



Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação baseada em modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada em Sistemas de Informação Geográfica.

**Flávia Farina¹, Fernando Petersen Cardoso¹, Gabriela Fiabane da Rosa¹,
Eduardo S. Valenti¹, Tatiana S. da Silva¹, Rai N. dos Santos¹, Tamiris S. Alves¹**

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Laboratório de Modelagem Ricardo Ayup Zouain

(flavia.farina@ufrgs.br, nando.petersen@hotmail.com, gabifrosa@hotmail.com,
eduardo.valenti@gmail.com, tatiana.silva@ufrgs.br, rai_nunes_santos@hotmail.com,
tamiris.salves@outlook.com)

Resumo

Os recentes eventos climáticos extremos ocorridos no RS têm resultado em inundações periódicas com grandes impactos sociais, econômicos e de saúde pública. Neste sentido, o propósito deste trabalho é expor uma metodologia empregada para a modelagem de áreas sujeitas a inundação a fim de auxiliar a previsão e a tomada de decisões em situações de desastres. As análises são aplicadas ao município de São Lourenço do Sul, situado na metade sul do RS. A execução da proposta está organizada em duas fases principais, a primeira consiste na construção de um banco de dados em Sistemas de Informação Geográfica e no estudo e sistematização de variáveis relevantes para modelagem da área teste. A segunda fase se refere a aplicação de modelos hidrológico e hidrodinâmico para geração de cenários futuros através de “manchas” de inundação, com o intuito de analisar os impactos que uma chuva intensa causará no município em questão. Para tal, foram utilizados os *softwares* ArcGIS 10.4, HEC-HMS e HEC-RAS. Os resultados preliminares abrangem as representações cartográficas e a análise da suscetibilidade à inundação para a área de interesse, de acordo com os parâmetros dos modelos implementados.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, Sistemas de Informação Geográfica, Inundações.

Área Temática: Recursos Hídricos

Mapping of areas susceptible to flood based on hydrological and hydrodynamic modelling integrated to Geographic Information Systems.

Abstract

The recent extreme events occurred in the RS have resulted in periodical floods with great social, economic and public health impacts. In this context, the goal of the present work is to present a methodology used to model areas susceptible to flood to support the forecasting and decision making in disaster situations. The analysis was carried on the São Lourenço do Sul municipality, located in the South part of RS. The execution of this proposal was organized into two main phases. The first one consists in building a Geographical Information System database and in studying and systematizing relevant variables to the modelling of a pilot area. The second one is related to the application of hydrological and hydrodynamic models for future scenario generation, in the form of flood patches, to analyze the impacts of a intense rainfall event over the municipality in hand. To do so, ArcGIS 10.4, HEC-HMS, and HEC-RAS software were used. Preliminary results comprise cartographic representations of the susceptibility to flood in the area of interest, according to the parameters of the implemented models.

Key words: Hydrological modeling, Geographic Information Systems, Flood.

Theme Area: Water Resources



1 Introdução

No Estado do Rio Grande do Sul as situações climáticas experimentadas nas últimas décadas têm sido responsáveis pelo aumento significativo do número de eventos extremos como vendavais, granizos, deslizamentos e inundações. Os registros oficiais dos últimos anos mostram um acentuado crescimento destes eventos nos municípios costeiros do Estado e, conseqüentemente, dos prejuízos sociais, econômicos e ambientais (Defesa Civil RS, 2014).

Em específico, o município de São Lourenço do Sul, localizado na zona costeira, sofreu um episódio de precipitação concentrada entre os dias 09 e 10 de março de 2011 que gerou uma inundação brusca, cobrindo mais da metade de sua área, com água a 2,7 metros de altura, em média. Cerca de 20.000 pessoas foram afetadas, 300 famílias estiveram isoladas e cerca de 500 pessoas ficaram expostas ao mau tempo aguardando o resgate. Pontes foram submersas ou destruídas, isolando o extremo sul do Estado ligado pela BR116 (Sausen *et al*, 2012).

A origem destas situações tem sido atribuída aos recorrentes eventos climáticos extremos, porém, os fatores antrópicos, como os padrões de cobertura e uso do solo, a alta impermeabilização das áreas urbanas, o desrespeito à legislação do Código Florestal Brasileiro no que tange à ocupação de Áreas de Preservação Permanente no meio urbano e rural são fatores preponderantes na ampliação dos danos causados pelos eventos hidrometeorológicos.

Por outro lado, o enfrentamento de situações de desastres tem evoluído para além de ações pós-evento (resgate, assistência de vítimas e reconstrução), no sentido da gestão do risco e do gerenciamento de desastre. Essa nova sistemática é descrita na Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNDC, Lei 12.608 de 10/04/2012), e prevê as seguintes ações: prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação (Brasil, 2012; CEPED, 2016). Como ações de prevenção, no artigo 7º, o PNPDC ressalta a necessidade de identificar e mapear áreas de risco e realizar estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades.

A suscetibilidade é a maior ou menor predisposição de ocorrência de um determinado evento extremo em uma área específica e, no caso das inundações, resulta de um conjunto de fatores que condicionam a sua ocorrência, como por exemplo, cobertura e uso da terra, tipos de solo e declividade (BRESSANI & COSTA, 2013, CPED, 2016). Atualmente, diversos são os métodos empregados para geração de modelos de suscetibilidade a inundação, entre os quais destacam-se aqueles que utilizam simulação hidrológica e hidráulica integrada aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (CABRAL, 2016; DECINA & BRANDÃO, 2016; CORREIA *et al*, 2015; LIMA NETO & TAVARES, 2013; RIBEIRO & LIMA, 2011). De maneira geral, tais estudos definem a estratégia metodológica considerando os parâmetros físicos da região de estudo, a disponibilidade de dados e a opção por um conjunto de técnicas de modelagem específicas dentro do instrumental disponível.

Diante do exposto, o propósito deste artigo é expor a modelagem desenvolvida para o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação, baseada na integração entre *softwares* de modelagem hidrológica e hidrodinâmica com Sistemas de Informação Geográfica. O modelo é aplicado na microbacia do Rio São Lourenço, na qual está inserida a maior parte da área urbana do município de São Lourenço do Sul, na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul.

2 Metodologia

O arranjo metodológico deste trabalho está organizado em duas fases principais: elaboração de um banco de dados em ambiente SIG com as variáveis pertinentes ao estudo e;



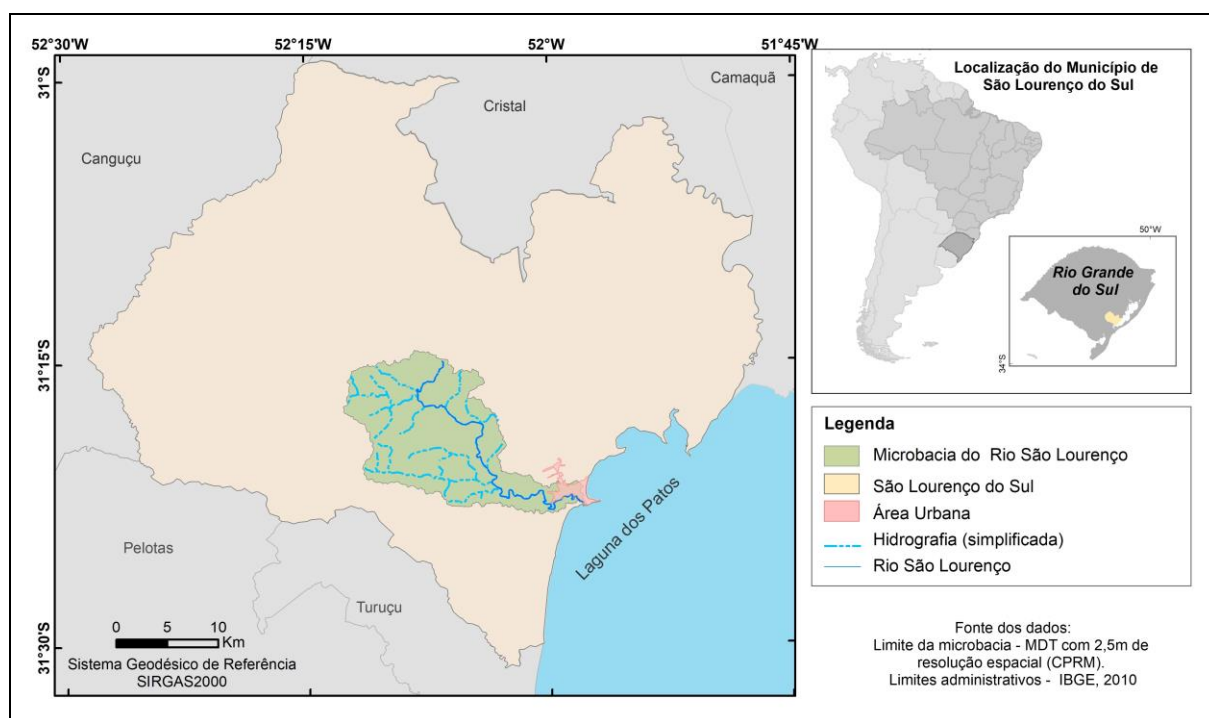
modelagem hidrológica e hidrodinâmica, nos *softwares* *HEC-HMS*, *HEC-RAS*, integrados ao *ArcGIS 10.4*, por meio da extensão *HEC-GeoRAS*. A seguir, são descritas em detalhe cada uma dessas etapas.

2.1 Elaboração do banco de dados em SIG

A primeira etapa da metodologia se fundamenta na revisão, na organização e no armazenamento de dados geográficos disponíveis para o município de São Lourenço do Sul, provenientes de fontes públicas disponibilizadas por órgãos oficiais como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Agência Nacional das Águas (ANA), Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM-RS), entre outros. Este banco de dados teve por objetivo caracterizar o município, delimitar a microbacia de interesse e obter os parâmetros físicos necessários às etapas seguintes. O banco foi elaborado no SIG *ArcGIS 10.4* e é composto por imagens do satélite *RapideEye*, mapas temáticos de geologia, geomorfologia, modelo digital de elevação (MDE), modelo digital do terreno (MDT) declividade, pedologia, além das tabelas associadas aos setores censitários do IBGE. Outras informações foram derivadas a partir dos dados originais, como o mapa de cobertura e uso da terra, declividade e hidrografia.

A microbacia do Rio São Lourenço (Figura 1) foi delimitada por meio da extensão *ArcHydro* do *ArcGIS*, utilizando-se como dados de entrada o MDE, com 2,5 metros de resolução espacial, disponibilizado *online* pela CPRM e, o *layer* da hidrografia, de mesma fonte. A hidrografia foi previamente ajustada, aplicando-se correções espaciais com base nas imagens do satélite *RapideEye*. A microbacia resultante perfaz uma área de cerca de 197km², com altitudes que variam entre zero e 240 metros.

Figura 1 – Localização e delimitação da microbacia do Rio São Lourenço do Sul, RS.



Fonte: Elaborado pelos autores



2.2 Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica

A microbacia do Rio São Lourenço foi subdividida em quatro sub-bacias, a fim de se obter resultados mais precisos devido às limitações quanto à extensão de área imposta por alguns dos métodos a serem aplicados. Em função disso, criou-se o modelo topológico do conjunto das sub-bacias de interesse, para a entrada e saída dos dados e posterior cálculo do transporte da vazão.

Inicialmente, empregou-se o modelo hidrológico do Serviço de Conservação do Solo (SCS), desenvolvido pelo *Natural Resources Conservation Service (NCRS)*, o qual estima a precipitação efetiva e a distribuição do escoamento superficial. Esse modelo utiliza como principal parâmetro o número da curva de escoamento superficial, ou *Curve Number (CN)*. O valor de CN é obtido a partir da relação entre os tipos de solo, de cobertura e uso da terra e das condições de umidade antecedentes (grupos hidrológicos), presentes na região de interesse. Tucci (1995) apresenta uma compilação da classificação dos solos quanto aos grupos hidrológicos (A, B, C, D) e suas características, bem como os valores de CN para cobertura e uso da terra em bacias rurais. Neste sentido, baseando-se, no trabalho de Sartori et al (2005), atribuiu-se os seguintes grupos hidrológicos aos tipos de solo da área de estudo: B (argissolos vermelho-amarelo), C (neossolo flúvico) e, D (planossolo háplico). Os grupos hidrológicos foram então cruzados com as classes de cobertura e uso da terra, resultando nos valores de CN apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Número de curva CN do SCS

Cobertura e uso da terra	Grupos hidrológicos		
	B	C	D
Campo ou pastagem	58	71	78
Mata e vegetação arbustiva/arbórea	60	70	76
Solo exposto	80	87	90
Cultivo agrícola (arroz)	75	83	87
Área urbana	92	94	95

Fonte: Elaborado pelos autores

Para a geração do valor da retenção potencial máxima utilizou-se a equação que relaciona este parâmetro com o CN ($S = 25.400/CN - 254$). Dessa forma, primeiro se calculou o tempo de concentração das sub-bacias, utilizando a equação de *Kirpich*, para em seguida selecionar um tempo de duração de chuva adequado (chuva de projeto), visando à obtenção de cálculos mais precisos. Posteriormente, os seguintes parâmetros físicos foram extraídos das sub-bacias: comprimento do talvegue, diferença de cotas no canal principal, CN médio, área, tempo de concentração e “*lag time*”, conforme exposto na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros físicos extraídos das sub-bacias do Rio São Lourenço

Sub-bacia	Comprimento talvegue (km)	Diferença de cotas (m)	CN médio	Área (km ²)	Tempo concentração (min)	Lag time
1	16,60	12	83,30	28,86	561,85	337,11
2	12,80	87	69,66	55,07	194,08	116,45
3	12,70	76	72,47	38,59	202,61	121,56
4	12,50	98	61,56	75,25	180,38	108,23

Fonte: elaborado pelos autores

A determinação da vazão (propagação das cheias) apoiou-se no método de *Muskingum-Cunge*, que necessita de dados de entrada de vazão, de topografia do terreno e



dos coeficientes de rugosidade *Manning*. Os coeficientes *Manning* foram obtidos em Chow (2009), atribuindo-se os valores 0,035 no leito do canal e 0,045 na planície de inundação.

A partir desses dados, procedeu-se o cálculo e a simulação das vazões de pico de uma chuva de projeto para diferentes tempos de retorno (TR), expressos em anos. As vazões podem ser calculadas em qualquer ponto das sub-bacias, porém, optou-se por aplicar a modelagem em um ponto do Rio São Lourenço localizado na entrada da área urbana, que se estende até a foz na Laguna dos Patos. Uma chuva de projeto é um evento chuvoso idealizado, ao qual está associado um tempo de retorno (TR), ou uma probabilidade a qual esse evento possa ser igualado ou superado em um ano qualquer. O TR é uma variável utilizada em hidrologia para avaliar os eventos extremos, como é o caso de chuvas intensas, e relaciona a altura máxima de precipitação, a qual determina as características específicas de uma inundação, como sua duração, altura, área abrangida e velocidade (COLLISCHONN & TASSI, 2008).

Para estimar a vazão máxima, a duração da chuva de projeto deve ser definida de forma que toda a bacia contribua, ao mesmo tempo, para o escoamento que alcança o ponto selecionado. Portanto, deve-se considerar que o tempo de duração da chuva seja igual ou superior ao maior tempo de concentração das sub-bacias delimitadas.

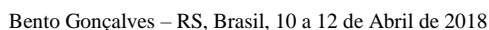
A chuva de projeto é geralmente obtida por meio das curvas que relacionam intensidade média, duração e frequência (curvas IDF). As curvas IDF são geradas a partir da análise estatística das chuvas mais intensas observadas em pluviógrafos, ou de dados de pluviômetros desagregados para durações menores que um dia. Porém, as curvas IDF para o município de São Lourenço do Sul, calculadas para os tempos de retorno 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos, foram geradas utilizando-se os coeficientes da Equação IDF da região de interesse, propostos por Sampaio (2011).

Para a distribuição temporal da chuva, foi adotado um hietograma especificado (*Specified Hyetograph*), onde as chuvas foram espacializadas no tempo, em intervalos de 10 minutos, na unidade de milímetros incrementais, e suas intensidades distribuídas conforme as distribuições de Huff (1990). Devido o maior “lag time” obtido ser 337,11 minutos, ou seja, menor do que sei horas, optou-se pela seleção do primeiro quartil de distribuição de Huff para espacializar a chuva. Entre os TR definidos, foram selecionados 10, 25 e 50 anos, sendo este último o evento mais extremo.

Nesta etapa, deu-se entrada no *HEC-HMS* dos dados apresentados na Tabela 1 e da chuva de projeto. Como resultado do modelo hidrológico, foram obtidas as seguintes vazões máximas para o ponto selecionado na microbacia do Rio São Lourenço, com seus respectivos TR: TR 10 anos = 206m³/s; TR 25 anos = 318,4m³/s; TR 50 anos = 345,6m³/s.

Para a simulação hidráulica da inundação na área de estudo, passou-se ao programa *HEC-RAS*, que utiliza como dados de entrada os coeficientes de rugosidade *Manning*, as vazões máximas obtidas no modelo hidrológico, e parâmetros hidráulicos do rio (geometria: rede de drenagem, seções transversais, limites da calha, planície de inundação). Estes parâmetros foram gerados previamente no *ArcGIS*, com a extensão *HEC-GeoRAS*, a partir da vetorização sobre imagens do satélite *RapidEye*, apoiada no MDT e no detalhe das imagens do *software GoogleEarth*. Em algumas das seções transversais delimitadas haviam dados de batimetria disponíveis, portanto, tais seções foram editadas manualmente, de modo a aprimorar o dado.

Concluída esta etapa, foram inseridos no *HEC-RAS* a geometria do canal, os coeficientes de *Manning* e os dados de vazão obtidos pelo modelo hidrológico. Desse modo, a modelagem hidrodinâmica é implementada para os tempos de retorno 10, 25 e 50 anos, resultando na simulação de “manchas” de inundação. Essas manchas representam a distribuição espacial da inundação, para a chuvas de projeto com os TR especificados.



Fonte: Elaborado pelos autores



4 Conclusões

De maneira geral, pode-se concluir que a modelagem ideal de áreas sujeitas à inundação é menos complexa quando estão disponíveis dados hidrológicos de eventos extremos já ocorridos, tais como a precipitação pluviométrica, cotas e tempo do alcance da inundação, entre outros. Cabe salientar também que os produtos cartográficos disponíveis em fontes públicas são produzidos em diversas escalas, geralmente pequenas, como é o caso do mapa de solos, dificultando a integração dos mesmos com produtos de maior escala, por vezes disponíveis para áreas de estudo de extensão reduzida.

Por outro lado, os resultados obtidos permitem concluir que a metodologia proposta é adequada para aplicação em qualquer outra microbacia para a qual não se disponha de dados de vazão. A integração entre os *softwares* de modelagem hidrológica/hidrodinâmica, por meio da extensão *HEC-GeoRAS*, com o *SIG ArcGIS* se mostrou de grande valia, permitindo que os dados essencialmente numéricos dos primeiros pudessem ser espacializados e, posteriormente avaliados com outras variáveis de interesse.

A partir das análises dos parâmetros gerados e das superfícies de inundação simuladas, concluiu-se que o Rio São Lourenço não suporta escoar as precipitações intensas associadas aos tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos. Portanto, espera-se que os dados produzidos e as informações a serem ainda incorporadas ao estudo, possam servir como subsídios para a tomada de medidas preventivas, no caso de eventos extremos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento do projeto, à Pró-Reitoria de Extensão da UFRGS pelas bolsas de extensão, à Pró-Reitoria de Pesquisa da UFRGS e à FAPERGS pelas bolsas de iniciação científica.

Referências

BRASIL. **Lei Nº 12.608, de 10 de abril de 2012.** Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil -PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; e dá outras providências. Brasília, 2012.

BRESSANI L. A., COSTA E. A. 2013. Mapeamento Geotécnico – Suscetibilidade, Perigo, Vulnerabilidade, Risco Instalado e Risco. **In:** CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 14, CBGE, Rio de Janeiro, 2013. Anais... Rio de Janeiro, 2013, 10p.

CABRAL, S. L. et al. **Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana:** aplicação à bacia do Rio Granjeiro-CE. *Revista Geociências*, São Paulo, v. 35, n. 1, p.90-101, 2016.

CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics.** Caldwell: Blackburn, 2009.

COLLISCHONN, V.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia.** Porto Alegre: UFRGS, 2008. Disponível em: <http://www.ctec.ufal.br/professor/crfj/Pos/Hidrologia/apostila_Completa_2008.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.



CORREIA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C. **Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco à inundação.** Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, v. 67, n. 6, p.1183-1202, dez. 2015.

CPED. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Capacitação em Gestão de Riscos.** 2ª. Ed. Porto Alegre: UFRGS, 2016.

DECINA, T. G. T.; BRANDÃO, J. L. B.. **Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, [s.l.], v. 21, n. 1, p.207-217, mar. 2016. FapUNIFESP (SciELO).

EMBRAPA. **O novo mapa de solos do Brasil.** Legenda atualizada. Escala 1:5.000.000. EMBRAPA: Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/920267/o-novo-mapa-de-solos-do-brasil-legenda-atualizada>>. Acesso em: 12 dez 2017.

HUFF, F. A. **Time distributions of heavy rainstorms in Illinois.** Illinois State Water Survey, Circular 173. Champaign, Ill. 1990.

LIMA NETO, O. C.; TAVARES, P. R. L. Mapeamento de áreas de inundação da microbacia hidrográfica do Rio Granjeiro na cidade do Crato/CE. **In: ENCONTRO UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI**, 1, 2013, Juazeiro do Norte. Anais dos Encontros Universitários da UFCA 2013. Juazeiro do Norte: UFCA, 2013. v. 1, p.1-10.

RIBEIRO, C. B. de M.; LIMA, R. N. S. **Simulação de inundações urbanas a partir da integração de técnicas de geoprocessamento à modelagem hidráulica e hidrológica.** Revista de Geografia: PPGeo, Juiz de Fora, v. 1, n. 2, p.1-9, dez. 2011.

SAMPAIO, M. V. **Espacialização dos coeficientes das equações de chuvas intensas em Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul.** 2011. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. **Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos.** Parte 1: Classificação. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.10, n.4, p.05-18, 2005.

SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P.; PEREIRA, R. S. Evento de inundação brusca ocorrido em São Lourenço do Sul, RS, em 10 de março de 2011. **In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE DESASTRES NATURAIS.** Rio Claro: UNESP. p. 1-12. 2012.

TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas. **In: Tucci, C.E.M.; Porto, R.L.L.; Barros, M.T.** Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1995, V.5, p.15-36.