

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES E ENXURRADAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO FORQUETA, RS, BRASIL

ANALYSIS OF THE SUSCEPTIBILITY TO FLOODING IN THE FORQUETA RIVER BASIN, RS, BRAZIL

Guilherme Garcia de OLIVEIRA¹, Taísa FLORES², Nestor Antonio BRESOLIN JUNIOR³, Claus HAETINGER², Rafael Rodrigo ECKHARDT², Renata Pacheco QUEVEDO¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Emails: g.g.oliveira10@gmail.com; renata.quevedo@ufrgs.br

²Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES. Emails: taisa.flores@univates.br; chaet@univates.br; rafare@univates.br

³Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Email: nbresolin@gmail.com

Introdução
Área de Estudo
Metodologia
Resultados e Discussões
Conclusões
Referências

RESUMO - O objetivo deste estudo foi analisar a suscetibilidade a inundações e enxurradas na bacia hidrográfica do rio Forqueta, RS, que foi atingida por uma grande enxurrada em 2010. Para tanto, foi apresentada uma abordagem adaptada para locais com baixa disponibilidade de dados, integrando modelos hidrológicos e geotecnologias. A precipitação extrema para os tempos de retorno (TR) de 10, 30 e 100 anos foi estimada usando uma equação de intensidade-duração-frequência. Foram utilizados dados *Shuttle Radar Topography Mission* para a delimitação das bacias e dos rios. O modelo *Soil Conservation Service* foi aplicado para a transformação chuva-vazão nas bacias, enquanto a propagação da onda de inundação foi conduzida pelo método *Muskingum-Cunge*. A simulação hidrológica revelou que as vazões podem ultrapassar $8.000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, com área da seção transversal molhada superior a 5.000m^2 e profundidade maior que 10m em muitos trechos do rio. Cerca de 2% da bacia apresentou alguma suscetibilidade, totalizando 53km^2 de áreas suscetíveis, principalmente nos municípios de Marques de Souza e Arroio do Meio. Conclui-se que é necessária uma revisão na legislação dos municípios ribeirinhos da área de estudo, visando redefinir as áreas sujeitas às inundações, considerando um zoneamento com cotas variáveis de inundação de acordo com a seção do rio.

Palavras-chave: sistema de informações geográficas; modelagem hidrológica; desastres naturais.

ABSTRACT - The objective of this study was to analyze the susceptibility to flooding in the Forqueta River Basin, RS, Brazil, which suffered a great flood in 2010. For this purpose, an adapted approach was presented for areas with low data availability, integrating hydrological models and geotechnologies. The definition of extreme rainfall in return periods (RP) of 10, 30 and 100 years was carried out by using an intensity-duration-frequency equation. Shuttle Radar Topography Mission data were used to the delimitation of the basins and rivers. The Soil Conservation Service method was used for the transformation of rain runoff, while the spread of river flood wave was conducted by Muskingum-Cunge model. Hydrological simulation revealed that the maximum flow rates can exceed $8,000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ at the Forqueta river outfall, with wet area section larger than $5,000\text{m}^2$ and waters rising more than 10m on the average. About 2% of the basin showed some degree of susceptibility, adding up to 53km^2 of wetlands. It is concluded that a revision is necessary in the legislation of the municipalities bordering the study area, aiming to redefine the areas susceptible to flooding, considering a zoning with variable flood quotas according to the section of the river.

Keywords: geographic information systems; hydrological modelling; natural disasters.

INTRODUÇÃO

Os desastres relacionados a eventos hidrológicos extremos, tais como as inundações e as enxurradas, causam grandes impactos à sociedade. Entre 2001 e 2015, estima-se que aproximadamente 1,3 bilhões de pessoas foram afetadas por esse tipo de evento em todo o mundo, com 285 mil pessoas feridas e 96 mil óbitos, além de prejuízos da ordem de US\$ 400 bilhões. No Brasil, neste mesmo período, foram afetadas 6,8 milhões de pessoas, com mais de 2.500 óbitos e prejuízo aproximado de R\$ 20 bilhões (EM-DAT, 2016).

As inundações e enxurradas são provocadas por precipitações intensas e/ou volumosas que, combinadas com fatores físicos e antrópicos da bacia hidrográfica, podem causar impactos em diferentes escalas e proporções. As inundações

são definidas como um transbordamento gradual da água do leito menor dos corpos hídricos para as planícies ou terraços adjacentes. Por sua vez, as enxurradas se diferenciam pela maior velocidade e poder de destruição, ocorrendo normalmente em locais de relevo acidentado e com pouca área de drenagem a montante, isto é, em bacias menores (Castro et al., 1998; Oliveira, 2010).

Diversas técnicas e métodos têm sido empregados para a identificação de áreas suscetíveis a eventos hidrológicos extremos. Algumas se baseiam na utilização de geotecnologias, como o Sensoriamento Remoto e os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), como nos estudos de Kunzer et al. (2013), Chen et al. (2014) e Pandey et al. (2014). Outras

abordagens integram as geotecnologias a dados fluviométricos e modelos digitais de elevação (MDE), como pode ser observado em Eckhardt (2008), Oliveira (2010), Pan & Nichols (2013), Mason et al. (2016). Em bacias hidrográficas com séries hidrológicas inexistentes ou insuficientes, têm-se observado a utilização de modelos hidrológicos para simular o avanço das águas, como em Bates (2012), Grimaldi et al. (2013), Guasselli et al. (2016) e Santos (2016).

Visando uma adequação aos limitados investimentos em monitoramento hidrológico e levantamentos altimétricos, no Brasil, faz-se necessária a aplicação de métodos adaptados, considerando informações obtidas gratuitamente e dados disponíveis em larga escala. Um exemplo é o método *Height Above Nearest Drainage* (HAND) (Rennó et al., 2008), utilizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) na definição dos graus de suscetibilidade às inundações em centenas de municípios do Brasil.

As características do meio físico associado aos recorrentes episódios de precipitações, juntamente com a urbanização e ocupação de áreas sem o planejamento adequado, fazem com que a bacia hidrográfica do rio Forqueta, localizada na porção central do Rio Grande do Sul, possua características que potencializem os impactos causados pelas inundações e enxurradas. No entanto, para obter um mapea-

mento de suscetibilidade nessa área, é necessária a utilização de uma abordagem adaptada para locais com baixa disponibilidade de dados altimétricos e hidrológicos, tendo em vista que os municípios localizados nesta bacia não possuem mapeamentos planialtimétricos em escala detalhada.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo a análise de suscetibilidade a inundações e enxurradas na bacia do rio Forqueta. A estruturação de uma base de dados voltada à análise de suscetibilidade pode servir como uma ferramenta que possibilite o armazenamento, sistematização e gerenciamento de informações, a fim de reduzir a possibilidade de possíveis perdas econômicas e de vidas humanas nas áreas urbanas dos municípios ribeirinhos nesta bacia hidrográfica.

A análise de suscetibilidade baseou-se em uma integração entre modelos hidrológicos e geotecnologias para a identificação de áreas suscetíveis a inundações e enxurradas, com uso de dados gratuitos e disponíveis em larga escala.

Dentre as vantagens dessa metodologia em relação a estudos anteriores, pode-se mencionar a inclusão da análise de frequência (simulação de precipitações com diferentes tempos de retorno – TR) e da profundidade das águas na definição dos graus de suscetibilidade e o satisfatório nível de automatização para obtenção das manchas de inundação.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Forqueta pertence à bacia hidrográfica dos rios Taquari-Antas, na Região Hidrográfica do Guaíba, Rio Grande do Sul (RS). A bacia encontra-se inserida entre as latitudes 29°30' e 28°49' S e as longitudes 52°00' e 52°45', na porção central do RS (Figura 1). A área de drenagem da bacia é de aproximadamente 2.845 km². O substrato geológico predominante da bacia hidrográfica se refere à Formação Serra Geral, Fácies Gramado e Caxias, caracterizados por derrames basálticos, de composição intermediária a ácida, datados de aproximadamente 130 milhões de anos.

O relevo apresenta uma grande amplitude altimétrica, com elevação variando de 16 m a 820 m. A bacia está inserida em quatro Unidades Geomorfológicas (UGs) distintas: Serra Geral, Planalto dos Campos Gerais, Patamares da Serra Geral e Planície Alúvio Coluvionar. As três

primeiras unidades se referem ao compartimento morfoestrutural da bacia e cobertura sedimentar fanerozoica, enquanto que as planícies alúvio-coluvionares pertencem ao compartimento de depósitos sedimentares quaternários (IBGE, 2003; Oliveira et al., 2015).

A Serra Geral, compartimento geomorfológico predominante na bacia, com aproximadamente 65% da área, está associada às escarpas do Planalto das Araucárias, desenvolvida sobre rochas efusivas básicas. Em função da declividade acentuada (com valores entre 10° e 70°), essa área é propícia ao desenvolvimento e preservação da Floresta Ombrófila Densa, Floresta Estacional Semidecidual e Estacional Decidual, tendo apresentado nas últimas décadas um avanço das áreas de florestas, com gradativa redução de áreas agrícolas (Rempel et al., 2001; Eckhardt et al., 2007).



Figura 1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Forqueta, RS, Brasil.

O principal tipo de solo nessa unidade é o Neossolo Litólico Chernossólico, com textura média cascalhenta. As formas do relevo apresentam-se bastante abruptas com vales fluviais aprofundados (superior a 350 m de desnível), com elevados índices de dissecação e predisposição para erosão, e forte controle estrutural nas linhas de drenagem, com muitos topos de morros angulares ou estreitos. Nesse compartimento, os processos hidrológicos predominantes se referem aos deslizamentos rasos, fluxos de detritos e enxurradas (IBGE, 2003; Oliveira et al., 2015; Oliveira et al., 2016).

Os Patamares da Serra Geral correspondem

aos terminais rebaixados da Serra Geral, composto por formas de relevo em colinas e morros com topos convexos e menor aprofundamento dos vales fluviais (IBGE, 2003; Oliveira et al., 2015). As declividades nesta unidade geomorfológica variam de 5° a 20°, apresentando outros usos e coberturas da terra predominantes, principalmente associados às atividades agrossilvipastoris, tais como plantações de milho, pastagens, florestas de eucaliptos, suinocultura e produção de gado leiteiro (Rempel et al., 2001; Eckhardt et al., 2007).

Nas áreas mais altas da bacia, com altitudes superiores a 600 m, observa-se a unidade do Planalto dos Campos Gerais.

O relevo apresenta uma variação do plano ao ondulado (sucessão de colinas e pequenos morros), com topos tabulares e alargamento dos vales fluviais. Os principais tipos de solos nessa unidade são o Argissolo Vermelho Alumínico e o Nitossolo Bruno Alumínico, ambos com textura argilosa a muito argilosa. A cobertura vegetal predominante é composta por pastagens e plantações de soja e milho, com algumas áreas de florestas, normalmente associada aos recursos hídricos (IBGE, 2003; Oliveira et al., 2015).

A Planície Alúvio Coluvionar corresponde a uma superfície mais plana (declividades inferiores a 5°), localizada no baixo curso do rio Forqueta e arroio Forquetinha. Os dois principais tipos de solos dessa unidade são o Chernossolo Argilúvico Órtico (textura argilosa) e o Planossolo Háptico Eutrófico (textura arenosa/média e média/argilosa). Os usos e coberturas predominantes se referem às atividades agropecuárias, com plantações de milho, pastagens, criação de gado leiteiro e de suínos. Nessa unidade também estão localizadas as áreas urbanas de Marques de Souza, Arroio do Meio, Lajeado e Forquetinha.

No caso de Marques de Souza, deve-se destacar a presença de dezenas de campings e áreas de lazer ao longo do rio Forqueta, principal atividade turística da localidade. Nessa unidade, o rio tem a velocidade de suas águas diminuída e, por vezes, até represada pelas águas do rio Taquari, conferindo características próprias de inundação (Oliveira et al., 2016).

Considerando a classificação de Köppen, a bacia hidrográfica possui um clima subtropical úmido, com verão quente (Cfa). De acordo com Rossato (2011) e Flores et al. (2017), a precipitação acumulada anual fica normalmente no intervalo entre 1.400 e 1.800 mm por ano. O período entre os meses de junho e outubro é o mais chuvoso, em função do avanço de sistemas frontais de precipitação, que resultam em precipitações mais longas e volumosas, ocasionando preferencialmente inundações nos rios com maior área de drenagem.

De novembro a março, a precipitação é influenciada fortemente por sistemas convectivos, os quais ocasionam chuvas mais intensas e localizadas, geralmente associadas aos movimentos de massa e enxurradas.

Em relação à hidrografia principal da bacia pode-se destacar o rio Forqueta e seus dois

principais afluentes, o rio Fão e o arroio Forquetinha (Figura 1). O rio Forqueta possui uma extensão de 150 km, com tempo de concentração do escoamento superficial estimado em 25 horas. Assim como nas precipitações, embora o regime hidrológico seja relativamente bem distribuído ao longo do ano, há um predomínio de eventos extremos de cheias entre junho e outubro. Em média, a vazão diária máxima em cada ano é de $1.166 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Considerando um tempo de retorno de 100 anos, a vazão diária máxima é estimada em $3.023 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, conforme estudo de regionalização das vazões realizado em Oliveira et al. (2016).

De acordo com o Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010), a população residente nos 16 municípios que estão localizados nesta bacia é de 181.502 habitantes, sendo os municípios de Lajeado, Soledade e Arroio do Meio os mais populosos. A economia na área de estudo está voltada à cadeia agroindustrial de produção e processamento de alimentos, com destaque para os setores avícola, suinícola, de pecuária leiteira e produção de grãos.

As indústrias, o comércio e os serviços apresentam uma concentração espacial ao longo da rodovia BR-386, com destaque para a cidade de Lajeado, que concentra o maior percentual do Produto Interno Bruto (PIB) da região. As propriedades rurais são, em sua maioria, de pequeno porte, com tamanho médio de 19 hectares.

A bacia hidrográfica do rio Forqueta apresenta uma problemática recorrente no que se refere aos impactos causados por eventos extremos hidrológicos. As grandes flutuações da vazão da bacia, subsequentes à ocorrência de chuvas intensas, distribuídas em extensas áreas, concentram altos volumes de água que se propagam com alta velocidade.

As principais enxurradas nesta região estão relacionadas com o extravasamento das águas dos Rios Fão e Forqueta, principalmente nas áreas urbanas dos municípios de Marques de Souza e Arroio do Meio (Ferri, 1991).

O maior evento extremo relacionado às inundações e enxurradas registrado na localidade se refere ao período de 03 a 05 de janeiro de 2010. A precipitação acumulada nesses dias superou os 250 mm na maior parte da bacia. O estudo de Oliveira et al. (2017) identificou 121 cicatrizes nas encostas e extensas manchas de

detritos e sedimentos grosseiros no leito do rio Fão e de seu afluente, o arroio Santa Tereza.

O comprimento médio das cicatrizes é de 250 m, com largura de 20 m. Em expedição a campo, foi verificada que a profundidade média das cicatrizes é inferior a um metro, indicando a predominância de deslizamentos rasos.

De acordo com o autor, esses deslizamentos ocorreram em um intervalo de tempo curto, resultando em grande acúmulo de detritos e formação de barreiras naturais nos vales fluviais da região, acumulando a água escoada de montante.

A figura 2 ilustra algumas das áreas propícias

para que isso tenha ocorrido, onde o rio apresenta cotovelos e curvas com forte controle estrutural, o relevo possui vertentes com curvatura horizontal convergente e curvatura vertical côncava (em forma de anfiteatro). O barramento do rio foi provocado pelos detritos de solos e rochas e material vegetal das árvores que se acumularam em algumas curvas dos rios. Esse fenômeno já foi relatado em publicações internacionais, conhecido como *Valley Blocking Landslide*, existindo inclusive indícios de ter ocorrido também em Rolante, RS, em janeiro de 2017, conforme o relatório apresentado pelo DRH-SADS (2017).

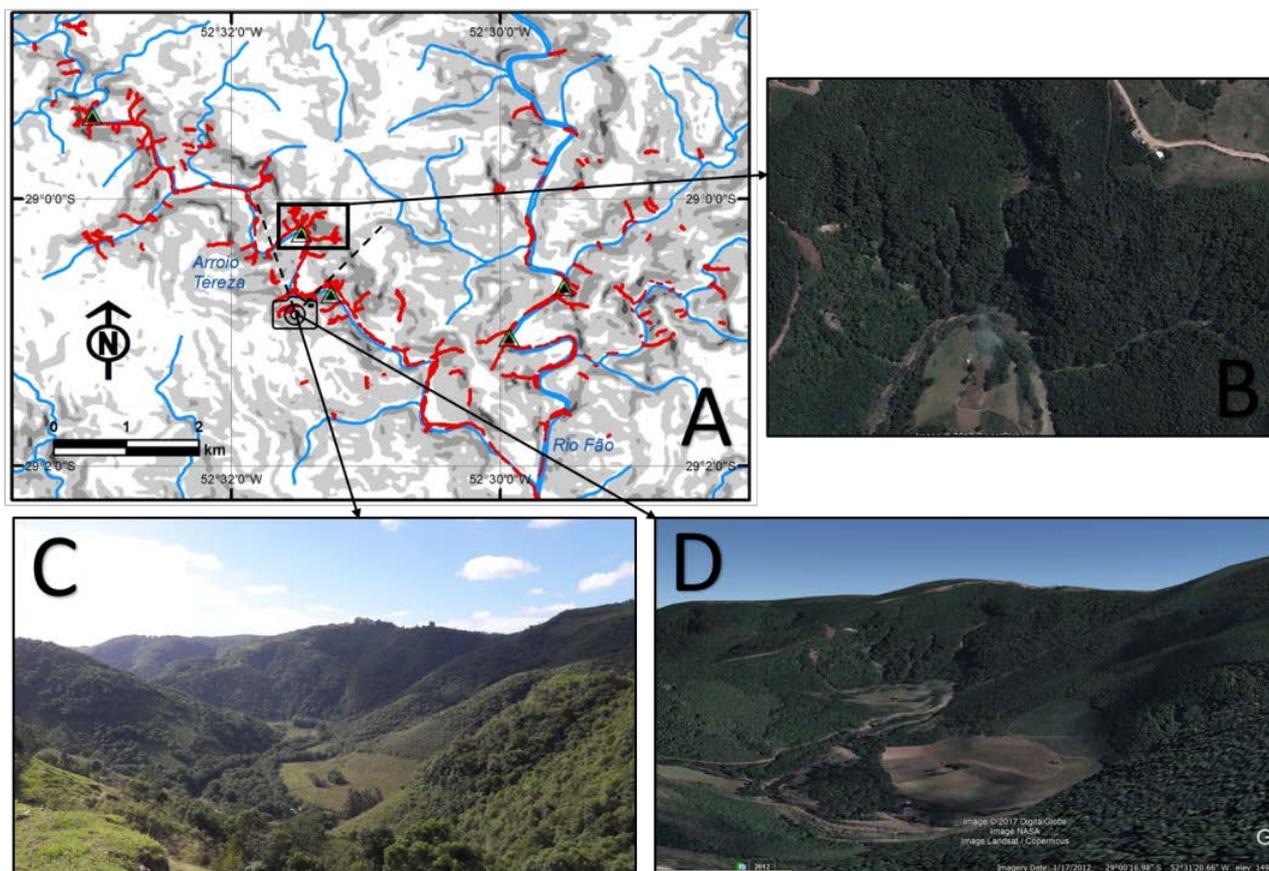


Figura 2 - Ilustração de áreas com ocorrência de movimentos de massa em 2010 na bacia do rio Forqueta, RS.

A: Localização das imagens; B: Imagem aérea da curva acentuada e margens assimétricas; C: Visada no rumo norte da feição ilustrada; D: Visada inclinada, obtida a partir do Google Earth.

Neste evento extremo, o nível do rio Forqueta chegou a subir 1,1 metros por hora, causando estragos e desabrigando centenas de pessoas no vale. Na cidade de Marques de Souza, as águas do rio Forqueta subiram rapidamente não dando tempo para as pessoas retirarem seus pertences, nem resgatar animais.

As propriedades situadas em áreas ribeirinhas, baseadas em agricultura e pecuária, bases da economia deste município, foram parcialmente

destruídas. Além disso, muitos campings tiveram suas estruturas arrastadas pelas águas. Ao todo, em torno de 100 famílias ficaram desalojadas, muitas delas sendo retiradas dos telhados de suas residências pelo Corpo de Bombeiros.

A enxurrada causou grandes prejuízos materiais em boa parte da cidade ocasionando a falta de água e de energia elétrica para a população. A BR-386, uma das principais rodovias do estado do RS, e que dá o acesso ao

município de Marques de Souza, ficou submersa por até um metro de água em diversos pontos.

Duas pontes, de dezenas de metros de comprimento, que ligam os municípios de Barros

Cassal e Fontoura Xavier, foram totalmente destruídas pela enxurrada do rio Fão, principal afluente do rio Forqueta (Santos, 2010; Cas, 2015; Oliveira et al., 2017).

METODOLOGIA

A identificação de áreas suscetíveis a inundações e enxurradas foi realizada a partir da integração entre modelos hidrológicos para a simulação hidrológica e geotecnologias para

estimar parâmetros físicos e espacializar as áreas suscetíveis.

O estudo foi segmentado em cinco etapas, como é apresentado na figura 3.

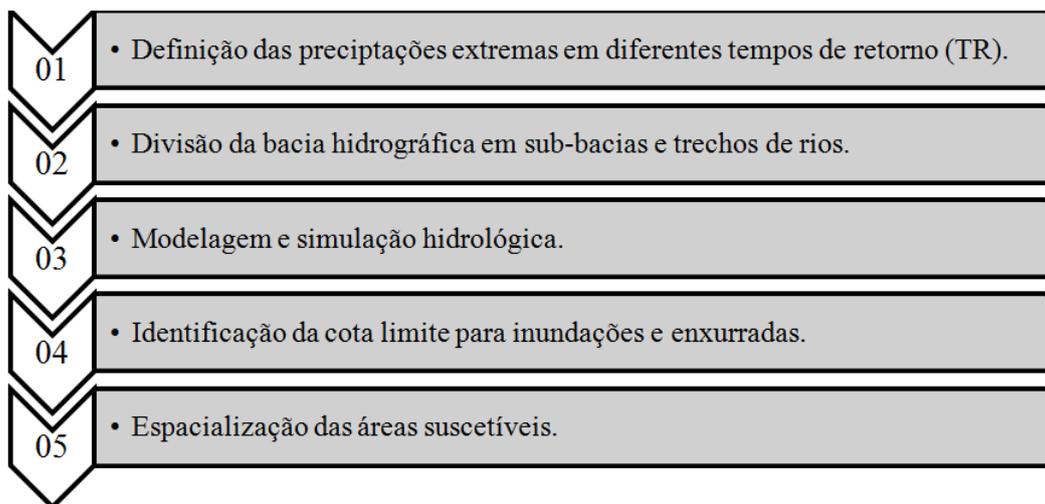


Figura 3 – Fluxograma indicativo das etapas do estudo.

Para modelagem das precipitações extremas, foi utilizada a equação IDF (intensidade-duração-frequência) ajustada para o Taquari-Antas por Sampaio (2011), como mostra a Equação 01. Foram selecionados os TRs de 10, 30 e 100 anos para simular chuvas com diferentes probabilidades de ocorrência, desde o cenário mais preocupante e recorrente (TR10) até o cenário mais remoto (TR100). A duração da chuva (d) foi definida como igual ao tempo de concentração (tc) (Equação 02), calculado pelo método de Kirpich (Kirpich, 1940).

Esse método apresenta os melhores resultados para a área de estudo, conforme já havia sido demonstrado nos estudos de Kurek (2016) e Oliveira et al. (2016), que realizaram uma análise detalhada de cotogramas de estações fluviométricas localizadas na bacia do Taquari-Antas para a estimativa do tempo de concentração pela técnica apresentada em Chow et al. (1994).

O intervalo de tempo (dt) de cada bloco de chuva foi definido em 15 minutos, para resultar em bom detalhamento dos hidrogramas de saída da simulação. As chuvas foram reordenadas pelo método dos blocos alternados, com posição de pico igual a $0,5d$.

$$i = \frac{998,57 \cdot TR^{0,1331}}{8,97 \cdot d^{0,7578}} \quad (01)$$

Em que: i é a intensidade da chuva (mm.h^{-1}); TR é o tempo de retorno (anos); d é a duração (min).

$$tc = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (02)$$

Em que: tc é o tempo de concentração (min); L é o comprimento do rio (km); H é o desnível altimétrico (m).

A bacia e a drenagem foram mapeadas em um SIG, com uso de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) do banco de dados Topodata (Valeriano et al., 2009). O procedimento utilizado se baseia no algoritmo proposto por Jenson & Domingue (1988), que consiste na eliminação de sumidouros, extração das direções de fluxo e área de drenagem acumulada, tendo como base um modelo digital de elevação.

A bacia hidrográfica do rio Forqueta foi segmentada em 18 sub-bacias (Figura 1), com áreas de drenagem entre 100 e 250 km^2 . Os rios principais (Forqueta, Fão e Forquetinha) foram subdivididos em 12 trechos, com extensões que variam de 7,4 a 31,1 km. Essa subdivisão é

fundamental para tornar o processo de modelagem hidrológica distribuído no espaço, considerando as diferentes características hidráulicas e de superfície, o que resulta em uma dinâmica hidrológica de alta complexidade.

O modelo utilizado para transformação da chuva em escoamento superficial na saída de cada sub-bacia foi o SCS (*Soil Conservation Service*), por meio do Hidrograma Unitário Triangular (SCS, 1975). A propagação do escoamento nos trechos de rio foi realizada por meio do modelo Muskingum-Cunge, na versão não linear, com planície de inundação (McCarthy, 1938; Cunge, 1969).

O modelo SCS tem como parâmetros a área de drenagem (A), o comprimento do rio principal (L), o desnível altimétrico (H) e o *Curve Number* (CN). Os parâmetros A , L e H foram extraídos a partir da base SRTM utilizando ferramentas de análise espacial e geoestatísticas zonais. O parâmetro CN foi obtido por meio do cruzamento entre os mapas de solos e uso e cobertura da terra.

O mapa de solos foi obtido junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), enquanto que o mapeamento do uso e cobertura da terra foi realizado com imagens do satélite LANDSAT 8, sensor OLI, órbita-ponto 222-080, adquirida em 18/01/2016, utilizando o método de classificação supervisionada de Máxima Verossimilhança. Para o cálculo do CN médio, foram consideradas as seguintes classes de uso e cobertura da terra: i) lavouras e cultivos agrícolas; ii) pastagens e pecuária; iii) áreas urbanizadas; iv) florestas; v) corpos hídricos. Os valores de referência de CN foram definidos em SCS (1975) e em Tucci (1998).

Para o modelo Muskingum-Cunge foram obtidos os valores dos seguintes parâmetros: comprimento (L), profundidade (Z), largura (B), desnível altimétrico (H) e coeficiente de rugosidade (n) do rio, além da largura ($B1$) e coeficiente de rugosidade ($n1$) da planície de inundação.

Os parâmetros L , H e $B1$ foram obtidos por meio do processamento do MDE SRTM, com uso de ferramentas para cálculo de geometria e estatísticas zonais.

A profundidade foi estimada a partir de seções transversais disponíveis no HIDROWEB (ANA, 2016) e de perfis batimétricos traçados

no âmbito do projeto da Pequena Central Hidrelétrica Salto Forqueta (Cas, 2015).

A largura média foi obtida a partir do traçado de cinco seções do trecho de rio, usando as imagens do Google Earth® (GOOGLE, 2017). A rugosidade foi estimada de acordo com o tipo de material depositado no canal e nas planícies de inundação, com suporte de atividades em campo para a identificação dos materiais predominantes. Esse coeficiente varia de 0,01 (para superfícies mais lisas) a 0,15 (para planícies de inundação com muitos obstáculos que oferecem resistência ao deslocamento da água).

A simulação hidrológica foi realizada no *software* IPHS1 (Viegas Filho, 2000). A partir das características geométricas de cada seção e do pico de vazões, foi calculada a área da seção transversal molhada ($ASTM$) e a velocidade do fluxo da água em cada intervalo de tempo, considerando as Equações 03 e 04. Em seguida, foram traçados 41 perfis topográficos sobre o MDE, de modo a calcular a cota topográfica máxima atingida para cada cenário (TRs de 10, 30 e 100 anos).

$$ASTM = B \cdot Z + B1 \cdot (C - Z) \quad (03)$$

Em que: $ASTM$ é a área (m^2) da seção transversal molhada; B é a largura média do rio; Z é a profundidade média; $B1$ é a largura média (m) da planície de inundação; C é a cota atingida.

$$V = \frac{Q}{ASTM} \quad (04)$$

Em que: V é a velocidade do fluxo de água ($m \cdot s^{-1}$); Q é a vazão simulada ($m^3 \cdot s^{-1}$); $ASTM$ é a área da seção transversal molhada (m^2).

As cotas de inundação foram interpoladas pelo método do inverso do quadrado da distância, gerando superfícies de inundação, semelhante à técnica apresentada no método HAND (Rennó et al., 2008). Em seguida, foi realizada a álgebra de mapas, aplicando uma subtração entre o MDE SRTM e as superfícies de inundação (para cada TR).

Esse procedimento gera como mapa de saída as áreas inundáveis e a profundidade das águas em cada *pixel* do MDE.

Para a definição de graus de suscetibilidade, foram estabelecidos critérios (Tabela 1), buscando integrar a frequência das ocorrências com a profundidade das águas em quatro categorias.

Uma vez que a suscetibilidade é definida como a potencialidade ou propensão de ocorrência de processos naturais em uma determinada área (Saito, 2004), considerou-se como categoria de maior suscetibilidade as áreas atingidas por inundações frequentes (TR \leq 10 anos) e com lâmina de água mais profunda ($>$ 3 metros).

Tabela 1 - Critérios para definição dos graus de suscetibilidade às inundações e enxurradas.

Profundidade das águas (m)	Frequência (TR em anos)		
	Até 10	De 10 a 30	De 30 a 100
Superior a 3	MUITO ALTA	ALTA	MÉDIA
De 1 a 3	ALTA	MÉDIA	BAIXA
Até 1	MÉDIA	BAIXA	-

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os cenários de precipitação extrema para duração de 25 horas, equivalente ao tempo de concentração da bacia hidrográfica do rio Forqueta, apresentaram acumulados de 132 mm (TR10) a 179 mm (TR100).

A chuva foi distribuída pelo método dos blocos alternados em intervalos de 15 minutos. O pico da precipitação foi posicionado em torno de 12,5 horas após o início das chuvas, e apresentou intensidade máxima de 122 mm.h⁻¹ (TR10) a 166 mm.h⁻¹ (TR100).

A extração de parâmetros hidrológicos possibilitou a elaboração de uma síntese (Tabelas 2 e 3) quanto às características que regem o escoamento das águas na área de estudo.

As sub-bacias (Tabela 02) apresentaram uma área média de 158 km², com valores entre 31 e 240 km², comprimento dos rios principais variando de 7,3 a 33,5 km, com média de 20 km, e desnível altimétrico médio de 533 m, oscilando entre 349 e 664 m. As declividades da drenagem variaram entre 10 e 72 m.km⁻¹ e o CN médio calculado entre 65 e 78.

Tabela 2 - Características consideradas para a modelagem hidrológica nas sub-bacias.

Sub-bacia	A (km ²)	L (km)	H (m)	CN
1	236,63	26,30	352,96	66,38
2	185,90	24,91	476,75	68,93
3	199,12	20,72	545,61	72,37
4	126,10	24,77	486,26	75,15
5	210,22	18,30	599,69	73,10
6	146,25	29,23	638,05	72,99
7	182,78	21,00	621,99	75,16
8	239,67	33,52	349,31	65,91
9	199,29	17,81	481,03	71,72
10	70,25	16,30	445,82	71,80
11	134,17	11,76	578,28	71,71
12	147,17	9,20	664,09	71,40
13	122,25	17,91	636,41	72,31
14	31,27	7,52	470,74	78,37
15	122,67	16,90	550,68	66,66
16	218,69	33,25	574,66	70,76
17	240,16	23,78	651,46	76,28
18	32,16	7,26	467,56	76,12

Em que: A é a área, L é o comprimento do rio principal, H é o desnível altimétrico e CN é o valor do parâmetro *Curve Number*, utilizado no método *Soil Conservation Service* (SCS) para transformação da chuva em escoamento superficial nas sub-bacias.

Tabela 3 - Características dos trechos de rio e planícies de inundação para simulação do escoamento nos canais de drenagem.

Trecho	Nome do Rio	L (Km)	H (m)	B (m)	Z (m)	n	B1 (m)	n1
1	Fão	17,47	142,05	30,17	3,5	0,050	90,8	0,075
2	Fão	15,62	70,03	40,33	3,7	0,050	92,4	0,075
3	Fão	25,07	76,96	48,95	4,0	0,050	151,8	0,075
4	Fão	27,06	69,24	55,38	4,2	0,047	200,0	0,075
5	Forqueta	22,61	135,25	27,72	3,5	0,050	70,4	0,075
6	Forqueta	22,95	133,40	60,33	3,6	0,050	131,2	0,075
7	Forqueta	30,17	126,21	39,17	3,9	0,047	230,5	0,075
8	Forqueta	18,74	23,01	78,36	4,3	0,045	878,1	0,065
9	Forqueta	7,40	10,73	73,86	4,5	0,043	1379,0	0,065
10	Forqueta	12,28	15,14	82,31	4,7	0,043	1203,7	0,065
11	Forquetinha	31,11	92,32	37,91	4,0	0,045	562,3	0,065
12	Forqueta	7,58	11,19	89,66	5,0	0,043	1497,8	0,065

Em que: L é o comprimento do trecho de rio, H é o desnível altimétrico, B é a largura média do trecho de rio, Z é a profundidade média, n é o coeficiente de rugosidade do canal (Manning), B1 é a largura média da planície de inundação e n1 é o coeficiente de rugosidade da planície.

O rio Fão foi dividido em quatro trechos (Tabela 03), que somados apresentaram uma extensão total de 85 km. A variação de cota é de 76,57 m (jusante) a 434,85 m (montante), com largura média de 30 a 55 m, profundidades de 3,5 a 4,2 m e largura da planície de inundação de 91 a 200 m.

O rio Forqueta foi segmentado em sete trechos (Tabela 03), totalizando aproximadamente 122 km de extensão, com maior variação da largura média em relação ao rio Fão, de 28 a 90 m, e profundidades de 3,5 a 5 m. No alto curso a declividade média é de 5,3 m.km⁻¹, com largura da planície de inundação inferior a 200 m. No baixo curso a declividade é de 1,3 m.km⁻¹, com abertura do vale em planícies mais extensas, com largura superior a 1 km em muitas seções transversais.

O desnível altimétrico e a largura das planícies e terraços nos trechos localizados a montante indicam uma tendência à ocorrência de enxurradas desde a confluência dos rios Fão e Forqueta em direção às cabeceiras de drenagem. No rio Forqueta, entre os municípios de Marques de Souza e Arroio do Meio,

predominam as inundações, com avanço mais gradual das águas, em função das chuvas na bacia e do efeito remanso provocado pelo rio Taquari, que possui uma área de drenagem muito maior (Oliveira et al., 2016).

No rio Fão, próximo à foz, na confluência com o rio Forqueta, a vazão de pico varia entre 2.800 m³.s⁻¹ (TR10) e 5.000 m³.s⁻¹ (TR100), ocorrendo cerca de 5 horas após o pico da chuva. O rio Forqueta, trecho a montante da confluência com o rio Fão, apresenta menor vazão, com pico de 1.400 m³.s⁻¹ (TR10), 1.800 m³.s⁻¹ (TR30) e 2.500 m³.s⁻¹ (TR100), com tempo de retardo semelhante (Figuras 04a e 05a).

A jusante, no trecho do rio Forqueta relativo à cidade de Marques de Souza, as vazões atingem valores de 4.200 m³.s⁻¹ (TR10), 5.500 m³.s⁻¹ (TR30) e 7.500 m³.s⁻¹ (TR100), ocorrendo cerca de 7 horas após o período de maior precipitação, variando de acordo com o TR (Figura 6a). No baixo curso, em Arroio do Meio, as vazões de pico se estabilizam em 4.400 m³.s⁻¹ (TR10) e 8.200 m³.s⁻¹ (TR100), mas apresentam um retardo maior, entre 8 e 10 horas após o pico da precipitação (Figura 7a).

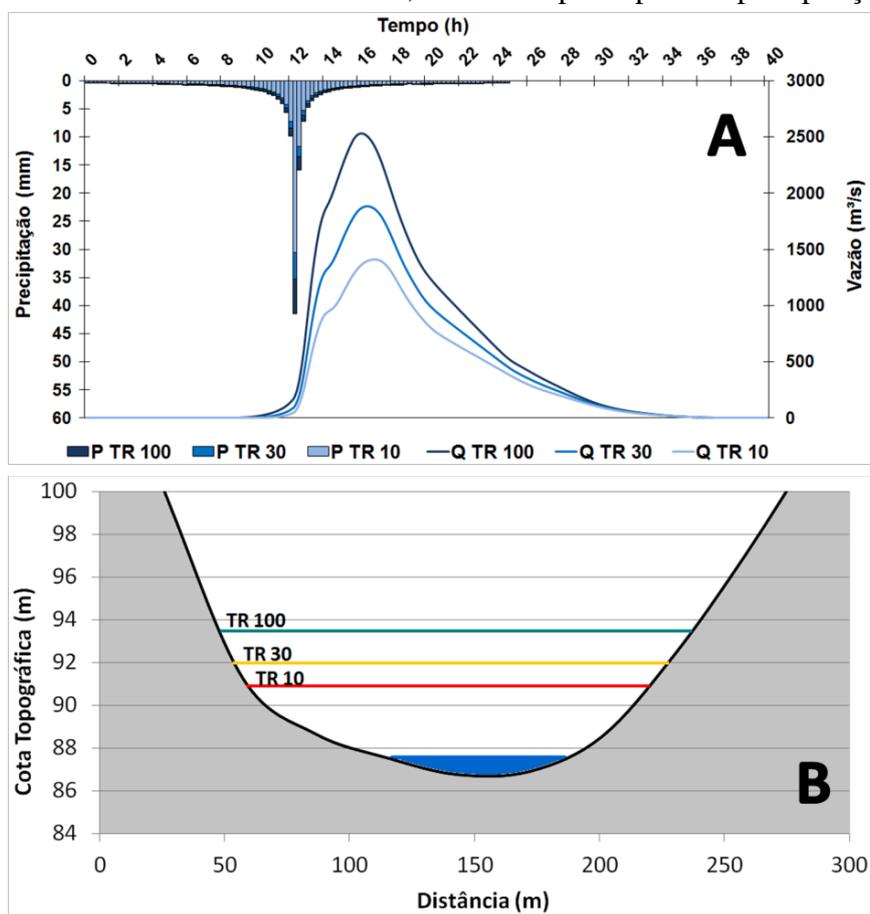


Figura 4 – Hidrograma simulado para precipitações com TR de 10, 30 e 100 anos (A) e cotas de inundação no perfil transversal nº 8 (B), localizado no rio Forqueta, próximo à confluência com o rio Fão.

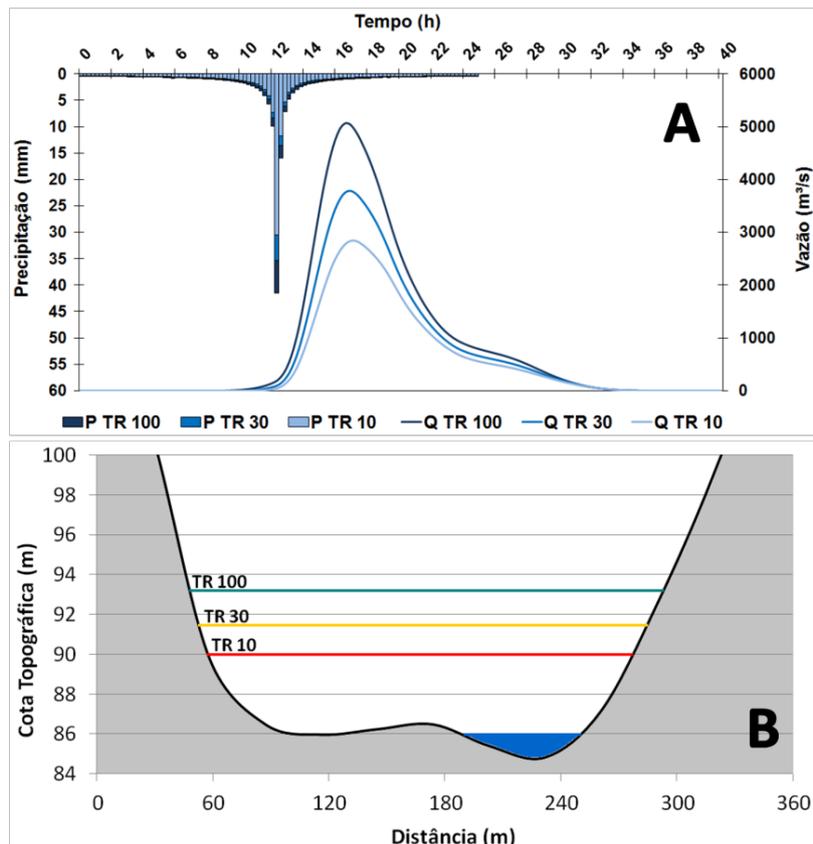


Figura 5 - Hidrograma simulado para precipitações com TR de 10, 30 e 100 anos (A) e cotas de inundação no perfil transversal nº 14 (B), localizado próximo à foz do rio Fão.

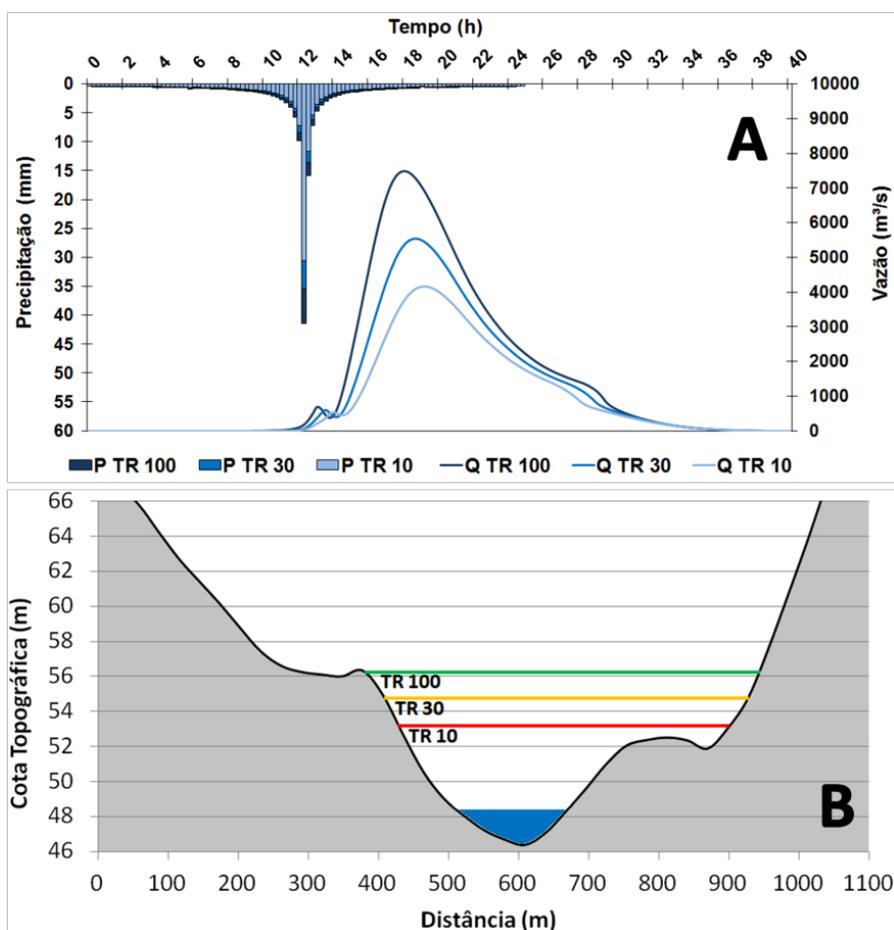


Figura 6 - Hidrograma simulado para precipitações com TR de 10, 30 e 100 anos (A) e cotas de inundação no perfil transversal nº 20 (B), localizado no rio Forqueta, junto à área urbana de Marques de Souza, RS.

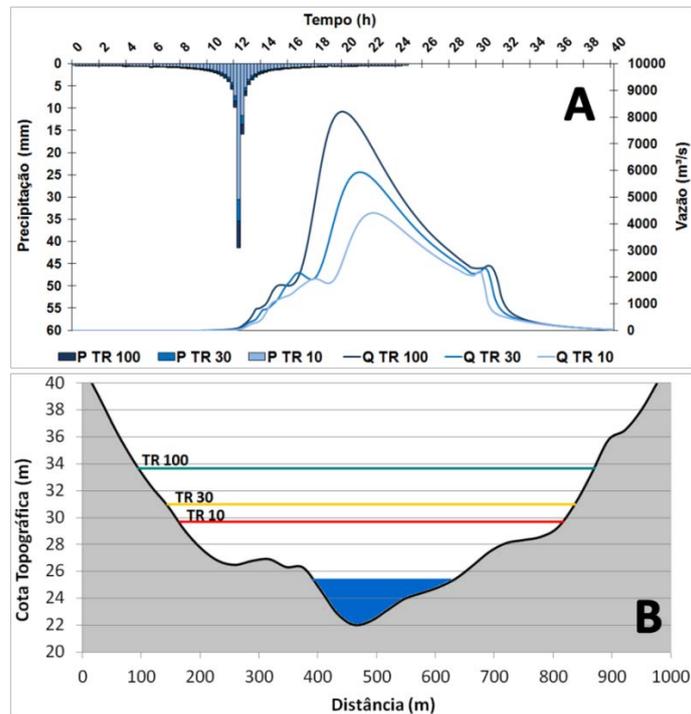


Figura 7 - Hidrograma simulado para precipitações com TR de 10, 30 e 100 anos (A) e cotas de inundação no perfil transversal nº 40 (B), localizado no trecho baixo do rio Forqueta, junto à área urbana de Arroio do Meio, RS.

As figuras 4b, 5b, 6b e 7b ilustram perfis transversais e cotas de inundação para os três TRs, em seções transversais localizadas no rio Fão (04b) e no rio Forqueta (05b, 06b e 07b). Em virtude da declividade acentuada observada nas linhas de drenagem, os níveis de inundação apresentaram uma grande variabilidade na bacia. No rio Forqueta, na confluência com o rio Fão, os níveis variam de 90 m (TR10) a 94 m (TR100). No exutório do rio Forqueta, entre Arroio do Meio e Lajeado, a cota de inundação apresenta valores de 30 m (TR10) a 33,5 m (TR100). A montante do perímetro urbano do município de Marques de Souza, as cotas são de 59,5 m (TR10), 60,2 m (TR30) e 62,1 m (TR100). Em um perfil mais a jusante, na área central da cidade, as cotas são de 53,5 m (TR10), 54,3 m (TR30) e 56,1 m (TR100).

Os resultados indicam a necessidade de se considerar a pente da linha de água do rio em períodos de cheias para a definição de áreas suscetíveis em Marques de Souza, diferente da cota fixa de inundação (55 m), que atualmente é utilizada pelo município no licenciamento de novos empreendimentos imobiliários no perímetro urbano. Além disso, é importante mencionar que em alguns pontos, a enxurrada de 2010 atingiu a marca de 59 m, o que fortalece a necessidade de revisão da cota limite pré-estabelecida.

O mesmo ocorre em outros municípios da região do Vale do Taquari, como em Lajeado e Arroio do Meio, que apenas estabelecem uma cota mínima fixa para a liberação de novos loteamentos em relação às áreas inundáveis, sem um zoneamento ou planejamento adequados, de modo a restringir a ocupação ou pelo menos estabelecer condicionantes para o loteamento em áreas suscetíveis. Em Lajeado, por exemplo, a cota de inundação utilizada para definição das áreas restritivas quanto ao parcelamento do solo urbano se refere às cheias do rio Taquari (que margeia a cidade próximo a sua área central) com tempo de retorno de aproximadamente 10 anos, que equivale a cota altimétrica de 25 metros. Porém, no setor norte do município, banhado pelo rio Forqueta, área que está apresentando ampla expansão urbana nas últimas décadas, a cota de inundação é superior a 25 metros, como demonstra a simulação realizada neste estudo.

Outro bom exemplo para ilustrar essa situação se refere à Lei nº 2.491 de 2006, que define as regras para o parcelamento do solo urbano no município de Arroio do Meio (na porção do baixo curso do rio Forqueta). No Art. 5º, Inciso I, essa lei estabelece que “fica vedado o parcelamento do solo, para fins urbanos, em terrenos alagadiços e sujeitos a inundações, antes de tomadas as providências para assegurar

o escoamento das águas ou a proteção para as cheias e inundações (Arroio do Meio, 2006)”. Em seguida, no Parágrafo 1º deste Art. 5, estabelece que “imóveis sujeitos a cheias e inundações são os que o acesso do lote à rua estiver localizado em cota de nível inferior a 32 m positivos em relação ao sistema oficial de referência de nível do mar - R.N. Oficial (Arroio do Meio, 2006)”. Porém, como ilustra os resultados obtidos pela simulação hidrológica realizada neste estudo, a cota de inundação pode chegar a 33,5 metros em alguns pontos dessa cidade, de acordo com a topografia e a seção transversal do rio.

É comum na esfera municipal se considerar uma cota única de inundações, pois a delimitação da área de uso restritivo pode ser facilmente obtida pelo traçado da curva de nível respectiva. Nenhum município na área deste estudo utiliza um mapeamento ou zoneamento de áreas suscetíveis ou de risco, seja pela sua inexistência ou pela falta de compromisso com a prevenção e redução dos riscos associados aos desastres de origem hidrometeorológica. No entanto, é fundamental destacar que a prática de utilizar uma cota fixa e subjetiva não se aplica

na grande maioria dos casos, principalmente em municípios que são margeados por rios declivosos. Nesses locais, a abordagem proposta neste estudo, que permite identificar áreas suscetíveis considerando a linha de água, é mais coerente com o fenômeno observado na realidade, podendo oferecer maior precisão na delimitação das áreas onde a ocupação deverá ser restrita ou condicionada de acordo com critérios mais rigorosos de segurança.

A partir dos resultados da simulação hidrológica e do cálculo de cota topográfica atingida em cada seção transversal, foi possível espacializar as áreas inundáveis por TR e por profundidade, classificando o grau de suscetibilidade. A figura 8 oferece uma visão regional, englobando todas as áreas suscetíveis da bacia hidrográfica do rio Forqueta, RS. A figura 9 ilustra com maior detalhamento o mapa temático de áreas suscetíveis às inundações e enxurradas, junto aos quatro perfis analisados nas figuras 4 e 7, sendo possível observar a predominância de áreas com alta e muito alta suscetibilidade, conjugando alta frequência de ocorrência com lâmina de água profunda em muitos trechos do vale.

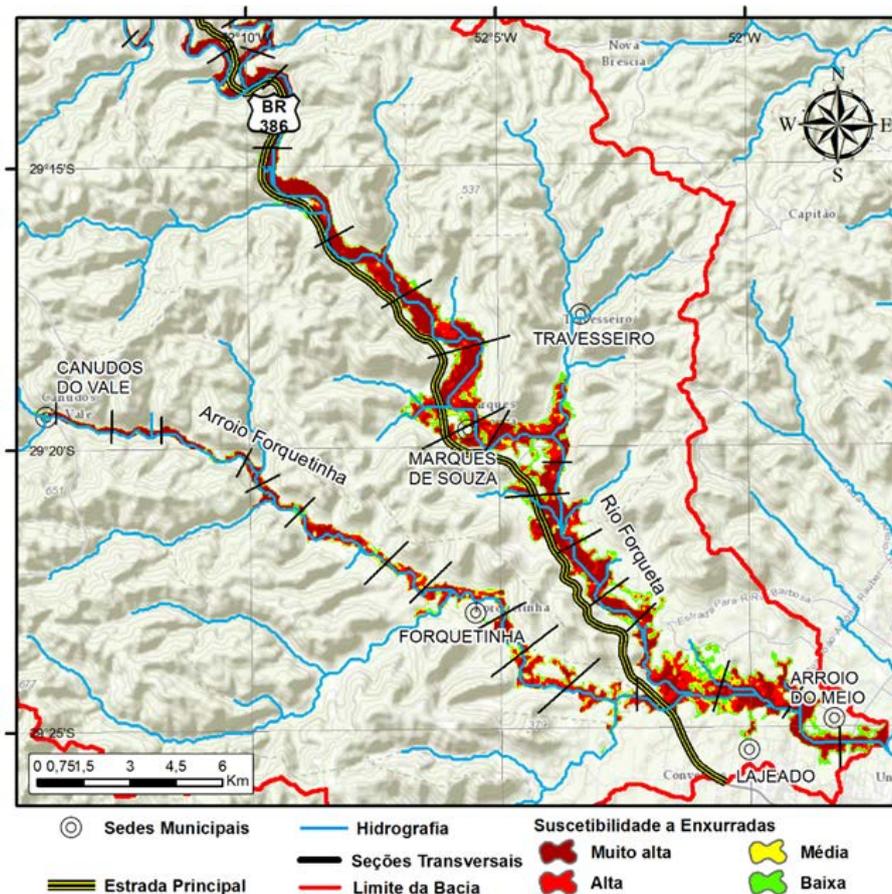


Figura 8 - Mapa de áreas suscetíveis às inundações e enxurradas, na bacia hidrográfica do rio Forqueta, RS, Brasil.

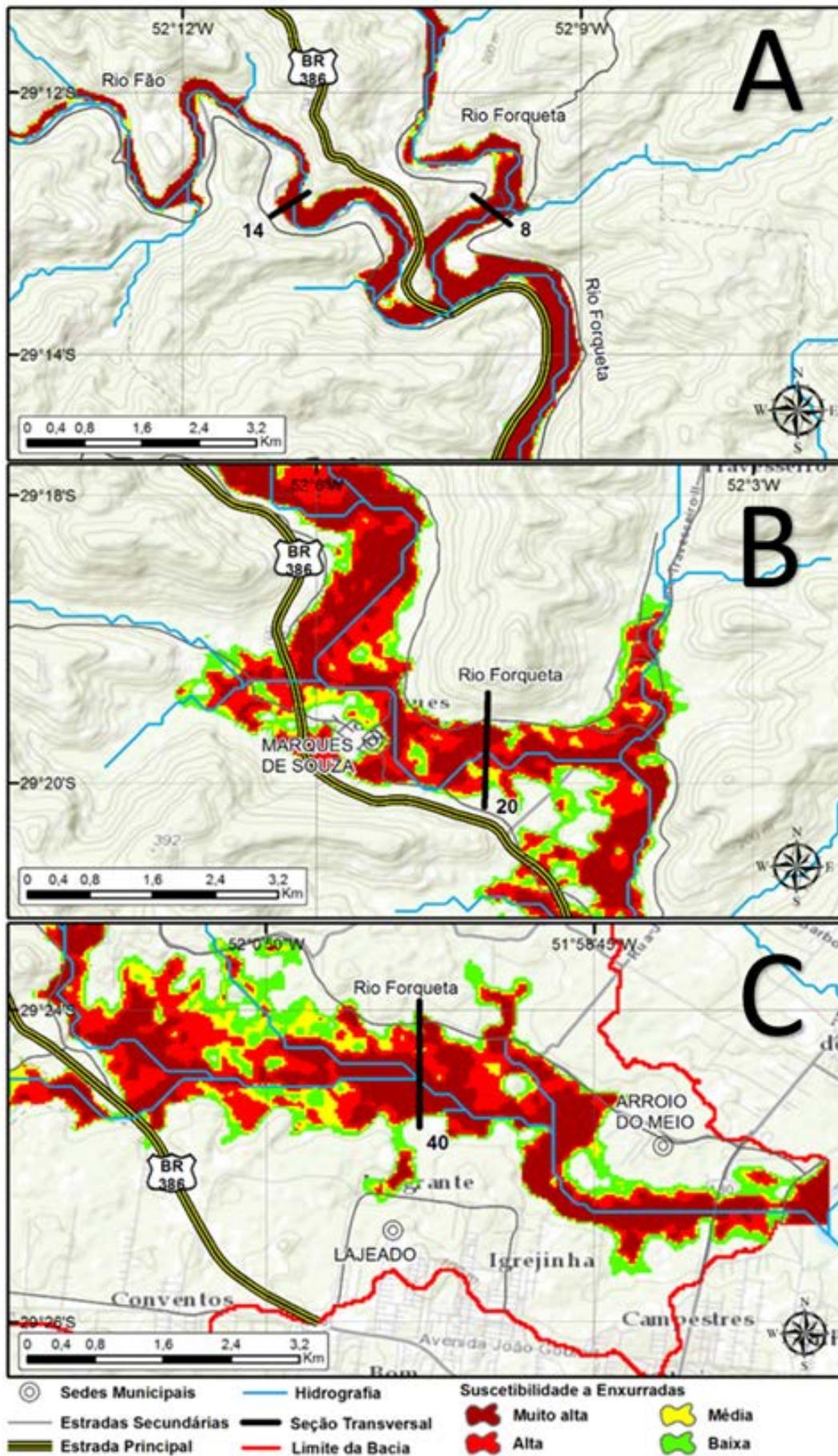


Figura 9 - Mapa detalhado de áreas suscetíveis às inundações e enxurradas, na bacia hidrográfica do rio Forqueta, RS, Brasil.

De acordo com os resultados, cerca de 2% da bacia apresenta algum grau de suscetibilidade para TR de até 100 anos, totalizando 53 km² de áreas inundáveis. Aproximadamente 25 km² possuem muito alta suscetibilidade, sendo afetada com TR de 10 anos ou menos, e lâmina d'água superior a 3 metros. Essas áreas estão localizadas ao longo do rio Forqueta, principalmente no trecho após a confluência com o rio Fão, atingindo uma quantidade significativa de propriedades rurais e áreas de lazer (campings), além de uma parcela da área urbana de Marques de Souza e de Arroio do Meio. A largura média das áreas inundáveis é de cerca de 800 metros, dependendo da topografia local, com algumas seções mais estreitas (<100m) e outras mais extensas (>1400m, próximo à confluência com o arroio Forquetinha).

Uma característica marcante dos resultados é a pequena diferença entre as manchas de inundação entre os TRs de 10 e 100 anos, conforme já havia sido discutido no estudo de Santos (2016). Isso se deve a dois fatores: i) à característica do vale, com vertentes íngremes e rio extremamente encaixado, com poucas áreas de planícies ou terraços fluviais, normalmente ocupados por plantações de milho, soja e pastagens; ii) à baixa resolução altimétrica da base de dados SRTM, o que implica em uma simplificação dos limites das áreas inundáveis em função do TR.

Santos (2016) realizou uma simulação de áreas inundáveis no vale do Forqueta, com uso de modelos hidrológicos, mas com a aplicação de curvas de nível com equidistância vertical de 1 m no perímetro urbano de Marques de Souza. Ao comparar os resultados, verificou-se que a discrepância não é tão significativa (erro planimétrico médio inferior a 30 m), indicando que o uso de dados SRTM para aplicações regionais, como a espacialização de áreas suscetíveis, pode ser uma alternativa em locais com baixa disponibilidade de dados topográficos. Além disso, foram realizadas algumas expedições em campo, com coleta de pontos usando um GPS topográfico, identificando os limites da mancha da enxurrada no evento de janeiro de 2010. Esses limites foram indicados com auxílio de fotografias da enxurrada, e por meio de consulta à Defesa Civil e moradores locais. A

partir dessas expedições, foi possível verificar uma boa representação das áreas suscetíveis, conferindo com os locais atingidos pelas enxurradas, no qual se demonstrou que o padrão espacial da mancha de inundação é muito semelhante ao observado em campo.

Ressalta-se que as vazões máximas e os níveis fluviais simulados apresentaram uma satisfatória correspondência com o observado nas séries disponíveis no HIDROWEB (ANA, 2016). De acordo com os dados hidrológicos da estação Passo do Coimbra, por exemplo, os níveis fluviais (média diária) frequentemente se elevam em aproximadamente 10 metros, valor semelhante ao observado nas simulações hidrológicas aqui apresentadas, porém inferiores ao evento de janeiro de 2010, quando o rio subiu até 20 metros em algumas seções, considerando os registros fotográficos existentes, marcas deixadas pelas águas e pela lama em pontes e outras edificações, além do relato da Defesa Civil e dos moradores entrevistados.

Deve-se reforçar que uma das contribuições do presente estudo se refere à abordagem metodológica que associa o uso de dados topográficos, modelos hidrológicos e os SIGs para identificação de áreas inundáveis em locais com baixa disponibilidade de dados, considerando como critérios para a determinação dos graus de suscetibilidade a profundidade das águas e a frequência em que são atingidas. A mesma abordagem poderia ser aplicada a outras áreas de estudo, tendo em vista a utilização de dados disponíveis gratuitamente e em larga escala, bem como métodos de modelagem já conhecidos e devidamente validados em diversas áreas de estudos.

Por fim, este estudo reforça a importância de uma mudança na forma de definir as áreas sujeitas às inundações, com o objetivo de reduzir os impactos causados por esses fenômenos na sociedade e aumentar a resiliência da população em relação às enxurradas e inundações. Enquanto as leis urbanísticas dos municípios de Marques de Souza, Lajeado e Arroio do Meio não alterarem a definição de suas áreas suscetíveis, com a delimitação de zonas com uso urbano restrito (zonas de alta suscetibilidade, atingidas com mais frequência) ou uso urbano condicionado (demais zonas de suscetibilidade

baixa ou média), a tendência é de ampliação dos loteamentos e edificações em áreas que são atingidas pelas águas, ampliando também o risco da população, incluindo danos materiais, prejuízos econômicos e até a possibilidade de óbitos.

Sugere-se, portanto, uma revisão do critério atual, buscando incluir na legislação um

zoneamento com cotas variáveis de inundação de acordo com a seção do rio. Além da restrição de ocupação, principalmente por residências, em áreas de alta suscetibilidade, poderia ser incluída uma lista de possíveis condicionantes para as demais áreas suscetíveis, como a construção de casas elevadas ou a necessidade de aterro no lote.

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar a suscetibilidade a inundações e enxurradas na bacia do rio Forqueta, apresentando uma base de dados que pode servir como ferramenta para o armazenamento, sistematização e gerenciamento de informações, a fim de ampliar a resiliência da população e reduzir a possibilidade de possíveis perdas econômicas e de vidas humanas nas áreas urbanas dos municípios ribeirinhos nesta bacia hidrográfica. Essa análise se apoiou em uma abordagem adaptada para locais com poucos registros fluviométricos, em escala regional, integrando modelos hidrológicos e geotecnologias para a identificação de áreas suscetíveis a inundações e enxurradas. Estudos nessa escala são importantes para um planejamento mais eficaz dos municípios e da Defesa Civil, buscando estratégias diferenciadas para o reordenamento espacial das atividades humanas, visando reduzir os custos inerentes aos processos hidrológicos extremos.

A metodologia demonstrou resultados detalhados e coerentes em relação aos tempos de retardo, às vazões e cotas topográficas limites em função de três cenários de precipitação extrema.

Mesmo com a utilização da base SRTM, a qual possui uma resolução espacial limitada, pode-se concluir que o mesmo conjunto de dados poderia ser aplicado a outras áreas de estudo, para caracterização regional da suscetibilidade a inundações ou enxurradas.

Os principais resultados obtidos indicam que as cotas de inundação para tempos de retorno entre 10 e 100 anos são superiores às utilizadas pelas prefeituras locais para restringir o parcelamento de solo urbano. Em Marques de Souza, a simulação realizada indicou uma cota de inundação variando entre 53,5 e 62,1 metros, de jusante a montante, no trecho com perímetro urbano, enquanto que o município considera uma cota fixa de restrição urbanística de 55 metros. O mesmo foi verificado em Arroio do Meio, que utiliza a cota de 32 metros para definir as áreas sujeitas a inundações. As simulações realizadas indicam que alguns pontos do perímetro urbano são atingidos pelas águas até a cota de 33,5 metros.

Deste modo, a maior contribuição deste estudo se refere à proposta de revisão no âmbito do planejamento urbano desses municípios. Conclui-se, com base nos resultados e discussões apresentadas, que a legislação municipal deveria considerar um zoneamento com cotas variáveis de inundação de acordo com a seção do rio. Nesse zoneamento, deveria ser definida uma área de restrição de ocupação por residências ou outras edificações de interesse social (como escolas, clínicas hospitalares, cemitérios, entre outros) em áreas de alta suscetibilidade, além de incluída uma lista de possíveis condicionantes para as demais áreas suscetíveis, como a construção de casas elevadas ou a necessidade de aterro no lote para a instalação de novas edificações.

REFERÊNCIAS

ANA–Agência Nacional de Águas. **Sistema de Informações Hidrológicas HIDROWEB**. 2016. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>. Acessado em: 15jun2016.

ARROIO DO MEIO. **LEI Nº 2.491/2006, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2006**. Disponível em: <http://arroio.domeio.rs.gov.br/upload/downloads/50bda5d853560131e15ef9db3ec101d60ee3f26a.pdf>. Acessado em: 12nov2017.

BATES, P.D. Integrating remote sensing data with flood inundation models: how far have we got?. **Hydrological**

Processes, v. 26, n. 16, p. 2515-2521, 2012.

CAS, R. **Estudo da influência da PCH Salto Forqueta na enchente de 4 de janeiro de 2010**. Lajeado, 2015. 104p Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil: Centro Universitário Univates.

CASTRO, A.L.C. **Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres**. Ministério do Planejamento e Orçamento, Secretaria Especial de Políticas Regionais, Departamento de Defesa Civil, 173 p., 1998.

CHEN, Y.; WANG, B.; POLLINO, C.A.; CUDDY, S.M.;

- MERRIN, L.E.; HUANG, C. Estimate of flood inundation and retention on wetlands using remote sensing and GIS. **Ecohydrology**, v. 7, n. 5, p. 1412-1420, 2014.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Hidrologia Aplicada**. Tradução JUAN G. SALDARRIAGA. Santafé de Bogotá, Colômbia: McGRAW-HILL Interamericana S.A., 584p., 1994.
- CUNGE, J.A. On the subject of flood propagation computation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, v. 7, n. 2, p. 205-230, 1969.
- DRH-SADS-DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS-SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO RIO GRANDE DO SUL. **Diagnóstico preliminar descritivo dos eventos ocorridos no dia 05 de janeiro de 2017 entre as regiões dos municípios de São Francisco de Paula e Rolante/RS**. 26p. 2017.
- ECKHARDT, R.R. **Geração de Modelo Cartográfico Aplicado ao Mapeamento das Áreas Sujeitas às Inundações Urbanas na Cidade de Lajeado/RS**. Porto Alegre, 2008. 116p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).
- ECKHARDT, R.R.; REMPEL, C.; SALDANHA, D.L.; GUERRA, T.; PORTO, M.L. Análise e diagnóstico ambiental do Vale do Taquari – RS – Brasil, utilizando sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIII, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, p. 5191-5198.
- EM-DAT. **The International Disaster Database**. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters-CRED. 2016. Disp. em: http://www.emdat.be/advanced_search/index.html. Acessado em: 15out2016.
- FERRI, G. **História do Rio Taquari-Antas**. 1ª ed. Encantado: Grafen, 373 p., 1991.
- FLORES, T.; OLIVEIRA, G. G.; HAETINGER, C.; BRESOLIN JUNIOR, N. A.; GERHARD, F. Método para avaliação de eventos extremos de precipitação a partir de dados sub-horários obtidos por estação meteorológica automática. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XXII, 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABRH.
- GOOGLE. **Google Earth Pro**. Version 7.3.0.3832. Disp. em: <https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>. Acessado em: 10jan2017.
- GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; ARCANGELETTI, E.; NARDI, F. Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic-hydraulic modeling. **Journal of Hydrology**, v. 487, p. 39-47, 2013.
- GUASSELLI, L.A.; OLIVEIRA, G.G.; QUEVEDO, R.P.; BRUBACHER, J.P. Modelagem hidrológica e espacialização de áreas suscetíveis às inundações no município de Igrejinha, RS. **Geo UERJ**, n. 28, p. 353-380, 2016.
- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. Disp. em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/panorama>. Acessado em: 11nov2017.
- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Download Geociências**. 2016. Disp. em: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm. Acessado em: 20jun2016.
- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas temáticos do Projeto RADAMBRASIL do Rio Grande do Sul na escala 1:250.000**. IBGE/SAA - RS, Florianópolis. 2003 CD - ROM.
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.
- KIRPICH, Z.P. Time of concentration in small agricultural watersheds. **Civil Engineering**, v. 10, p.362, 1940.
- KUNZER, C.; GUO, H.; HUTH, J.; LEINENKUGEL, P.; LI, X.; DECH, S. Flood mapping and flood dynamics of the Mekong Delta: ENVISAT-ASAR-WSM based time series analyses. **Remote Sensing**, v.5, n. 2, p. 687-715, 2013.
- KUREK, R.K.M. **Análise das inundações no Vale do Taquari/RS como subsídio à elaboração de um modelo de previsão**. Santa Maria, 2016. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Santa Maria.
- MASON, D.C.; TRIGG, M.; GARCIA-PINTADO, J.; CLOKE, H.L.; NEAL, J.C.; BATES, P.D. Improving the TanDEM-X Digital Elevation Model for flood modelling using flood extents from Synthetic Aperture Radar images. **Remote Sensing of Environment**, v. 173, p. 15-28, 2016.
- MCCARTHY, G.T. **The unit hydrograph and flood routing**. Proc. Conf. of North Atlantic Division, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC. 57p., 1938.
- OLIVEIRA, G.G. **Modelos para Previsão, Espacialização e Análise das Áreas Inundáveis na Bacia Hidrográfica do Rio Caí, RS**. Porto Alegre, 2010,148p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).
- OLIVEIRA, G.G.; ECKHARDT, R.R.; HAETINGER, C.; ALVES, A. **Mapeamento e caracterização das áreas suscetíveis a inundações e enxurradas na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas**. Material não publicado (no prelo), p. 1-15, 2016.
- OLIVEIRA, G.G.; FLORES, T.; BRESOLIN JUNIOR, N. A. Análise do evento hidrometeorológico extremo ocorrido em janeiro de 2010 na bacia hidrográfica do rio Forqueta. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 14, n. 1, p. 181-192, 2017.
- OLIVEIRA, G.G.; GUASSELLI, L.A.; BRUBACHER, J.P.; SIRANGELO, F.R. Interpretação e mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, com suporte de técnicas de geoprocessamento e utilização de dados orbitais e cartográficos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XVII, 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: INPE.
- PAN, F. & NICHOLS, J. Remote sensing of river stage using the cross-sectional inundation area-river stage relationship (IARSR) constructed from digital elevation model data. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 25, p. 3596-3606, 2013.
- PANDEY, R.K.; CRÉTAUX, J.; BERGÉ-NGUYEN, M.; TIWARI, V.M.; DROLON, V.; PAPA, F.; CALMANT, S. Water level estimation by remote sensing for the 2008 flooding of the Kosi River. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 2, p. 424-440, 2014.
- REMPER, C.; SUERTEGARAY, D.; JASPER, A. Aplicação do Sensoriamento Remoto para Determinação da Evolução da Mata Nativa da Bacia Hidrográfica do Rio Forqueta - RS entre 1985 e 1995. **Pesquisas - Botânica**, n. 51, São Leopoldo, RS, 2001.
- RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3469-3481, 2008.
- ROSSATO, M.S. **Os Climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, Tendências e Tipologia**. Porto Alegre, 2011. 253p. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SAITO, S. **Estudo analítico da suscetibilidade a escorregamentos e quedas de blocos no maciço central de Florianópolis - SC**. Florianópolis, 2004. 133p. Dissertação (Mestrado de Geografia), Departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Catarina.
- SAMPAIO, M.V. **Determinação e espacialização das equações de chuvas intensas em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul**. Santa Maria, 2011. 145p. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Maria.

- SANTOS, D.M. **Zoneamento das áreas suscetíveis a movimentos de massa, enxurradas e inundações no município de Marques de Souza-RS**. Lajeado, 2016. 129p., Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Ambiental: Centro Universitário Univates.
- SANTOS, E. **Enchente no Rio Taquari, Janeiro de 2010**. Apena-ONG. Disp. em: <http://estrela-rs-aeapan.blogspot.com.br/2010/01/enchente-no-rio-taquari-janeiro-de-2010.html>. Acessado em: 07set2015.
- SCS. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Washington. U.S. Dept. Agr. (Technical Release. n. 55), 1975.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: ABRH. Ed. da Universidade–UFRGS, 669p., 1998.
- VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F.; ALBUQUERQUE, P.C.G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2009. v. CD-ROM. p. 1-8.
- VIEGAS FILHO, J.S. **O Paradigma da Modelagem Orientada a Objetos Aplicada a Sistemas de Apoio à Decisão em Sistemas de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, 2000. 103p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Submetido em 29 de março de 2017

Aceito em 11 de dezembro de 2017