

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/7: 1371-1386
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ESPACIALIZAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO DEMÉTRIO, GRAVATAÍ – RS

*Spatialization of Susceptibility to Flooding in the Demétrio
Stream Basin, Gravataí – RS*

**Renata Pacheco Quevedo¹, Tássia Fraga Belloli¹,
Guilherme Garcia de Oliveira², Laurindo Antonio Guasselli¹,
Cecília Balsamo Etchelar¹ & João Paulo Brubacher¹**

**¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto**

Avenida Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, 91540-000, Porto Alegre, RS, Brasil
{renata.quevedo, laurindo.guasselli}@ufrgs.br, tassiabelloli@yahoo.com.br, cecibalsamo@gmail.com;
jp.brubacher@hotmail.com

**²Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Campus Litoral Norte – Departamento Interdisciplinar
Rodovia RS 030, 11.700 – km 92, Emboaba, 95590-000, Tramandaí, RS, Brasil
g.g.oliveira10@gmail.com**

*Recebido em 2 de Janeiro, 2017/ Aceito em 20 de Março, 2017
Received on January 2, 2017/ Accepted on March 20, 2017*

RESUMO

As inundações são fenômenos naturais que possuem uma distribuição temporal irregular, possibilitando a expansão populacional nesse tipo de região, o que, aliado a falta de planejamento, torna-se uma das principais causas de desastres. A bacia hidrográfica do arroio Demétrio encontra-se na porção Leste do município de Gravataí, localizado no estado do Rio Grande do Sul, onde se verifica um intenso processo de ocupação próximo às suas margens, locais consequentemente suscetíveis a inundações. Esse estudo tem como objetivo espacializar as áreas suscetíveis à ocorrência de inundações na bacia do arroio Demétrio, por meio da integração entre um modelo hidrológico aplicável em pequenas bacias hidrográficas e dados obtidos por sensoriamento remoto e geoprocessamento. Para alcançar os objetivos propostos, este estudo compreendeu, primeiramente, a aquisição de dados para a modelagem hidrológica por meio da extração de parâmetros físicos da bacia, usando bases cartográficas digitais e geotecnologias. Posteriormente foi realizada a simulação hidrológica, por meio da utilização do modelo chuva-vazão da *Soil Conservation Service* (SCS, 1986) e o modelo de propagação da onda de cheia *Muskingum-Cunge* (CUNGE, 1969), na sua versão não linear. A última etapa deste trabalho consistiu na espacialização das áreas inundáveis na bacia para uma precipitação extrema com tempo de retorno de 50 anos, o que resultou em um mapa de áreas suscetíveis a inundações. Também foram mapeadas as áreas construídas, a fim de relacionar as áreas suscetíveis àquelas ocupadas. A partir das modelagens, foi elaborado um mapa de áreas suscetíveis a inundações. Por fim, fez-se um mapeamento da evolução das áreas edificadas na bacia, com posterior confecção de mapa de comparação entre áreas edificadas e suscetíveis a inundações. Assim, verifica-se que este estudo poderá servir de base para futuros estudos relacionados a vulnerabilidade e a risco nas áreas atingidas.

Palavras-chave: Modelagem Hidrológica, Geotecnologias, Planejamento Urbano, Desastres Hidrológicos.

ABSTRACT

Floods are natural phenomena that have an irregular temporal distribution, making possible the population expansion in this type of region, which, it combined with the lack of planning, it becomes a major cause of disasters. The Demétrio stream basin is located in the eastern portion of the municipality of Gravataí, in the state of Rio Grande do Sul, where there is an intense occupation process near the banks of the stream, places consequently susceptible to floods. This paper aims to spatialize the susceptible areas to occurrence of floods in the Demétrio stream basin. This spatialization was carried out through the integration of an applicable hydrological model in small basins and data obtained by remote sensing and geoprocessing. To achieve the proposed objectives, this study included the following steps: at first, a data acquisition was performed through the extraction of physical parameters from the Demétrio stream basin, using digital cartographic bases and geotechnologies. Afterward, the hydrological modeling was carried out using the rainfall-run-off model, from the *Soil Conservation Service* (SCS, 1986), and the flood wave propagation model, *Musking-Cunge* (CUNGE, 1969). The last step of this study consisted in the spatialisation of the flooded areas in the basin for extreme precipitation with a 50 years return time, which resulted in a map of susceptible areas to flooding. The constructed areas were also mapped in order to relate the susceptible areas to those occupied. Among the main results included the development of a coverage and land use mapping, through which it was possible to observe a predominance of vegetation classes. After the completion of modeling, a map of susceptible areas to flooding was elaborate. Finally, a mapping of the evolution of the built areas in the basin was carried out, and elaborate a map with a comparison between built areas and susceptible areas to flooding. Thus, this study can serve as a basis for future studies related to vulnerability and risk in the affected areas.

Keywords: Hydrological Modeling, Geotechnology, Urban Planning, Water Disasters.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, as populações estabeleceram-se às margens de rios, nas planícies e terraços fluviais, pois as fontes de água sempre representaram meios de sobrevivência, transporte, comunicação e desenvolvimento. Deste modo, as cheias sempre se constituíram em motivos de faturas ou de preocupações (OLIVEIRA, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2011; MÜLLER, 2011; FERRI & TOGNI, 2012; BRUBACHER, 2014; MAIA & COSTA, 2014; SANTOS, 2015; QUEVEDO, 2016).

Grande parte das cidades brasileiras sofre com problemas relacionados à ocorrência de enchentes, inundações, enxurradas, produção de sedimentos e baixa qualidade da água (TUCCI, 2013). Isto se dá como consequência do planejamento urbano inadequado, aliado ao fato de as cheias serem fenômenos naturais que possuem uma distribuição temporal irregular (TUCCI & MACHADO, 1998; RAMOS & REIS, 2001).

Além disso, o aumento da população urbana no Brasil aconteceu de forma rápida e desordenada. Atualmente, 84% da população brasileira é urbana (IBGE, 2017), o que causa pressão nas áreas de ocupação humana e a expansão populacional em áreas próximas a corpos hídricos, aumentando, assim, os impactos ocasionados pelas inundações.

Esse tipo de ocupação é verificado em municípios da Região Metropolitana de Porto Alegre, RS, como, por exemplo, Gravataí, o qual está localizado na bacia hidrográfica do rio Gravataí, região hidrográfica do Lago Guaíba.

A ocupação urbana no município de Gravataí remonta ao século XVIII, quando esta era uma área de disputa de posse entre portugueses e espanhóis (GRAVATAÍ, 2017). Mais recentemente, nas décadas de 1960 e 1970, com a criação do Distrito Industrial e instalação das primeiras indústrias, construção da rodovia BR-290 com acesso ao município e, na década de 1990, a instalação do Complexo Industrial *General Motors*, o município de Gravataí passa a crescer econômica e demograficamente, passando de 107 mil habitantes na década de 1980 para 255 mil, em 2010, de acordo com o censo do IBGE (2010).

A bacia hidrográfica do arroio Demétrio está localizada na porção leste do município de Gravataí e conta com uma população de 76.247 habitantes, distribuídos entre os municípios de Taquara e Gravataí. Nessa área ocorre um acelerado processo de ocupação (RIO GRANDE DO SUL, 2012).

O rápido crescimento da população levou à ocupação de áreas próximas ao arroio Demétrio, locais consequentemente suscetíveis

a inundações. Enquanto as áreas a montante estão sofrendo o processo de expansão urbana, as áreas mais a jusante do arroio já se encontram ocupadas, contando com registro de episódios de inundações, que resultaram em desalojamentos e perdas materiais.

Tendo em vista esse contexto e a ausência de uma base de dados com mapeamento das áreas afetadas pelas inundações, observa-se a necessidade de espacializar as áreas suscetíveis a inundações na bacia hidrográfica em função de precipitações extremas. Esse mapa, em conjunto com a análise espacial das edificações expostas ao fenômeno, pode contribuir para o planejamento do espaço urbano, visando à redução de risco de desastres e à preservação da planície de inundação do arroio.

A identificação de áreas suscetíveis tem sido realizada por meio de diferentes técnicas. Alguns estudos (KUENZER *et al.*, 2013; CHEN *et al.*, 2014; PANDEY *et al.*, 2014) utilizam apenas dados obtidos por sensoriamento remoto e os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), gerando um mapa de inundação por interpretação ou processamento de imagens de satélite, ou pelo cruzamento ponderado de bases temáticas digitais. Outras abordagens integram nessa análise dados fluviométricos disponíveis e Modelos Digitais de Elevação (MDE) (ECKHARDT, 2008; OLIVEIRA, 2010; MASON *et al.*, 2016). Em bacias com séries fluviais insuficientes (como no caso do arroio Demétrio), observa-se a utilização de modelos hidrológicos para simular o avanço das águas nas cidades (SANTOS, 2015; GUASSELLI *et al.*, 2016).

No Brasil, em muitos casos, faz-se necessária a aplicação de métodos adaptados visando uma adequação à falta de monitoramento hidrológico e de levantamentos altimétricos mais precisos. Um exemplo é o método *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.

Porém, como cada curso d'água apresenta suas particularidades em relação ao escoamento, não é suficientemente preciso identificar as áreas de inundação em função de um limiar fixo de aumento no nível fluvial para todas as linhas de

drenagem, como foi utilizado para o mapeamento em nível nacional. É mais coerente realizar uma simulação hidrológica que seja capaz de, a partir de uma precipitação, estimar o escoamento em cada seção transversal da área de estudo, a fim de mapear as áreas que podem ser atingidas em função do pico de vazão do rio.

Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo espacializar as áreas suscetíveis à ocorrência de inundações na bacia hidrográfica do arroio Demétrio, por meio da integração entre um modelo hidrológico aplicável em pequenas bacias hidrográficas e dados obtidos por sensoriamento remoto e geoprocessamento. A metodologia utilizada possibilita analisar a variação da vazão e do nível fluvial ao longo do canal principal, permitindo um maior detalhamento e precisão na identificação das áreas inundáveis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos, este estudo compreendeu diferentes etapas. Em um primeiro momento, foi realizada a aquisição de dados por meio da extração de parâmetros físicos da bacia com uso de geotecnologias, incluindo dados cartográficos digitais e dados obtidos por sensoriamento remoto.

Posteriormente, foi realizada uma simulação hidrológica, considerando um cenário de precipitação extrema com tempo de retorno (TR) de 50 anos, combinando dois modelos: i) modelo chuva-vazão da *Soil Conservation Service* (SCS, 1986); ii) modelo de propagação da onda de cheia, *Muskingum-Cunge* (CUNGE, 1969), versão não linear.

A última etapa deste trabalho consistiu na espacialização das áreas inundáveis na bacia em função dos resultados da simulação hidrológica, o que resultou em um mapa de áreas suscetíveis a inundações. Além destas, foi realizado o mapa das áreas construídas, a fim de sobrepor às áreas suscetíveis e realizar uma análise da relação entre a ocupação e as inundações.

2.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do arroio Demétrio faz parte da bacia hidrográfica do rio Gravataí, abrangendo 12,51% da área total (GRAVATAÍ, 2007). A bacia está inserida, quase em sua totalidade, no município de Gravataí (83% da

área da bacia), sendo a porção norte pertencente ao município de Taquara (17%). Ao longo de seu curso, o arroio Demétrio percorre áreas rurais e urbanas do município de Gravataí, desaguardando diretamente no rio Gravataí, em sua margem direita (Figura 1).

As nascentes do arroio Demétrio encontram-se na região dos Patamares da Serra Geral, com cerca de 250 m de altitude, tendo sua foz no rio Gravataí, onde se encontra a uma altitude de aproximadamente 5m. Esta amplitude altimétrica evidencia uma importante característica no que se refere à drenagem das águas nesta bacia. Quando ocorrem precipitações elevadas, as águas do arroio podem adquirir grande velocidade de escoamento, agravando

os efeitos das inundações ao longo do curso do arroio Demétrio e de seus afluentes.

A área da bacia do arroio Demétrio é caracterizada por clima subtropical e pelas formações geológicas “Serra Geral, Botucatu, Rio do Rasto, Estrada Nova, Irati, Palermo e Rio Bonito” (GRAVATAÍ, 2007). O uso do solo é predominantemente agropecuário, apresentando uma vegetação composta, em sua maioria, por campos e floresta estacional semidecidual. A área urbanizada é mais densa ao sul da bacia, devido à proximidade com o centro urbano do município de Gravataí e ao acesso às principais estradas da região, a BR-290, RS-030 e RS-020, que dão acesso à capital, às áreas litorâneas e ao planalto do estado.

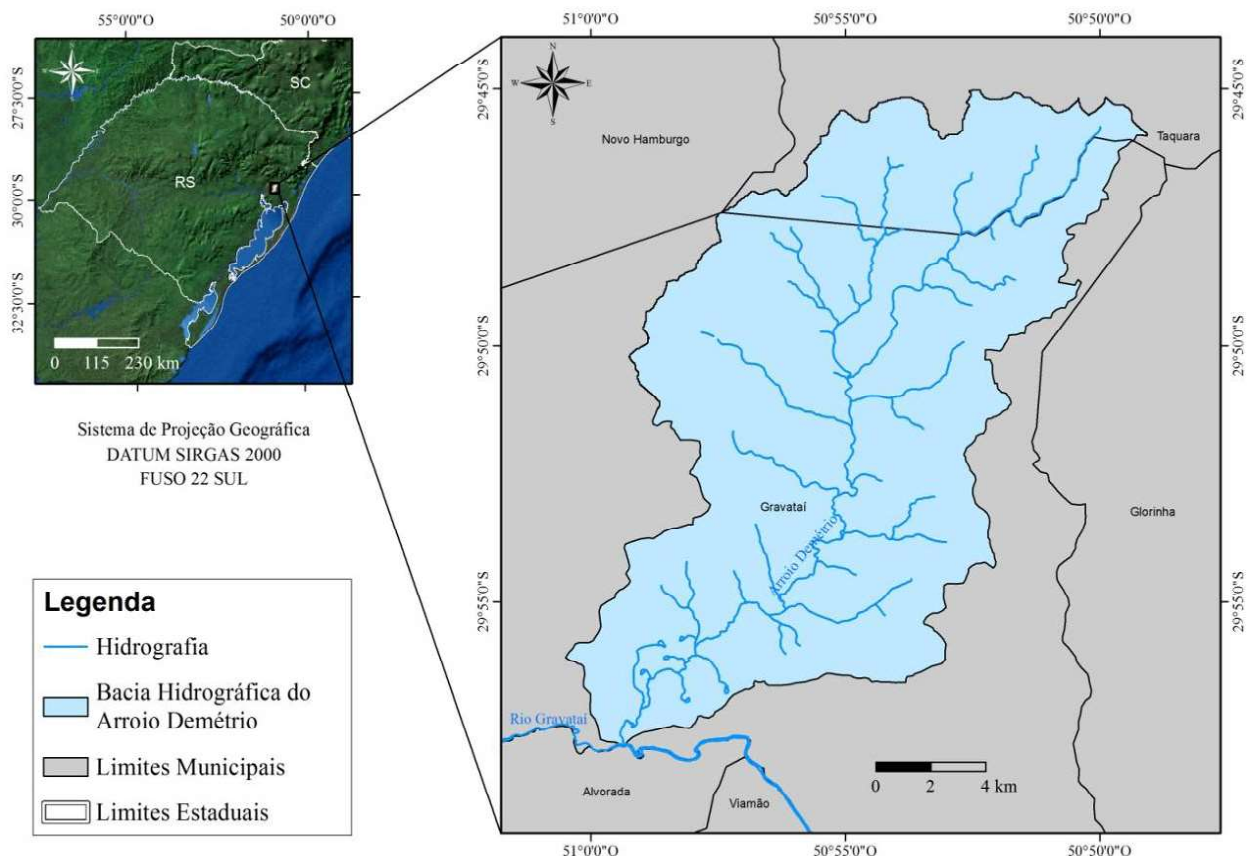


Fig. 1 - Mapa de localização da área de estudo: bacia hidrográfica do arroio Demétrio.

A economia do município de Gravataí foi, até a década de 1960, predominantemente agrícola, além de cumprir a função de cidade-dormitório em relação à capital do estado. Na década de 1970, por intermédio da Lei Complementar Federal N°14, de 8 de junho de 1973, passa a pertencer à Região Metropolitana de Porto Alegre, tendo suas características de

cobertura e uso solo modificadas, assim como sua economia (FERNANDES, 2011).

Segundo Fernandes (2008), a política de implantação dos distritos industriais que empregaram um grande contingente populacional alavancou o desenvolvimento urbano destas cidades. Assim, na década de 1970 em Gravataí, a população urbana passou a ser maior que a rural, destacando o crescimento da cidade.

A evolução urbana na bacia hidrográfica do arroio Demétrio se deu principalmente com a Instalação do Complexo Industrial *General Motors* no ano de 2000, que atraiu populações de outras cidades pela possibilidade de trabalho. Assim, a partir dos anos 2000, iniciou-se uma ocupação mais intensificada nas áreas próximas ao arroio e seus afluentes, naturalmente suscetíveis a inundações.

2.2 Aquisição de dados e modelagem hidrológica

Foi gerado um mapa de cobertura e uso do solo, com oito classes (corpos d'água, solo exposto, mineração, silvicultura, mata ciliar, edificações, vegetação e campo), para a bacia hidrográfica do arroio Demétrio, a partir de interpretação visual e vetorização de polígonos,

na escala de 1:10.000, através do *software ArcGIS 10.3*. Para tal, foi utilizada uma imagem orbital georreferenciada do sensor *LISS-3, ResourceSat*, de 17/02/2012.

Em seguida, visando uma modelagem hidrológica distribuída no espaço, foi realizada a subdivisão da área de estudo em sete sub-bacias e do arroio Demétrio em 10 trechos (Figura 2). Das sete sub-bacias consideradas, duas são bacias de montante, enquanto as demais são bacias de contribuição lateral. Na área a jusante, não foram consideradas bacias de contribuição lateral, devido à ausência destas. Além disso, nesses trechos do arroio, existem dados mais detalhados dos canais, referente a um estudo hidrológico para determinação de cota de inundação, realizado pela empresa *PROFILL Engenharia e Ambiente* (2012).

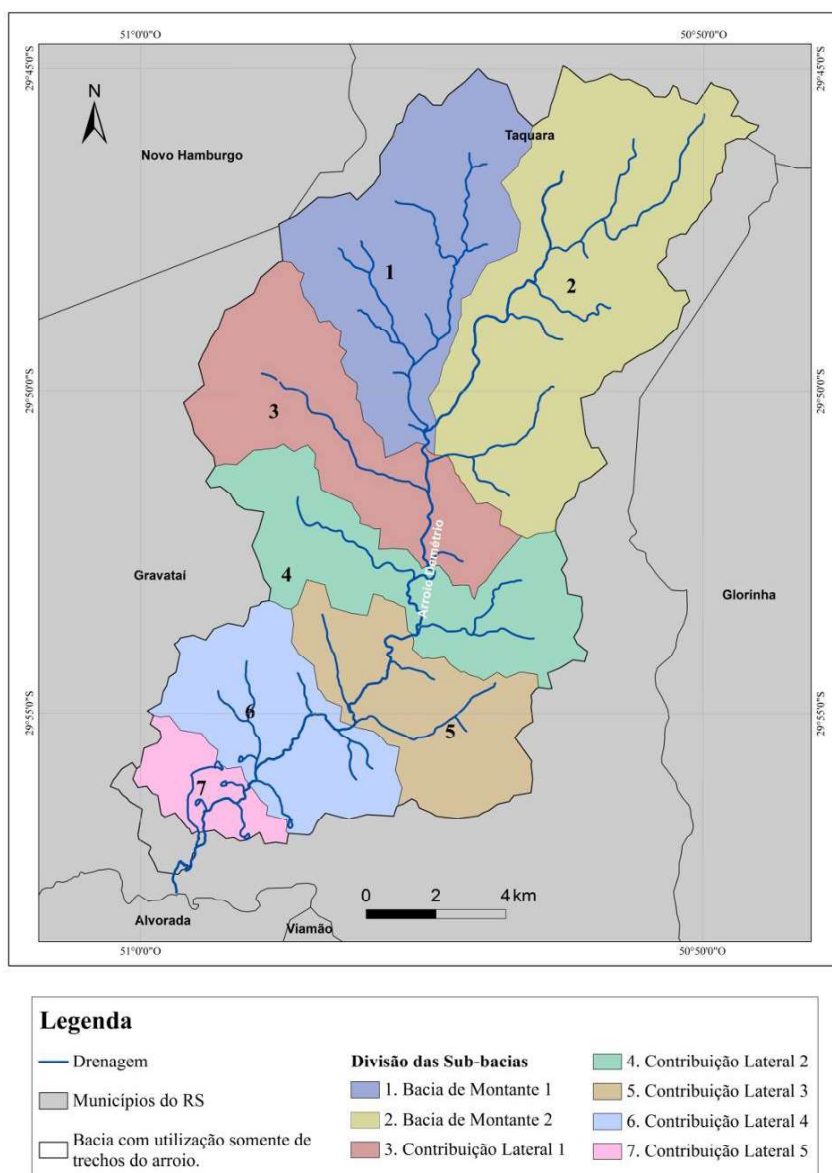


Fig. 2 - Subdivisão da bacia hidrográfica do arroio Demétrio, no programa *ArcGIS 10.3*.

Foi estabelecida uma chuva de projeto, referente a uma precipitação extrema para simulação hidrológica, definida por meio de uma equação do tipo IDF (intensidade-duração-frequência), ajustada para a estação do 8º Distrito de Meteorologia, do Instituto Nacional de Meteorologia, em Porto Alegre (Equação 1). O TR escolhido foi de 50 anos e a duração da precipitação de 420 minutos (7 horas), com discretização temporal de 15 minutos para cada bloco de chuva. Essa duração foi definida considerando o tempo de concentração da bacia, calculado pelo método de *Kirpich* (KIRPICH, 1940).

$$i = \frac{1297,9TR^{0,171}}{(t+11,6)^{0,85}} \quad (1)$$

em que: i é a intensidade da precipitação em mm/h; TR é o tempo de retorno em anos; t é a duração da precipitação em min.

Para a simulação hidrológica usando o modelo chuva-vazão da *Soil Conservation Service* (SCS), foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). A escolha dessa base altimétrica se deve a sua confiabilidade e a sua acessibilidade, o que facilitaria a aplicação da metodologia em outras pequenas bacias.

A partir do SRTM, os seguintes parâmetros foram extraídos para cada sub-bacia: i) área de drenagem; ii) comprimento do rio principal; iii) desnível altimétrico. O procedimento utilizado para o cálculo da área de drenagem e do comprimento do rio principal de cada sub-bacia, se baseia no algoritmo proposto por Jenson e Domingue (1988), implementado no *ArcGIS 10.3*, que consiste na eliminação de sumidouros, na extração das direções de drenagem e da área de drenagem acumulada, tendo como base um modelo digital de elevação em um SIG. Uma vez que esse procedimento identifica automaticamente bacias e linhas de drenagem, foi possível extrair com ferramentas de estatística espacial no *ArcGIS*, os valores mínimos e máximos de altitude e, conseqüentemente, o desnível altimétrico de cada sub-bacia.

O modelo SCS foi utilizado para a transformação de chuva em vazão na saída das sub-bacias, levando em conta as perdas iniciais por infiltração através de parâmetros definidos

para o tipo, uso e cobertura do solo. Essas perdas são quantificadas a partir do cálculo do valor do parâmetro CN (*Curve Number*), que interfere na parcela da precipitação que irá gerar escoamento superficial no exutório.

Em cada sub-bacia, esse cálculo foi realizado por meio do cruzamento entre o uso e cobertura do solo (obtido a partir da imagem orbital *LISS-3*) e os tipos de solo (base disponível no banco de dados espacial do IBGE). Para cada classe combinada de tipo e uso e cobertura de solo, pode-se obter um valor para o CN, considerando as tabelas apresentadas por Tucci (2013), para áreas rurais e urbanas. Os valores contidos nessas tabelas foram calibrados pela SCS em simulações hidrológicas realizadas em pequenas bacias dos Estados Unidos, tendo sido amplamente aplicadas nas últimas décadas em estudos hidrológicos por todo o mundo.

A propagação do escoamento nos trechos de rio foi realizada por meio do modelo *Muskingum Cunge* (MCCARTHY, 1938; CUNGE, 1969), na sua versão não linear, com planície de inundação. Esse modelo é recomendado para modelagem em rios cujas forças principais que regem o escoamento sejam a gravidade (em função do desnível altimétrico dos canais) e o atrito (em função da resistência oferecida pelos objetos e superfícies para o avanço das águas).

O modelo *Muskingum Cunge* (MCCARTHY, 1938; CUNGE, 1969) propaga a vazão em segmentos de rios, simulando o comportamento da onda de cheia durante o evento de precipitação de projeto. Quanto aos parâmetros necessários para a sua execução, foram considerados: extensão do canal de drenagem; cota do canal a montante e a jusante; profundidade do canal; largura média do canal; coeficiente de rugosidade do canal (*Manning*); altura da planície de inundação; largura média da planície de inundação e coeficiente de rugosidade da planície de inundação. Esses parâmetros foram extraídos de diversas bases digitais, tais como o SRTM e as imagens do *Google Earth*, e dos dados do estudo hidrológico da PROFILL Engenharia e Ambiente (2012).

A simulação integrada foi realizada no *software IPHSI*. Esse programa exige em um primeiro momento que o usuário/pesquisador indique a subdivisão de sub-bacias e canais

de drenagem da área estudada. Em seguida, é solicitada a inserção da chuva de projeto a partir da equação IDF. Após, o pesquisador indica os modelos hidrológicos que serão combinados (neste caso, o SCS para as sub-bacias e o *Muskingum Cunge* para os trechos de rios) e insere os parâmetros que foram obtidos para cada sub-bacia e trecho de rio.

Por fim, o *software* realiza o cálculo do conjunto de equações que compõem os dois modelos, realizando, primeiramente, a transformação da chuva em escoamento superficial na saída de cada sub-bacia, para, em seguida, propagar esse escoamento ao longo dos canais de drenagem e planícies de inundação. O programa oferece como respostas as seguintes informações: i) hidrograma de saída com valores de escoamento superficial em cada intervalo de tempo, por sub-bacia; ii) hidrograma de entrada e de saída em cada trecho do arroio, em cada intervalo de tempo; iii) área molhada da seção transversal em cada trecho do arroio por intervalo de tempo.

Espacialização das áreas suscetíveis às inundações e das áreas edificadas

Após a simulação, foi estimada a cota altimétrica de inundação para cada trecho do arroio, a partir da construção de curvas-chave, relacionando a vazão e a área molhada das seções transversais simuladas com o MDE SRTM.

Para cada trecho de rio foram gerados perfis transversais, a partir dos quais foi possível determinar a cota máxima atingida em função da área da seção transversal molhada no instante de pico da cheia, usando o *software MATLAB*. As cotas máximas de inundação foram interpoladas ao longo da planície, de forma manual, gerando uma mancha de inundação, com base no MDE, através do *software ArcGIS 10.3*.

Com o objetivo de analisar a evolução espaço-temporal das áreas edificadas com usos múltiplos (residencial, comercial, industrial e agropecuário) nesta bacia, realizou-se o mapeamento destas, a partir da digitalização de dados espaciais (polígonos) representativos. As técnicas utilizadas nesse procedimento foram a fotointerpretação em cenas dos satélites *Landsat 5 (TM)* e *Landsat 8 (OLI)* e o uso de recursos de geoprocessamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o conhecimento das condições de escoamento e infiltração na bacia hidrográfica do arroio Demétrio, foi gerado um mapa com oito classes de cobertura e uso do solo, sendo elas: campo, corpos d'água, edificações, mata ciliar, mineração, silvicultura, solo exposto e floresta (Figura 3). Dentre as oito classes estabelecidas, verificou-se o predomínio das classes de campo, mata ciliar e floresta, respectivamente, conforme Tabela 1.

As áreas de campo, que incluem pastagens e cultivos agrícolas, apresentam a maior porcentagem de área ocupada na bacia, 52% do total. A segunda classe que mais se destaca, com 20,3% do total, corresponde à vegetação ciliar do arroio Demétrio, seguida da classe de floresta, que corresponde às formações vegetais típicas de floresta estacional semidecidual, com 13% da área total. O predomínio das classes de campo, mata ciliar e floresta influenciam em menores valores de CN e no aumento da taxa de infiltração de água na bacia.

Tabela 1: Análise quantitativa do uso e cobertura do solo

Classe	Área ocupada	
	km ²	%
Campo	119,495207	52,41
Mata ciliar	46,284995	20,3
Vegetação	30,968225	13,58
Edificações	17,863487	7,83
Silvicultura	9,405904	4,13
Solo exposto	2,148858	0,94
Corpos d'água	1,285215	0,56
Mineração	0,537362	0,23
Total	227,989253	100

A partir do mapeamento, foi possível confirmar que a bacia hidrográfica do arroio Demétrio é bastante vegetada a montante, enquanto que sua área a jusante sofreu modificações, tendo uma maior presença de construções. Observa-se, também, que as áreas edificadas são encontradas em locais próximos às rodovias.

Com base na divisão da bacia do arroio Demétrio em 7 sub-bacias, foram extraídos os seguintes parâmetros físicos: área, CN médio e tempo de concentração. As características de cada sub-bacia podem ser verificadas na Tabela 2. Entre os dados apresentados, nota-se que a sub-bacia 2 conta com a maior área de contribuição (62,7 km²), seguida da sub-bacia

1 (40,6 km²). Entre as bacias de contribuição lateral, a sub-bacia 3 é a maior em área, com 32,5 km². O CN médio variou entre 59,9 (sub-bacia 2) e 74,0 (sub-bacia 7). O maior tempo de concentração ocorreu também na sub-bacia 2, verificando-se, assim, que esta bacia possui maior capacidade de infiltração de água no solo.

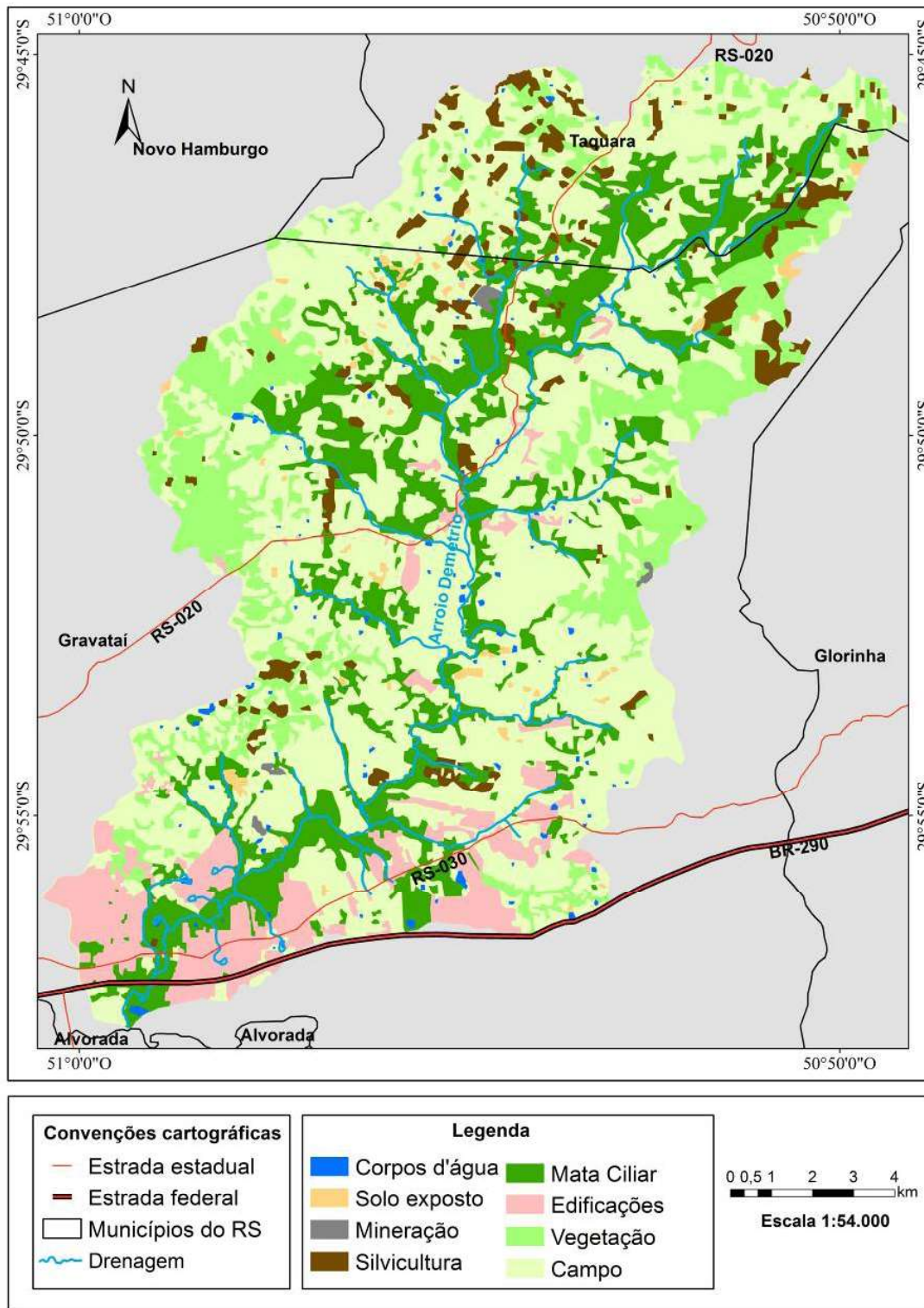


Fig. 3 - Mapa de cobertura e uso do solo da Bacia hidrográfica do Arroio Demétrio

Tabela 2: Parâmetros físicos das sub-bacias para modelagem hidrológica com métodos SCS

Sub-Bacia	Área (km ²)	Tempo de Concentração (min)	CN Médio
1	40,6	126,2	60,2
2	62,7	173,0	59,9
3	32,5	110,4	61,1
4	29,8	128,8	61,9
5	25,0	98,9	66,4
6	24,6	82,4	66,5
7	10,9	54,9	74,0

O arroio Demétrio foi segmentado em 10 trechos, sendo enumerados de montante a jusante, ou seja, o trecho número 1 aquele mais próximo à região das nascentes, enquanto o trecho 10 aproxima-se da foz do arroio.

Para cada segmento de drenagem, foram estimados parâmetros, para utilização no modelo *Muskingum-Cunge*. São eles: extensão do canal (L); cotas de montante (CM); cotas de jusante (CJ); profundidade do canal (Z); largura do canal (B); largura da planície de inundação (Bp); coeficiente de rugosidade de *Manning* (n) e coeficiente de rugosidade de *Manning* para a planície (np). Os valores dos parâmetros, conforme cada, trecho de rio são apresentados na Tabela 3.

O primeiro trecho destaca-se pelo desnível altimétrico (diferença entre a cota de montante e jusante), o que resulta em maior velocidade de vazão. Já os trechos 9 e 10 destacam-se, respectivamente, por apresentar a maior largura da planície de inundação (1200m) e a maior profundidade de canal (3m).

Tabela 3: Parâmetros de cada trecho do arroio utilizados na propagação de vazões através do método *Muskingum Cunge*

Trecho do Arroio	L (km)	CM (m)	CJ (m)	Z (m)	B (m)	n	Bp (m)	Np
1	3,58	31	23	2,5	5,3	0,045	600	0,070
2	2,66	23	19	2,5	8,3	0,045	400	0,070
3	3,49	19	16	2,5	11,8	0,045	407	0,070
4	4,24	16	10	2,5	8,1	0,045	674	0,070
5	2,60	10	7	2,5	18,2	0,045	678	0,070
6	0,35	7	6	2,8	10,0	0,045	795	0,125
7	0,34	6	5	2,8	7,6	0,045	700	0,100
8	0,34	5	4	2,8	12,0	0,045	730	0,100
9	0,31	4	3	2,9	7,0	0,045	1200	0,100
10	0,23	3	2	3,0	11,3	0,045	620	0,125

Para poder executar os modelos, ademais dos parâmetros físicos extraídos das bacias e dos trechos de rio, foi obtida uma chuva de projeto para precipitações extremas, por meio de uma equação IDF estabelecida para a cidade de Porto Alegre, conforme metodologia. A chuva de projeto contou com TR de 50 anos, duração de 420 minutos (7 horas) e discretização temporal de 15 minutos para cada bloco de chuva.

Com isso, foi possível simular três hidrogramas, cada qual correspondendo a um trecho da bacia (montante, jusante e área intermediária) (Figura 4). Assim, foi possível verificar que o trecho correspondente à seção

intermediária do arroio apresentou um maior pico de vazão. Vale ressaltar que o maior pico de vazão dentre todos os seguimentos foi apresentado no trecho 2, conforme Tabela 4 (o qual não foi considerado nos hidrogramas simulados).

Quanto ao tempo entre o máximo da precipitação e o pico de escoamento superficial, verificou-se que a montante essa defasagem está entre 3h e 4,5h. Além disso, nesta área, além de rápida ascensão do hidrograma, o tempo de escoamento é menor quando comparado às demais áreas.

Os trechos relacionados às seções intermediária e jusante apresentam um pequeno pico com defasagem semelhante àqueles da seção a montante, porém nota-se que seus picos máximos estão entre 6,5h e 10h para trechos intermediários e 10h para trechos próximos à foz. Em ambas as áreas são verificadas ascensão

relativamente rápida até o primeiro pico, porém há uma pequena queda da vazão, até ser retomada novamente e alcançar seu pico máximo. Em seu ápice, o trecho 4 apresenta uma ascensão rápida, enquanto o trecho 10 demonstra um aumento gradual da vazão, além de apresentar tempo de escoamento superior.

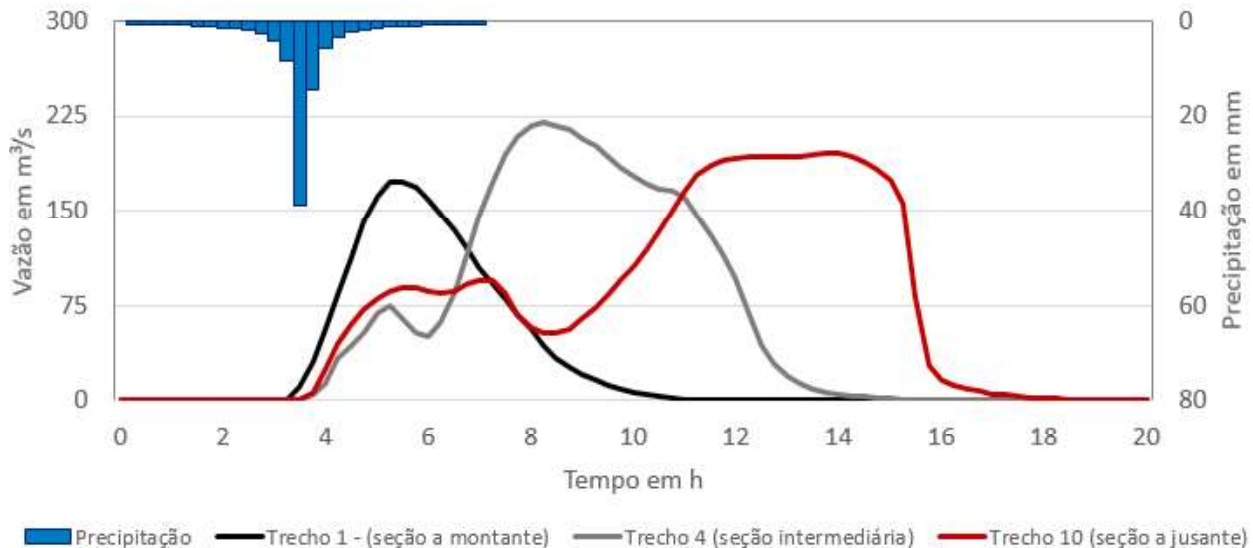


Fig. 4 - Chuva de projeto com TR de 50 anos e hidrogramas simulados em três trechos do arroio Demétrio, desde a seção mais a montante até a foz da bacia hidrográfica.

Tabela 4: Vazão de pico, defasagem entre o pico da precipitação e o pico da vazão, área molhada da seção transversal e cota máxima atingida por trecho de rio - resultados da simulação hidrológica para TR de 50 anos

Trecho de rio	Vazão de Pico (m ³ /s)	Defasagem do Pico (h)	Área Molhada da Seção (m ²)	Cota Máxima Atingida (m)
1	207,8	3,0	385,3	34,6
2	230,7	3,5	476,8	25,9
3	219,5	4,5	440,3	21,9
4	205,3	6,5	451,9	15,6
5	198,2	9,5	418,7	10,6
6	197,3	10,0	656,3	9,5
7	196,5	10,0	427,2	7,0
8	196,4	10,2	376,7	6,1
9	196,0	10,2	488,3	8,2
10	195,8	10,5	325,4	4,0

Os parâmetros área molhada da seção e cota máxima atingida são interdependentes (Tabela 4). A área molhada está relacionada com o perfil transversal de cada trecho e, de acordo com a profundidade e largura da seção transversal, foi possível verificar a cota máxima que as águas atingiram para determinado local. Assim, nota-se que a cota

máxima atingida foi maior de montante para jusante, devido ao fato de os vales serem mais encaixados quanto mais próximos estiver das áreas de nascente.

Já a área molhada possui tendência a aumentar conforme mais próximo da Foz. No arroio Demétrio, verificou-se que a maior área molhada foi a do trecho 6, na parcela

intermediária da bacia. Esse comportamento pode estar relacionado com o aporte de água de afluentes, ou seja, ser uma área de confluência de rios, os quais não foram considerados no presente estudo.

Após a obtenção e análise dos parâmetros e das modelagens executadas, foi possível espacializar a mancha de inundação, a qual resultou no mapa de suscetibilidades a inundações na bacia hidrográfica do arroio Demétrio (Figura 5).

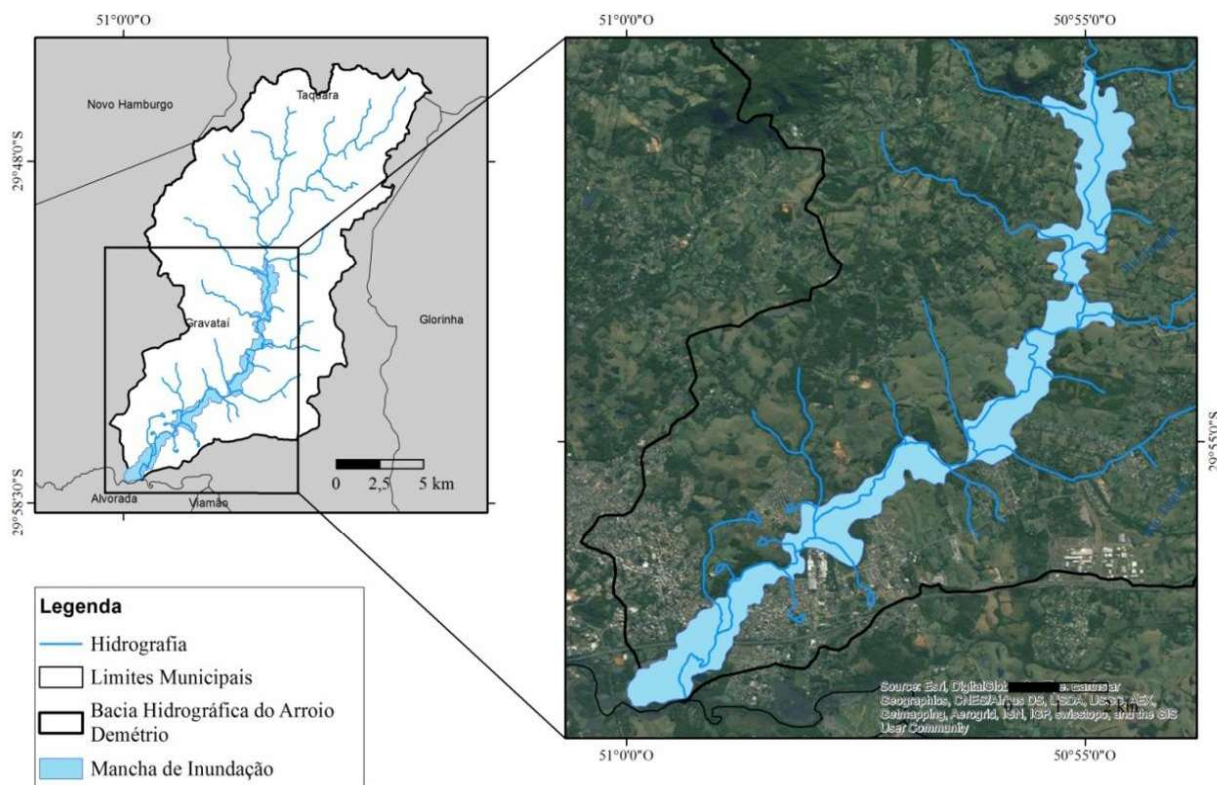


Fig. 5 - Espacialização das áreas suscetíveis às inundações na bacia hidrográfica do arroio Demétrio, com destaque para a mancha de inundação.

Através da espacialização, foi possível verificar que a área inundável abrange parte das áreas construídas na bacia, principalmente na seção a jusante, próximo à foz do arroio. Sabe-se que a união de suscetibilidade a inundações e vulnerabilidade, influência social, além dos danos e perdas possíveis, compõem o risco de desastres e que a redução de risco de desastres deve estar diretamente vinculada com o planejamento urbano (QUEVEDO, 2016). Assim, a fim de servir como meio de compreensão da relação espacial entre a ocupação urbana e as áreas suscetíveis a inundações e como ferramenta para o planejamento urbano, realizou-se um mapeamento com a evolução das áreas edificadas na bacia do arroio Demétrio, conforme a Figura 6.

Em 1985, as áreas edificadas correspondiam a cerca de 6,70 km², com predomínio de áreas urbanas localizadas nas áreas planas próximas a

foz do arroio, em suas margens direita e esquerda. Em 1996, observa-se o crescimento destas no entorno da rodovia RS – 030 e no distrito de Morungava, que possui características rurais, estando fora do perímetro urbano estabelecido pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano do município, instituído pela Lei N° 1541, de 06 de julho de 2000. Para o ano de 1996, as áreas edificadas foram quantificadas em 9,07 km².

A maior expansão observada nas áreas edificadas desta bacia se deu após o ano 2000, com a instalação do Complexo Industrial da *General Motors*. A sua instalação resultou no surgimento de novos loteamentos residenciais e aumento de mais de 5 km² em área construída, totalizando 14 km² no ano de 2005. Atualmente, as áreas edificadas com usos múltiplos nesta bacia correspondem a cerca de 16 km².

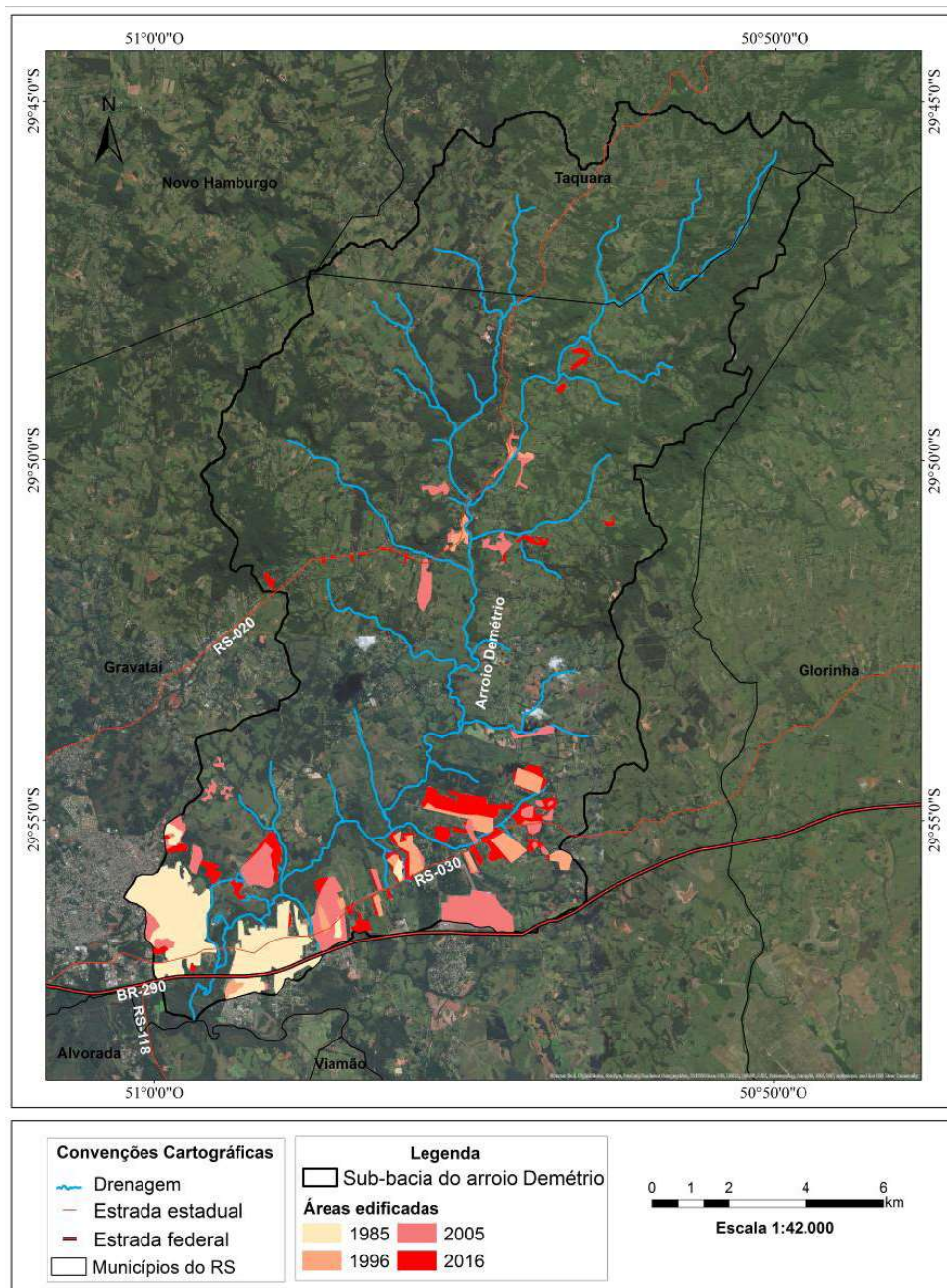


Fig. 6 - Evolução espaço temporal das áreas edificadas com usos múltiplos na bacia do arroio Demétrio.

A mancha de inundação abrangeu uma área de, aproximadamente, 11 km², a qual atinge 400 mil m² de área edificada, principalmente na área a jusante da bacia.

As áreas edificadas sobre a área suscetível a inundação na bacia caracterizam-se, em maior parte, com moradias irregulares e loteamentos residenciais, com presença de populações de baixa renda e moradias vulneráveis, com baixo padrão construtivo.

Segundo Maia *et al.* (2017), esta característica de ocupação ocorre devido à especulação imobiliária, que determina a distinta

valorização entre os espaços da cidade. Assim, quando a urbanização se torna um processo excludente, a alternativa para a população com baixo poder aquisitivo é migrar para locais cujo valor da terra é mais acessível e sem amenidades, ocupando espaços que deveriam ser destinados à preservação ambiental, como, por exemplo, as planícies de inundação.

Como forma de validação da mancha de inundação, buscaram-se informações sobre os pontos de alagamentos e inundações na bacia, obtidos junto a Fundação do Meio Ambiente de Gravataí (FMMA) e a partir de reportagens de jornais locais.

De acordo com Wink (2013), a ocupação das áreas suscetíveis tem gerado eventos frequentes de inundações em vários pontos próximos ao arroio Demétrio. Entre os bairros Jardim do Cedro, Itatiaia, Padre Réus e Parque dos Anjos, pelo menos 950 imóveis às margens do arroio Demétrio ficaram inundados em agosto de 2013, deixando dezenas de desalojados. Em julho de 2015, quando mais de oito mil pessoas foram afetadas pelas chuvas no município de Gravataí, estes mesmos locais foram novamente atingidos.

Na Figura 7, são apresentadas as áreas suscetíveis a inundações sobrepostas às áreas

edificadas. Destacam-se, em vermelho, os pontos que correspondem aos locais com alagamentos e inundações. Nos pontos 1 e 3, a ocupação caracterizava-se como rarefeita entre 1985 e 1996. Após este período, observou-se adensamento populacional e expansão em direção ao arroio, abrangendo atualmente 137.000 m².

No ponto 4, a ocupação ocorreu recentemente com a construção de um loteamento habitacional, onde 29.603,83 m² da área deste encontra-se suscetível a inundação. No ponto 2, a área edificada corresponde aproximadamente a 25.200 m², sendo esta uma área industrial.

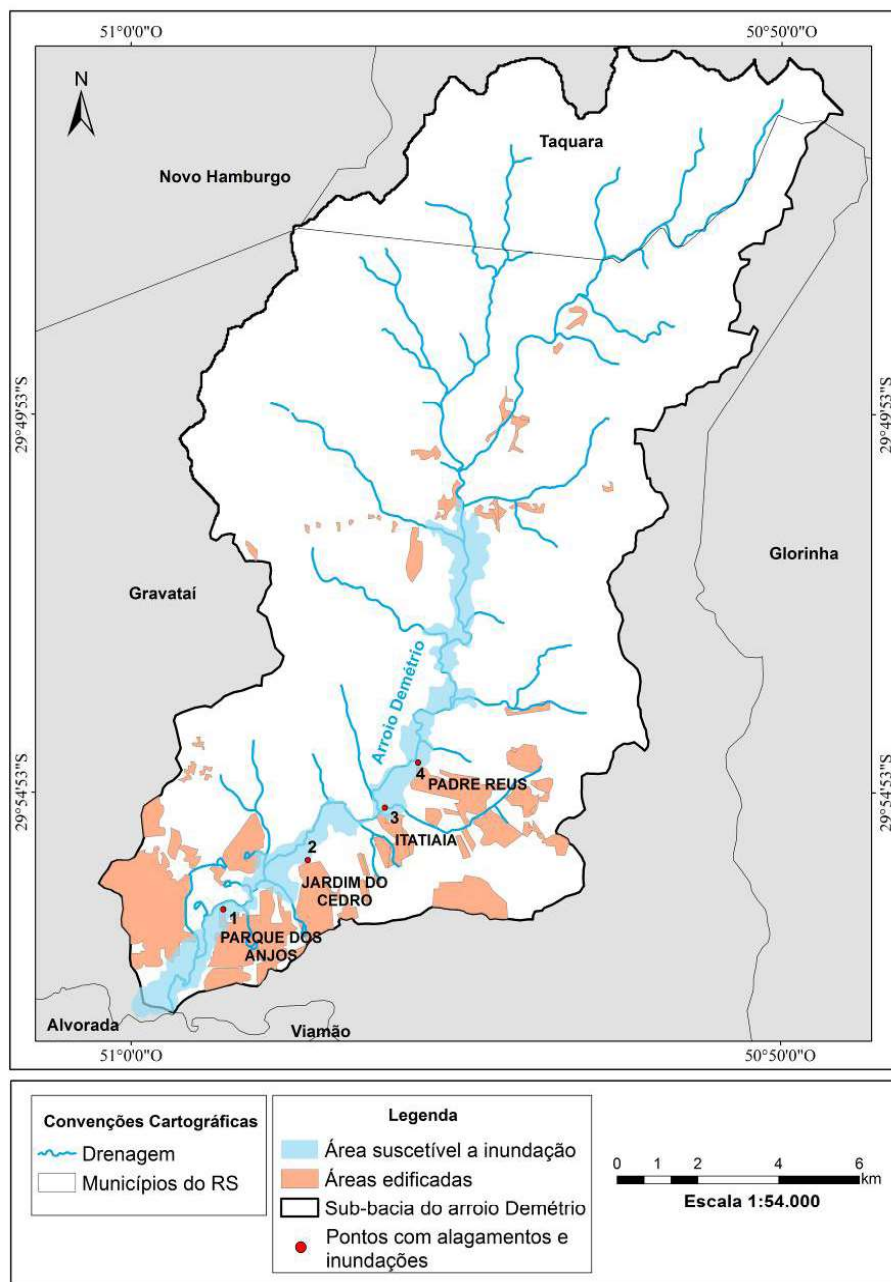


Fig. 7 - Sobreposição entre áreas suscetíveis a inundações, áreas edificadas e os pontos de alagamentos e inundações.

Apesar de estar coerente com o modelo digital de elevação (SRTM), é possível verificar algumas limitações nessa mancha de inundação, visto que a simulação foi feita exclusivamente para o arroio Demétrio. Para futuros estudos, recomendam-se levar em consideração também os arroios tributários.

Além disso, é importante ressaltar a importância da existência de curvas de nível com melhor resolução, metro em metro, por exemplo, para uma maior precisão do modelo, pois estas geram uma mancha de inundação mais fidedigna.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, com um tempo de retorno de 50 anos, foi possível validar alguns pontos abrangidos pela mancha através de notícias e reportagens que relatavam a localização de bairros atingidos.

Assim mesmo, apesar de estar coerente com o modelo digital de elevação utilizado (SRTM), considera-se que o conjunto de dados para compor o modelo hidrológico deve ser complementado, visto que quanto maior for a resolução espacial dos dados, melhor será a precisão dos modelos utilizados. Além disso, recomenda-se considerar os arroios tributários em simulações futuras.

Verificou-se a importância de estudos nesse tema, com geração de manchas de inundação, a fim de contribuir para uma adequada gestão da ocupação urbana em áreas suscetíveis a inundações no município, visando mitigar os efeitos de futuros eventos extremos.

Por fim, foi possível concluir que o modelo utilizado se mostra relevante para auxiliar em estudos na temática de suscetibilidade à inundação, o qual poderá ser utilizado para futuros estudos relacionados a inundações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUBACHER, J.P. **Análise da suscetibilidade a inundações, na área urbana do município de Igrejinha/RS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Curso de Geografia. Porto Alegre, 2014. 69p.

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.

Ecology, v. 7, n. 5, p. 1412-1420, 2014.

CUNGE, J. A. "On the subject of flood propagation computation method" (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, v. 7, no. 2, p. 205-230. 1969.

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) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008. 117p.

FERNANDES, A.C. **A cidade esparramada. Considerações sobre a produção do espaço urbano industrial em Gravataí - Região Metropolitana de Porto Alegre (RS)**. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008. 183p.

FERNANDES, A.C. Tempos, formas e conteúdos do espaço urbano-industrial em Gravataí (RS). **Boletim Gaúcho de Geografia**, Vol. 37. p. 103 - 108. 2011.

FERRI, G. A.; TOGNIA, C. **A história da bacia hidrográfica Taquari-Antas**. Lajeado, Ed. da Univates, 2012. 375p.

GUASSELLI, L. A. ; OLIVEIRA, G. G. ; PACHECO QUEVEDO, R.; 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.

GRAVATAÍ. **A história de Gravataí**. Disponível em: <<https://gravatai.atende.net/#!/tipo/pagina/valor/1>>. Acesso: 01 maio 2017.

GRAVATAÍ. **Planejamento de Uso do Ambiente Natural e Construído da Sub-bacia do Arroio Demétrio**. In: Arroio Demétrio, Gestão e sustentabilidade. Gravataí. 20 p. 2007.

IBGE. **Características da população brasileira**. Disponível em: <<http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-povo/caracteristicas-da-populacao.html>>. Acesso: 22 maio 2017.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>>. Acesso: 02 maio 2017.

- 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, 1940. 362p.
- KUENZER, 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.
- MAIA, J. A.; STROHAECKER, T. M.; GUASSELLI, L. A. Identificação da expansão urbana em áreas úmidas por meio do Sistema de Informações Geográficas. Estudo de caso: Área de inundação do rio Gravataí/RS. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, v. 30, p. 95-112, 2017.
- MAIA, B. M. A.; COSTA, C.A. Análise das precipitações no intervalo de 1979 a 2009, da sub-bacia do rio Figueiredo e a susceptibilidade à inundação da área urbana de Iracema-CE. **Revista GEONORTE**, Edição Especial 4, v. 10, n.1, p. 50-54, 2014.
- 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 Conf.** North Atlantic Division, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 1938. 57p.
- MÜLLER, A. S. **Aplicabilidade de medidas não-estruturais no controle de cheias urbanas: estudo de caso Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira-Joinville-SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2011. 239p.
- OLIVEIRA, G. G. **Modelos para previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do rio Caí, RS.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, 2010. 149p.
- OLIVEIRA, G. G.; SALDANHA, D. L. ; GUASSELLI, L. A. . Espacialização e Análise das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Caí/RS. **Revista Geociências (São Paulo. Online)**, v. 29, n. 3 p. 413-427, 2010.
- OLIVEIRA, G. G.; SALDANHA, D. L. ; GUASSELLI, L. A. . Modelos para a espacialização e previsão de áreas inundáveis na zona urbana de São Sebastião do Caí, RS, Brasil. **Pesquisas em Geociências (Online)**, v. 38, n.2, p. 132-146, 2011.
- 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.
- PROFILL Engenharia e Ambiente. Estudo Hidrológico para determinação de cota de inundação. In: PROFILL Engenharia e Ambiente. **Diagnóstico Ambiental. Abertura de via em área urbana - Gravataí/RS.** Gravataí. p. 13-32. 2012.
- QUEVEDO, R. P. Gestão de Risco de Desastres no Município de Encantado - RS. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Geografia. Porto Alegre, 2016. 80p.
- RAMOS, C.; REIS, E. As cheias no sul de Portugal em diferentes tipos de bacias hidrográficas. **Finisterra**, v. 36, n. 71. p. 61-82. 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.
- RIO GRANDE DO SUL. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Gravataí.** Relatório Final. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. 2012. 582p.

SANTOS, D.M. **Zoneamento das áreas suscetíveis a movimentos de massa, enxurradas e inundações no município de Marques de Souza - RS.** Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). UNIVATES. Bacharelado em Engenharia Ambiental. 2015. 135p.

S.C.S. (Soil Conservation Service), **Urban hydrology for small watersheds.** U.S. Dep. Agric., Technical Release 55. 2. ed. 1986. 117p.

TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Porto Alegre. Editora da UFRGS. 4. ed. 2013. 943 p.

TUCCI, C.E.M.; MACHADO, E.S. Concepção do controle de enchentes na Região metropolitana de Curitiba. In: BRAGA, B.; TUCCI, C.E.M.; TOZZI, M. (Orgs.) **Drenagem Urbana: Gerenciamento, simulação e controle.** Porto Alegre, Ed. da UFRGS. p. 27-37. 1998.

WINK, L. Rio Gravataí está dois metros acima do normal. Jornal Correio do Povo. Porto Alegre, 28 ago. 2013. Disponível em: <<http://www.correiodopovo.com.br/Noticias/562168/Mais-de-8-mil-pessoas-sao-afetadas-pela-chuva-em-Gravatai>> Acesso: 28 maio 2017.