

## XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

# DETERMINAÇÃO DA COTA DE INUNDAÇÃO SEVERA COM BASE NO CRITÉRIO DE PREJUÍZOS ECONÔMICOS ASSOCIADOS: APLICAÇÃO AO MUNICÍPIO DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ - RS

*Emanuel Duarte*<sup>1</sup>

**RESUMO** – Sistemas de Alerta Hidrológico (SAH) são medidas não estruturais adotadas para minimização dos prejuízos decorrentes de inundações. Desde 1989 o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) implanta e opera SAH's em todo território nacional. Na última década tem investido massivamente na expansão e melhoramentos dos sistemas, por meio da adoção de novos modelos de previsão hidrológica, otimização de processos internos e na comunicação com os usuários finais. Diante desse cenário esse estudo utilizou a integração de informações provenientes de mapas de inundação, compilação de dados censitário, revisão bibliográfica e coleta de dados em campo, para desenvolver uma metodologia que possibilite determinar, de forma simplificada, uma cota de referência que indique inundação severa no município de São Sebastião do Caí – RS. As estimativas foram baseadas na adaptação das metodologias utilizadas por Silva (2019) e Germano (2017) que tiveram como propósito quantificar o prejuízo total gerado em um evento hidrológico extremo e determinar cotas de referência para sistemas de alertas respectivamente. O valor obtido para o nível indicativo de inundação severa em São Sebastião do Caí é de 1250 cm, esse valor está associado a um tempo de retorno de 3,5 anos aproximadamente. Os valores gerados, para os diferentes níveis de referência, poderão ser utilizados na operação do SAH-Caí, de modo a tornar o processo de tomada de decisão pela defesa civil mais objetivo, bem como tem potencial para facilitar a compreensão do estado hidrológico da região durante um evento para seus usuários finais.

**ABSTRACT**– Hydrological Warning Systems (HWS) are non-structural measures adopted to minimize damage from flooding. Since 1989, the Geological Survey of Brazil (SGB/CPRM) implements and operates HWS's throughout the country. In the last decade, it has invested massively in the expansion and improvement of systems, through the adoption of new hydrological forecasting models, optimization of internal processes and communication with end users. In view of this scenario, this study used the integration of information from flood maps, census data compilation, literature review and field data collection, to develop a methodology that makes it possible to determine, in a simplified way, a reference quota that indicates severe flooding in the municipality of São Sebastião do Caí – RS. The estimates were based on the adaptation of the methodologies used by Silva (2019) and Germano (2017) which aimed to quantify the total damage generated in an extreme hydrological event and determine reference quotas for warning systems, respectively. The value obtained for the indicative level of severe flooding in São Sebastião do Caí is 1250 cm, this value is associated with a return time of approximately 3.5 years. The values generated, for the different reference levels, can be used in the operation of the SAH-Caí, in order to make the decision-making process by the civil defense more objective, as well as having the potential to facilitate the understanding of the hydrological state of the region during an event for your end users.

**Palavras-Chave** – Inundação, Prejuízos, Danos, Cotas de Referência, Sistemas de Alerta Hidrológico.

1) Pesquisador em Geociências do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, R. Banco da Província, 105, 90840030, Porto Alegre RS, emanuel.duarte@cprm.gov.br

As inundações no Brasil causam, todos os anos, danos significativos a propriedades, infraestrutura urbana, além do risco a saúde e segurança das pessoas diretamente afetadas, tendência que pode se agravar no futuro se considerarmos os efeitos das mudanças climáticas e da urbanização. Tucci (1997), subdivide as medidas de controle de inundações em dois segmentos, as estruturais (diques, bacias de contenção, canais, barragens) e as não estruturais (sistemas de alerta precoce, zoneamento e seguros).

Os Sistemas de Alertas Hidrológicos (SAH's) são considerados medidas não estruturais adotadas na minimização de prejuízos causados por cheias em determinadas regiões das bacias hidrográficas nas quais estão inseridos. Os sistemas são capazes de subsidiar a tomada de decisão de agentes públicos e da comunidade afetada, diante de cenários hidrológicos críticos, por meio da geração e disseminação de um conjunto de informações, como previsões hidrológicas, áreas, número de pessoas e residências a serem potencialmente atingidos. O Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) deu início, em 1989, a implementação de sistemas de alertas hidrológicos (SAH) com o da bacia do Rio Amazonas. Atualmente a instituição opera 16 sistemas em todo território nacional.

Os SAH's operados pelo SGB têm sua rotina, como determinação de escala de plantonistas e emissão de boletins, orientada por níveis limimétricos (cotas) de referência, estes também são utilizados para comunicação da situação hidrológica atual e futura ao público externo. De acordo com Brasil (2021) até o ano de 2020 os sistemas possuíam três níveis de referência: Cota de atenção (Possibilidade moderada de ocorrência de inundação), Cota de Alerta (Possibilidade elevada de ocorrência de inundação) e Cota de Inundação (Cota em que o primeiro dano é observado no município). Esses limiares são definidos conforme metodologia proposta por Germano e Matos (2017) com pequenas adaptações para adequação a realidade local. Com o intuito de melhorar a compreensão do público externo sobre a magnitude dos eventos, a partir do ano de 2021, mais um nível de referência passou a ser adotado de forma gradual pelos SAH's, sendo ele denominado de Cota de Inundação Severa (Cota em que a inundação provoca danos severos ao município).

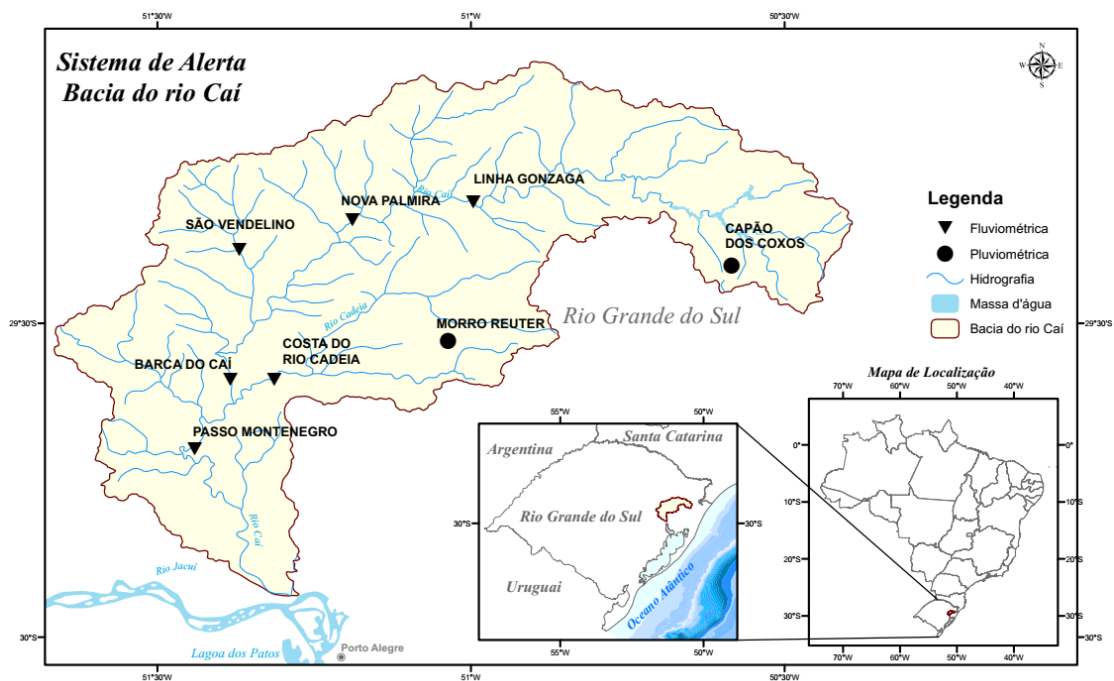
Os níveis de inundação e inundação severa, normalmente, são determinados por levantamento topográfico a partir da indicação de um ponto ou região pela defesa civil (DC) local. Apesar de ser uma forma prática e rápida de se obter esses limiares este método pode levar a imprecisões na determinação da cota de inundação severa, uma vez que é dependente da experiência e avaliação subjetiva da equipe responsável pela DC do município no momento do levantamento. Diante dessa lacuna esse artigo objetiva propor uma metodologia simplificada para determinação da cota de inundação severa de forma mais objetiva, que possa ser replicada para os demais SAH's operados pelo SGB.

A metodologia proposta visa relacionar dados censitários e obtidos a partir de revisão bibliográfica com mapas de inundação de uma área previamente escolhida, a fim de se quantificar os prejuízos econômicos associados a cada nível de inundação, bem como calcular os tempos de retorno para cada magnitude de cheia e o prejuízo econômico associado a ele. A presente abordagem possibilita a construção de um gráfico de evolução de danos por nível de inundação permitindo a determinação da cota de inundação severa com base em uma avaliação objetiva do potencial de danos observados em cada nível. A determinação consistente de um nível de inundação severa tem potencial para facilitar o processo de tomada de decisão o colocado sob uma perspectiva de custo-benefício (custo de medidas de mitigação x perdas econômicas).

## METODOLOGIA

A área de estudo consiste em parte do perímetro urbano do município de São Sebastião do Caí – RS, que está localizado na Bacia do Rio Caí em seu baixo curso. Grande parte das cheias apresenta características de ascensão do curso de água a níveis de extravasamento em algumas horas e com duração de alguns dias, apresentam ocorrência em qualquer época do ano, entretanto, julho é o mês com maior número de ocorrências registradas. Em relação à frequência de cheias, em São Sebastião do Caí, numa análise de 74 anos de dados, de 1947 a 2020, apenas em 11 anos o rio Caí não atingiu a cota de início de inundação, na última década em todos os anos a cota foi ultrapassada. O município é atendido, desde 2012, pelo Sistema de Alertas Hidrológicos da Bacia do Rio do Caí (SAH-Caí). A espacialização das estações de monitoramento que compõe o sistema pode ser visualizada na figura 1.

Figura 1 – Espacialização das estações do SAH-Caí.



Fonte: Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2019).

A metodologia proposta é composta três etapas: 1 - A primeira visa quantificar os danos e prejuízos econômicos associados a diferentes níveis de inundação na área urbana do município de São Sebastião do Caí – RS, para isso utilizou-se dados e metodologia empregados por Silva (2019); 2 - A segunda parte visa associar as diferentes magnitudes de eventos a suas frequências de recorrência, para isso utilizou-se dados provenientes da série fluviométrica do posto 87170000 (Barca do Caí), fornecida pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), e distribuições de probabilidade de Gumbel, Normal e Log-Normal; 3 - A terceira etapa consiste em determinar um limiar de referência para caracterização de inundação severa com base na evolução dos danos em cada nível de inundação, bem como determinar seu respectivo tempo de retorno.

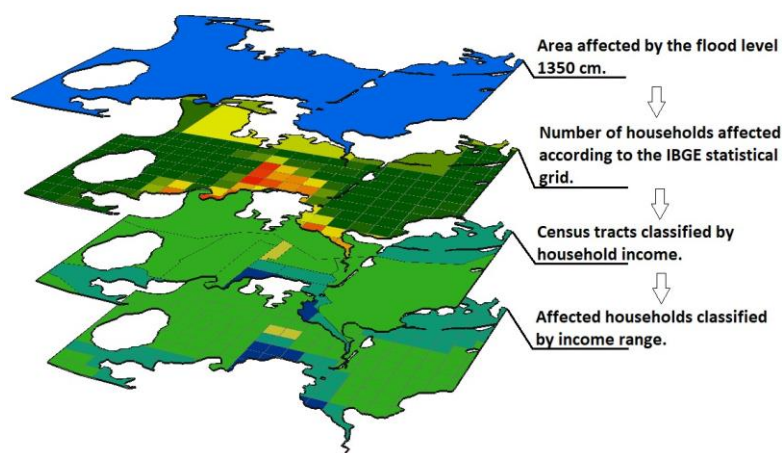
## 1. Quantificação de prejuízos econômicos por nível de inundação

Os danos provenientes de uma inundação podem ser quantificados a partir do cruzamento de uma série de dados e características da região diretamente afetada (quantidade de imóveis atingidos, tempo médio de duração da inundação, nível socioeconômico da população residente, perfil construtivo das edificações) com mapas de inundação indicando o nível de submersão e perfil de velocidade que uma determinada região foi exposta (SILVA, 2020).

O presente estudo utilizou dados econômicos obtidos por Silva (2019), que utilizou uma abordagem simplificada para obter os prejuízos econômicos decorrentes de inundações no município de São Sebastião do Caí em intervalos nível de 0,5m. As estimativas de danos foram subdivididas em quatro tipologias: Danos as edificações (DE), Danos ao conteúdo (DC), Custos de limpeza (CL) e Danos por dias parados (DDP).

As variáveis utilizadas são padronizadas em função da classe socioeconômica de cada setor censitário do IBGE, segundo critério desenvolvido pela ABEP (2016), e a quantidade de imóveis atingidos é obtido através da intersecção de cada área inundada com a grade estatística do IBGE (2010), bem como é adotado um perfil de construção e conteúdo padrão para os imóveis a fim de simplificar o processo de caracterização das residências. A figura 2 apresenta de forma esquemática como os dados base são gerados.

Figura 2 – Apresentação esquemática da utilização de mapa de inundação e dados censitários para obtenção de estimativas de danos causados por inundações.



As equações utilizadas para o cálculo de cada tipologia de dano são apresentadas a seguir e tem como base estudos apresentados por Tachini (2010) e adaptadas por Fadel (2015), Silva (2017) e Silva (2019).

- Danos as edificações (DE):

$$DE=0.05 \times CUB \times Ped \times Ua \quad (1)$$

**Onde:**

0.05: fator de depreciação para imóveis usados de 5%, proposto por Tachini (2010);

DE: dano residencial relativo à edificação [R\$];

CUB: custo unitário de construção civil [R\$/m<sup>2</sup>];

Ped: percentual de dano à edificação;

Ua: unidades atingidas;

- Os danos ao conteúdo (DC):

$$DC = 0,5 \cdot Cip \cdot Fm \cdot Ua \cdot Pdc \quad (2)$$

**Onde:**

DC: dano relativo ao conteúdo das residências [R\$];  
0,5: Fator de depreciação por tempo de uso do conteúdo;  
Cip: custo do conteúdo do imóvel padrão [R\$];  
Fm: fator de multiplicação;  
Ua; unidades atingidas  
Pdc: percentual de dano ao conteúdo (obtido em fator da profundidade de submersão);

- O custo de limpeza (DL):

$$DL = Rf \cdot Tl \cdot Ua \quad (3)$$

**Onde:**

DL: dano relativo à limpeza da residência [R\$];  
Rf: renda média mensal familiar já adicionada de encargos sociais [R\$/h];  
Tl: tempo de limpeza [horas/m<sup>2</sup> pessoa];  
Ua: unidades atingidas [m<sup>2</sup>];  
Hm: total de horas de trabalho por mês [h/mês] (média de 21 dias trabalhados ao longo do mês e 8 horas diárias)

- Os danos por dias parados (DDP):

$$DDP = \frac{RF}{Nd} \cdot Pop_i \cdot D_i \quad (4)$$

**Onde:**

DDP: dano relativo aos dias de paralização das áreas atingidas [R\$]  
Rf: renda média mensal familiar [R\$/mês]  
Nd: número de dias do mês  
PopI: número de pessoas atingidas pela inundação  
DI: duração da inundação [dias]

De posse da quantificação de prejuízos de cada topologia de dano podemos estimar o prejuízo total, para cada nível da inundação, a partir da seguinte expressão:

$$D_{total_i} = DDP_i + DE_i + Dc_i + DL_i \quad (5)$$

**Onde**

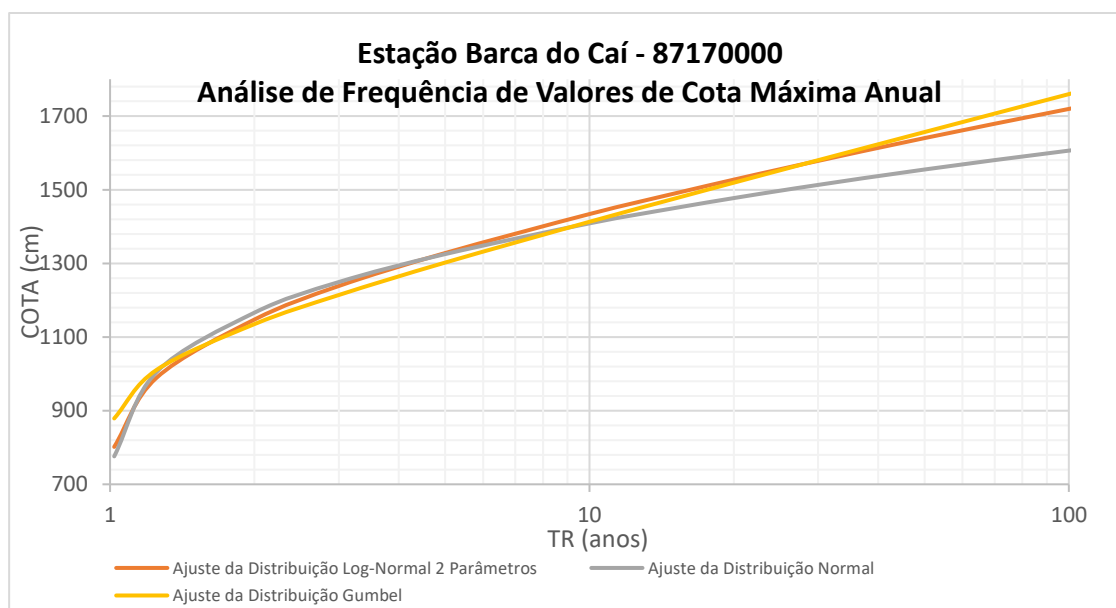
Dtotal: dano total por nível de inundação [R\$];  
i: nível previsto considerado.

## 2. Cálculo do tempo de retorno associado a cada nível

As análises de frequência de níveis fluviométricos têm como objetivo relacionar a magnitude dos eventos de cheias com sua frequência de ocorrência por meio da utilização de distribuições de probabilidades, a análise realizada nesse estudo teve como objetivo estimar um tempo de retorno a cota definida como de inundação severa, com base no prejuízo econômico vinculada a ela.

Os ajustes estatísticos para cotas máximas anuais foram realizados utilizando-se as distribuições estatísticas de valores extremos de Gumbel, Normal e Log-Normal, em uma serie com 74 anos de dados de cotas máximas anuais. Adotou-se os valores obtidos pela distribuição Log-Normal, uma vez que apresenta valores intermediários entre as demais distribuições experimentadas. O gráfico 01 ilustra o resumo dos valores de níveis obtidos para o posto.

Gráfico 1 – Análise de frequência de valores de cota máxima anual posto 87170000 (Barca do Caí)



### 3. Determinação dos níveis de referência

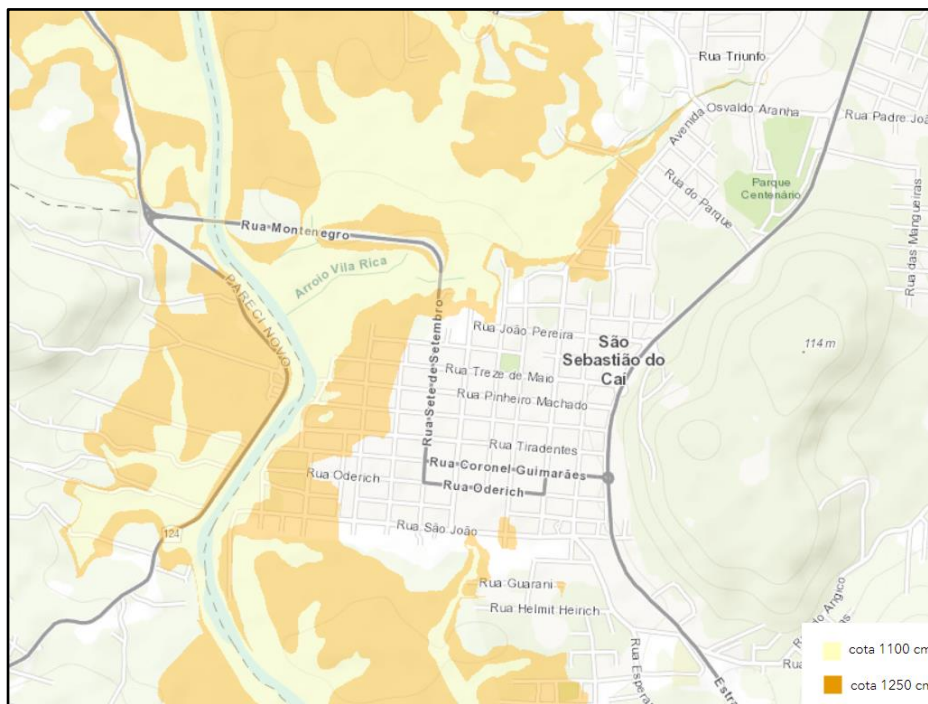
A determinação das cotas de referência para atenção, alerta e inundação, seguiu os critérios propostos por Germano e Matos (2017), sendo vinculadas respectivamente aos tempos de retorno de 1,02, 1,25 e 2 anos respectivamente. Adicionalmente a avaliação estatística a cota de inundação foi, posteriormente, discutida em conjunto com a defesa civil a fim de se realizar um melhor ajuste em função da compreensão do nível considerado como de início de inundação pela instituição.

Para determinação do nível de inundação severa foi traçado um gráfico de evolução de prejuízos econômicos x nível de inundação até um nível próximo ao maior já observado, sendo adotado como nível de referência o que representa a totalização de 50% de todos os danos potenciais para um evento de magnitude similar ao maior já ocorrido.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

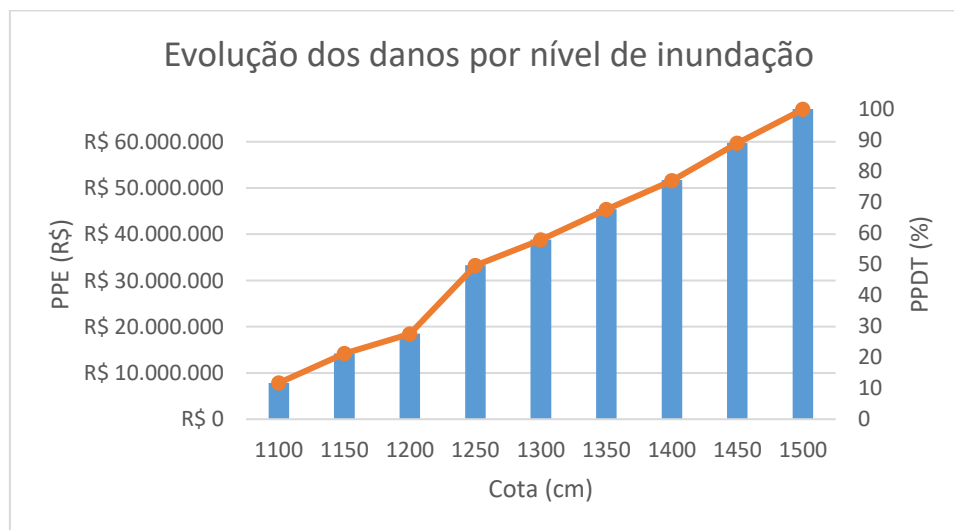
O valor de referência, obtido através da análise de frequência, para início de inundação foi de aproximadamente 1150 cm associado a um tempo de retorno de 2 anos, no entanto dados observados em campo e coletados junto a defesa civil local indicam que a utilização do valor de 1100 cm é mais adequado, em virtude da localização de algumas residências nessa faixa.

Figura 3 – Áreas potencialmente atingidas por diferentes limiares de inundação no município de São Sebastião do Caí.



O gráfico 2 apresenta a estimativa dos prejuízos potencialmente causados (PPE) pela elevação do nível do rio Caí no perímetro urbano do município. É possível observar que um evento de cheia que iguale a cota de 1250 cm tem potencial de gerar cerca de 50% de todos os danos causados por um evento similar ao maior evento que se tem registro região (PPDT) que é de aproximadamente 1470 cm, sendo esse o valor adotado como cota de inundação severa.

Gráfico 2 – Evolução dos prejuízos econômicos decorrentes de diferentes níveis de inundação.



Também é possível observar que o incremento de danos gerados no intervalo compreendido entre 1200 cm e 1250 cm é o maior para todas as faixas, em virtude do adensamento populacional observado nessa região. O tempo de retorno calculado para a cota de 1250 cm é de aproximadamente 3,5 anos, esse valor poderá ser utilizado em estudos futuros a fim de se comparar se esse padrão de tempo se repete em outras regiões, podendo ser utilizado em locais que não disponham de dados para quantificação dos danos, mas possuam características populacionais e hidrológicas similares.

A espacialização dos valores de cotas de referência para inundação e inundação severa pode ser observada na figura 3.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A definição níveis (cotas) de referência em um sistema de alertas hidrológicos é de fundamental importância para o melhor aproveitamento do seu potencial mitigador de impactos. Uma vez que possibilitam a comunicação do estado atual e futuro de uma região na bacia hidrográfica de forma mais didática, possibilitam aos seus usuários uma tomada de decisão baseada em uma análise mais rápida e objetiva. Além de facilitar o processo de comunicação a definição destes níveis permite otimizar rotinas de trabalho do operador do sistema, uma vez que a alocação de funcionários, rotina de plantões e outras atividades podem ser ajustadas de acordo os valores obtidos para cada região.

A metodologia proposta se mostrou de fácil aplicação, tendo potencial para ser replicada em diversas regiões localizadas nas áreas de atuação dos SAH's operados pelo SGB. É importante destacar que as tipologias de danos utilizadas nesse trabalho não abrangem todos os danos potenciais observados em um evento de inundação, podendo variar de forma substancial conforme as características da região estudada. Assim como os valores obtidos a partir das análises estáticas é imprescindível o levantamento de campo, em conjunto com a defesa civil local, a fim de se verificar e ajustar os resultados obtidos.



## REFERÊNCIAS

ABEP. Associação Brasileira de Empresas e Pesquisa. Critério Brasil, 2016.

BRASIL. Emanuel Duarte Silva. Serviço Geológico do Brasil. ELABORAÇÃO DE MAPAS DE INUNDAÇÃO PARA AS CIDADES DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ E MONTENEGRO. Porto Alegre: CPRM, 2016. 23 p.

BRASIL. Serviço Geológico do Brasil. Ministério de Minas e Energia (org.). SISTEMA DE ALERTA DE EVENTOS CRÍTICOS. 2021. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/sace/>. Acesso em: 04 maio 2021.

FADEL, Amanda Wajnberg. Incorporação do Risco de Prejuízo no Gerenciamento de Medidas de Controle de Inundação. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Iph, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

GERMANO, Andrea de Oliveira; MATOS, Artur José Soares. METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DE COTAS DE REFERÊNCIA EM SISTEMAS DE ALERTA E PREVISÃO HIDROLÓGICA. In: XXIII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Porto Alegre: Abrhidro, 2017. p. 0-8.

SILVA, Emanuel Duarte. Previsão hidroeconômica de curto prazo com modelo de redes neurais artificiais: aplicação à bacia do rio Caí. 2019. 131 f. Orientador: Guilherme Fernandes Marques. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2019.

SILVA, Emanuel Duarte. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE DANOS CAUSADOS POR INUNDAÇÕES: APLICAÇÃO AO MUNICÍPIO DE MONTENEGRO -RS . In: XXIII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Porto Alegre: Abrhidro, 2017. p. 0-8.

SILVA, Emanuel Duarte. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA OPERAÇÃO DO SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO CAÍ ENTRE OS ANOS DE 2009 E 2020. In: II Encontro Nacional de Desastres, 2020, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Porto Alegre: Abrhidro, 2020. p. 0-8.

TACHINI, M. Avaliação de danos associados às inundações no município de Blumenau. 2010. 167 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.