



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Conhecimento do perigo ocasionado pelas enchentes urbanas: O caso do Município de Itabuna, Bahia

Emilly da Silva Farias¹, Ronaldo Lima Gomes², João Batista Lopes da Silva³

¹Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Estadual de Santa Cruz, Salobrinho, CEP 45662-900, Ilhéus, Bahia. emillyfarias10@hotmail.com (autor correspondente). ²Dr. em Geotecnia, Professor Pleno, Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Estadual de Santa Cruz, Salobrinho, CEP 45662-900, Ilhéus, Bahia. rlgomes@uesc.br ³Dr. em Engenharia Agrícola, Professor da Universidade Federal do Sul da Bahia, Praça Joana Angélica, 250, CEP 45988-058, Teixeira de Freitas, Bahia. silvajbl@ufsb.edu.br

Artigo recebido em 20/10/2023 e aceito em 17/05/2024

RESUMO

O meio urbano é o espaço mais vulnerável a passar por consequências danosas em virtude de eventos de inundação. Neste cenário, destaca-se o município de Itabuna que tem passado por eventos recorrentes de inundações de grandes dimensões. Pensando nisso, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de mapear o perigo da ocorrência de inundações ao longo da calha do rio Cachoeira, no trecho urbano deste município. O método adotado teve as suas atividades iniciadas com a caracterização fluviométrica e pluviométrica da área em estudo, a partir da análise das séries históricas de estações localizadas na bacia compreendidas entre os anos de 1963 e 2021. Em seguida, realizou-se a avaliação da ocorrência do perigo a inundação a partir da análise em dois contextos: o primeiro através do entendimento das características geomorfológicas da planície de inundação do rio e o segundo a partir da determinação das características e distribuição da lâmina d'água de inundação em cheias de diferentes tempos de recorrência, por meio da modelagem de dados no software HEC-RAS. A validação destes modelos foi realizada por meio da comparação de dados da lâmina d'água real obtidos em imagens/fotografias da área inundada na cheia de 2021. Os resultados demonstram que os eventos de cheias mais significativos foram originados pela ocorrência de precipitações contínuas e com distribuição em toda a bacia hidrográfica. Em relação as formas de relevo, ficou evidente a existência de planícies históricas de inundação que estão localizadas as margens do canal principal. Os dados da modelagem da lâmina d'água de inundação no HEC-RAS apresentaram resultados de área e profundidades atingidas pelos eventos de cheias compatíveis com as observações e registros reais.

Palavras-Chave: Modelagem computacional; HEC-RAS; Inundações; Sul da Bahia.

Knowledge of the Danger Caused by Urban Floods: the Case of the Municipality of Itabuna, Bahia

ABSTRACT

The urban environment is the most vulnerable space to experience harmful consequences due to flooding events. In this scenario, the municipality of Itabuna stands out, which has experienced recurring events of large floods. With this in mind, this study was developed with the aim of mapping the danger of flooding along the Cachoeira river channel, in the urban section of this municipality. The activities adopted began with the fluviometric and pluviometric characterization of the area under study, based on the analysis of the historical series of stations located in the basin between years 1963 and 2021 to danger to flooding based on analysis in two contexts: The first through understanding the geomorphological characteristics of the river floodplain and the second based on determining the characteristics and distribution of the flood water depth in floods of different recurrence times, through data modeling in the HEC-RAS software. The validation of these models was carried out by comparing real water depth data obtained in images/photographs of the area flooded in the 2021 flood. The results demonstrate that the most significant flood events were caused by the occurrence of continuous precipitation and with distribution throughout the river basin. In relation to the relief forms, it was evident the existence of historic flood plains that are located on the banks of the main channel. The flood water depth modeling data in HEC-RAS presented results of area and depths reached by flood events compatible with real observations and records.

Keywords: Computational modeling; HEC-RAS; Inundation; South of Bahia.

Introdução

Ao tratar a relação entre ser humano e natureza, principalmente em cenários de ocupação de áreas inadequadas, é preciso compreender os elementos que levam a ocorrência do risco ocasionado pelos desastres naturais (escorregamentos, inundações, furacões, etc.), sendo estes: o perigo de ocorrência de um evento, a vulnerabilidade do meio atingido e os danos ocasionados por estes. É com a clareza desses conceitos que se torna possível enxergar a contribuição antrópica frente às dimensões dos eventos danosos.

O perigo ou o *hazard*, em uma primeira perspectiva, é definido apenas a partir de elementos de aspecto físico do ambiente que são prejudiciais ao homem e causados por forças externas, ou seja, de característica puramente física. Então, pode se considerar que o perigo existe visto que as atividades antrópicas estão submetidas às forças naturais. Ou seja, o perigo é o efeito potencial provocado pela interação entre fatores físicos e fatores humanos (Marandola Jr. e Hogan, 2004).

O perigo, associado a eventos de inundações, tem sido estudado desde as primeiras décadas do século XX, quando engenheiros dos Estados Unidos da América investigaram medidas capazes de solucionar os problemas causados pelas inundações rurais e urbanas. Desde então foram identificadas inúmeras variáveis que envolvem um problema tão amplo e, atualmente, dados referentes à incidência do perigo de inundações são constantemente levantados e quantificados em diferentes partes do mundo (Marandola Jr. e Hogan, 2004).

Mattedi e Butzke (2001) trazem em seu estudo uma classificação para cada dimensão física do perigo, a saber: distribuição temporal (frequência, sazonalidade); distribuição espacial; dinâmica de eclosão (tempo de início e de preparação, rapidez de término) e, mecanismos físicos (magnitude, duração, extensão espacial). De acordo com os autores, a partir do conhecimento desses diferentes aspectos que caracterizam o perigo, é possível entender de maneira mais clara a resposta humana frente à ocorrência de eventos danosos, sendo possível de serem estabelecidas atitudes de prevenção, proteção e reação.

Quando se trata da ocorrência de inundações, o perigo pode ser definido como a probabilidade de episódio desse evento com características danosas em uma área determinada e em um período específico. Assim, constituem-se as inundações o perigo resultante das características das chuvas que ocorrem na área afetada e dos fatores físicos dessa área, como por exemplo, a tipologia do relevo, substrato rochoso e

características de cobertura vegetal ou ausência desta (Alves, 2018).

De acordo com Fernandez et al. (2015), o perigo de inundação é composto pela extensão da área inundada e pelas características hidráulicas da inundação. São utilizados diferentes indicadores que retratam as características hidráulicas da magnitude do evento, a exemplo: profundidade da lâmina d'água na área inundada, velocidade do fluxo de água (correnteza), duração da inundação e a sua probabilidade de ocorrência (período de retorno), pois são variáveis que tornam possível a previsão do dano em uma situação de inundação e a sua probabilidade de ocorrência (período de retorno), pois são variáveis que tornam possível a previsão do dano em uma situação de inundação (Wind et al., 1999; Merz et al., 2007; Hora, 2009; Hora e Gomes, 2009).

Nesse contexto, a quantificação do perigo de inundação não representa as consequências de tais inundações na sociedade, ambiente construído ou ambiente natural e sim, o conhecimento da intensidade do processo (Merz et al., 2007). Corroborando com essa afirmação, Andrade et al. (2012) destacam que os setores de perigo utilizados em seu estudo, buscam expressar a probabilidade de ocorrência dos fenômenos de inundação, a sua abrangência, intensidade e recorrência, ou seja, a frequência com que ocorre em um determinado período.

Diferente do perigo, a susceptibilidade corresponde à possibilidade de uma área ser afetada ou não em um determinado evento, em um tempo indeterminado, sendo considerados seus fatores de predisposição para tal ocorrência e não levando em consideração o período de retorno ou probabilidade de ocorrência. Ou seja, de acordo com Cunha e Ramos (2013) as áreas susceptíveis são aquelas que possuem condições naturais que caracterizam uma predisposição a ocorrência de eventos futuros de inundação em decorrência de precipitações intensas. Em resumo, o termo susceptibilidade pode ser entendido como a propensão das áreas ao desenvolvimento de um fenômeno, podendo ser de inundação (Leal, 2018).

A representação do perigo de inundação pode ser feita por meio de cartografia resultante da aplicação de modelos hidrológicos, hidráulicos e da modelagem da superfície. Para tanto, são utilizados *softwares* de processamento de dados, em sua maioria baseados em Sistemas de Informações Geográficas, em que ocorre a simulação da transformação do volume precipitado em escoamento, modelando assim o perímetro da inundação, a altura da lâmina d'água e a velocidade de escoamento na zona inundada (Alves, 2018).

Por sua vez, para se conhecer o dano provocado pela inundação, torna-se necessário aliar o perigo da inundação, descrito anteriormente, com as características de vulnerabilidade da área inundada. A vulnerabilidade associa-se as características dos elementos do sistema humano, do ambiente construído e o do ambiente natural que estão submetidos ao perigo de inundação em uma determinada área, por exemplo: a população, edifícios e construções, atividades econômicas e ecossistemas, que são submetidos a consequências negativas como mortes, lesões, estresse psicológico, destruição, interrupção do tráfego ou negócios, poluição dos solos, dentre outros (Merz et al., 2007). Dessa forma, a extensão dos danos da inundação depende não apenas das características de intensidade da inundação, mas também da vulnerabilidade da área inundada.

Dessa forma, a vulnerabilidade pode ser entendida como a exposição física ao perigo, sem condições para enfrentá-lo ou superar as consequências deixadas por sua concretização (Veyret e Richemond, 2007). Partindo desse entendimento, a vulnerabilidade pode ser caracterizada como a possibilidade de sofrer com os agravos originados pelas intervenções realizadas além da capacidade do ser ou sistema afetado (Santos, 2015). Ou seja, quanto maior a vulnerabilidade de uma comunidade, uma cidade, ou indivíduo, menor será a sua capacidade de reagir, se adaptar e se reinventar diante da ocorrência de um evento danoso, como a inundação.

Já o risco, resulta da interação entre o perigo e a vulnerabilidade e o dano ocasionado. Sendo descrito como a probabilidade de ocorrerem eventos naturais de uma determinada magnitude (perigo) e uma determinada perda (vulnerabilidade) que leva a um determinado prejuízo (dano), em uma determinada área dentro de um período especificado (Merz et al., 2007).

De acordo com Westen et al. (2006), a partir da associação do perigo, da vulnerabilidade e do dano é possível quantificar o risco por meio do produto entre eles. Isso porque o processo de avaliação do risco perpassa pela determinação da existência e do grau de vulnerabilidade, da intensidade, natureza e probabilidade de perigos, e identificação da capacidade de enfrentamento e controle dos danos ou perigos (Hora e Gomes, 2009).

No contexto do presente trabalho destacam-se as ocorrências de enchentes históricas associadas ao centro urbano do município de Itabuna, localizado no Estado da Bahia. Um dos eventos mais significativos ocorreu em dezembro de 1967, em que a lâmina d'água recobriu quase

que completamente a Avenida Cinquentenário - considerada a principal avenida comercial do município. Evento similar ao ocorrido na cheia histórica de 1967 aconteceu novamente em dezembro de 2021 em consequência da subida de cerca de 9 m do nível normal, deixando aproximadamente seiscentas famílias desabrigadas e dois óbitos. Têm-se ainda, relatos de inundações de intensidades consideráveis datadas de 1914, 1920, 1947 e 1957, que atingiram bairros situados às margens do rio Cachoeira (Andrade e Rocha, 2005).

Diante do exposto, este trabalho possui o objetivo de mapear o perigo de ocorrência de inundações ao longo da calha do rio Cachoeira em trecho ocupado pela zona urbana do município de Itabuna-BA. Para tanto, o método adotado consistirá em atividades que visam, com a sua execução, responder perguntas como: O que os dados de precipitações e vazões na bacia nos dizem sobre o potencial de inundação do rio Cachoeira na área urbana de Itabuna-BA? Quais as características das formas de relevo do vale do rio Cachoeira em seu trecho urbano? Os aspectos das formas de relevo retratam antigas planícies de inundação do rio? As cheias ocorridas no mês de dezembro dos anos de 1967 e 2021, consideradas históricas, alcançaram e recobriram estas áreas potencialmente alagáveis da antiga planície de inundação do rio Cachoeira? Qual a altura da lâmina d'água inundada e qual o volume precipitado? Essas áreas historicamente alagáveis estão atualmente ocupadas? Quais os tipos de ocupação e suas vulnerabilidades encontradas nas áreas inundadas? Os dados existentes atestam a condição de perigo no contexto deste estudo?

Para responder a essas perguntas este trabalho parte da hipótese de que a ocupação urbana desordenada, associada às características naturais da área de estudo, como o comportamento hidrológico e as características fisiográficas, podem estar aumentando a frequência e a magnitude das inundações no município de Itabuna-BA. Tal fato atrelado ao adensamento populacional e a ocupação em áreas não adequadas, como as margens do rio Cachoeira, estão potencializando o risco a esse fenômeno

Material e métodos

Área em estudo

A área de estudo da investigação proposta, abrange um polígono de 6,22 km² da área urbana do município de Itabuna-BA, em trecho entrecortado pelo rio Cachoeira, com aproximadamente 1 km de largura e 7,5 km de extensão (Figura 1). A configuração geométrica da

área foi feita tendo em vista englobar o domínio da mancha de inundação na área urbana em diferentes tempos de recorrência.

O município de Itabuna está localizado na mesorregião sul do Estado da Bahia e possui uma área total de 443,09 km², com população de

185.500 habitantes (IBGE, 2022). O município é o décimo sexto maior PIB do Estado, com o índice de desenvolvimento humano (IDH) equivalente a 0,712. De acordo com a classificação de Köppen (1931), o clima do município é o Tropical de Floresta.

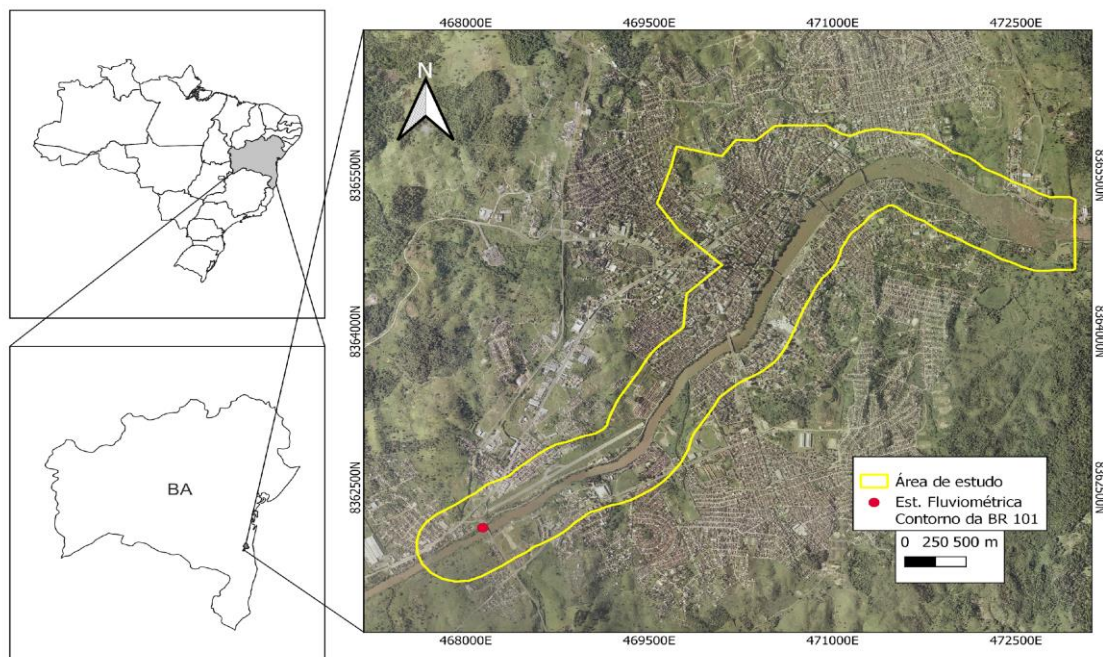


Figura 1. Localização da área de estudo e da estação fluviométrica Contorno da BR-101, trecho do núcleo urbano de Itabuna, Bahia

O método adotado

Para atingir os objetivos traçados, o método adotado apresenta-se subdividido em três etapas que visam o entendimento e conhecimento

dos elementos que compõem o perigo de inundação, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Indicadores do perigo de inundação na área em estudo

Método	Elementos do perigo a inundação	Unidade	Fonte de dados e ferramentas de análise e modelagem.
Etapa 1	Vazões de cheias	m ³ /s	Estudos de pluviometria e vazões na área em estudo realizado por Farias e Gomes (2023), ajustados no <i>Hidroweb</i> (ANA, 2022b) e modelados no Hidro 1.4 (ANA, 2022a) e no SisCAH 1.0 (Sousa et al., 2009).
	Probabilidade de ocorrência (TR)	anos	
	Cotas atingidas pelas cheias na seção da estação	m	
	Intensidade de chuvas na bacia associadas as cheias históricas	mm/mês	
Etapa 2	Mapeamento da planície de inundação do rio Cachoeira na área em estudo	m ²	Base cartográfica SICAR/CONDER, em escala 1:2.000 com MDT de resolução 1m x 1m organizados em SIG QGIS (Conder, 2002), tendo em vista a elaboração de mapa hipsométrico e de declividade da área em estudo para análise e mapeamento de planícies de inundação. Aplicação do modelo de Iwahashi e Pike (2007) para definição de formas de relevo na área.
Etapa 3	Área atingida pela inundação em diferentes tempos de recorrência	m ²	Base cartográfica SICAR/CONDER, em escala 1:2.000 com MDT de resolução 1m x 1m organizados em SIG QGIS (Conder, 2002). Modelagem hidrológica unidimensional em regime permanente utilizando o HEC-RAS (USACE, 2021).
	Profundidade de lâmina d'água nas áreas atingidas em diferentes tempos de recorrência	m	
	Velocidade da correnteza em diferentes tempos de recorrência	m/s	

Na primeira Etapa, realizou-se a caracterização fluviométrica e pluviométrica da área em estudo a partir da análise das séries históricas da estação fluviométrica Contorno da BR 101, localizada a montante do centro urbano da cidade de Itabuna-BA e das estações pluviométricas localizadas na bacia hidrográfica do rio Cachoeira (Tabela 2).

As séries históricas dos dados do posto fluviométrico foram manipulados pelo *software* SisCAH 1.0 (Sousa et al., 2009) para cálculo da vazão média mensal, vazão média mensal anual, vazão máxima média mensal e da vazão máxima anual. Em seguida, foram calculadas as vazões máximas de cheias da área de estudo, sendo obtidos os valores de cotas atingidas por cheias com o tempo de retorno de 2 anos, 5 anos, 10 anos, 20

anos, 50 anos e 100 anos (TR2, TR5, TR10, TR20, TR50, TR100).

Com relação aos dados pluviométricos, esses foram avaliados com o objetivo de compreender a relação existente entre as chuvas que ocorrem na bacia hidrográfica do rio Cachoeira, com a ocorrência de picos de cheias na área em estudo. Para tanto, as séries históricas de precipitação foram manipuladas pelo *software* Hidro 1.4 (ANA, 2022a) para calcular a precipitação média anual e as médias mensais. Além disso, realizou-se a associação dos picos de vazões máximas aos volumes precipitados em cada estação pluviométrica. Maiores detalhes metodológicos e resultados encontrados nessa etapa podem ser vistos em Farias e Gomes (2023).

Tabela 2. Estação fluviométrica e estações pluviométricas pertencentes à bacia do rio Cachoeira e a sua área de influência selecionadas para o estudo.

Código	Nome	Tipo	Duração (anos)	Latitude	Longitude
53180000	Contorno da BR-101	Fluviométrica	48	-14,8150	-39,2961
01439001	Lomanto Junior	Pluviométrica	52	-14,8103	-39,4714
01439002	Floresta Azul	Pluviométrica	52	-14,8597	-39,6583
01439044	Santa Cruz da Vitória	Pluviométrica	52	-14,9589	-39,8075
01539016	Fazenda Manaus	Pluviométrica	52	-15,1544	-39,7692
01539008	Itajú do Colônia	Pluviométrica	44	-15,1389	-39,7242
01539002	São José	Pluviométrica	52	-15,0922	-39,3456
01539009	Firmino Alves	Pluviométrica	26	-14,9886	-39,9222
01540006	Itororó	Pluviométrica	26	-15,1167	-40,1167
01439026	Buerarema (Macuco)	Pluviométrica	34	-14,9500	-39,3000
01539015	Fazenda Liberdade	Pluviométrica	31	-15,1894	-39,4361
01440015	Itajaí (Tapirama)	Pluviométrica	28	-14,9517	-40,0975

Fonte: Adaptado de Farias e Gomes (2023)

A segunda Etapa do método consiste em uma avaliação da ocorrência do perigo de inundação associada à área em estudo, a partir da análise do contexto geomorfológico, ou seja, das formas de relevo associadas à calha principal do rio Cachoeira em seu trecho urbano. Para tanto, essas formas de relevo foram mapeadas em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), mais precisamente com a manipulação de informações cartográficas (curvas de nível em formato *shapefile* provenientes do levantamento da base SICAR/CONDER, em escala 1:2.000 (Conder, 2002)) e a consequente elaboração do Modelo Digital do Terreno (MDT).

A partir da análise e interpretação do MDT foram mapeados os fundos de vale e as planícies de inundações de acordo com a técnica de mapeamento de *Landforms* (Iwahashi e Pike, 2007). Essa técnica consiste em uma classificação automatizada de atributos topográficos por meio do modelo digital de elevação. Nessa classificação são

consideradas a inclinação e textura da superfície e a convexidade local.

Nesse contexto, parte-se da premissa de que planícies de inundação são áreas susceptíveis a inundações em um determinado período temporal. Sendo assim, as manchas de planícies de inundação serão confrontadas com as cotas atingidas quando da elaboração dos mapas de manchas de inundação obtidos pela modelagem hidrológica da Etapa 3.

Em seguida, na terceira Etapa, também se avalia o perigo a partir do conhecimento da lâmina d'água de inundação, mais especificamente: a sua área de cobertura, sua profundidade e a velocidade do fluxo de água (correnteza), ocasionados por cheias em diferentes tempos de recorrência.

A profundidade da lâmina d'água, sua área de abrangência e suas características de velocidade de fluxo foram obtidas a partir da modelagem dos dados em *software* especializado. A validação do modelo foi realizada com a comparação de dados de lâmina d'água obtidos em imagens/fotografias

reais da área inundada quando das cheias de 1967 e 2021.

Dentre os *softwares* disponíveis, optou-se pelo HEC-RAS, que é um *software* livre que realiza cálculos de perfis unidimensionais e bidimensionais em situações de fluxo permanente ou transitório para regimes subcrítico, supercrítico e misto (USACE, 2021). O referido *software* tem sido utilizado para modelagem de áreas de inundação em inúmeros trabalhos científicos, com destaque para os trabalhos desenvolvidos por: Namara et al. (2022) que mapearam uma planície de inundação na bacia hidrográfica Alto Rio Awash, na Etiópia; Rangari et al. (2019) que analisaram eventos extremos de precipitação com base em eventos passados para a cidade de Hyderabad, Índia; Lea et al. (2019) que simularam um evento de rompimento em um rio da Coreia do Sul, ocorrido em 2011, e constataram que os resultados encontrados foram semelhantes com os observados na realidade, provando a aplicabilidade do *software* e sua potência como ferramenta de simulação de inundações; Mendes et al. (2022) que avaliaram diferentes situações para o trecho canalizado no córrego Botafogo, em Goiânia, por

meio do qual o HEC-RAS se mostrou eficiente e satisfatório, apresentando erros inferiores a 20%.

O pré-processamento da modelagem hidráulica no HEC-RAS ocorre por meio da definição da geometria do terreno, para que sejam configuradas as características físicas da área em estudo. Dessa forma, foram definidos o canal principal do rio (*Rivers*), as linhas que delimitam as bordas do canal principal (*Bank Lines*), a área em que ocorre o escoamento do fluxo (*Flow Paths*) e as seções transversais (*Cross Sections*) (Figura 2). Todas foram digitalizadas de montante para jusante, da margem esquerda para a direita, utilizando como plano de fundo o MDT já mencionado na etapa metodológica anterior. Em seguida, atribuiu-se o coeficiente de rugosidade de *Manning* (n) para o canal principal e para as margens do canal. De acordo com Namara et al. (2022), esse coeficiente exerce uma função importante na estimativa correta da elevação da superfície da água. Assim, adotou-se para o canal principal $n = 0,035$, para as margens com vegetação $n = 0,040$, e para as margens com edificações $n = 0,030$, conforme recomendado por Porto (2006).

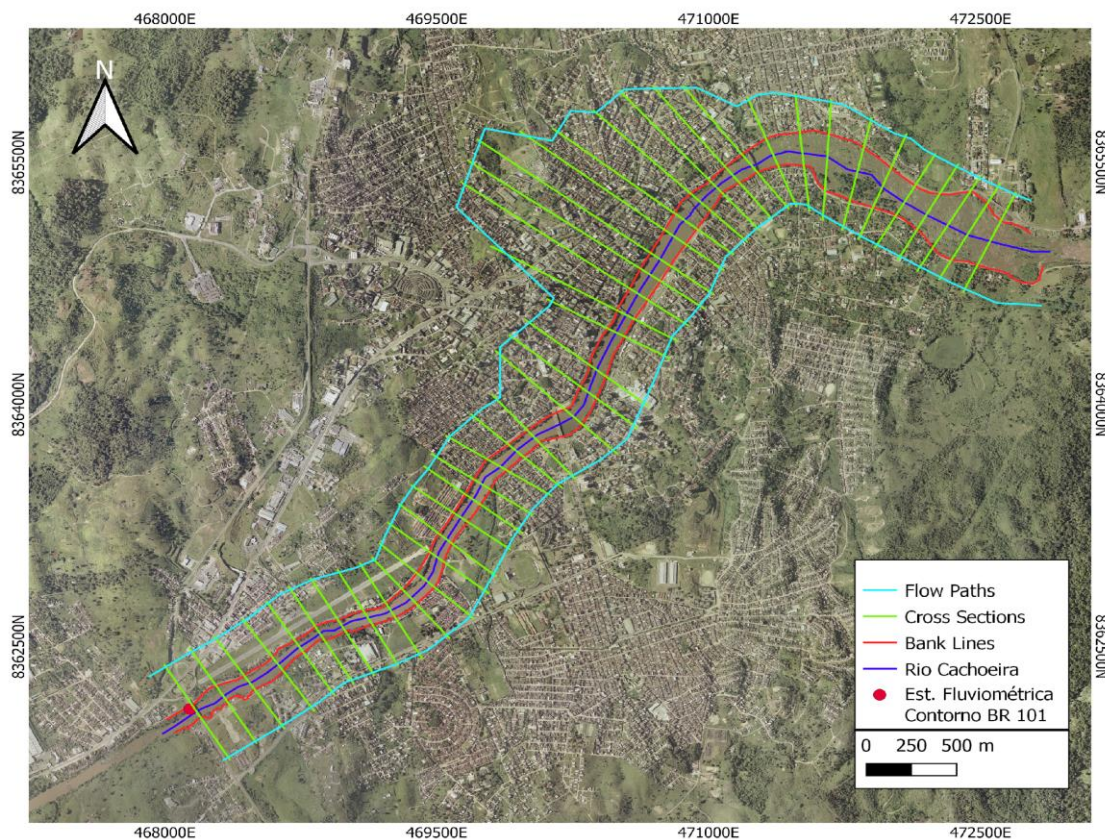


Figura 2. Seções transversais do trecho urbano utilizados para a modelagem das manchas de inundação no HEC-RAS

Como regime de escoamento estabeleceu-se o regime permanente, e como dados de entrada foram utilizadas as vazões média, TR 2, TR 5, TR

10, TR 20, TR 50, TR 54 e TR 100 (Farias e Gomes, 2023) na seção mais a montante localizada na estação Contorno da BR 101. Como condições

de contorno foram definidas a montante as cotas atingidas por cada tempo de recorrência e, a jusante, a profundidade normal, sendo utilizada a declividade por trecho de 0,005 m/m. Então, determinou-se a combinação de regime de fluxo misto, ou seja, que engloba os regimes sub e supercrítico, conforme utilizado por Namara et al. (2021) e procedeu-se com a execução da modelagem que culminou com a geração dos resultados de área atingida pelas inundações, profundidade de lâmina d'água e velocidade da correnteza, todos em diferentes tempos de recorrência.

Por fim, quanto a descrição no contexto da área, identificou-se qualitativamente os tipos de uso e ocupação do solo que estão sendo atingidos pela lâmina d'água quando há ocorrência dos eventos de inundação, tornando conhecidas suas susceptibilidades naturais e adquiridas a esse tipo de evento.

Resultados e discussão

O que os dados atuais de chuvas e vazões na bacia nos dizem sobre o potencial de inundação na área estudada.

A partir da análise dos dados provenientes do banco de dados da Agência Nacional de Águas

e Saneamento Básico (ANA, 2022b), e dos apresentados em Farias e Gomes (2023), referentes as vazões médias mensais do rio Cachoeira da estação Contorno da BR 101, observa-se na Tabela 3, que os meses compreendidos entre maio e outubro são os mais secos, destacando-se os meses de agosto e setembro com os menores volumes fluviométricos. Em seguida, há um aumento gradual desse volume durante os meses de novembro a abril, ocorrendo um pico de vazão no mês de dezembro, com média de 51,89 m³/s. A vazão média mensal anual, calculada a partir dos valores constantes na Tabela 3, foi de 21,13 m³/s. Tal fato, como foi apresentado em Farias e Gomes (2023), retrata o cenário em que o mês de dezembro, historicamente, possui valor de vazão média mensal cerca de 2,5 vezes maior do que a média mensal anual. Esse comportamento também é observado quando se analisa os dados de vazões máximas mensais que possuem média de 954,15 m³/s para a estação fluviométrica Contorno da BR-101 (53180000) com os maiores valores máximos ocorridos no mês de dezembro, de 1.760,45 m³/s. Assim como ocorre com a vazão média mensal, a vazão máxima mensal apresenta menores valores entre os meses de maio e outubro, com destaque para o mês de agosto que possui a menor máxima.

Tabela 3. Médias mensais das vazões médias e máximas na estação fluviométrica estudada

Meses	Vazões médias mensais (m ³ /s)	Vazões máximas mensais (m ³ /s)
Jan	27,40	1.584,05
Fev	35,47	1.594,46
Mar	32,43	1.636,48
Abr	22,58	1.053,40
Mai	11,84	634,59
Jun	10,45	524,23
Jul	10,37	191,49
Ago	7,84	152,56
Set	5,39	196,68
Out	10,22	495,53
Nov	29,75	1.625,92
Dez	51,89	1.760,45
Média	21,13	954,15

Fonte: Adaptado de Farias e Gomes (2023)

Já o gráfico da Figura 3, no contexto do presente trabalho, que é o entendimento das características e ocorrências de inundações, apresenta a variação das máximas anuais durante o período de 1965 a 2019 para a estação Contorno da BR-101. A partir dessa figura depreende-se que para a estação Contorno da BR-101, foram encontrados picos de máximas nos anos de 1967 (2.668,44 m³/s), 1991 (1.625,92 m³/s), 1992 (1.594,47 m³/s), 1997 (1.636,48 m³/s), 2002 (1.964,03 m³/s) e 2007 (1.760,45 m³/s).

Ainda considerando o estudo conduzido por Farias e Gomes (2023), com os valores das vazões máximas e o ano de sua ocorrência, tornou-se possível o cálculo dos seus tempos de recorrência a partir da aplicação do método de Gumbel, que é considerado a distribuição mais adequada para extrapolar dados de precipitação máxima diária e anual para períodos de retorno longos (Sansigolo, 2008; Wanderley et al., 2018).

Dessa forma, foram obtidos os valores de cotas e vazões máximas atingidas por cheias com o tempo de retorno de 2 anos, 5 anos, 10 anos, 20

anos, 50 anos e 100 anos (TR2, TR5, TR10, TR20, TR50, TR100). A Tabela 4 apresenta os dados referentes as cotas atingidas e respectivas vazões ocorrentes em diferentes tempos de recorrência na seção da estação Contorno da BR 101. Destacam-se nessa tabela a cota no terreno de 50,32 m característica da média mensal anual de vazão de 21,13 m³/s e a cota de 58,74 m, atingida por uma

vazão de 2.430,19 m³/s que eleva o nível médio do rio cachoeira em aproximadamente 9 m e corresponde ao tempo de retorno de 54 anos para a estação fluviométrica Contorno da BR 101. É a partir dessa vazão que ocorre o extravasamento do leito do rio e a consequente inundação no centro comercial do município de Itabuna-BA.

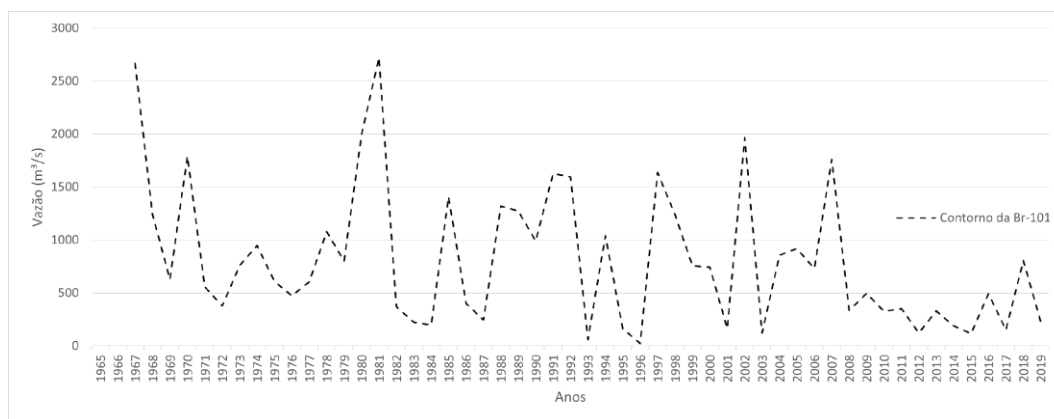


Figura 3. Vazão máxima em cada ano na estação Contorno da BR 101

Fonte: Adaptado de Farias e Gomes (2023)

Tabela 4. Tempo de recorrência das vazões máximas e das cotas para a estação fluviométrica Contorno da BR-101

Tempo de Retorno	Vazão (m³s ⁻¹)	Elevação no terreno (m)
Média mensal anual	21,13	50,32
TR 2	670,22	53,4
TR 5	1.219,50	55,07
TR 10	1.583,17	56,18
TR 20	1.932,01	57,25
TR 50	2.383,55	58,62
TR 54	2.430,19	58,74
TR 100	2.721,92	59,65

Fonte: Adaptado de Farias e Gomes (2023)

Com relação aos dados pluviométricos, de forma geral e de acordo com o levantamento do comportamento de chuvas na bacia do rio Cachoeira descrito em Farias e Gomes (2023) (Tabela 5), a precipitação média anual encontrada é de 1.088,72 mm, sendo os menores valores de média anual associados as estações localizadas a oeste na bacia (exemplo de 759,90 mm na estação Itororó) e os maiores valores a leste, mais próximo da porção litorânea da bacia (exemplo de 1.461,29 mm na estação Fazenda Liberdade). Os períodos secos e chuvosos são mais acentuados nas estações

que estão localizadas na porção oeste da bacia e os menores volumes precipitados ocorrem nos meses de agosto e setembro. Em seguida, há um aumento do volume, caracterizando um pico no mês de novembro, que marca o início do ano hidrológico na bacia. O período de chuva se estende até o mês de abril. O comportamento das precipitações nessa área foi encontrado também associado as vazões médias mensais da estação Contorno da BR 101 no rio Cachoeira, a exceção do mês de pico, que no caso das vazões foi o de dezembro.

Tabela 5. Precipitação média mensal nas estações da bacia do rio Cachoeira

Estações / Meses	Fazenda Manaus	Santa Cruz da Vitória	Floresta Azul	Lomanto Junior	Itajú do Colônia	Itororó	Firmino Alves	Fazenda Liberdade	São José	Buerarema	Itajaí	Média
Jan	79,83	93,5	93,24	117,77	82,33	82,59	109,08	120,09	136,02	106,47	95,72	101,51
Fev	77,76	80,8	90,78	130,33	73,19	59,63	114,07	125,72	135,63	119,68	91,78	99,94
Mar	88,46	106,16	108,72	140,24	93,68	67,16	88,77	143,1	146,66	143,86	120,74	113,41
Abr	78,15	90,64	97,09	123,84	83,36	63	88,98	127,66	122,81	112,87	97,31	98,7
Mai	46,58	62,12	66,76	106,85	47,25	37,99	52,27	98,13	97,13	82,4	67,49	69,54
Jun	39,89	67,45	76,49	108,92	43,25	36,96	60,18	114,41	105,4	78,31	69,76	72,82
Jul	34,68	63,6	82,67	122,62	39,58	39,84	48,1	123,29	117,96	85,09	72,16	75,42
Ago	23,43	45,06	64,6	109,08	27,58	17,59	30,61	86,1	85,76	79,62	51,89	56,48
Set	27,71	42,5	51,78	83,52	27,1	40,71	54,27	93,54	78,32	73,98	55,99	57,22
Out	65,06	70,02	79,88	108,8	62,63	66,78	75,47	121,66	109,76	113,44	82,07	86,87
Nov	110,99	118,99	120,59	136,45	106,84	114,23	137,42	155,08	148,16	133,02	133,32	128,64
Dez	112,49	107,42	101,88	131,25	111,27	123,98	116,31	156,83	137,22	140,01	118,75	123,4
Anual	788,95	948,26	1035,4	1419,66	798,05	759,9	975,51	1.461,29	1.420,83	1.311,06	1.057,00	1.088,72

Fonte: Adaptado de Farias e Gomes (2023)

Por sua vez, tendo em vista a compreensão da relação existente entre as chuvas que ocorrem na bacia hidrográfica do rio Cachoeira, com a ocorrência de picos de cheias na área em estudo, elaborou-se a Tabela 6. Essa tabela contém os dados dos principais picos de cheias registrados na estação Contorno da BR 101 e os índices pluviométricos obtidos nas estações pluviométricas em período anterior ao pico de vazão.

Nos anos de 1991, 1992, 1997, 2002 e 2007 os eventos de inundação que atingiram o núcleo urbano de Itabuna-BA não extravasaram o canal na zona comercial da cidade. Porém, atingiram cotas associadas a ocupação de bairros ribeirinhos.

Os maiores valores de precipitação ocorreram na estação Santa Cruz da Vitória (em 1992, 1997 e 2007), localizada na sub-bacia do rio Salgado, e na estação Fazenda Manaus (anos de 1991 e 2002) localizada na sub-bacia do rio Colônia. Ou seja, percebe-se que quando as chuvas ocorrem com maior intensidade em apenas uma sub-bacia as inundações que atingem o município são de menores proporções.

Ao levar em consideração que o rio Cachoeira é formado pela confluência dos rios principais destas duas sub-bacias (Salgado e Colônia), é possível compreender que ao ocorrer precipitações intensas em apenas uma delas, o pico de vazão ocorrido será menor, pois, o volume hídrico recebido será oriundo de apenas um dos afluentes do rio Cachoeira.

Diferente do que ocorreu nos anos citados anteriormente, em 1967 uma das maiores inundações históricas atingiu o município de Itabuna-BA, com um pico de vazão máxima de 2.668,44 m³/s. Para o ano em questão, existem

dados históricos registrados em 6 estações pluviométricas, sendo que a maior precipitação ocorreu na estação Itororó com 295,5 mm acumulados durante o período de 24 a 29 de dezembro de 1967. Ao analisar os volumes precipitados nas outras estações são encontrados valores significativos, sendo todos superiores a 150 mm. Além disso, as estações que apresentaram precipitação durante o período do evento, estão distribuídas em todas as porções da bacia do rio Cachoeira, estando as estações Itajaí, Itajú do Colônia e Itororó localizadas na sub-bacia do rio Colônia, a estação Firmino Alves localizada entre as sub-bacias do rio Colônia e do rio Salgado, e as estações Fazenda Liberdade e Buerarema localizadas na sub-bacia do rio Piabanha.

Assim como em 1967, no ano de 2021 ocorreu novamente uma inundação de grandes proporções no município. Todavia, até a conclusão do presente trabalho ainda não estão disponíveis na ANA (2022b) os dados fluviométricos para estimativa do pico de vazão máxima que foi atingido no evento de 2021. No entanto, é possível identificar a ocorrência de precipitação em estações pluviométricas localizadas em diferentes pontos ao longo da bacia, sendo elas: Santa Cruz da Vitória, localizada na sub-bacia do rio Salgado, Fazenda Manaus, localizada na sub-bacia do rio Colônia, Lomanto Júnior, localizada na porção do rio Cachoeira, e São José, localizada na sub-bacia do rio Piabanha. Percebe-se, portanto, que os grandes eventos de cheias são oriundos da ocorrência de precipitação em diferentes pontos da bacia hidrográfica, ou seja, é necessário que ocorram chuvas intensas em toda a bacia do rio Cachoeira para que a inundação atinja o centro urbano do município.

Tabela 6. Relação entre os picos de vazão máxima ocorridos na estação Contorno da BR-101 e as chuvas ocorrentes na bacia

Data	Vazão	TR da Vazão (anos)	Estação Pluviométrica	Sub-bacia	Acm, Mês (mm)	Dias de chuva	Acm, evento (mm)	mm/dia
29/12/1967	2.668,44	> 54	Itajaí	Rio Colônia	359,6	4	179,6	44,90
			Iitororó	Rio Colônia	514,3	5	295,5	59,10
			Firmino Alves	Rios Colônia e Salgado	574,6	5	210,8	42,16
			Itajú do Colônia	Rio Colônia	470,7	6	224,3	37,38
			Fazenda Liberdade	Rio Piabanha	416,7	5	184,9	36,98
			Buerarema	Rio Cachoeira	274,5	4	166,3	41,58
23/11/1991	1.625,92	10 a 20	Itajaí	Rio Colônia	282,9	5	118,2	23,64
			Fazenda Manaus	Rio Colônia	455,1	7	255,0	36,43
			Itajú do Colônia	Rio Colônia	318,4	5	131,7	26,34
			Santa Cruz da Vitória	Rio Salgado	293,8	4	147,6	36,90
			Floresta Azul	Rios Colônia e Salgado	215,2	5	77,2	15,44
			Lomanto Junior	Rios Colônia e Salgado	94,9	6	20,2	3,37
			São José	Rio Piabanha	359,7	4	217,0	54,25
			Buerarema	Rio Cachoeira	395,1	5	227,4	45,48
05/02/1992	1.594,47	10 a 20	Fazenda Manaus	Rio Colônia	184,1	3	79,6	26,53
			Itajú do Colônia	Rio Colônia	176,9	4	65,6	16,40
			Santa Cruz da Vitória	Rio Salgado	446,7	5	218,6	43,72
			Floresta Azul	Rios Colônia e Salgado	209,8	4	65,6	16,40
			Lomanto Junior	Rios Colônia e Salgado	159,4	5	38,4	7,68
			São José	Rio Piabanha	66,2	5	6,6	1,32
19/03/1997	1.636,48	10 a 20	Fazenda Manaus	Rio Colônia	369,6	1	89,7	89,70
			Itajú do Colônia	Rio Colônia	382,0	3	122,3	40,77
			Santa Cruz da Vitória	Rio Salgado	420,5	4	151,7	37,93
			Floresta Azul	Rios Colônia e Salgado	261,4	3	71,5	23,83
			Lomanto Junior	Rios Colônia e Salgado	319,0	2	69,4	34,70
			São José	Rio Piabanha	508,4	3	78,5	26,17
06/02/2002	1.964,03	20 a 50	Fazenda Manaus	Rio Colônia	176,0	2	161,0	80,50
			Itajú do Colônia	Rio Colônia	163,3	3	140,4	46,80
			Santa Cruz da Vitória	Rio Salgado	161,7	5	143,5	28,70
			Floresta Azul	Rios Colônia e Salgado	161,0	3	140,7	46,90
			Lomanto Junior	Rios Colônia e Salgado	207,8	4	156,9	39,23
			São José	Rio Piabanha	214,8	3	152,6	50,87
19/12/2007	1.760,45	10 a 20	Fazenda Manaus	Rio Colônia	215,1	3	132,3	44,10
			Itajú do Colônia	Rio Colônia	217,6	4	139,5	34,88
			Santa Cruz da Vitória	Rio Salgado	317,9	4	182,9	45,73
			Floresta Azul	Rios Colônia e Salgado	183,9	4	75,8	18,95
			Lomanto Junior	Rios Colônia e Salgado	206,2	4	70,3	17,58
			São José	Rio Piabanha	165,9	3	41,2	13,73
26/12/2021	-	> 54	Fazenda Manaus	Rio Colônia	263,2	3	86,2	28,73
			Santa Cruz da Vitória	Rio Salgado	313,4	6	155,9	25,98
			Lomanto Junior	Rios Colônia e Salgado	457,4	6	232,4	38,73
			São José	Rio Piabanha	583,5	5	455,3	91,06

Em que: Acm. – Acumulado.

Fonte: Os Autores (2023)

Ao analisar a intensidade das chuvas ocorridas em 24 horas, e sua distribuição nas estações pluviométricas estudadas, observa-se na Figura 4 que os anos das três maiores vazões foram caracterizados pela ocorrência de precipitações superiores a 25 mm nas estações Fazenda Manaus, Itajú do Colônia, Santa Cruz da Vitória, Floresta Azul, e maiores do que 35 mm nas estações Lomanto Jr., Fazenda Liberdade e São José. Destacam-se os picos ocorridos nas estações Iitororó em 1967, com precipitação equivalente a 60 mm diários, Fazenda Manaus em 2002 com 80 mm diários e São José em 2021 com 90 mm diários.

É importante ressaltar que, ao distinguir os eventos diários ocorridos por estação, é possível

perceber que os três anos marcados pelas maiores vazões são caracterizados por chuvas que se mantiveram constantes na maior parte das estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Cachoeira. No ano de 1967, é perceptível que houve uma precipitação maior nas estações Itajaí, Iitororó e Firmino Alves, enquanto nas demais estações o volume precipitado se manteve entre 30 e 40 mm, com destaque para um aumento discreto na estação São José. Já em 2021, o volume precipitado nas estações Fazenda Manaus, Itajú do Colônia e Santa Cruz da Vitória esteve próximo aos 30 mm, ocorrendo um aumento nas demais estações e um pico máximo de aproximadamente 90 mm na estação São José. Então, apesar de terem

ocorrido precipitações menores em algumas estações, o pico de chuva ocorrido em estações mais próximas ao município de Itabuna-BA favoreceu a magnitude da vazão máxima atingida. Para o ano de 2002, o que se pode depreender do comportamento das precipitações é que, exceto pelo pico de 80 mm ocorrido na estação Fazenda Manaus, as demais precipitações foram similares ao evento de 2021, estando próximas dos 30 mm. No entanto, o que não ocorreu em 2002 foi o alto volume precipitado na estação São José. Diante desse fato, pode-se afirmar que, a vazão máxima atingida no ano de 2002 não extravasou o canal do rio e atingiu o centro comercial do município devido ao seu menor volume especificamente nessa estação.

Analisando os demais anos em que ocorreram inundações no município de Itabuna-BA, pode-se entender que, o fato de os volumes precipitados serem menores do que 30 mm nas estações mais a leste da bacia influenciou de forma significativa na magnitude das vazões máximas atingidas. Corroborando com esse fato, tem-se o caso ocorrido em 1991 que, apesar de apresentar um volume precipitado de aproximadamente 55 mm na estação São José, não foi suficiente para que ocorresse uma inundação de grandes proporções no município, devido as precipitações mais baixas nas outras estações pluviométricas.

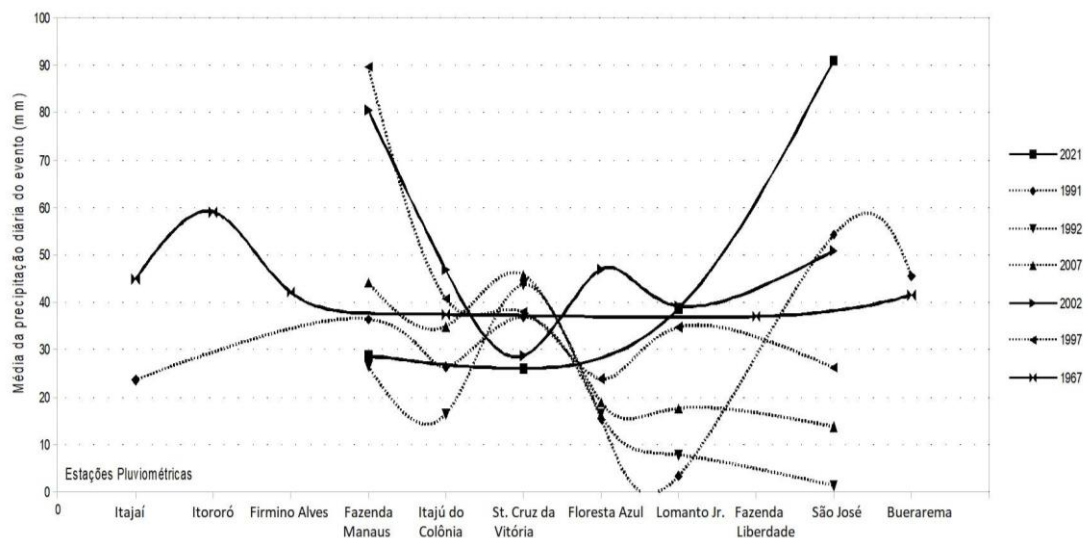


Figura 4. Valores das médias de precipitação diária do evento de cheia

Por fim, é possível analisar a precipitação média ocorrida na bacia durante o evento por meio do método dos Polígonos de Thiessen (Tabela 7). Para isso, leva-se em consideração as áreas de contribuição de cada uma das estações pluviométricas descritas na Tabela 7. Os anos que apresentaram inundação histórica e precipitações uniformes ao longo de toda a bacia, apresentaram precipitação média diária do evento correspondentes a 41,08 mm em 1967 e 37,62 mm em 2021, sendo importante destacar que até a conclusão do presente trabalho, ainda não estavam disponíveis na ANA (2022b) dados para todas as estações pluviométricas no ano de 2021.

Outro evento com valor similar aos já mencionados é o ocorrido em 2002,

correspondente a 48,60 mm. No entanto, como já fora discutido, o volume precipitado em cada estação tem influência direta na magnitude do evento, sendo a razão pela qual a inundação ocorrida em 2002 não extravasou o canal do rio. Outro exemplo importante da influência do volume precipitado em cada sub-bacia, tem-se o ocorrido em 1997 correspondente a 44,82 mm, volume médio precipitado superior aos ocorridos nas inundações históricas. Nesse caso, apesar de ter um alto volume médio precipitado quando comparado aos outros eventos, não foi o suficiente para causar inundações de magnitudes históricas. Isso ocorreu, devido à ocorrência de precipitações abaixo de 40 mm diários durante os dias que antecederam o evento nas estações ao longo da bacia.

Tabela 7. Precipitação média diária e com acumulados de 7 e 30 dias de antecedência do evento por meio do método dos Polígonos de Thiessen

Ano do evento	VP 30 (mm)	VP 7 (mm)	VP diário (mm)	Vazão (m³/s)
1967	445,61	207,36	41,08	2.668,44
1991	309,43	152,56	29,92	1.625,92
1992	227,82	90,90	21,27	1.594,47
1997	371,35	100,54	44,82	1.636,48
2002	178,57	149,52	48,60	1.964,03
2007	226,75	115,45	31,41	1.760,45
2021	363,92	186,94	37,62	-

Em que: VP 30 – Volume precipitado na bacia 30 dias antes do evento; VP 7 – Volume precipitado na bacia 7 dias antes do evento; VP diário – volume precipitado na bacia no dia do evento.

As características de formas de relevo e seu potencial de perigo a ocorrência de inundações na área em estudo

O conhecimento das formas de relevo do canal e da sua planície de inundação, são parâmetros importantes na caracterização da susceptibilidade natural a inundação de uma área (Wenzel et al., 2017). Apesar das áreas planas possuírem características naturais favoráveis à infiltração, é importante ressaltar que é sobre elas que ocorrem as constantes inundações ao longo do tempo. No caso da cidade de Itabuna-BA, foi sobre as antigas planícies de inundação que se desenvolveu grande parte da ocupação na região central e comercial da cidade. Sabe-se, conforme exposto anteriormente, que em cheias históricas, a exemplo das que aconteceram no mês de dezembro de 1967 e em 2021, o rio atinge cotas que levam a inundação em níveis de danos consideráveis.

Nesse contexto, considerando os dados de hipsometria, o trecho estudado apresenta altitudes que variam de 35 m (exutório na área) a 107,6 m. As cotas mais baixas encontram-se a jusante da área em estudo e as mais elevadas nos topos do relevo de morros que margeiam o canal do rio (Figura 5).

As cotas hipsométricas de 35 a 55 m associam-se as áreas do canal principal do rio

Cachoeira e de suas áreas adjacentes, provavelmente associadas a antigas planícies de inundação.

Com relação às declividades, a maior parte da área estudada está caracterizada como de relevo plano, variando de 0 a 3%, associado a áreas de fundo de vale e topos, mais precisamente ao longo da calha principal do rio Cachoeira e em suas margens associadas as áreas de cotas mais baixas ao longo das antigas planícies de inundação. Por sua vez, relevos mais ondulados apresentando declividades superiores a 10%, associam-se as encostas dos morros ocorrentes na margem esquerda da área. Dessa forma, as planícies de inundação, anteriormente identificadas na hipsometria e nos perfis, associam-se as áreas de relevo plano que margeiam alguns trechos do rio.

Uma outra forma de identificar a ocorrência de planícies de inundação é com a utilização de ferramentas de modelagem do relevo em ambiente de SIG. Uma delas é o modelo de Iwahashi e Pike (2007). De acordo com esse método, a classe correspondente a planície de inundação da área em estudo pode ser observada na Figura 5.

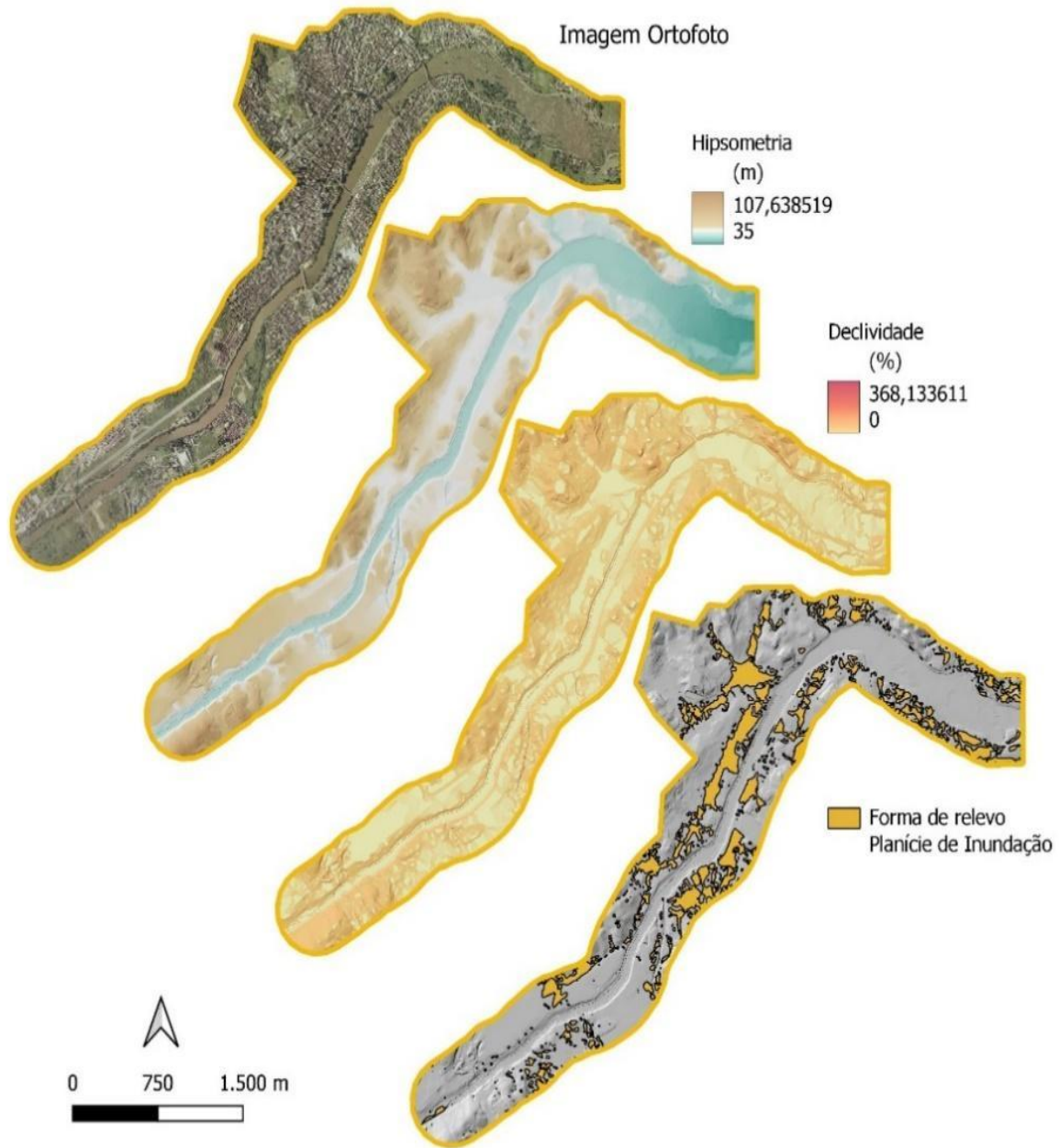


Figura 5. Hipsometria, declividade e forma de relevo na área em estudo
Fonte: Os Autores (2023)

Conforme esperado, ocorre a associação entre a classe mapeada por esse método com os valores de declividade inferiores a 1% e altitudes menores que 58 m, que corresponde as porções mais planas do relevo. Na Figura 5 é perceptível, ainda, a distribuição das áreas planas que margeiam o canal principal do rio, consideradas aqui como áreas potenciais a inundação.

Conforme o rio segue para jusante, as declividades se apresentam menores fazendo com o que escoamento caminhe lateralmente para essas planícies. Observa-se na Figura 5 uma maior

concentração dessas áreas na parte média e jusante do trecho, onde elas se alargam. Por outro lado, na porção de montante, estão presentes declividades maiores, onde o canal do rio se encaixa no relevo, não dando oportunidade para a formação de planícies de inundação e, o escoamento segue confinado a seção transversal encaixada.

Assim, a partir da análise hipsométrica e de declividade é possível perceber o crescimento do município em planícies de inundação históricas. Ao diagnosticar essas áreas planas e favoráveis a inundação em que o setor urbano está inserido,

compreende-se que esses são locais que estão sujeitos a sofrer maiores danos com eventos de cheias, ou seja, independente dos aspectos hidrológicos e climáticos, a própria morfologia local já é um fator determinante para a ocorrência de inundações.

As manchas de inundação em eventos extremos e suas características de lâmina d'água, velocidade de correnteza e área atingida

Conforme exposto na metodologia, essa seção objetiva apresentar os resultados obtidos da modelagem hidrológica do rio Cachoeira no trecho em estudo, com destaque para as características e espacialização da mancha de inundação em cheias com diferentes tempos de recorrência, as profundidades de lâmina d'água e suas velocidades de correnteza (Figura 6).

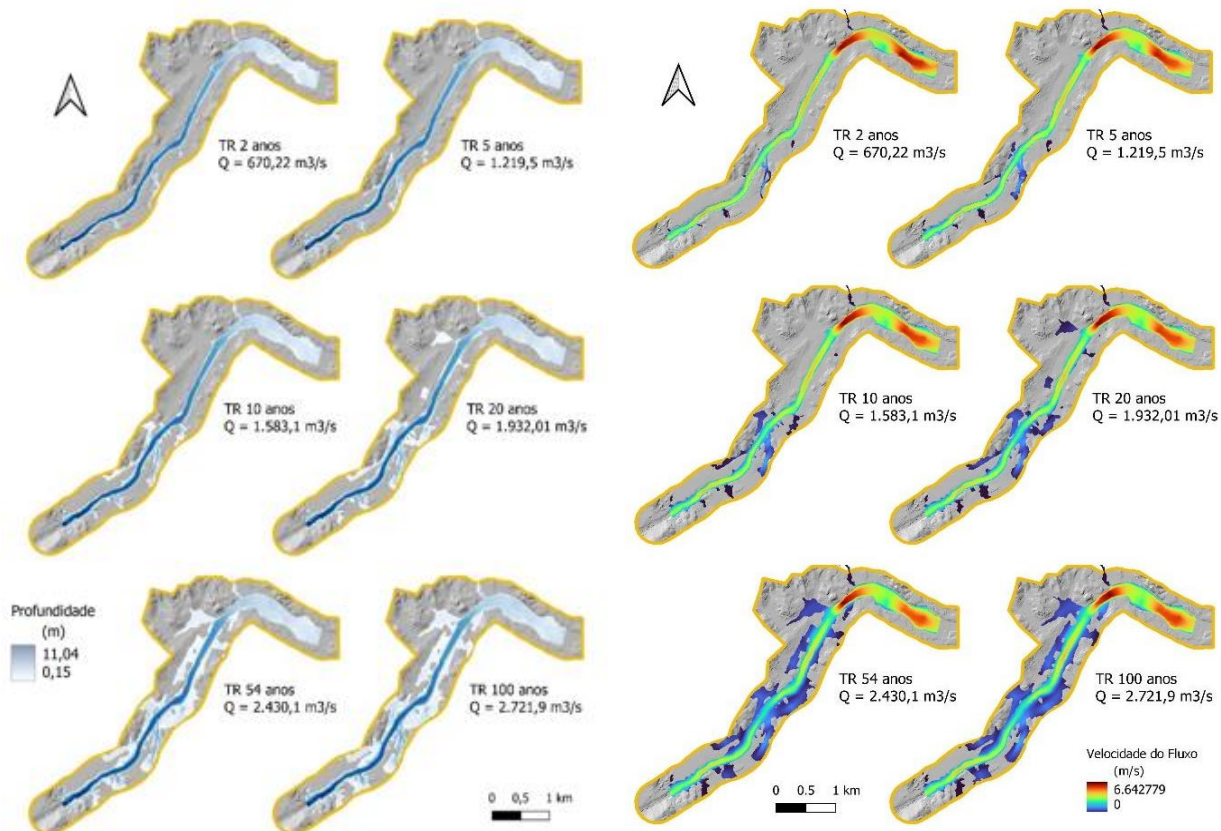


Figura 6. Comportamento da lâmina d'água inundada e das velocidades de correnteza em diferentes tempos de recorrência

Nesse contexto, depreende-se das Figuras 6 e 7 que no Tempo de Retorno de 2 anos a lâmina d'água na calha principal do rio possui profundidade em torno de 6,0 m a montante, 4,0 m na porção média e 1,0 m a jusante. No tempo de retorno de 5 anos esses valores passam a ser: 8,0 m a montante, 5,0 m na porção média e 1,5 m a jusante. Considera-se aqui o ponto de montante a seção transversal na ponte da rodovia Governador Mário Covas (BR 101), o ponto médio na ponte Francisco Lacerda e o ponto de jusante a seção da ponte Calixto Midlej Filho.

Com relação as velocidades de correnteza dessas cheias, no tempo de retorno de 2 anos a velocidade varia de 1,5 m/s na porção a montante a 3,8 m/s na porção a jusante. Para o TR de 5 anos ocorre um aumento da velocidade, apesar das áreas

atingidas serem similares, variando de 2,0 m/s na porção a montante a 5,0 m/s na porção a jusante. Os locais inundados são semelhantes nesses dois tempos de retorno, diferenciando apenas a altura da lâmina d'água atingida.

A lâmina d'água da cheia de TR 2 atinge áreas de ocupação subnormal localizadas as margens do rio Cachoeira, uma delas o aglomerado subnormal do Bananeira, com uma altura de lâmina d'água que pode chegar a 4,0 m ao atingir as residências localizadas ao lado esquerdo da Rua Tertuliano Guedes, as margens do rio Cachoeira. Essa inundação atinge também as edificações que estão mais próximas das margens do rio nos bairros Gogo da Ema, na rua Otávio Menezes. Nos bairros Jardim Vitória e Mangabinha, alcançando o fundo das residências nas ruas Beira Rio e Berilo Gomes,

com lâmina d'água de 3,0 m, em ambas. As ruas Felícia de Novais e parte da rodovia Jorge Amado, no bairro Nossa Senhora de Fátima, também podem ser atingidas com uma lâmina d'água de 1,5 m.

Assim como o TR 2, o TR 5 atinge os aglomerados subnormais já mencionados, no entanto, a lâmina d'água é maior e consequentemente a extensão atingida também é maior. Destaca-se nesse TR 5 a mancha de inundação sobre o bairro Novo Mangabinha, atingindo parte das ruas Tertuliano Guedes de Pinto e São José, e sobre o bairro Mangabinha, atingindo a rua João Mangabinha Filho. No bairro Nossa Senhora de Fátima, as residências das ruas Felícia de Novais e parte da rodovia Jorge Amado continuam sendo atingidas, todavia, com uma área inundada maior, correspondente a uma lâmina d'água de 2,3 m. Percebe-se que as áreas subnormais e as áreas mais ribeirinhas são as mais atingidas por esses TR's, visto que, por estarem as margens do rio cachoeira, são particularmente mais vulneráveis a esses eventos hidrológicos.

No estudo desenvolvido por Hora e Gomes (2009), destacou-se a precariedade em que se encontram essas áreas no município de Itabuna-BA, destacando-se a alta densidade habitacional, a falta de saneamento básico adequado e baixa infraestrutura. Portanto, chuvas com um período de retorno de 2 anos a 5 anos já são capazes de afetar de forma significativa essas comunidades, levando a episódios de inundação que colocam em risco a segurança dos moradores.

No TR 10, o rio principal, em seu canal, atinge alturas de lâmina d'água correspondentes a: 9,0 m a montante, 7,0 m na porção média e 2,0 m a jusante. Nesse TR, o extravasamento que ocorre na porção a montante é intensificado e chegam a atingir alturas de lâmina d'água de 3 m. Na porção média do curso hídrico ocorre uma invasão maior da água nos bairros que estão localizados às margens do rio. Ou seja, a inundação que antes atingia apenas as margens, passam a adentrar os locais ocupados. Na porção a jusante, apesar de

ocorrer o extravasamento do canal principal, são atingidos apenas os locais mais próximos do curso hídrico com lâmina d'água equivalente a 2,0 m.

No TR 10, continua ocorrendo o aumento da mancha de inundação nos aglomerados subnormais que ocupam as margens do canal principal do rio Cachoeira. Nesse tempo de retorno, a rua Tertuliano Guedes de Pinto é atingida em quase toda sua totalidade, enquanto a rua São José e as que estão próximas são atingidas de forma parcial, todas no bairro Novo Mangabinha. No bairro Jaçanã ocorre a inundação das ruas que estão as margens do rio Cachoeira. O destaque se dá para a extensão da mancha formada sobre o bairro Mangabinha. Enquanto nos TR's anteriores a lâmina d'água atingia apenas as áreas próximas as margens do rio, no TR 10 tem-se a formação de uma mancha de alagamento em trechos das ruas: João Mangabinha Filho, São Sebastião, São João, São José, Ubaldino Brandão e Rio Bahia, atingindo uma lâmina d'água que pode chegar a 1,5 m em alguns pontos. Assim como no bairro Mangabinha, no bairro Jardim Vitória tem-se um aumento da inundação, atingindo parcialmente as ruas Beira Rio, Bela Vista, Getúlio Vargas, Santa Luzia, Sergipe e Amazonas, com a altura de lâmina d'água variável de 3,5 m a 0,1 m a depender da distância do canal. Os bairros Jaçanã, Novo Mangabinha, Mangabinha e Jardim Vitória, os mais afetados pelo TR 10, são caracterizados como área de ocupação consolidadas. Apesar dessas áreas serem caracterizadas pela presença de infraestrutura, elas podem sofrer com as consequências das cheias, principalmente se não disporem de um sistema de drenagem eficaz.

Os lugares inundados pelo TR 20 são semelhantes aos que são inundados pelo TR 10. Porém, diferente do TR 10, no TR 20 a inundação ocorre na porção média do rio principal na área em estudo. O que se percebe, é que a partir do TR 20 as inundações passam a atingir áreas mais distantes do curso hídrico e não somente as áreas que margeiam o canal.

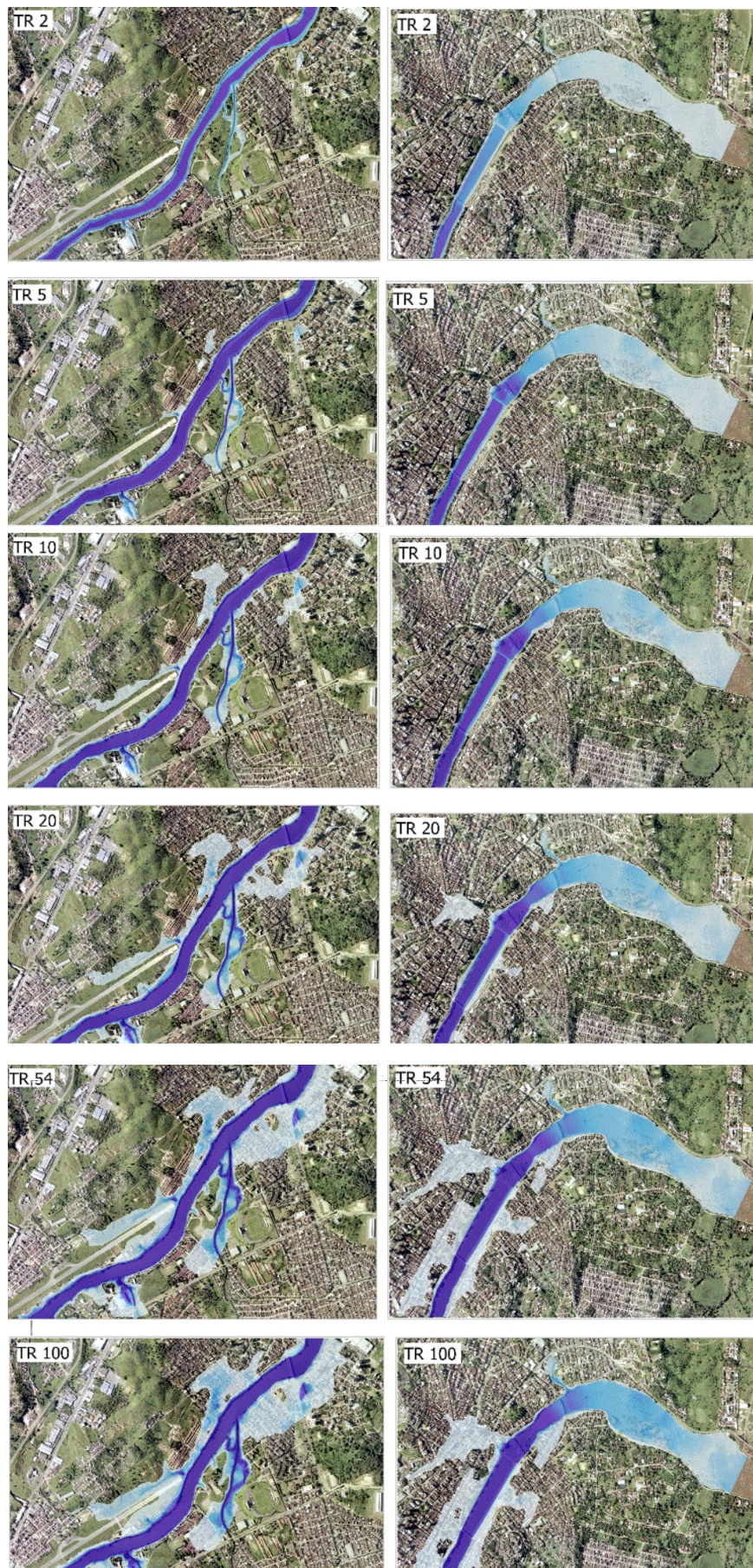


Figura 7. Mancha de inundação para os TR 2, 5, 10, 20, 54 e 100 anos

Com relação as velocidades de correnteza, os tempos de recorrência de 10 e 20 anos são caracterizados pelo surgimento de velocidades menores (inferior a 1,0 m/s) nas áreas das planícies de inundações e maiores na parte central do canal (2,5 m/s).

Na cheia do TR 20 destaca-se a mancha de inundação que ocorre no bairro Jardim Vitória, que atinge as ruas Paraná, Sergipe e Pernambuco, de modo parcial, com uma lâmina d'água de 3,0 a 0,1 m a depender da distância do rio. Além dessas ruas, a inundação adentra pela rua João Teles até atingir a avenida Félix Mendonça com lâmina d'água equivalente a 1,00 m, e as ruas do Prado, Rui Penalva de Farias, de modo parcial, e rua Godofredo Almeida com altura da lâmina d'água de 0,7 m, todas no bairro Nossa Senhora da Conceição. Como já mencionado, o bairro Jardim da Vitória se caracteriza como uma área de ocupação consolidada, assim como o bairro Nossa Senhora da Conceição.

Por sua vez, o TR 54 merece destaque pois é nesse período que ocorre o extravasamento do canal do rio em sua porção média e jusante. Nesse TR, o rio principal atinge uma altura de lâmina d'água de 10,0 m a montante, 8,0 m na porção média e 2,5 m a jusante. Dessa forma, ocorrem extravasamentos ao longo de todo o curso hídrico, atingindo com maior intensidade a porção média do canal. As inundações que ocorrem no período de retorno mencionado, abarcam regiões mais distantes das margens do canal, chegando a inundar áreas que estão localizadas a aproximadamente 500 m com lâminas d'água com altura equivalente a 0,8 m. Ao analisar as planícies históricas de inundação, conforme mostra a Figura 4, é possível perceber que as cheias que ocorrem nesse TR se direcionam para essas áreas. Assim, evidencia-se o potencial natural a inundações da área em que o município se desenvolveu, devido a sua geomorfologia. Fazendo uma análise de montante para jusante, tem-se como primeiros atingidos os aglomerados subnormais as margens do rio Cachoeira. Nestes locais a altura da lâmina d'água atinge 7,0 m. No bairro Jaçanã a mancha de inundação atinge as ruas R.L., R.D., José Antoniel Pinho Lima e chega à avenida Manoel Souza Chaves, com altura de lâmina de água de 2,2 m nas proximidades da Rua do Canal.

No bairro Nova Mangabinha a inundação atinge a rua Tertuliano Guedes de Pinto em sua totalidade, a rua São José e as que estão próximas atinge de forma parcial, assim como já ocorre no TR 10. Todavia, no TR 54 a lâmina d'água atinge 2,5 m, e se estende até a área sem habitações que comporta a pista do aeródromo da cidade. Já o bairro Mangabinha é atingido até a rua Nossa Senhora das Graças, ficando a rua João

Mangabinha Filho coberta em toda a sua extensão. Já a rua Berilo Guimarães é atingida de forma parcial com a inundação se estendendo até parte da avenida Cinquentenário. O bairro Jardim Vitória fica parcialmente alagado até a rua Pernambuco, com uma lâmina d'água que pode atingir-a 1,5 m em alguns pontos. Destaca-se no TR 54 o fato de a água extravasar os muros de arrimo e adentrar o centro comercial da cidade, atingindo a avenida Cinquentenário e todas as ruas que estão localizadas entre a mesma e as margens do rio, com altura da lâmina d'água que pode atingir a 1,2 m. As águas atingem ainda, a avenida Amélia Amado e adentra nas ruas adjacentes a ela, com uma lâmina d'água de 0,8 m. No bairro Nossa Senhora da Conceição, são atingidas as ruas do Prado, Rui Penalva de Farias e Getúlio Vargas.

A inundação que ocorre no período de retorno de 100 anos tem dimensões bem similares com a inundação do tempo de retorno de 54 anos, possuindo uma mesma altura de lâmina d'água na calha principal. Em relação as áreas atingidas, o que difere o TR 100 ao TR 54 é somente a altura da lâmina d'água na parte média do curso hídrico que foi maior no TR 100, no entanto, a extensão atingida é, de forma geral, a mesma.

No TR 100 a mancha de inundação possui 9,0 m no aglomerado bananeira, 5,0 m no bairro Jaçanã, 3,0 m no bairro Nova Mangabinha, 3,4 m no bairro Mangabinha, 4,9 m no bairro Jardim Vitória, 1,5 no centro e 3,8 m no bairro Nossa Senhora da Conceição.

Com relação as velocidades de correnteza, no TR 54 e TR 100 anos tem-se a força cisalhante presente em maiores áreas ao longo do curso hídrico. No curso de água principal a velocidade de correnteza chega a 5,6 m/s na porção mais a jusante. Como já fora mencionado, nesses TR's ocorre a ocupação das planícies de inundação e, nessas áreas a força cisalhante é inferior a 1 m/s. Assim como nos TR's anteriores encontrou-se um valor mais baixo para as áreas edificadas que foram inundadas, devido ao papel de barreira que as edificações assumem, controlando a velocidade que a água escoar.

Levando em consideração a inundação ocorrida em dezembro de 2021, no município de Itabuna-BA, é possível confirmar os resultados encontrados pela modelagem realizada neste estudo. Isso pois, a referida inundação atingiu as áreas previstas pelo TR 54, com uma lâmina d'água similar a prevista pelo modelo. As figuras 8, 9 e 10 mostram locais do município antes e após a inundação, a identificação do local da fotografia na mancha de inundação e a altura de lâmina de água prevista pelo modelo.

A Figura 8 retrata as dimensões atingidas pela inundação de 2021 na rua Etelvina Miranda localizada na região central do município. A fotografia mostra que a lâmina d'água ultrapassa o meio-fio e encobre os tornozelos das pessoas. Baseando-se nisso, é possível constatar uma altura atingida de aproximadamente 0,3 m. Corroborando com o que é mostrado nas fotografias, o modelo prevê uma altura de lâmina d'água de 0,26 m no local analisado.

Da mesma forma, a Figura 9 mostra uma parte da avenida Cinquentenário, que está diante da praça Adami, na região central da cidade, antes e após a inundação. Ao analisar a imagem, pode-se levar em consideração a altura que a lâmina d'água

atinge na porta da agência da Caixa Econômica Federal. Por norma, tem-se como altura de porta 2,1 m e, nesse caso, percebe-se que a lâmina d'água se encontra na metade da porta, atingindo em torno de 1,0 m de lâmina d'água. No modelo estudado, a altura prevista foi de 0,7 m, variação que pode ser considerada dentro do aceitável.

Já a Figura 10 retrata a inundação na parte frontal da câmara dos vereadores do município de Itabuna-BA. Como mostrado nas fotografias é possível perceber que a lâmina d'água ultrapassou o muro de contenção do canal e atingiu o limite inferior das janelas, resultando em uma altura de aproximadamente 1,7 m, assim como o previsto pelo modelo.



Figura 8. Inundação na rua Etelvina Miranda localizada na região central de Itabuna, em 2021

Fonte: G1 (2021)



Figura 9. Inundação na avenida Cinquentenário no município de Itabuna, em 2021

Fonte: G1 (2021)



Figura 10. Imagem na parte frontal da Câmara dos vereadores do município de Itabuna, 2021
Fonte: G1 (2021)

Conclusão

Historicamente, o mês de dezembro apresenta um valor médio de vazão mensal cerca de 2,5 vezes maior do que a média anual no município de Itabuna-BA. Isso significa que, nesse período, encontra-se uma maior quantidade de água fluindo pelo rio e, portanto, as chances de ocorrerem inundações de grandes dimensões são maiores. No entanto, além da questão sazonal, outro ponto importante é a distribuição geográfica das chuvas, pois, ficou perceptível que os eventos de cheias mais significativos são originados pela ocorrência de precipitações em diferentes pontos da bacia hidrográfica. Ou seja, é necessário que ocorram chuvas intensas em toda a extensão da bacia do rio Cachoeira para que aconteça uma inundação de grandes proporções no centro urbano do município. Essa observação indica que quando as chuvas ocorrem de forma intensa em uma única sub-bacia, as inundações resultantes no município são de menor magnitude.

Em relação as formas de relevo do vale do rio Cachoeira em seu trecho urbano, ficou evidente a existência de planícies históricas de inundação que estão localizadas as margens do canal principal e suas áreas adjacentes. Essas áreas são caracterizadas por sua baixa altitude (35 a 55 m) e declividades que variam de 0 a 3%. Portanto, com base na análise hipsométrica e de declividade, percebe-se que o município de Itabuna-BA tem se expandido em áreas de antigas planícies de inundação, com destaque para o fato de que grande parte da ocupação na região central e comercial ocorreu nessas planícies.

Apesar das áreas planas possuírem características naturais favoráveis à infiltração, é importante ressaltar que é sobre elas que tem ocorrido inundações constantes ao longo do tempo

no município, sendo que durante cheias históricas, como as que ocorreram em dezembro de 1967 e em 2021, o rio atinge cotas que resultam em inundações com níveis consideráveis de danos, sendo que tais inundações são direcionadas para essas áreas. Dessa forma, entende-se que, independentemente dos aspectos hidrológicos e climáticos, a própria morfologia local é um fator determinante para a ocorrência de inundações.

Considerando os diferentes tempos de retorno utilizados na metodologia deste estudo, é importante ressaltar o TR 54, pois é nesse intervalo que tem ocorrido o transbordamento do rio em sua porção média e jusante. Durante esse período, o rio principal alcança alturas de lâmina d'água significativas: 10,0 metros a montante, 8,0 metros na porção média e 2,50 metros a jusante. Consequentemente, ocorrem transbordamentos em toda a extensão do curso do rio, com maior intensidade na porção média do canal.

O fato em destaque é o de que as áreas atingidas pelo TR 54 estão atualmente ocupadas tanto por áreas subnormais quanto por áreas consolidadas. No caso das áreas subnormais, destaca-se a alta densidade habitacional, a falta de saneamento básico adequado e uma baixa infraestrutura, sendo locais mais vulneráveis aos danos de inundações. Já as áreas consolidadas, apesar de possuírem infraestrutura básica, podem se tornar vulneráveis as cheias, principalmente se não disporem de um sistema de drenagem eficaz.

Dessa forma, entende-se que, o município de Itabuna-BA se desenvolveu sobre uma planície histórica de inundação e, tal fato aliado a ocorrência de chuvas extremas e constantes em toda a bacia hidrográfica do rio Cachoeira, são fatores que desencadeiam os episódios de inundação de grande proporção no município. Assim, os dados apresentados neste estudo,

principalmente os que tratam da altura da lâmina d'água atingida são de grande relevância para subsidiar uma avaliação da magnitude dos riscos e impactos associados a esses eventos, podendo direcionar medidas de planejamento, prevenção e resposta que visem extinguir e/ou reduzir a vulnerabilidade das áreas mais críticas e, consequentemente evitar situações de perigo.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia, FAPESB, pela bolsa de estudos e a CONDER, Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia, por gentilmente ceder a base cartográfica planialtimétrica da área em estudo.

Referências

- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2022a. Hidro 1.4 – Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos. Disponível: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/sistemas>>. Acesso: 11 ago. 2022.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2022b. Hidroweb – Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos. Disponível: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso: 11 ago. 2022.
- Alves, J.M.N. 2018. Avaliação do perigo de inundação na ribeira do Açafal. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agrária, Castelo Branco, Portugal.
- Andrade, E. de.; Danna, L.C.; Silva, P.C.F. da. 2012. Mapeamento de Perigos e Riscos de Inundação no Município de Aparecida (São Paulo). Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, 35 (2), 28-42. DOI: 10.11137/2012_2_28_42
- Andrade, M.P.; Rocha, L.B. 2005. De Tabocas a Itabuna: um estudo histórico-geográfico. Ilhéus: Editus.
- CONDER. Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia, 2002. Fotografias aéreas e base planialtimétrica da cidade de Itabuna. Salvador: Conder, 2002.
- Cunha, L.; Ramos, A.M. 2013. Riscos naturais em Portugal: Alguns problemas, perspectivas e tendências no estudo dos riscos geomorfológicos. In: Lombardo, M.A.; Freitas, M.I.C. (Orgs.). Riscos e vulnerabilidade: teoria e prática no contexto luso-brasileiro. São Paulo: Cultura Acadêmica.
- Farias, E. da S.; Gomes, R.L. 2023. Comportamento histórico de chuvas e vazões na bacia hidrográfica do rio Cachoeira e suas implicações na ocorrência de eventos de inundações na cidade de Itabuna-BA. Revista Brasileira de Geografia Física, 16 (2), 847-872. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.2.p847-872>
- Fernandez, P.; Pereira, L.G.; Moreira, M.; Gonçalves, G. 2015. Criação e Avaliação do Modelo Digital de Superfície de Escoamento para Elaboração das cartas de Risco de Inundação. VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia. Portugal.
- G1. Veja antes e depois das ruas de Itabuna, cidade que ficou alagada com chuvas no sul da Bahia. 27 dez. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/2021/12/27/veja-antes-e-depois-das-ruas-de-itabuna-cidade-que-ficou-alagada-com-chuvas-no-sul-da-bahia.ghml>. Acesso em: 16 maio 2024.
- Hora, S.B. da. 2009. Mapeamento e avaliação do risco a inundação do rio Cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Brasil.
- Hora, S.B.; Gomes, R.L. 2009. Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do Município de Itabuna/BA. Sociedade & Natureza, 21 (2), 57-75. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-45132009000200005>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Estimativa da população. Disponível: <https://censo2022.ibge.gov.br/>. Acesso em 26 jul. 2023.
- Iwahashi, J.; Pike, R.J. 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. Geomorphology, 86, 409-440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>
- Köppen, W. 1931. Grundriss der Klimakunde: Outline of climate Science. Berlin: Walter de Gruyter.
- Lea, D.; Yeonsu, K.; Hyunuk, A. 2019. Case Study of HEC-RAS 1D-2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea. Water, 11 (10), z048. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11102048>
- Leal, T. dos S. 2018. Análise da suscetibilidade à inundação na bacia hidrográfica do rio João Mendes, Niterói-RJ: planejamento e gestão das águas em áreas urbanas. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, São Gonçalo, Brasil.
- Marandola JR., E.; Hogan, D.J. 2004. Natural hazards: o estudo geográfico dos riscos e

- perigos. *Ambiente e Sociedade*, 7 (2), 95-109. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2004000200006>
- Mattedi, M.A.; Butzke, I.C. 2001. A relação entre o social e o natural nas abordagens de hazards e de desastres. *Ambiente e Sociedade*, 4 (9), sp.
- Mendes, T.A.; Sousa, M.B. de; Pereira, S. A. dos S.; Santos, K.A. dos; Formiga, K.T.M. 2022. Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27 (1), 141-157. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200276>
- Merz, B.; Thielen, A.; Gocht, M. 2007. Flood risk mapping at the local scale: Concepts and challenges. In: Begum, S; Stive, M.J.F.; Hall, J.W. (org.) *Flood Risk Management in Europe*. Dordrecht: Springer, 231–251.
- Namara, W.G.; Damisse, T.A.; Tufa, F.G. 2022. Application of HEC RAS and HEC GeoRAS model for Flood Inundation Mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 1449–1460. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01166-9>
- Porto, R. de M. 2006. *Hidráulica Básica*. São Carlos: EESC-USP.
- Rangari, V.A.; Umamahesh, N.V.; Bhatt, C.M. 2019. Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. *Modeling Earth System Environment*, 5, 1839–1851. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00641-8>
- Sansigolo, C.A. 2008. Distribuição de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23, 341-346. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862008000300009>
- Santos, J. de O. 2015. Relação entre fragilidade ambiental e vulnerabilidade social na susceptibilidade aos riscos. *Mercator*, 14 (2), 75-90. DOI: <https://doi.org/10.4215/RM2015.1402.0005>
- Sousa, H.T.; Pruski, F.F.; Bof, L.H.N.; Cecon P.R.; Sousa, J.R.C. 2009. *SisCAH – Sistema Computacional para Análise Hidrológica. Versão 1.0*. Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos.
- USACE. US Army Corps of Engineers. 2021. *HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual, Version 6.0*
- Veyret, Y.; Richemond, N.M. 2007. Definições e vulnerabilidades do risco. In: Veyret, Y. (org.) *Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente*. São Paulo: Contexto, 25-46.
- Wanderley, L.S. de A.; Nóbrega, R.S.; Moreira, A.B.; Anjos, R.S. dos; Almeida, C.A.P. de P. de. 2018. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22, 149-164. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.56034>
- Wenzel, D.A.; Uliana, E.M.; Almeida, F.T. de.; Souza, A.P.; Mendes, M. A. dos S. M.; Souza, L. G. da S. 2017. Características fisiográficas de sub-bacias do Médio e Alto Rio Teles Pires, Mato Grosso. *Revista de Ciências Agroambientais*, 15 (2), 123-131. DOI: <https://doi.org/10.5327/rcaa.v15i2.2193>
- Westen, C.J.; Van Asch, T.W.J.; Soeters, R. 2006. Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 167-184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>
- Wind, H.G.; Nierop, T.M.; de Blois, C. J.; de Kok, J. L. 1999. Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse flood. *Water Resources Research*, 35 (11), 3459–3465.