

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018**

**UTILIZAÇÃO DO MODELO CAESAR-LISFLOOD NO MAPEAMENTO DE
PERIGO POR INUNDAÇÃO BRUSCA. ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE
SÃO VENDELINO/RS, BRASIL**

Fernando Campo Zambrano; Masato Kobiyama

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre/RS – Brasil, e-mail: fernando.zambrano@ufrgs.br, masato.kobiyama@ufrgs.br

RESUMO: O aumento da ocorrência de desastres hidrológicos relacionados a inundações bruscas tem recebido maior atenção dos diversos órgãos em suas diferentes escalas, com o objetivo de reduzir ao máximo suas causas. Justamente por isso, as medidas não estruturais são medidas de extrema importância na prevenção de tais desastres. Portanto, o objetivo do trabalho foi elaborar o mapa de perigo de inundações bruscas por meio do modelo CAESAR-Lisflood na bacia do arroio Forromeco-RS. Em escala de bacia foram gerados hidrogramas a partir da criação de chuvas de projeto para diferentes tempos de retorno (TR), considerando como base o maior evento registrado nessa bacia associado a um TR de 22 anos. Esses hidrogramas foram utilizados nas simulações em escala de canal para gerar os diferentes mapas de inundação em termos de profundidade e velocidade do fluxo da água. Para analisar as áreas de perigo de inundação, foram determinados os índices de perigo (IP) associados aos diferentes TR, a partir da profundidade e a velocidade d'água. Através das análises do resultado de IP foi criado o mapeamento final de perigo associado a três tempos de retorno (5, 22, e 100 anos). Além disso, estabeleceu-se três zonas para identificar os níveis de perigo, considerando o cenário mais crítico dos três mapas. Os resultados mostraram que a maior área inundada se encontra em alto perigo, ocupando 77% da área total. Isso, mostra que as pessoas que moram nessa região estão em perigo tanto em casa, como fora delas. Ao mesmo tempo as construções estão em alta possibilidade de serem danificadas.

ABSTRACT: The increase in the occurrence of hydrological disasters related to flash flood has begun to more important for several organs at different in order to reduce their magnitude and frequency as much possible. Precisely because of it, non-structural measures are extremely important measures for preventing such disasters. Therefore, the objective of the work was to elaborate the flash flood hazard mapping, using the CAESAR-Lisflood model in the Forromeco river basin. At basin scale hydrographs were generated from the creation of project rains for different return times (TR), considering as the basis the largest event recorded in this basin associated to a TR of 22 years. These hydrographs were used in channel scale simulations to generate the different flood maps in terms of depth and velocity of water flow. In order to analyse the flood hazard areas, the hazard indexes (IP) associated with the different TR were determined from the depth and water velocity. Through the IP result analysis, the final hazard mapping associated with three return times (5, 22, and 100 years) was created. In addition, three zones were established to identify the hazard levels, considering the most critical scenario of the three maps. The results showed that the largest flood area is in high degree hazard, occupying 77% of the total area. It indicates that people are in danger both inside and outside houses. At the same time buildings are in high possibility of being damaged.

PALAVRAS-CHAVES: Desastres Hidrológicos, Inundação Brusca, Mapeamento de Perigo.

INTRODUÇÃO

Os desastres naturais são definidos como um sério distúrbio no funcionamento de uma comunidade, ocasionado impactos econômicos, ambientais e perdas humanas. O banco de dados do *Emergency Events Database* (EM-DAT) demonstra que os desastres naturais vêm aumentando consideravelmente, sendo os desastres hidrológicos caracterizados principalmente por inundações os mais representativos em termos de ocorrências, como em impactos humanos em escala global.

Segundo CEPED-UFSC (2013), os tipos de desastres que mais afetam a população no Brasil é a estiagem, com 51,31%, seguido de inundações com 32,07%. No entanto, o desastre que causa o maior número de mortes, são as inundações bruscas.

Embora existam diversas causas no aumento da ocorrência de desastres hidrológicos, como é o caso de alterações climáticas que podem gerar significativos impactos sobre o regime hidrológico, a ocupação de áreas susceptíveis à ocorrência de fenômenos hidrológicos extremos é uma das principais. Tal ocupação muitas vezes ocorre pela falta de conhecimento e conscientização do perigo e risco por parte da população, como de um mal planejamento não adequado no ordenamento de ocupação territorial por parte das instituições encarregadas.

Assim, o aumento de ferramentas voltadas à redução de desastres hidrológicos, como é o mapeamento, leva a um adequado ordenamento territorial que, por conseguinte levará a uma apropriada gestão de desastres. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi elaborar um mapa de perigo de inundações bruscas por meio do uso do modelo CAESAR-Lisflood desenvolvido por Coulthard et al. (2013).

METODOLOGIA

Área de estudo

A área de estudo, a bacia do arroio Forromeco, situa-se no estado do Rio Grande do Sul – Brasil, entre os municípios de Farroupilha, Barão, Carlos Barbosa, São Vendelino, Alto Feliz e Bom Princípio. Possui uma área de 288 km², perímetro de 85 km e sua altimetria varia entre 85 e 790 m (Figura 1).

Para gerar o mapeamento de perigo de inundações a partir da propagação do escoamento, foi selecionado um trecho do arroio Forromeco que atravessa a cidade de São Vendelino, devido à existência de um histórico de inundações bruscas que este município tem sofrido. Por exemplo, o evento ocorrido em 28/07/1982, que ocasionou grandes prejuízos na cidade (Zambrano, 2017). Este trecho é caracterizado por apresentar uma planície de inundação, relativamente estreita, com também um canal sinuoso (Figura 1). O comprimento desse trecho é de 3,76 km, largura média de 33 m, e profundidade média de 6 m.

Dados hidrológicos utilizados

Para a determinação dos hietogramas de entrada para as simulações hidrológicas no modelo CAESAR-Lisfood, foi utilizado o maior evento registrado que ocorreu o 28/07/1982. Além disso, levou-se em consideração a teoria apresentada por Monteiro e Kobiyama (2014), na qual afirmaram que, quanto mais tardar o pico do hietograma em ocorrer, maior será a vazão de pico. Isso fornecerá, conseqüentemente, maior abrangência na inundação. Assim, o presente trabalho adotou o pico do hietograma a 75% da duração total da precipitação.

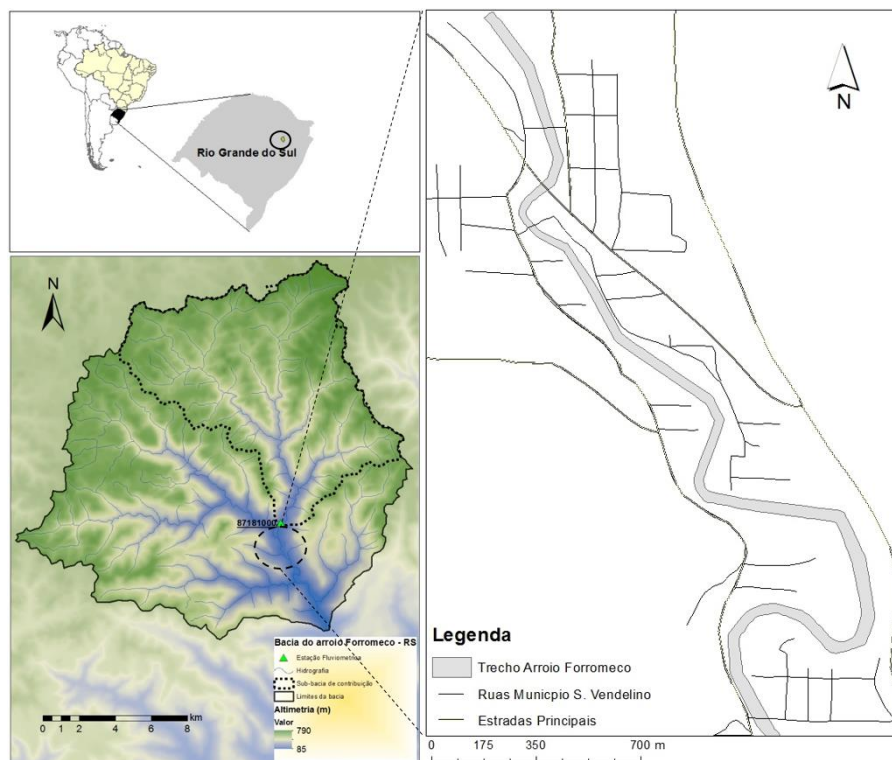


Figura 1 – Localização da área de estudo e sua altimetria.

Dados topográficos utilizados

Os dados topográficos utilizados na simulação computacional foram um Modelo Digital do Terreno (MDT) criado a partir de dados disponíveis para o estado de Rio Grande do Sul e dados topográficos levantados em campo (pontos cotados e seções transversais). Isto, permitiu representar um MDT com as condições mais precisas, tanto no canal como na planície.

Desta forma, considerando a largura estreita do trecho de rio selecionado, a resolução final do MDT foi de 5 m.

Aplicação do CAESAR-Lisflood

Para simulação dos processos hidrológicos na bacia de estudo, foi aplicado o modelo chuva-vazão TOPMODEL acoplado ao modelo CAESAR-Lisflood. Para isto, inicialmente realizou-se a calibração do modelo através da análise estatística da comparação de dados observados de vazões, a fim de avaliar os resultados com o TOPMODEL obtidos por Zambrano et al. (2015). Aqui, nota-se que o TOPMODEL no CAESAR-Lisflood é uma versão bastante simplificada do seu modelo original proposto por Beven e Kirkby (1979).

O escoamento gerado com o TOPMODEL serviu como dados de entrada ou condição de contorno para as simulações hidrodinâmicas. Para propagação do escoamento, CAESAR-Lisflood utiliza o modelo inercial bidimensional LISFLOOD-FP. Assim, a fim de calcular o fluxo Q em todas as direções entre as células, o modelo utiliza uma formulação derivada a partir da equação de momento, na forma unidimensional, das equações de Saint Venant.

$$Q = \frac{q - g \cdot h_t \cdot \Delta t \cdot \frac{\Delta(h+z)}{\Delta x}}{(1 + g \cdot h_t \cdot \Delta t \cdot n^2 \cdot |q| / h_t^{10/3})} \Delta x \quad [1]$$

onde q é o fluxo entre as células na iteração anterior; g é a aceleração gravitacional; n é o coeficiente de rugosidade de Manning; h é a profundidade da água; z é a elevação; h_t é a profundidade máxima de fluxo entre as células; Δx é a largura da célula; e Δt é o tempo. Esta formulação é aplicada nas duas direções horizontais a fim de simular o escoamento em duas dimensões sobre o *raster*.

Uma vez calculados os fluxos nas quatro direções da célula, estima-se a profundidade da água, a partir da discretização da equação de conservação de massa.

$$\frac{\Delta h^{i,j}}{\Delta t} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x^2} \quad [2]$$

onde i e j são as coordenadas da célula; e Δt é o intervalo de tempo adequado para o modelo, que é controlado pela condição de Courant Freidrichs Lewy, para garantir uma simulação estável para a maioria das situações de fluxo, assegurando assim maior estabilidade numérica do modelo.

A partir dos resultados que o modelo hidrodinâmico fornece, é criado o mapa de inundação que está relacionado a um tempo de retorno (TR), para assim, posteriormente elaborar o mapa de perigo de inundação.

Mapeamento de perigo de inundação

Para a criação do mapeamento de perigo de inundação foi necessário quantificar ou definir o nível de perigo. PREVENE (2001) propôs uma caracterização a partir de diferentes níveis de perigo que variam em função da probabilidade, em termos do tempo de retorno e em função da intensidade através do índice de perigo (Figura 2).

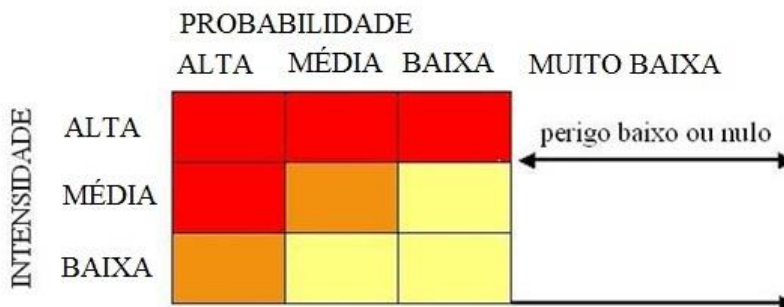


Figura 2.- Níveis de perigo associados ao período de retorno e a intensidade

Para a definição do índice de perigo, Stephenson (2002) desenvolveu diferentes tipos de perigo ligado diretamente ao seu potencial destrutivo. Este índice permite calcular o tipo de perigo em função da profundidade e a velocidade da água.

$$IP = h \cdot v \quad [3]$$

onde h é a profundidade da água (m); e v é a velocidade do escoamento em (m.s⁻¹).

No entanto, as inundações têm respostas hidrológicamente diferentes dependendo das suas características geomorfológicas, o que leva a que o tipo de perigo de inundação esteja sujeito a sua resposta. Por exemplo, baixas profundidades e velocidades do escoamento, determinarão um tipo de perigo menor, visto que, os prejuízos em sua maioria serão econômicos. No entanto, para altas profundidades e velocidades do escoamento, geralmente conhecidas como inundações bruscas, o tipo

de perigo será maior, ao envolver tanto danos materiais como perdas humanas (Figura 3).

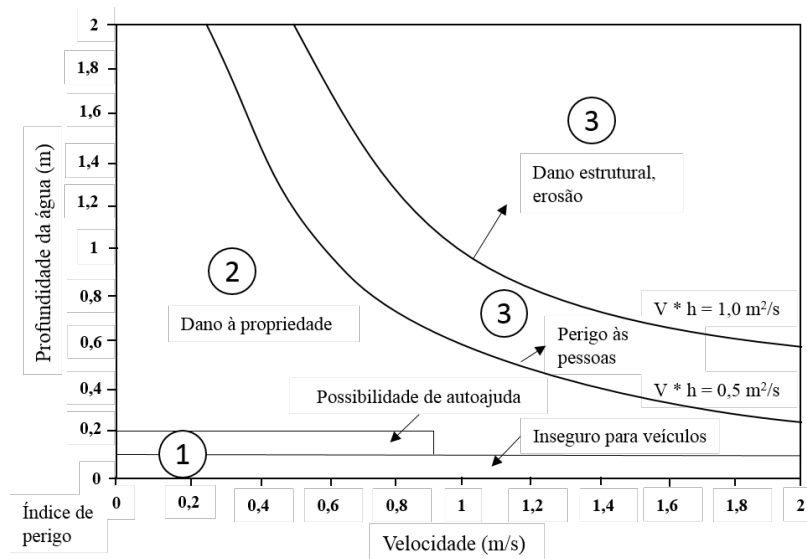


Figura 3.- índices de perigo associados à profundidade e velocidade do escoamento

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mapeamento de áreas de inundação

Para propagação do escoamento gerado a partir dos processos hidrológicos, realizou-se a calibração do modelo hidrodinâmico em termos da extensão da área inundada através dos resultados simulados e observados do evento extremo ocorrido em junho de 1982. Embora as comparações das simulações com os dados observados tenham apresentado um bom ajuste, houve algumas diferenças em termos de níveis máximos atingidos. Esta diferença pode ser explicada devido às alterações do terreno ao longo do tempo, conforme o relatado por moradores e o observado em campo. Além disso, a não consideração de estruturas, como pontes, poderia também ter influenciado no ajuste.

Posteriormente, os resultados das simulações hidrodinâmicas foram comparados em termos de área inundada, profundidade e velocidade do escoamento (Figura 4). As áreas inundadas aumentam com o aumento do TR apresentando uma boa correlação de $R^2 = 0,958$ (Figura 5a). Este resultado já era esperado considerando as diferenças entre as vazões de pico.

Observa-se que a distribuição de profundidade para os diferentes valores de TR é similar. A medida que a profundidade aumenta a sua frequência diminui. No entanto, a distribuição de frequências de velocidades teve o mesmo comportamento para os TR de 5, 22, e 50 anos. Quanto maior a velocidade, menor é sua frequência. Nos TRs de 100 e 200 anos, o comportamento de distribuição de frequências teve uma variação em relação aos outros apresentando as maiores frequências para as velocidades de 1 e 2 m/s (Figura 5b).

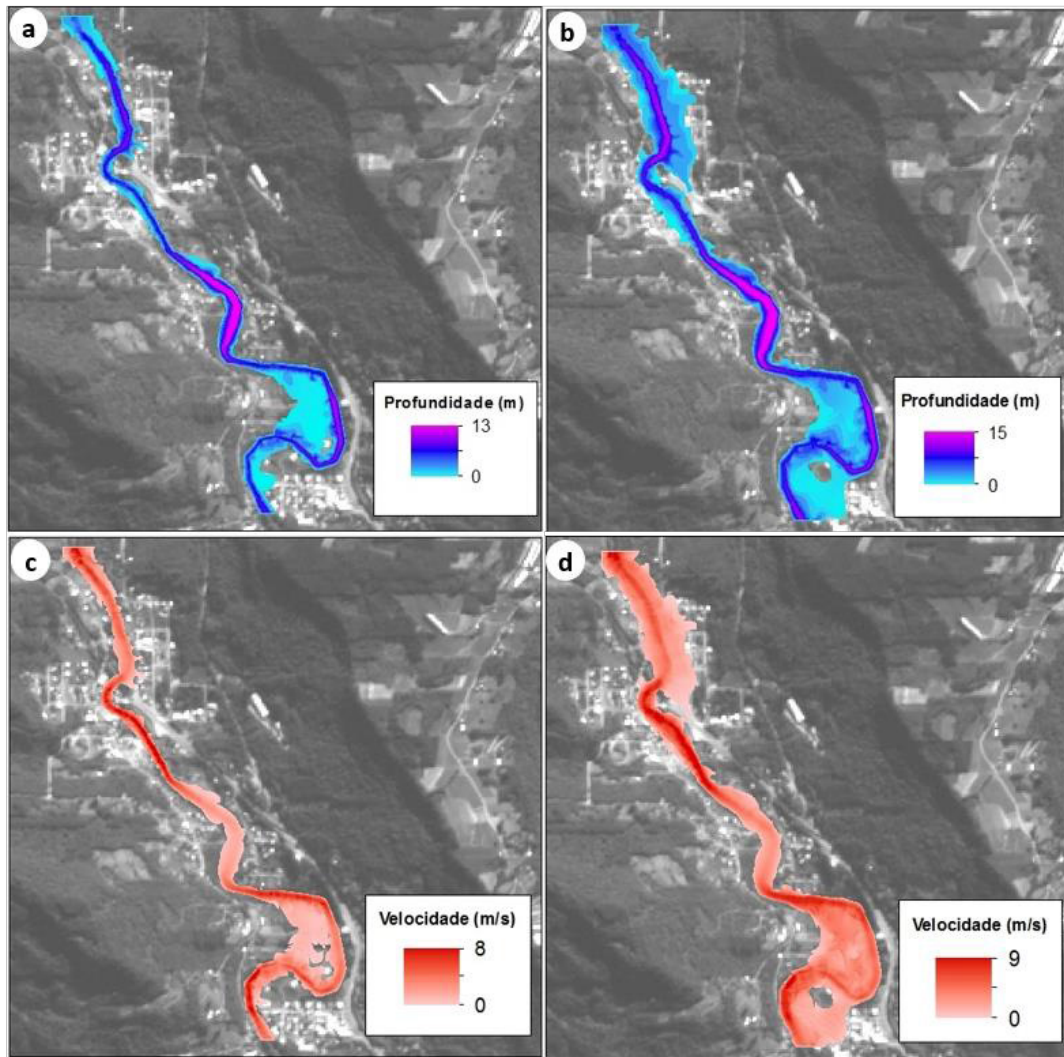


Figura 4.- Mapas de inundação em termos de profundidade e velocidade da água. a) e c) Tr=5 anos, b) e d) Tr=200 anos

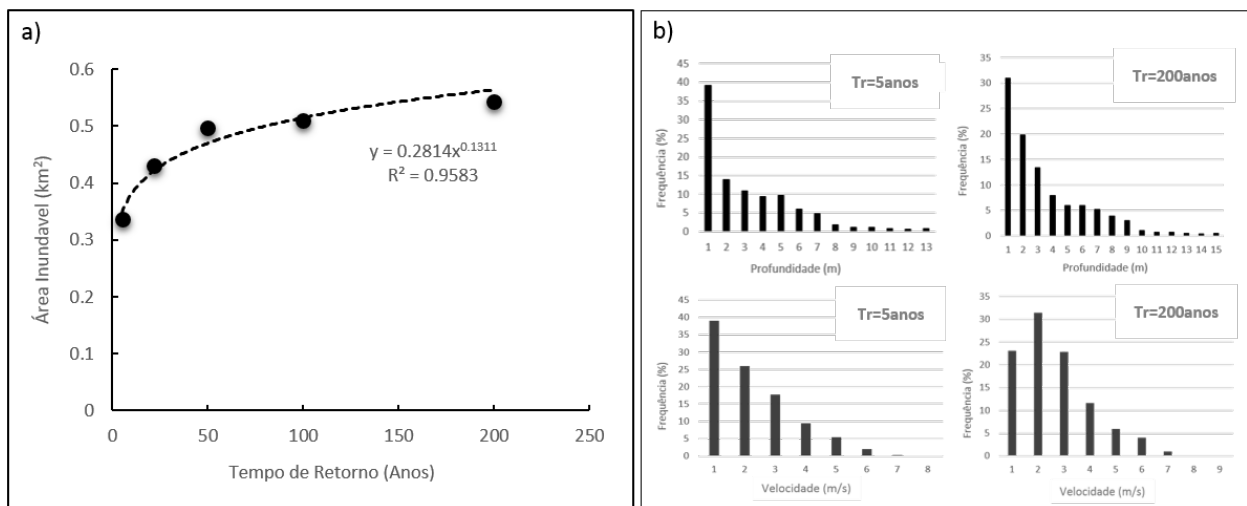


Figura 5.- Resultados das simulações: a) Área inundável para diferentes TR e b) Distribuição de frequências em função da profundidade e velocidade da água para TR=5 e TR=200 anos.

Determinação do índice de perigo de inundação

Na determinação do índice de perigo foram utilizados os mapas de inundação associados a diferentes TR em função da profundidade e velocidade da água. O cálculo foi realizado para a maior área inundada e definidos como IP_1 para perigo baixo, IP_2 para perigo médio e IP_3 para perigo alto.

Os resultados mostram que a maior área dentro da inundação apresentou um alto perigo. Isto aconteceu para os diferentes TR, com um aumento potencial (Figura 6). Por exemplo, para TR = 5 e TR = 200 anos a área de alto perigo representou 71 e 81% da área total inundada. Além disso, a segunda maior área apresentou um perigo baixo, seguido de um perigo médio. Em termos de porcentagem, tomando os TR de 5 e 200 anos, a área de baixo perigo representou 25% e 14%, e para a área de perigo médio 4% e 5% da área total inundada.

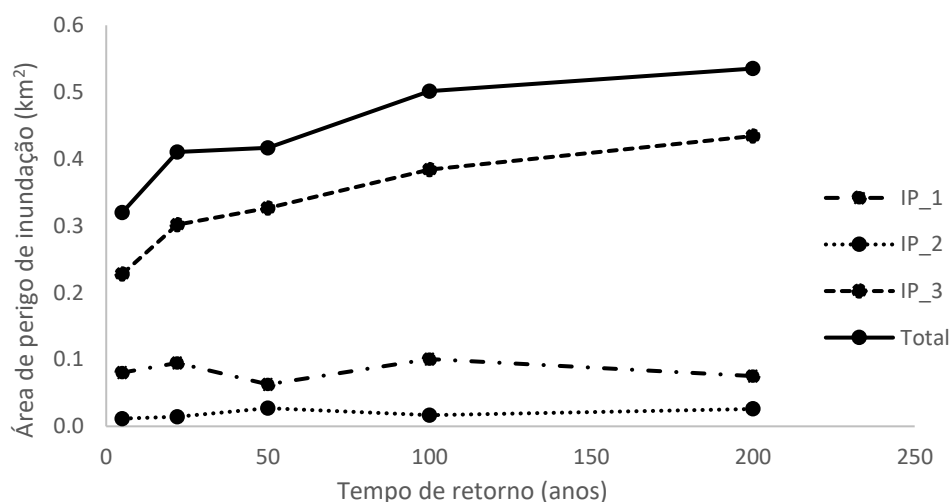


Figura 6.- Tipos de perigo de inundação associados a diferentes tempos de retorno.

Contudo, pode-se dizer que estes resultados coincidem com a região de estudo, ao considerar que a criação do índice de perigo é tanto função da profundidade como velocidade, sendo que o tipo de inundação que esta região apresenta está caracterizada pelas elevações repentinas das vazões com altas velocidades.

Mapa final de áreas de perigo de inundações

A elaboração de um único mapa de áreas de perigo de inundações foi realizada através da quantificação dos níveis de perigo proposto por PREVENE (2001). Estes níveis estão relacionados em função da frequência em termos de TR e da intensidade em termos do índice de perigo.

Contudo, foram considerados três TR de 5, 22 e 100 anos, sendo que após de 100 anos a área inundável é quase constante. Desta forma, estimou-se o mapa final dando preferência ao nível de perigo mais alto (Figura 7).

Estes resultados demonstram que a área atingida pela inundação, associada a diferentes TRs no município de São Vendelino, encontra-se em um alto perigo, ocupando 77% da área total inundada. Isto significa que a população está em perigo, tanto dentro quanto fora de suas casas, e que as construções podem sofrer danos consideráveis, com alta possibilidade de serem destruídas.

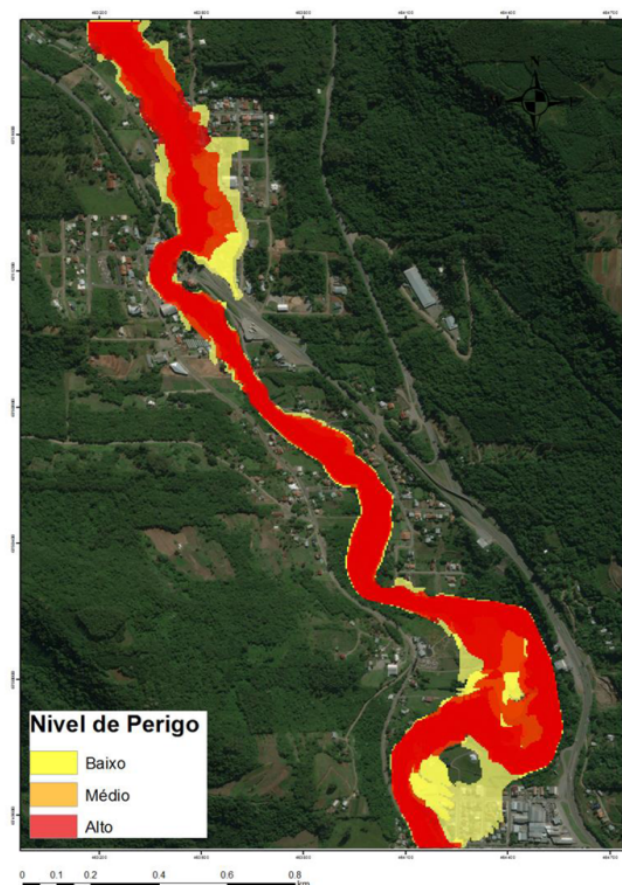


Figura 7.- Mapa de áreas de perigo de inundação para o município de São Vendelino/RS

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento de perigo de inundação contribui no entendimento, descrição e avaliação dos processos que ocasionam inundações, além de ser uma ferramenta importante no gerenciamento de desastres naturais. Por tanto recomenda-se para o município de São Vendelino, que sejam aplicadas medidas de baixo custo e de fácil implementação (medidas não estruturais), considerando o alto perigo a inundações bruscas, ao qual este município está exposto.

REFERÊNCIAS

- Beven, K; Kirkby, M.** (1979). Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Science Bulletin*. v. 24, pp. 43 – 69.
- CEPED–UFSC** (2013). Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012. 2 ed rev. ampl. Florianópolis: UFSC.
- Coulthard, T. J.; Neal, J. C.; Bates, P. D.; Ramirez, J.; Almeida, G. A. M.; Hancock, G. R.** (2013). Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: implications for modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*. v. 38, pp. 1897-1906
- Monteiro, R. L.; Kobiyama, M.** (2014). Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. *REGA*. v. 10, n. 2, p. 13-25.
- PREVENE.** (2001). “Contribution to Natural Disaster Prevention in Venezuela”. Cooperation: Venezuela – Switzerland. PNUD.
- Stephenson, D.** (2002). Integrated flood plain management strategy for the Vaal. *Urban Water*, v. 4, p. 425-430.
- Zambrano, C.F** (2017). “Avaliação do perigo de inundações bruscas por meio de modelagem hidrogeomorfológica: Estudo de caso, bacia do arroio Forromeco-RS” Dissertação de Mestrado IPH/UFRGS. Porto Alegre.
- Zambrano, C. F.; Kobiyama, M.; Michel, G. P.; Pereira, M.A.; Barragan, M. L.** (2015). Estudo preliminar do balanço hídrico da bacia do arroio Forromeco-RS com o modelo CAESAR-Lisflood. XXI *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Brasília.