

XII ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS

GERAÇÃO DE INDICADORES DE PERIGO E MAPA DE INUNDAÇÃO A PARTIR DE SIMULAÇÃO 2D UTILIZANDO MODELO DIGITAL DO TERRENO DE ALTA RESOLUÇÃO

Edinilson de Castro Ferreira¹; Alexson Caetano²; Prof. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral³

RESUMO – O presente artigo tem como objetivo o mapeamento de áreas de risco de inundação no Riacho Moxotó, localizado na cidade do Recife/PE, avaliando também, a distribuição espacial dos indicadores de risco velocidade de fluxo, profundidade de água e a combinação entre esses dois parâmetros. O estudo utilizou o Modelo Digital do Terreno (MDT), obtido por varredura a laser do terreno pela técnica LiDAR (*Ligth Detection and Ranging*), para realizar simulações hidrodinâmica 2D com modelo HEC-RAS. Avaliou-se inicialmente a extensão total da inundação e os parâmetros “velocidade de fluxo” e profundidade de água” isoladamente. Em seguida foi feita a avaliação da combinação entre esses parâmetros de acordo com três possibilidade de perigo: (1) possibilidade de danos para propriedade e risco para veículos, (2) possibilidade de danos as pessoas e (3) possibilidade de danos estruturais. As simulações confirmaram a presença de vários pontos que periodicamente apresenta inundação na região. A avaliação das possibilidades de perigo demonstra que a região, apesar de apresentar uma grande extensão de inundação, maior parte apresenta riscos apenas para as propriedades, com poucos locais com riscos de danos estruturais e para as pessoas.

ABSTRACT– The present article aims to map flood risk areas in Riacho Moxotó, located in the city of Recife / PE, also evaluating the spatial distribution of the risk indicators of flow velocity, water depth and the combination of these two parameters. The study used the Digital Terrain Model (MDT), obtained by laser scanning of the terrain by the LiDAR (*Ligth Detection and Ranging*) technique, to perform 2D hydrodynamic simulations with HEC-RAS model. The total extension of the flood and the parameters "flow velocity" and "water depth" were evaluated initially. Next, the combination of these parameters was evaluated according to three possible hazards: (1) possibility of damage to property and risk to vehicles, (2) possibility of injury to people and (3) possibility of structural damage. The simulations confirmed the presence of several points that periodically present flooding in the region. The assessment of the possibilities of danger shows that the region, although presenting a large extent of flooding, mostly poses risks only to properties, with few sites at risk of structural damage and for people.

Palavras-Chave: Inundação Urbana. LiDAR. HEC-RAS.

1) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Av. da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, (81) 2126-7763, edinilsoncastro@hotmail.com

2) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Av. da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, (81) 2126-7763 alexsoncaetano@hotmail.com

3) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Av. da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, (81) 2126-7763, jcabral@ufpe.br

INTRODUÇÃO

As inundações em áreas ribeirinhas é um processo natural de extravasamento do leito menor do curso d'água, que ocupa as regiões de maiores elevações do terreno. Estas áreas por passarem longos períodos secos, são geralmente invadidas pela população, porém em eventos extremos, em média com tempo de retorno superior a dois anos (Tucci *et al*; 1995), o nível d'água atinge estas regiões causando sérios danos.

A ocupação inadequada do espaço urbano nas áreas ribeirinhas é causada, em geral, devido: a invasão de áreas ribeirinhas, a ausência nos Planos Diretores Urbanos de quase totalidade das cidades brasileiras de restrições ao loteamento de áreas com risco de inundação e a ocupação de áreas de médio risco, ou seja, que são atingidas com menor frequência.

O mapeamento de área de inundações associado a geração de indicadores de perigo é uma ferramenta de gestão pública no auxílio a política de combate as ocupações irregulares. Em Pernambuco Ribeiro *et al*. (2015), mapeou áreas riscos de inundação no rio Una no município de Palmares-PE e no rio Ipojuca, cidade de Ipojuca-PE (Ribeiro *et al*, 2016).

Este estudo concentra-se no riacho urbano Moxotó, localizado no bairro do Ibura em Recife/PE. As regiões as margens do Riacho são constantemente ameaçadas por inundações (Figura 1). Sendo suas margens ocupadas por construções, a população ribeirinha torna-se vulnerável a perdas de propriedade e até mesmo possibilidade de danos estruturais e danos as pessoas.



Figura 1 – Inundação as margens do Riacho Moxotó, Av. Dois Rios, Ibura – Recife/PE (Data: 29/05/2016)

Do exposto, o presente estudo tem como objetivo, mapear as áreas de risco de inundação no Riacho Moxotó, avaliando também, a distribuição espacial dos indicadores de risco: velocidade de fluxo, profundidade de água e a combinação entre esses dois parâmetros.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

1.1. Área de Estudo

A área escolhida para o estudo foi o riacho Moxotó, localizado no bairro do Ibura na cidade do Recife/PE. O riacho Moxotó é um dos principais cursos da bacia urbana do Moxotó, a qual possui uma área total de cerca de 7,44 km² e possui uma diferença de cota de cerca 85 metros do ponto mais alto ao ponto mais baixo da bacia. O riacho Moxotó possui uma extensão total de 3,7 km e uma declividade baixa. O seu afluente principal é o canal do Ibura que se encontra na região da bacia totalmente urbanizada e seu curso totalmente canalizado (Figura 2).

O Riacho Moxotó encontra-se atualmente com seu curso bastante afetado devido a construções de edificações nas suas margens causando o confinamento da calha principal, aumentando assim possibilidade de alagamentos. Além disso, é observado em vários pontos contribuições de esgoto doméstico no curso do riacho.

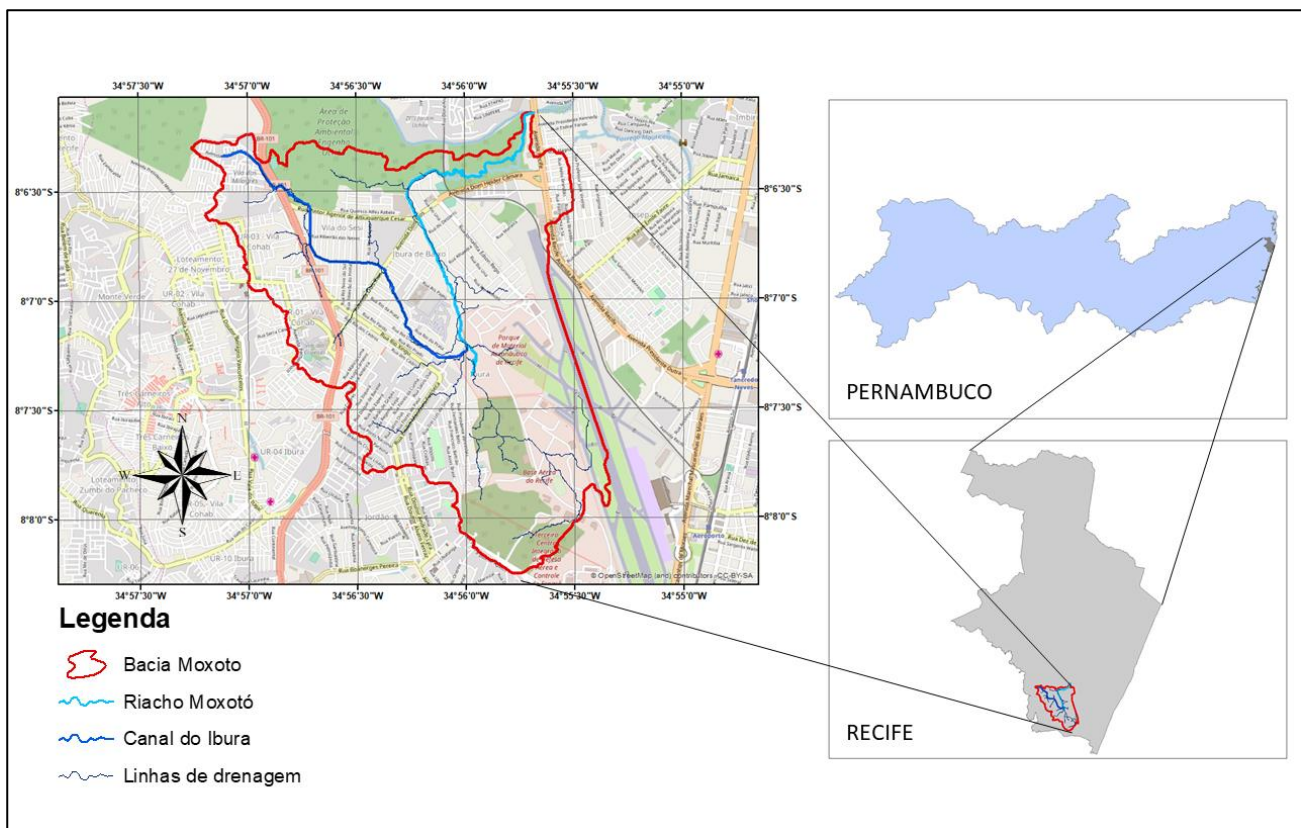


Figura 2 – Bacia do Riacho Moxotó, Recife/PE

1.2. Simulação 2d no HEC-RAS v5.0.4.

O evento de inundação foi simulado usando o modelo HEC-RAS v5.0.4. desenvolvido pela USACE (U. S. Army Corps of Engineers). A simulação em 2D o HEC-RAS resolve as equações de Saint-Venant 2D ou as equações de Ondas de Difusão 2D, conforme apresentadas:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 p g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - g h \frac{\partial \zeta}{\partial x} + p f \frac{\partial}{\rho \partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\rho \partial y} (h \tau_{xy}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 q g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - g h \frac{\partial \zeta}{\partial y} + p f \frac{\partial}{\rho \partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\rho \partial x} (h \tau_{xy}) \quad (3)$$

Onde h é a profundidade da água, p e q são o fluxo específico na direção x e y (m^2/s), ζ é a elevação da superfície (m), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), n é o coeficiente de Manning, ρ é densidade da água (kg/m^3), τ_{xx} , τ_{yy} e τ_{xy} são as componentes da tensão de cisalhamento efetiva e f é o Coriolis (s^{-1}) (QUIROGA et al. 2016).

Para execução da simulação 2d no HEC-RAS v5.0.4. inicialmente deve-se carregar um Modelo Digital do Terreno (MDT). Para tal, foi utilizado um MDT de alta resolução obtido por varredura a laser do terreno, utilizando a tecnologia LiDAR (*Ligh Detection and Ranging*) (Figura 3). O recobrimento a laser gera uma nuvem de pontos com distribuição irregular que, após pós-processamento, permite a geração de Modelos Digitais do Terreno e de Elevação, MDT e MDE, com alta resolução espacial (CIRILO, 2014).

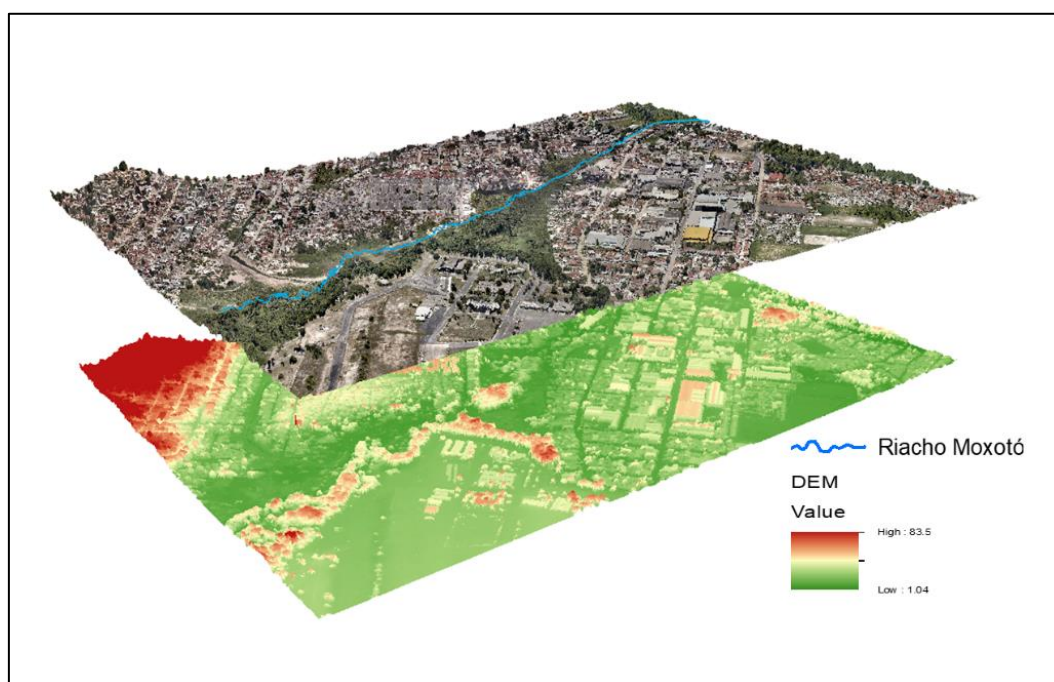


Figura 3 – Trecho do riacho Moxotó em estudo.

Os MDTs foram adquiridos através do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) desenvolvido pela Secretaria de Recursos de Infraestrutura do Estado de Pernambuco (SEINFRA). O programa PE3D tem o objetivo de realizar varredura a laser e obter ortoimagens de alta resolução de toda a superfície territorial de Pernambuco.

Após carregar o MDT, o processo para desenvolvimento dos mapas de perigo e inundação obedecem a três procedimentos principais no modelo HEC-RAS: *Edit Geometric Data*, *Edit Unsteady Flow Data* e *Perform an Unsteady Flow Simulation*.

- *Edit Geometric Data*: Neste ambiente, após o MDT já inserido no modelo, é feita a delimitação da região onde será realizada a simulação em 2D. Neste estudo, foi delimitado, através de um polígono, um trecho de 1,6 km ao longo do curso do riacho Moxotó, incluindo as áreas sujeitas a inundação nas margens. Após a delimitação, neste mesmo ambiente, é preciso definir os locais onde serão inseridas as condições de contorno de entrada e saída de fluxo (montante e jusante) e a criação de uma malha computacional 2D definindo assim, o número de células que serão consideradas no fluxo nas duas direções.
- *Edit Unsteady Flow*: Nesta etapa são definidas as condições de contorno a montante e a jusante. Para condição de contorno a montante foi inserido o hidrograma de cheia a produzido a jusante do canal do Ibura, ou seja, no ponto de contribuição do riacho Moxotó. O hidrograma considerado neste estudo foi o obtido em Ferreira (2017) que realizou simulações hidrológicas na bacia do riacho Moxotó. Foi escolhido o hidrograma obtido pela simulação do cenário de chuva observado em 29 de maio de 2016, o qual a precipitação total foi de 152 mm e resultou em um hidrograma com uma vazão de pico 9,10 m³/s. A condição de contorno a jusante foi a “Profundidade Normal (*Normal Depth*)” a qual é estimada com base na declividade média do fundo do riacho.
- *Perform an Unsteady Flow Simulation*: Consiste na última etapa para execução da simulação, onde é estabelecido qual o período do hidrograma será simulado e os intervalos de simulação, o qual deverá ser igual ao intervalo do hidrograma de cheia, para este estudo, 10 minutos.

As etapas de desenvolvimento da simulação 2D no HEC-RAS, são apresentadas no fluxograma da Figura 4.

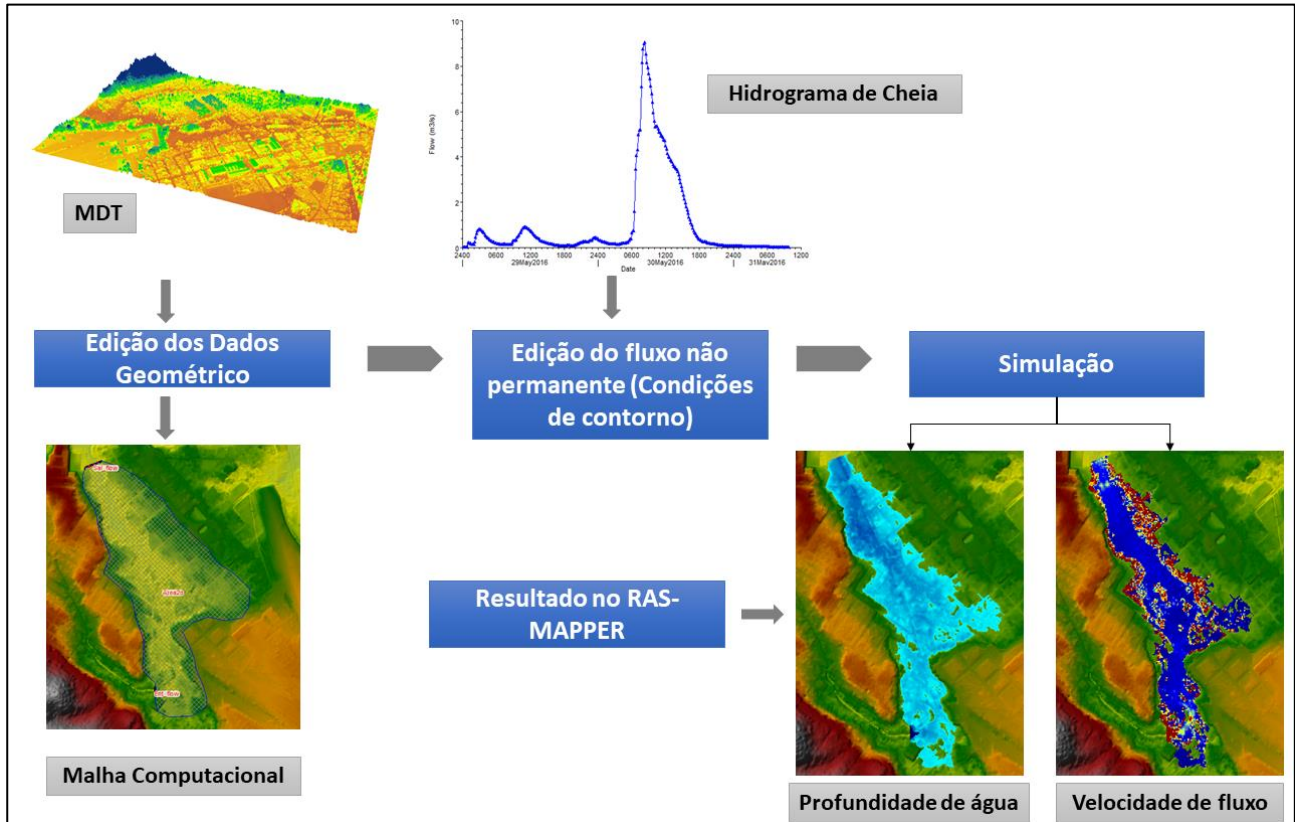


Figura 4 – Etapas para execução da simulação 2D no HEC-RAS

1.3. Indicadores de Perigo de Inundação

O indicador pode ser compreendido como um parâmetro selecionado e considerado isoladamente ou em combinação com outros para refletir sobre as condições de um sistema em análise (BARROS, MENDES E CASTRO, 2017). Os principais indicadores de perigo de inundação analisados nos estudos de vulnerabilidade são a “velocidade de fluxo e a profundidade de água”. Porém, El Fels et al. (2018) explica que a influência dos dois parâmetros, profundidade e velocidade de fluxo, na análise dos danos produzidos pelas inundações podem ser insuficientes, levando-os a combina-los para ter uma caracterização mais precisa de tais danos.

H. Kreibich (2009) combinou os indicadores velocidade (v) e profundidade (h) para gera mais três parâmetros de indicadores de perigo em eventos de inundação, são eles:

$$\text{Energia: } h + v^2/2g \quad (4)$$

$$\text{Força de fluxo: } h \cdot v^2 \quad (5)$$

$$\text{Intensidade: } v \cdot h \quad (6)$$

Sendo g a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Stephenson (2002) sugere três classes de riscos, as quais envolvem possibilidade de danos para pessoas ou para propriedade, conforme apresentada na Tabela 01.

PERIGO	INDICADOR
Dam Damage to property (<i>Danos a propriedade</i>) Vehicles unsafe (<i>Veículos inseguros</i>)	$v \cdot h < 0,5$
Danger to people (<i>Perigo para as pessoas</i>)	$0,5 < v \cdot h < 1$
Structural damage (<i>Dano estrutural</i>) Erosion (<i>Erosão</i>)	$v \cdot h > 1,0$

Tabela 01 – Indicadores de risco segundo Stephenson (2002).

Segundo Stephenson (2002), se um rio é muito profundo e flui rápido, pode levar a destruição de edifícios e também afogar as pessoas. Já para profundidades e velocidades de fluxo mais baixos, pode não ser uma ameaça para a vida das pessoas, porém pode resultar em danos a propriedades.

No modelo HEC-RAS através do RAS Mapper, após a realização das simulações, é possível acessar os mapas discretizados com a distribuição espacial da profundidade de água e velocidade fluxo, além dos mapas das combinações citadas anteriormente.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo analisou a extensão da inundação, os parâmetros velocidade de fluxo (v) e profundidade de água (h) isoladamente e as combinação entre eles, analisando as faixas de valores apresentadas por Stephenson (2002). Para as combinações é apresentado o mapa com a distribuição espacial dos locais com três classes de perigo: 1 – Possibilidade de danos a propriedade e insegurança para veículos ($v \cdot h < 0,5$), 2 – Possibilidade de perigo para as pessoas ($0,5 < v \cdot h < 1,0$), 3 – Possibilidade de danos estruturais e erosão ($v \cdot h > 1,0$).

A partir da observação da extensão lateral da inundação, observa-se vários pontos com transbordamento da calha, causando inundações em construções e estradas as margens do riacho Moxoto (Figura 4).

Quanto a velocidade de fluxo, os resultados apresentaram uma certa variabilidade espacial ao longo do riacho, que pode ser explicada por sua geomorfologia, apresentando uma velocidade mais baixa em locais mais profundo e velocidade mais altas, em torno de 12 m/s, nos locais com baixa profundidade. A profundidade máxima observada após a simulação foi em torno de 2 metros nos trechos mais a jusante do riacho (Figura 5).

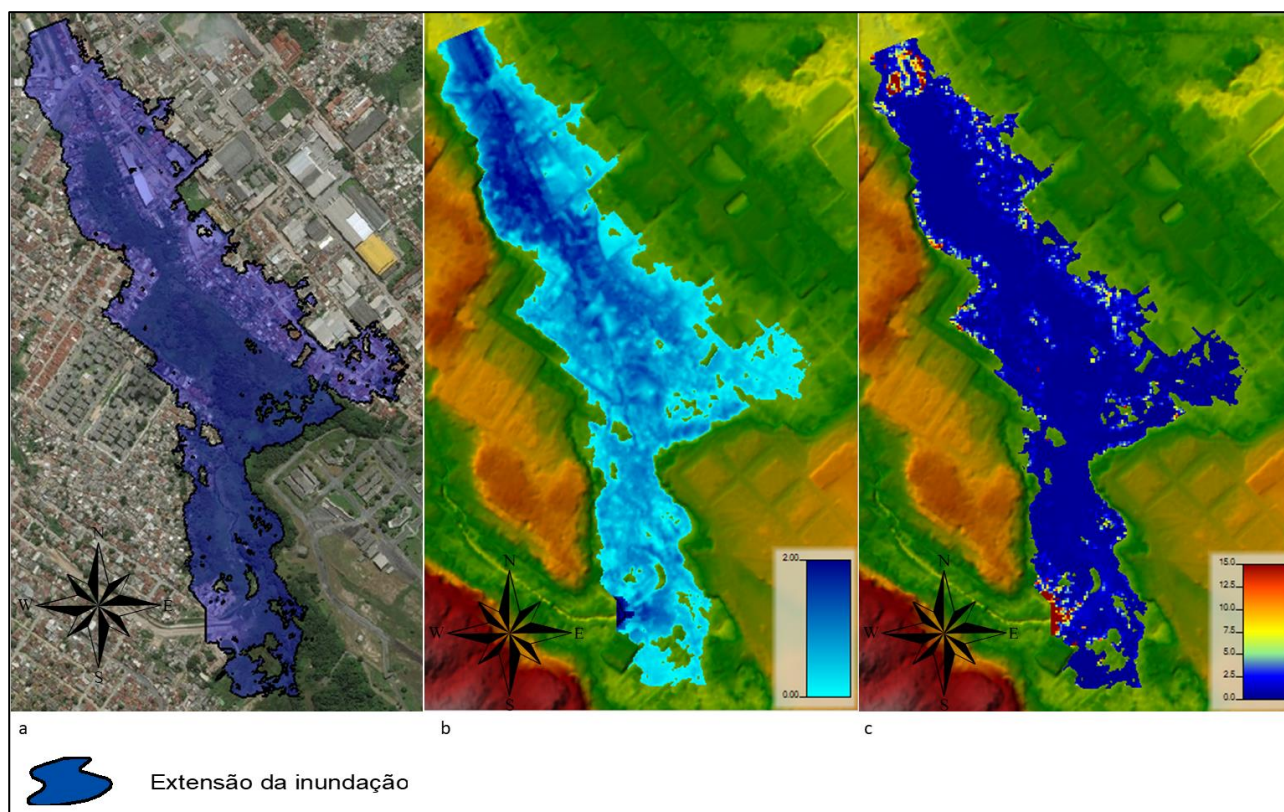


Figura 5 – Mapas: **a** – Extensão da Inundação **b** – Profundidade de água **c** – Velocidade de Fluxo

Na Figura 6, é possível observar o mapa da variabilidade espacial do indicador de perigo Intensidade, o qual a combina as variáveis velocidade e profundidade. O mapa foi classificado segundo três possibilidades de danos, conforme mencionado. A maior parte da extensão da inundação a intensidade apresenta valores menores 0,5, prevalecendo então, maior possibilidade de danos as propriedades e estradas com veículos inseguros em uma situação de inundação. Os locais com possibilidades de danos para as pessoas, danos estruturais e erosão apresenta-se em menor extensão, que pode ser explicado pela baixa declividade do riacho ao longo do seu curso, ocasionando assim menores velocidades fluxo e profundidades.

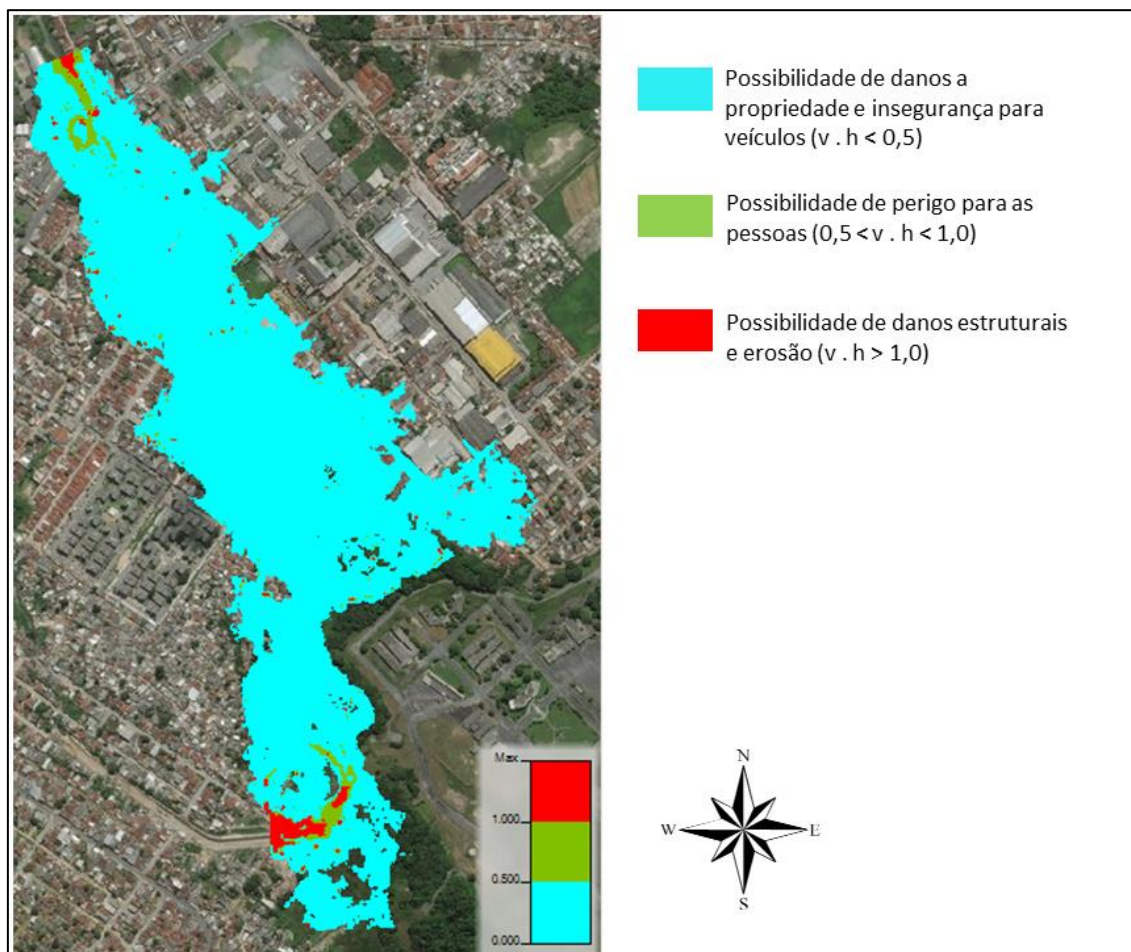


Figura 6 – Mapa de Indicador Intensidade com as faixas de possibilidade de danos.

3. CONCLUSÃO

Os indicadores de perigo são uma importante ferramenta para a gestão de áreas de risco de inundação. O mapeamento das áreas de risco de inundação e dos indicadores de perigo, conclui-se que há um número significativo de construções e estradas as margens do riacho localizadas em áreas suscetíveis à inundação. O mapa da variabilidade espacial do indicador de perigo intensidade indicou a predominância da possibilidade de danos às propriedades e estradas com veículos inseguros em uma situação de inundação, justificado pelo baixo gradiente hidráulico do trecho estudado, esta é mesma razão de prevalecer a baixa velocidade do escoamento na região inundada. As áreas mapeadas de inundação mostraram-se aderentes com registros de cheias na região em estudo, demonstrando assim a eficácia da metodologia aplicando simulações hidrodinâmica 2D.

REFERÊNCIAS

FERREIRA, E.C., (2017). *Modelagem computacional com aplicação de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto na bacia urbana do riacho Moxotó na cidade do Recife/PE*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE.

KREIBICH, H.; PIROTH, K.; SEIFERT, I.; MAIWALD, H.; KUNERT, U.; SCHWARZ, J.; MERZ, B.; THIEKEN, A. H. (2009) *Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling?* Natural Hazards and Earth System. Sciences, v. 9, p.1679-1692.

QUIROGA, V. M., KURE, S., UDO, K., MANO, A., 2016. *Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5*. RIBAGUA – Revista Iberoamericana del Agua, 0 – 9.

RIBEIRO, N.A., FERREIRA, F., ROMÃO, D., ROBERTO, B., COUTINHO, Q., 2016. *Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 377 – 390.

STEPHENSON, D. (2002). *Integrated flood plain management strategy for the Vaal*. Urban Water, v.4, p.425-430.

TUCCI, CARLOS E. M.; PORTO, RUBEM LA LAINA; BARROS, MÁRIO T; *Drenagem Urbana: Coleção ABRH de Recursos Hídricos. 5. ed.* Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1995. 414 p.