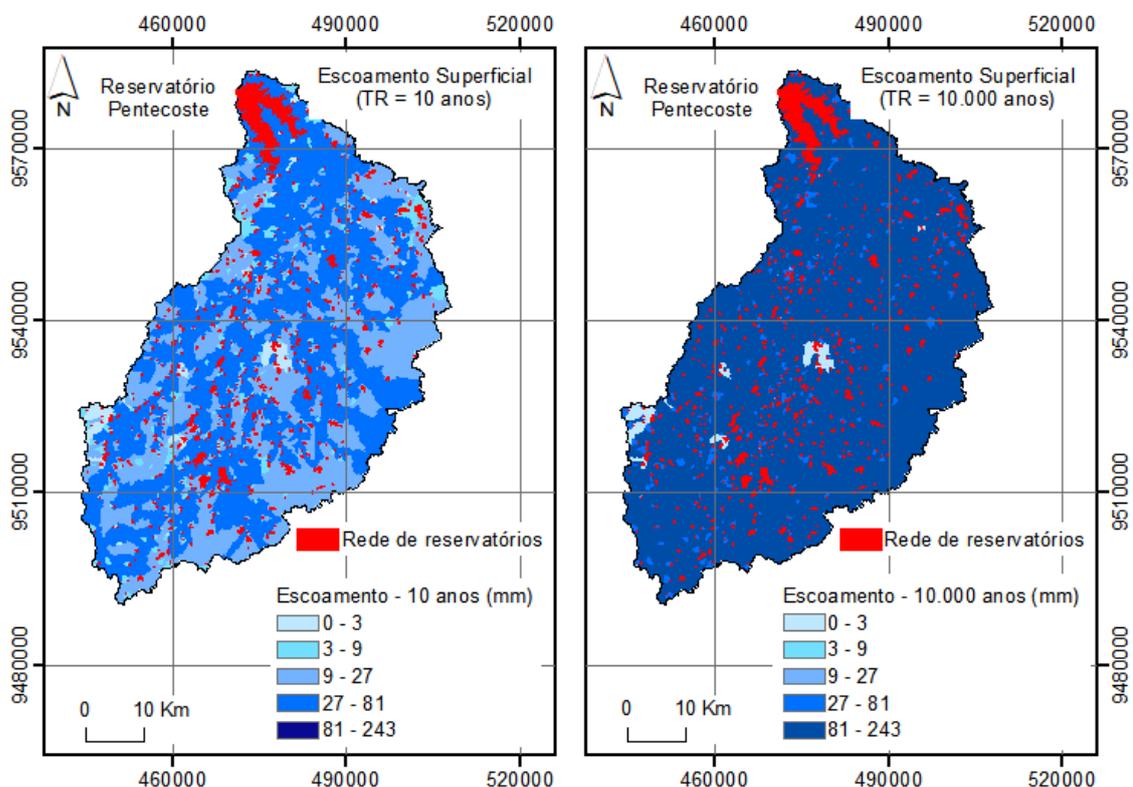
Já na Figura 5b é apresentada a relação entre o coeficiente de escoamento (%) e o escoamento superficial no evento de cheia (mm). É importante destacar que para um período de retorno de 10 anos, os eventos de cheia são bem menores, com coeficientes de escoamento inferiores a 50%. Já para o período de retorno de 10.000 anos, geralmente utilizado para o

dimensionamento de estruturas hidráulicas de grande porte, como vertedores de barragens, os valores de escoamento são maiores e o coeficiente de escoamento também aumenta, chegando a valores superiores a 75%.

Ademais, é válido citar que o coeficiente de escoamento pode ser influenciado por outros fatores, como variações sazonais, que afetam a disponibilidade hídrica no solo, além de ocasionar mudanças no tipo de vegetação e sua cobertura. Além disso, mudanças no uso do solo causadas pelo avanço da urbanização, ou desmatamento, também impactam diretamente no uso do solo, afetando nesse coeficiente.

Na Figura 6 é apresentado o mapa da Bacia de Pentecoste, mostrando os valores de escoamento superficial para os períodos de retorno de 10 e 10.000 anos. Percebe-se que, para o período de retorno de 10.000 anos, praticamente toda a bacia apresenta escoamento superficial superior a 80 mm, enquanto em eventos menos frequentes ($Tr = 10$ anos), boa parte da bacia apresenta escoamento superficial inferior a 27 mm.

Figura 6 – Variabilidade espacial do escoamento superficial nas 733 sub-bacias, considerando as simulações para os tempos de retorno de 10 e 10.000 anos.



Fonte: De autoria própria.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de ferramentas de SIG para a caracterização de densas redes de reservatórios mostrou-se ser uma estratégia promissora, com potencial de produzir os parâmetros necessários para simulação hidrológica de eventos extremos de escoamento, como observado neste estudo para a rede de reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pentecoste. No caso do comprimento do rio principal, o método apresenta um erro médio percentual absoluto de 9% (*MAPE, Mean Average Percentage Error*), ao analisar uma amostra de 30 sub-bacias.

A aplicação de um método simplificado de cálculo da vazão de pico e demais elementos para estimativa do hidrograma triangular do evento em densas redes de reservatório pode ser uma estratégia interessante, uma vez que esta técnica consegue reproduzir parâmetros hidrológicos similares aos encontrados usando modelagem hidrológica de eventos extremos amplamente reconhecido pela comunidade técnico-científica, como o modelo HEC-HMS. Nesta análise comparativa, o método proposto neste estudo apresenta um erro médio percentual absoluto de 23% na estimativa das vazões de pico para os 14 reservatórios e períodos de retorno de 10 e 10.000 anos, quando comparadas às obtidas com o HEC-HMS. Por outro lado, a simulação de eventos extremos de escoamento da rede completa de 733 reservatórios com o HEC-HMS poderia ser bastante complexa, no que diz respeito ao esforço de parametrização para execução do modelo.

Apesar dos resultados promissores encontrados, é de grande relevância uma análise mais criteriosa quanto à eficiência do método em áreas com disponibilidade de dados medidos de escoamento em bacias de regiões semiáridas. Também pode ser oportuna a validação do método para outras regiões com comportamentos hidrológicos distintos.

Este estudo é de grande importância para o dimensionamento de estruturas hidráulicas, como bueiros e vertedores, tratando as sub-bacias individualmente e gerando hidrogramas associados ao tempo de concentração nestas áreas usando uma técnica simples e com resultados próximos de modelos convencionais. Contudo, a aplicação de modelos complexos ou híbridos podem ser a melhor solução, sobretudo quando há disponibilidade de dados e o estudo requer a simulação detalhada da propagação do escoamento por estruturas hidráulicas.

Este estudo traz resultados iniciais que poderiam ser utilizados como base para futuros trabalhos relacionados à ruptura de barragens em cascata em densas redes de reservatórios superficiais, considerando os hidrogramas gerados nas sub-bacias como vazão de entrada para a simulação deste tipo de desastre, requerendo a integração de hidrogramas em modelos dinâmicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP, Processo nº UNI-0210-00025.01.00/23) pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

AL-RAWAS, G.; NIKOO, M. R.; AL-WARDY, M. **A review on the prevention and control of flash flood hazards on a global scale: Early warning systems, vulnerability assessment, environmental, and public health burden.** International journal of disaster risk reduction: IJDRR, v. 115, n. 105024, p. 105024, 2024.

CARVALHO, F.; RODRIGUES, S. C. **Método Curve Number – pesquisas e discussões dos parâmetros valor CN e abstração inicial.** Geografia Ensino & Pesquisa, v. 25, p. e31, 2021.

Catálogo de Metadados da ANA - ANA. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/search?keyword=CN>>. Acesso em: 24 dez. 2024.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Relatório Estadual de Segurança de Barragens - DE PAULA Ano 2023.** Fortaleza: SRH, 2024. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2024/02/RESB-2023.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2024.

CHOWDHURY, M. S. **Flash flood susceptibility mapping of north-east depression of Bangladesh using different GIS based bivariate statistical models.** Watershed Ecology and the Environment, v. 6, p. 26–40, 2024.

DE ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. **A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil.** Water international, v. 41, n. 2, p. 213–230, 2016.

DE PAULA CARVALHO, M. C. et al. **Análise de ruptura hipotética para barragens em**

cascata. *Ciência ET Praxis*, v. 19, n. 34, p. 64–82, 2024.

EUROPEAN SPACE AGENCY; AIRBUS. **Copernicus DEM.** Copernicus DEM European Space Agency, , 2022.

GACUL, L.-A. et al. **GIS-based identification of flood risk zone in a rural municipality using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP).** *Revue internationale de géomatique*, v. 33, n. 1, p. 295–320, 2024.

IBRAHIM, N. A. et al. **GIS-based analysis of flood and drought susceptibility in renewable energy systems planning.** *Energy (Oxford, England)*, v. 313, n. 133906, p. 133906, 2024.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 16 nov. 2024.

IPCC, 2023: **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

JIA, M. et al. **Exploring the impact of climate change on flood risk at cultural heritage sites using a GIS-based SCS-CN method: A case study of Shanxi province, China.**

KUMARI, M. et al. **Rainfall-runoff modelling using GIS based SCS-CN method in umiam catchment region, Meghalaya, India.** *Physics and chemistry of the earth (2002)*, v. 135, n. 103634, p. 103634, 2024.

MOURA, M. S. B. DE et al. **Clima e água de chuva no Semi-Árido.** www.alice.cnptia.embrapa.br, 2007.

PENNA, D.; BORGA, M.; ZOCCATELLI, D. **7.9 Analysis of flash-flood runoff response, with examples from major European events.** Em: *Treatise on Geomorphology*. [s.l.] Elsevier, 2013. p. 95–104.

PINHEIRO DO NASCIMENTO, A. T.; GURGEL MACAMBIRA, A.; AUGUSTO MEDEIROS, P. H. **Efeito da Rede de Reservatórios sobre a Energia Hidráulica Acumulada em Bacia Hidrográfica de Meso-Escala no Semiárido Brasileiro.** *Conexões - Ciência e Tecnologia*, v. 10, n. 5, 2016.

RABELO, U. P. et al. **Representing a dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model.** *Journal of hydrology*, v. 603, n. 127103, p. 127103, 2021.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M.; OLIVEIRA, T. S.; LOBATO, F. A. O. **Equações de Intensidade – duração – frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará.** *Scientia Agraria*. Curitiba, v. 9, n. 4, p. 511-519, 2008.

RIAZ, R.; MOHIUDDIN, M. **Application of GIS-based multi-criteria decision analysis of hydro-geomorphological factors for flash flood susceptibility mapping in Bangladesh.** *Water Cycle*, 2024.

TORTORELLI, R. DE M. et al. **Segurança hídrica e mudanças climáticas: Uma caracterização hidrológica para a bacia do rio Verde Grande.** *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, v. 5, p. e0240011, 2024.

VILLELA, S.M. e MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo, 1975