



Aprimoramento da modelagem matemática de níveis fluviais de inundação na cidade de Lajeado/RS

Fabiane Gerhard¹, Guilherme Garcia de Oliveira², Rafael Rodrigo Eckhardt³

¹Universidade do Vale do Taquari – Univates (fgerhard1@universo.univates.br)

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul (g.g.oliveira10@gmail.com)

³Universidade do Vale do Taquari – Univates (rafare@univates.br)

Resumo

As inundações são fenômenos naturais, que fazem parte da realidade do município de Lajeado/RS, que é em média atingido por um evento a cada ano. Em virtude dessa elevada recorrência, o presente estudo tem o objetivo aprimorar a modelagem matemática de níveis fluviais de inundação no município de Lajeado, considerando os níveis extremos de cheia e inundação registrados em Lajeado e Encantado entre 1980 e 2016, além da chuva média acumulada e filtrada a partir de um decaimento exponencial na área da bacia complementar. As variáveis de entrada do modelo foram selecionadas pelo coeficiente de correlação linear de Pearson, e a sua concepção ocorreu pelo método da Regressão Múltipla. Verificou-se que o modelo desenvolvido apresentou bom desempenho para a previsão de níveis de inundação na cidade de Lajeado, destacando-se que o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe obtido durante a validação foi de 0,951. Isso demonstra a importância de realizar constantes atualizações dos modelos, bem como a inclusão de novas variáveis explicativas, visto que a utilização dos dados de precipitação resultou num aumento percentual de qualidade de previsão de 20%.

Palavras-chave: Eventos extremos hidrológicos. Previsão hidrológica. Modelos de regressão.

Área Temática: Recursos Hídricos.

Improvement of the mathematical modeling of river flood levels in the city of Lajeado/RS

Abstract

The floods are natural phenomena, which are part of the reality of the municipality of Lajeado/RS, which is on average hit by an event every year. Due to this high recurrence, this study aims to improve the mathematical modeling of river flood levels in the municipality of Lajeado, considering the extreme levels of flood recorded in Lajeado and Encantado between 1980 and 2016, in addition to the accumulated average rainfall and filtered from an exponential decay in the area of the complementary basin. The input variables of the model were selected by Pearson's linear correlation coefficient, and its conception occurred by the Multiple Regression method. It was verified that the developed model presented good performance for the prediction of flood levels in the city of Lajeado, emphasizing that the coefficient of efficiency Nash-Sutcliffe obtained during the validation was of 0.951. This demonstrates the importance of constant updating of the models, as well as the inclusion of new explanatory variables, since the use of precipitation data resulted in a percentage increase of prediction quality of 20%.



6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

Key words: Extreme hydrological events. Hydrological forecast. Regression models.

Theme Area: Water Resources.

1 Introdução

As inundações são fenômenos naturais e antigos, mas, que se transformaram em um problema quando o homem passou a se estabelecer nas proximidades dos corpos hídricos, resultando em perdas de vidas humanas, de bens materiais, na interrupção de atividades, na contração de doenças, dentre outros impactos (DORNELLES, 2007; OLIVEIRA; GUASSELI; SALDANHA, 2012).

O Vale do Taquari, localizado na porção inferior da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas, apresenta problemas recorrentes com inundações, tanto do rio Taquari como de seus afluentes. Segundo Ferri (1991), as grandes flutuações de vazão da bacia, decorrentes de elevadas e longas precipitações, fazem com que se concentrem rapidamente altos volumes de água e escoem rio abaixo, elevando os seus níveis. Dentre os municípios atingidos, encontra-se Lajeado, afetado, em média, uma vez por ano (MORAES, 2015), sendo que a cada evento são registrados uma série prejuízos econômicos e sociais.

Visto a elevada recorrência deste evento hidrológico extremo na cidade, faz-se necessário investir em estratégias para o controle de inundações, a exemplo, de medidas não estruturais. Estas visam reduzir os danos das inundações e possibilitar a melhor convivência com a população, a partir da implantação de normas, regimentos e programas, tais como os sistemas de previsão e alerta de inundações (CANHOLI, 2005). Destaca-se, que importantes componentes desses sistemas são os modelos hidrológicos de previsão, os quais auxiliam no aumento do horizonte de previsão de eventos de inundaçao, indicam a sua provável magnitude, e contribuem na compreensão da complexidade de seu desenvolvimento. Além disso, são ferramentas fundamentais na tomada de decisões para emissão de alertas e de ações para diminuir os impactos destes eventos (SENE, 2008).

Nesse sentido, esse estudo visa aprimorar a modelagem matemática de níveis fluviais de inundaçao no município de Lajeado, considerando os dados de precipitação da bacia hidrográfica complementar, entre Lajeado e Encantado, e os níveis máximos de cheia e inundaçao observados nestes municípios entre 1980 e 2016.

2 Metodologia

Inicialmente, determinou-se que a área do presente estudo abrangeia a bacia complementar da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas compreendida entre os municípios de Encantado e Estrela (FIGURA 1). Na sequência, foi realizado o levantamento das estações pluviométricas dentro da área de estudo e no seu entorno, num raio de 40 quilômetros (km), no *software* ArcGis 10.1. Foram identificadas 82 estações de diferentes fontes, sendo elas o banco de dados do portal HidroWeb, do Instituto Nacional de Meteorologia, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), do Netsenses Univates, e da estação meteorológica do Núcleo de Informações Hidrometeorológicas (NIH) da Univates. Os dados destas estações foram interpolados no *software* MATLAB 2010a, aplicando-se o método do Inverso do Quadrado da Distância, a fim de obter a precipitação média da bacia, considerando uma malha regular com resolução de 5 km, em discretização diária entre os anos de 1980 e 2016. Em seguida, a chuva foi acumulada em diferentes defasagens temporais, de 2 a 20 dias anteriores ao evento de inundaçao, na planilha ExcelTM, e, também, aplicou-se o filtro de decaimento exponencial (EQUAÇÃO 1) aos dados diários de precipitação.

Os dados pluviométricos dos municípios de Lajeado e Encantado, obtidos junto ao



6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

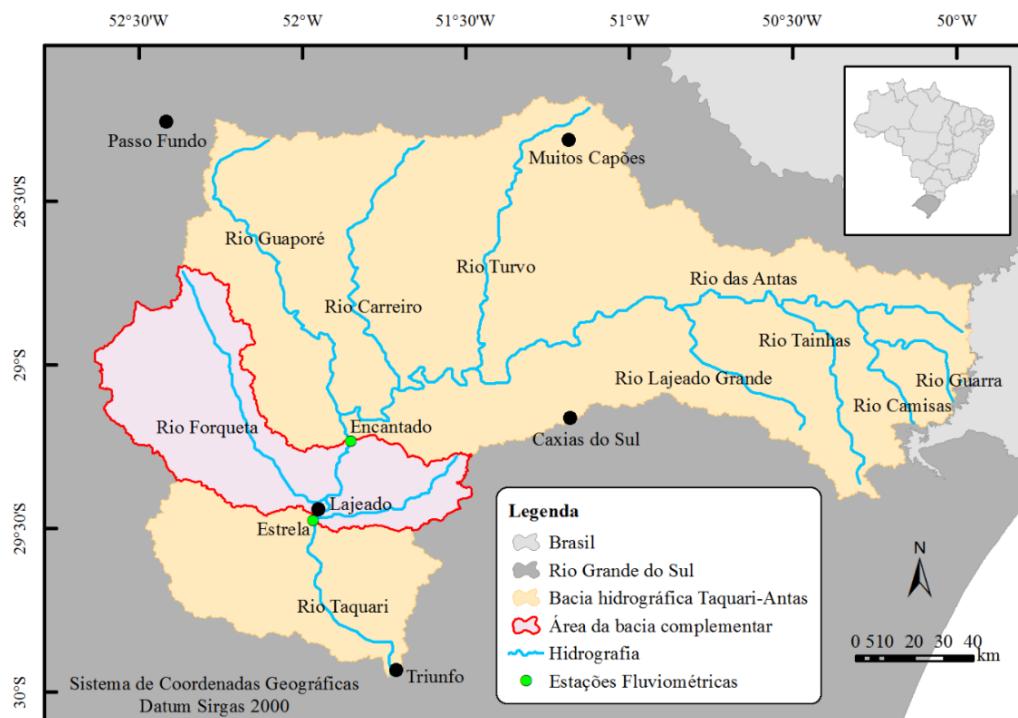
Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

NIH, à Administração das Hidrovias do Sul, ao Porto Fluvial de Estrela, e ao Netsenses Univates, foram organizados de forma pareada, considerando os níveis de cheia e inundação registrados entre 1980 e 2016.

$$fP_t = (1 - \alpha)fP_{t-1} + \alpha P_t \quad (1)$$

Em que: P_t = precipitação no tempo t ; fP_t e fP_{t-1} = valores de precipitação transformados pela aplicação do filtro de decaimento exponencial, nos tempos t e $t-1$, respectivamente; α = coeficiente calibrado por ensaios, a fim de aumentar a correlação linear (r) entre a variável filtrada e a observada. No presente estudo, esses coeficientes foram calibrados pelo suplemento Solver do ExcelTM, considerando as cotas (níveis fluviais) médias diárias registradas no município de Lajeado entre o período de 1980 e 2012.

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas



Fonte: Dos autores (2018).

A partir das informações de chuva e nível organizadas, pôde-se selecionar as variáveis de entrada do modelo matemático, considerando o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (R), sendo que 75% destes dados foram empregados na calibração da modelagem pelo método de Regressão Múltipla (RM) aplicada no software TableCurve 3D V. 4.0. Os 25% dos dados restantes foram utilizados na validação do modelo para análise de desempenho em eventos hidrológicos extremos não utilizados no treinamento do modelo.

Para a determinar a qualidade de modelagem dos níveis fluviais em Lajeado foram avaliadas algumas medidas de desempenho como o coeficiente de determinação (R^2); o erro absoluto médio (EAM); a raiz do erro quadrático médio (RMSE); o erro proporcional médio (EPM); o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS), e; o quantil 0,95 dos erros absolutos (EA95).



6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

3 Resultados

A interpolação dos dados de chuva permitiu obter informações diárias de precipitação média na área da bacia complementar entre os anos de 1980 e 2016. A partir desses dados obteve-se a chuva acumulada e filtrada, destacando-se que o coeficiente α calibrado para a precipitação média diária filtrada apresentou valor de 0,78.

As séries históricas de cheia em Lajeado e Encantado, de 1980 a 2016, apresentaram 58 eventos de inundações e, 14 eventos de cheia não associados a inundações (TABELA 1). Salienta-se que as réguas limimétricas da ANA (Agência Nacional de Águas - HidroWeb) e da CPRM, instaladas no município de Encantado, utilizam o nível de referência 0 (zero) para o registro dos níveis fluviais no rio Taquari. Portanto, também foi empregado este padrão na organização dos níveis de Encantado, sendo que para ajustar os referidos níveis com a cota topográfica referenciada ao nível médio do mar, o valor de 27,77 metros (m) deve ser somado aos registros. Além disso, é importante mencionar que as cotas de Lajeado tiveram descontados 0,70 m para a consolidação da série, seguindo o estudo de Moraes (2015).

Tabela 1 – Série de cotas máximas registradas em Lajeado e Encantado, entre 1980 e 2016

Data	Lajeado (máximo)	Encantado (máximo)	Data	Lajeado (máximo)	Encantado (máximo)
30/07/1980	20,38	13,80	14/10/2000	22,75	15,70
23/08/1980	21,00	13,75	21/07/2001	25,60	18,70
29/06/1982	24,26	15,64	02/10/2001	26,25	19,58
24/10/1982	22,00	13,56	13/06/2002	21,50	14,27
12/11/1982	20,50	12,40	03/07/2002	18,75	10,40
03/05/1983	19,75	11,65	21/02/2003	21,00	15,00
07/07/1983	24,05	16,70	09/07/2003	18,95	10,20
02/08/1983	19,56	11,26	27/10/2003	20,04	11,45
18/08/1983	22,14	14,85	16/12/2003	19,68	10,57
09/07/1984	19,75	11,27	19/05/2005	20,24	12,95
10/05/1985	18,25	10,07	17/10/2005	22,25	15,29
13/08/1985	17,02	8,85	27/07/2006	19,16	11,04
31/05/1986	16,60	8,30	11/07/2007	23,82	17,87
11/10/1986	18,90	10,25	24/09/2007	25,55	18,65
15/05/1987	18,95	11,55	27/10/2008	25,95	18,90
30/07/1987	20,65	11,53	10/08/2009	20,85	11,57
15/08/1987	18,95	11,36	13/09/2009	23,80	16,90
14/09/1988	23,55	16,20	28/09/2009	21,05	13,22
25/09/1988	21,70	11,32	05/01/2010	23,25	12,40
06/07/1989	19,95	12,44	23/09/2010	20,85	13,30
13/09/1989	24,50	18,35	27/03/2011	18,80	11,35
25/09/1989	25,20	18,39	21/07/2011	26,15	19,50
01/06/1990	25,94	19,47	10/08/2011	23,96	16,28
23/09/1990	17,95	9,63	20/09/2012	20,55	14,30
13/10/1990	21,40	13,55	25/08/2013	23,13	15,40
27/12/1991	18,20	10,55	06/06/2014	19,19	11,47
29/05/1992	24,65	18,40	29/06/2014	18,21	9,08
06/07/1992	18,15	9,88	30/09/2014	16,32	9,18
25/09/1992	16,19	7,71	20/10/2014	19,79	11,32
05/06/1993	17,90	8,20	15/07/2015	20,65	13,29
06/07/1993	20,45	13,40	21/07/2015	17,17	9,02
03/07/1994	17,30	10,05	21/09/2015	21,40	12,76
04/08/1997	24,90	18,00	10/10/2015	23,81	15,95
16/10/1997	19,00	10,50	23/10/2015	17,02	9,56
01/11/1997	18,10	10,47	15/07/2016	21,90	15,01
16/08/1998	20,85	13,80	20/10/2016	24,56	17,37

Fonte: Dos autores (2018).



6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

A partir da análise desses dados pluviométricos e fluviométricos, verificou-se que as variáveis melhor correlacionadas linearmente à cota máxima observada em Lajeado foram: a cota máxima observada em Encantado - CE ($R = 0,971$), a chuva acumulada na bacia complementar em 3 dias anteriores à cheia – P3d ($R = 0,612$), e a precipitação com filtro de decaimento exponencial - Pf ($R = 0,663$).

Considerando esses resultados foram testados os diferentes pares de dados de entrada para a elaboração do modelo matemático, sendo que a função (EQUAÇÃO 2) que apresentou as melhores medidas de desempenho foi obtida a partir do emprego das variáveis “CE + Pf”.

$$CL = 9,596 + 0,699 \cdot CE + 0,101 \cdot Pf \quad (2)$$

Em que: CL = cota prevista para Lajeado; CE = cota máxima observada em Encantado; Pf = precipitação com filtro de decaimento exponencial.

Na Tabela 2 são apresentadas as medidas de desempenho obtidas durante a calibração e validação do modelo matemático representado por essa função (EQUAÇÃO 2), bem como as medidas de qualidade de modelos matemáticos, para a previsão de níveis fluviais de inundação no município de Lajeado, desenvolvidos por Eckhardt (2008) e Kurek (2016).

Tabela 2 – Medidas de desempenho do modelo desenvolvido no presente estudo (MOD_2018) e de modelos elaborados em estudos anteriores

Medidas de desempenho	MOD_2018		Modelo de Eckhardt (2008)	Modelo de Kurek (2016)
	Calibração	Validação	Calibração	Calibração
EAM (m)	0,329	0,484	0,998	-
EPM (%)	1,599	2,434	-	-
RMSE (m)	0,429	0,607	-	-
EA95 (m)	0,786	1,106	-	-
NS	0,974	0,951	0,900	0,999
R²	0,974	0,956	0,900	0,948
EP (m)	0,059	0,146	-	0,530
EQM (m²)	0,184	0,369	-	0,281

Em que: EAM = erro absoluto médio; EPM = erro proporcional médio; $RMSE$ = raiz do erro quadrático médio; $EA\ 95$ = quantil 0,95 dos erros absolutos; NS = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; R^2 = coeficiente de determinação; EP = erro padrão; EQM = erro quadrático médio.

Fonte: Dos autores (2018).

O R^2 obtido na calibração do presente modelo (MOD_2018) foi de 0,974, indicando que há um excelente ajuste do modelo ao conjunto de dados disponíveis (FIGURA 2A). Além disso, este valor aponta que as variáveis de entrada empregadas explicam mais de 97% da cota observada em Lajeado, o que é um percentual muito satisfatório.

O EAM e o EA95 foram, respectivamente, de 0,33 m e 0,79 m, destacando-se que 47 eventos (87%), conforme pode ser visualizado na Figura 2B, apresentaram resíduo inferior a 0,80 m na previsão de nível para Lajeado. Dos eventos que ultrapassaram este limiar, apenas dois, de pequena magnitude, apresentaram erro superior a 1 m, sendo referentes às inundações ocorridas em 30/07/1980 (1,39 m) e 25/09/1988 (-1,02 m).

Confrontando as medidas de desempenho obtidas durante a calibração do MOD_2018 à Eckhardt (2008) e à Kurek (2016), conforme representado na Tabela 2, verifica-se que houve uma considerável melhora na previsão de níveis em Lajeado com o modelo proposto no presente estudo, provavelmente por integrar o uso de cotas máximas observadas à

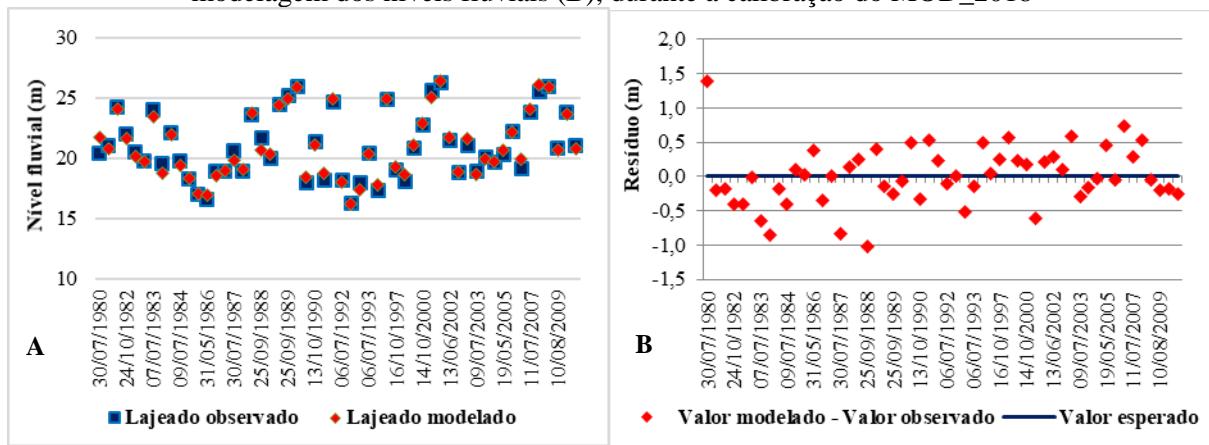


6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

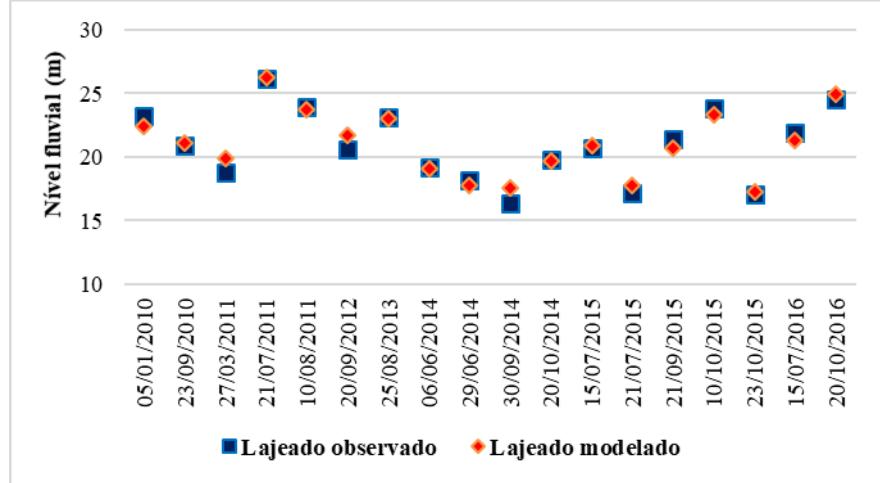
montante com a chuva filtrada na área da bacia complementar, a qual não é monitorada por estações fluviométricas. Além disso, se considerado o modelo proposto por Eckhardt (2008), os resultados mais fidedignos do MOD_2018 também podem estar relacionados ao emprego de informações de nível fluvial mais recentes e confiáveis, já que o autor supracitado empregou dados históricos desde 1942 em seu estudo. No entanto, é importante mencionar que o presente modelo exige um conjunto maior de informações e maior esforço para sua manipulação, uma vez que além de dados de cotas a montante, também é preciso realizar o levantamento de dados de precipitação na área de estudo; obter o seu valor médio, e; aplicar o filtro de decaimento exponencial, para na sequência empregar o modelo matemático de previsão de níveis.

Figura 2 – Ajuste dos níveis fluviais observados e modelados para Lajeado (A) e os resíduos da modelagem dos níveis fluviais (B), durante a calibração do MOD_2018



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 3 – Ajuste das cotas observadas e modeladas para Lajeado durante a validação do MOD_2018



Fonte: Dos autores (2018).

A amostra de validação reforça o bom desempenho do modelo matemático MOD_2018 na previsão de níveis em Lajeado (FIGURA 3), com R^2 de 0,956 e NS de 0,951, demonstrando que a equação calibrada obteve um excelente ajuste e eficiência perante aos dados separados para validar o modelo. O EAM e o EA95 se mantiveram baixos, sendo, respectivamente, de 0,48 m e 1,11 m. Destaca-se, que em apenas 3 dos 18 eventos de validação, o erro foi um pouco superior a 1 m, sendo nas datas de 27/03/2011 (1,06 m), 20/09/2012 (1,18 m) e, 30/09/2014 (1,25 m), que correspondem a eventos não associados a



6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

inundações, e uma inundação de pequena magnitude. Também é importante mencionar que ao aplicar os modelos propostos por Eckhardt (2008) e Kurek (2016) ao mesmo conjunto de dados considerado na validação do presente estudo, verificou-se que o NS do MOD_2018 apresentou, respectivamente, um aumento percentual de 27,65% e 20,08%, o que representa uma significativa melhora na qualidade de previsão. A partir desses resultados, constata-se que MOD_2018 apresenta boa eficiência para a previsão de níveis de inundação no município de Lajeado, inclusive para eventos de grande magnitude. Salienta-se que o seu emprego somente não é indicado para inundações extremas em Lajeado, visto que durante o ajuste do modelo não foi considerado nenhum evento com cota superior a 28 m no município.

4 Conclusão

Com base nos resultados e nas análises realizadas, verificou-se o emprego conjunto de informações de cota e precipitação contribuíram para a melhora da qualidade de modelagem de níveis fluviais de inundação no município de Lajeado. Portanto, o modelo matemático desenvolvido no presente estudo pode ser empregado futuramente para antecipar cenários de inundação na cidade, que é afetada, em média, uma vez a cada ano.

Os bons resultados alcançados também reforçam a importância de realizar constantes atualizações nos modelos de previsão, bem como a tentativa de emprego de novas variáveis explicativas, visto que a partir da previsão mais fidedigna, possibilita-se a melhoria da gestão desses eventos hidrológicos extremos, o que diminui, consequentemente, os danos sociais e econômicos associados à ocorrência de inundações.

Referências

- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchente.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- DORNELLES, F. **Previsão Contínua de Níveis Fluviais com Redes Neurais utilizando Previsão de Precipitação: Investigação Metodológica da Técnica.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.
- ECKHARDT, R. R. **Geração de Modelo Cartográfico Aplicado ao Mapeamento das Áreas Sujeitas às Inundações Urbanas na Cidade de Lajeado / RS.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2008.
- FERRI, G. **História do Rio Taquari-Antas.** Encantado: Grafen, 1991.
- KUREK, R. K. M. **Análise das Inundações no Vale do Taquari/RS como Subsídio à Elaboração de um Modelo de Previsão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- MORAES, S. R. **Mapeamento das Áreas e Edificações Atingidas pelas Inundações do Rio Taquari na Área Urbana do Município de Lajeado/RS.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental Bacharelado) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2015.



6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A; SALDANHA, D. L. Modelos de Previsão e Espacialização das Áreas Inundáveis em Montenegro, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 4, p. 355-378, 2012.

SENE, K. **Flood Warning, Forecasting and Emergency Response**. United Kingdom: Springer Science, 2008. 303 p.