



Avaliação da Expansão Urbana e seu Impacto na Dinâmica de Escoamento Superficial da Bacia Hidrográfica do Arroio Itaquarinchim de Santo Ângelo – RS
Evaluation of Urban Expansion and its Impact on Dynamic Surface Runoff of the River Basin of Itaquarinchim Stream in the City of Santo Ângelo – RS

Ângelo Rohr Anschau¹

Tatiana Reckziegel²

Franco da Silveira³

Filipe Molinar Machado⁴

Fernando Gonçalves Amaral⁵

Resumo: O crescimento acelerado e desorganizado dos centros urbanos proporciona impactos negativos nos recursos hidrológicos, tanto a nível local como global. Os resultados da urbanização incluem aumento das áreas impermeáveis e da redução das áreas verdes, que em conjunto são responsáveis por acarretarem no escoamento superficial e em vazões máximas de enchentes, tornando-se um problema, principalmente, para pequenas bacias hidrográficas. Nesse contexto, o objetivo do artigo consiste em realizar uma análise multitemporal da mudança no escoamento superficial e da vazão máxima ocasionada pela variação do uso e ocupação da Bacia Hidrográfica do Arroio Itaquarinchim (BHAI), localizada no município de Santo Ângelo – RS, entre os anos de 1990 e 2015. Para obter as estimativas de precipitação efetiva e das vazões máximas utilizaram-se as metodologias desenvolvidas por *Soil Conservation Service* (SCS) e por *Ven Te Chow*. Para o processamento de imagens e aquisição de informações, utilizou-se o software de Sistema de Informação

¹ Universidade Integrada do Alto do Uruguai e das Missões (URI- Santo Ângelo)

² Universidade Integrada do Alto do Uruguai e das Missões (URI- Santo Ângelo)

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul

⁴ Universidade Integrada do Alto do Uruguai e das Missões (URI- Santo Ângelo)

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Geográfica *Quantum GIS* (QGIS). Como resultado, foi possível verificar a grande variação do crescimento urbano por meio da classe de áreas impermeáveis, representando um aumento de 80,5% entre 1990 e 2015. Além disso, destaca-se que na BHAI, a agricultura e o solo exposto demonstraram crescimento de 50% em 1990 para 60% da área total da bacia em 2015. Dessa forma, a *Curve Number* da bacia obteve ascensão de 73,50 para 77,92 e a precipitação efetiva com tempo de retorno de 5 e 10 anos apresentou um crescimento de 20,85 mm para 26,51 mm e de 27,78 mm para 34,07 mm respectivamente.

Palavras-chave: Expansão Urbana; BHAI; Escoamento Superficial; Vazão Máxima.

Abstract: The accelerated and disorganized growth of urban centers provides negative impacts on hydrological resources at both local and global levels. The results of the urbanization include an increase in the waterproof areas and the reduction of the green areas, which together are responsible for causing shallow runoff and maximum flood flows, becoming a problem mainly for Small watersheds. In this context, the objective of the article is to carry out a multitemporal analysis of the change in the superficial runoff and the maximum flow caused by the variation in the use and occupation of the watershed of the Itaquarinchim Brook (BHAI), located in the municipality of Santo Ângelo – RS, between the years 1990 and 2015. To obtain the estimates of effective precipitation and the maximum flows, the methodologies developed by Soil Conservation Service (SCS) and by Ven Te Chow were used. For image processing and information acquisition, Quantum GIS Geographic Information system software (QGIS) was used. As a result, it was possible to verify the large variation of urban growth by means of the class of waterproof areas, representing an increase of 80.5% between 1990 and 2015. Moreover, it is noted that in the BHAI, agriculture and exposed soil showed growth of 50% in 1990 to 60% of the total area of the basin in 2015. Thus, the Curve Number of the basin obtained rise from 73.50 to 77.92 and the effective precipitation with return time of 5 and 10 years showed a growth of 20.85 mm to 26.51 mm and from 27.78 mm to 34.07 mm respectively.

Keywords: Urban Expansion; BHAI; Surface Runoff; Maximum Flow.

1. Introdução

As importantes modificações antropogênicas do ambiente global estão relacionadas com a urbanização (CHEN et al., 2017). A influência da urbanização nas mudanças no uso do solo, na cobertura do solo, no escoamento e inundações dentro das bacias hidrográficas são temas atuais de pesquisa (DU et al., 2012; PASE et al., 2017). É amplamente reconhecido que a urbanização transforma os processos hidrológicos das bacias hidrográficas alterando as características de infiltrações superficiais (YANG et al., 2012). Os resultados esperados da expansão urbana incluem a redução da infiltração, fluxo de base, tempos de atraso, aumento dos volumes de fluxo de tempestade, descarga máxima, frequência de inundações e escoamento superficial (DOUGHERTY et al., 2006, OGDEN et al., 2011, DU et al., 2012).

No Brasil, os projetos que são desenvolvidos para recuperar os cursos da água são recentes (COLET, 2012). Além disso, com a ausência de planejamento estratégico territorial, as cidades foram expandindo-se de forma desordenada, acarretando altas taxas de concentração populacional e incidindo de forma negativa sobre os recursos hídricos, tanto em termos qualitativos, em relação à poluição das águas, quanto quantitativos, como no caso de enchentes (SILVEIRA, 2000; LOPES e TEIXEIRA, 2012; NAVARRO, 2013). Para Gorski (2010), as cidades situadas em países desenvolvidos implementaram planos e projetos que devem ser considerados como modelos na relação existente entre os tratamentos de sistemas e corredores fluviais urbanos, facilitando a integração da urbanização sobre a dinâmica hidrológica.

Segundo Tucci e Marques (2001), a urbanização e seus impactos requer uma abordagem integrada, trazendo para um mesmo núcleo de ações elementos referente à quantidade de água, à qualidade e do planejamento urbano. Conforme Santos (2012), as enchentes em centros urbanos ocorrem e são agravadas pela progressiva impermeabilização do solo, atuando diretamente na aceleração da velocidade de escoamento, diminuindo o tempo de concentração e elevando a vazão de pico. Com a finalidade de analisar e determinar os fatores pertinentes ao risco de inundações, diversos modelos hidrológicos foram desenvolvidos (TUNG e MAYS, 1981; VALEO e MOIN, 2000, CHOI et al., 2003), sendo o do *Soil Conservation Service* (SCS) um dos mais aplicados em estudos do gênero (TASSI et al., 2006). Destaca-se que cada método apresenta aplicações específicas, dependendo dos objetivos do trabalho e das suas características (BARROS et al., 2014). O modelo SCS permite estimar os valores da precipitação efetiva em locais com poucos dados hidrológicos, sendo seu principal parâmetro a *Curve Number* (CN), a qual relaciona o tipo de solo da região empregada às suas condições de umidade e de cobertura (TASSI et al., 2006).

Nesse contexto, a pesquisa objetiva analisar a Bacia Hidrográfica do Arroio Itaquirinchim (BHAI), localizada no município de Santo Ângelo, Rio Grande do Sul (RS) - Brasil, utilizando uma abordagem multitemporal da mudança no escoamento superficial e na

vazão máxima ocasionada pela expansão urbana, dentro de um espaço temporal de 1990 a 2015. Como complemento da pesquisa, propõem-se delimitar a bacia hidrográfica assim como, determinar as características fisiográficas relevantes e realizar mapas multitemporais de uso e ocupação do solo.

O estudo assume relevância em decorrência da necessidade de compreender a inter-relação entre recurso natural e pressão evolutiva antropológica, uma vez que o mapeamento das áreas é uma ferramenta para os gestores governamentais no momento de licenciar ou fiscalizar empreendimentos que possam estar contribuindo de forma expressiva na geração do escoamento e no conseqüente aumento das vazões de cheias. Além disso, as proposições e reflexões levantadas no estudo contribuem como subsídios para futuras pesquisas acadêmicas e governamentais sobre o tema, que poderão dar continuidade a esta pesquisa.

2. Metodologia

A partir do conceito central formulado como objetivo geral, foi estabelecida a metodologia para cada etapa do estudo. Para a definição da fase de levantamento do panorama de pesquisa, esta seção apresenta aspectos pertinentes aos procedimentos metodológicos adotados para a realização deste trabalho. Está estruturada em dois grandes tópicos: i) área de estudo e ii) variáveis para aplicação do modelo do SCS.

2.1 Área de Estudo

Definiu-se inicialmente a BHAI como a unidade de planejamento e aplicação da metodologia. A BHAI está localizada na região noroeste do estado do RS, compreendendo regiões conforme seu interflúvio em parcial majoritária rural e minoritária urbana, correspondente ao município de Santo Ângelo. O Arroio Itaquarinchim está inserido na Bacia do Rio Ijuí (U90), pertencente a Região Hidrográfica do Uruguai, conforme estabelece a Lei Estadual n. 10.350/1994, sendo sua nascente localizada no Distrito do Comandaí, com continuidade até o Rio Ijuí. Para delimitar a BHAI e realizar o levantamento de características inertes (área, longitude dos cursos d'água e declividade da bacia), utilizaram-se os arquivos de extensão *shape* da hidrografia e das curvas de nível do RS disponibilizadas pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental (Fepam). Os arquivos foram exportados no *software* QGIS para elaborar o mapa da bacia que possibilitou a extração dos dados necessários.

2.2 Variáveis para Aplicação do Modelo do SCS

Para caracterização do solo que abrange a área em estudo, utilizou-se o mapa exploratório de solos do RS, desenvolvido e disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013). Para posteriormente enquadrá-lo em uma das classificações dispostas pelo SCS (tais como: A, B, C e D), utilizou-se como base a adaptação da tabela para a região de São Paulo elaborada por Sartori (2005), uma vez que as características do solo brasileiro são diferentes dos Estados Unidos da América. Além disso, as características dos solos podem ser aplicadas em outras regiões que apresentam semelhanças, exceto em localidades de alto grau de umidade ou seca, como na região do Amazonas, Pantanal e Nordeste (SARTORI, 2005). Para fins de aplicação do método, considerou-se a condição de umidade antecedente do solo II, onde a precipitação total dos últimos cinco dias atinge valores entre 15 a 40 mm. A determinação da ocupação da superfície da bacia foi executada com o auxílio do software *Quantum GIS* (QGIS), na função *plug-in SCP (Semi-Automatic Classification Plug-in)*. O SCP fornece ferramentas integradas para acelerar a criação de ROIs (áreas de formação), permitindo em função de imagens de satélite, a realização de uma classificação espectral semiautomática *pixel a pixel* da cobertura do solo. O Quadro 1 disponibiliza as classificações do solo para o presente estudo.

Quadro 1: Classes de uso e ocupação do solo.

Classe	Nome da Classe	Descrição
1	Vegetação Arbórea	Bosques, matas e florestas
2	Campos e Gramados	Campos em geral e gramados
3	Agricultura	Cultura de grãos em geral
4	Solo Exposto	Solo exposto e terra
5	Áreas Impermeáveis	Ruas e coberturas (telhados)
6	Água	Cursos d'água e açudes

Fonte: Adaptado de Sartori (2005).

As imagens de satélite foram obtidas a partir do banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Nos mapas resultantes do processamento, adotou-se o sistema de coordenadas planimétricas *Universal Transversor Mercator* (UTM), associado ao *datum SIRGAS2000*, que é oficialmente utilizado no Brasil. A obtenção dos valores de CN para as classes se deu em função da média ponderada das classes estabelecidas pelo SCS após o enquadramento do solo da região ao método.

2.3 Precipitação Máxima

A Para definir a precipitação máxima, aplicou-se a Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para o posto pluviométrico de Giruá (este distando 15 km de Santo Ângelo). Para geração da IDF de Giruá, Sampaio (2011) utilizou uma série de 67 anos de dados de chuvas máximas anuais extraídas da Agência Nacional das Águas (ANA), obtendo a Equação (1) para determinação de chuvas intensas:

$$I = \frac{955,09 \cdot Tr^{0,2014}}{(T_d + 8,82)^{0,7556}} \quad (1)$$

Para determinar o “T” necessita-se do tempo de retorno “Tr”, que contempla uma simulação para um intervalo de tempo de 5 a 10 anos, utilizados no dimensionamento de obras de microdrenagem. O “Td” condiz com o tempo de duração, provido do tempo de concentração da bacia, dividido em 6 intervalos e rearranjada conforme metodologia de *Bureau of Reclamation*. O tempo de concentração necessário para designar os intervalos derivou da aplicação da Equação (2), elaborada por *Ven Te Chow* em razão da sua abrangência a bacias com área de 6 a 12.000 km², e também, pela bacia objeto do presente estudo, ser predominantemente rural.

$$T_c = 0,160 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32} \quad (2)$$

Em que “L” corresponde à longitude reta do curso d’água principal em quilômetros (km) que será determinada junto ao software QGIS e “S” condiz com a declividade média (m/m) do curso d’água a ser verificada em virtude da confecção de seu perfil longitudinal. Os resultados de intensidade então simulados foram multiplicados pelo intervalo de tempo equivalente, a fim de encontrar os valores de precipitação bruta. Estes valores posteriormente vieram a ser rearranjados pelo *Bureau of Reclamation*, sendo acumulados, a fim de obter a precipitação efetiva acumulada que, em seguida, foi desacumulada para obtenção do hietograma de chuva.

2.4 Chuva Excedente

Os valores de precipitação excedentes, Equação (3), foram simulados pela metodologia desenvolvida pelo SCS, a qual salienta que a precipitação “P” deve ser 120% maior que o valor da retenção potencial do solo “S”, pois inclui as perdas iniciais e depende diretamente do tipo de solo, da ocupação e da umidade. O valor de “S” é definido por meio do coeficiente CN (TUCCI e MARQUES, 2001), conforme a Equação (4):

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2 S)^2}{P + 0,8 S} \quad (\text{se } P > 0,2S) \quad (3)$$

Em que:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

Onde

P_{ef} = precipitação efetiva (mm);

P = precipitação (mm); e

S = Valor de retenção do solo, representa as perdas iniciais (adimensional).

O coeficiente “CN” utiliza uma expressão simples, variando em grandeza de “1” (um) até “100” (cem), considerando sua total impermeabilidade (ANDREOLLI e TUCCI, 2004).

2.5 Vazão Máxima

A vazão máxima do curso d’água pode ser compreendida como o valor associado a um risco de ser igualado ou excedido. Seu valor pode ser estimado levando-se como base o ajuste de uma distribuição estatística, a regionalização de vazões ou a partir da precipitação (TUCCI e MARQUES, 2001). Em casos de ausência de dados de vazões, utilizam-se dados de precipitação. Conforme Genovez (2001), entre os métodos comumente utilizados estão o Racional, o *I-Pai-Wu* modificado, o HU (de *Snyder*), o HUT (do SCS), o *Ven te Chow* e o HU Regionalizado. O método Racional, *I-Pai-Wu* modificado e *Ven Te Chow* permitem a determinação da vazão máxima de enchente, enquanto que os métodos SCS e HUR possibilitam obter o hidrograma de projeto. Paiva e Paiva (2001) salientam que o método *Ven Te Chow* destaca-se pela simplicidade e praticidade. Assim, utilizando conceitos do HU em seu modelo, a vazão de pico equivale-se à chuva excedente, sendo descrita conforme Equação (5):

$$Q_p = 0,278.(A).(X).(Y).(Z) \quad (5)$$

Onde

Q_p = vazão máxima (m³/s);

A = área da bacia (km²);

X = fator de deflúvio, correspondente a razão da precipitação efetiva pela duração;

Y = fator climático; e

Z = fator de redução de pico.

A partir da delimitação da bacia realizada no software QGIS foi possível obter sua respectiva “ A ”. Para encontrar “ X ”, foi necessário utilizar a seguinte razão entre a precipitação efetiva “ P_e ” pela respectiva duração “ t_d ”, conforme Equação (6):

$$Q_p = \frac{P_e}{t_d} \quad (6)$$

Em função da proximidade da área de estudo ao posto pluviométrico do município de Giruá, que apresenta uma série histórica de precipitações, não necessitou converter o valor de “Y”, sendo adotado o valor “1”. Para o “Z”, foi necessário utilizar os dados de Wilken (1978), que são dependentes da relação do tempo de duração de uma chuva “ t_d ” pelo tempo de pico “ t_p ”. O valor do “ t_p ” é resultante da seguinte Equação (7):

$$t_p = 0,005055 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{I}}\right)^{0,64} \quad (7)$$

Em que “L” corresponde à longitude reta do curso d’água principal, em metros (m) e “I” condiz com a declividade média do curso d’água, em porcentagem (%).

3. Resultados e Discussões

A partir do fluxo metodológico estruturado, identificaram-se mapas para comparar a precipitação efetiva pelo método SCS e “ Q_p ”, elaborado por *Ven Te Chow*.

3.1 Delimitação Espacial e Características da BHAI

A partir do software QGIS realizou-se a delimitação da bacia e obteve-se características primordiais que são apresentadas no Quadro 2. A área da BHAI é (A) de 61,50 km², que, conforme Faustino (1996), classifica-se como microbacia. Além disso, a microbacia apresenta uma área com drenagem direta ao curso principal de uma bacia e, dessa forma, diversas microbacias formam uma bacia. Na Figura 1 está o mapa que representa a delimitação da BHAI.

Quadro 2: Características da BHAI.

Característica	Resultado Obtido
Área (A)	61,50 km ²
Comprimento total curso d’água (L_t)	37,30 km
Comprimento curso principal (L)	27,24 km
Declividade (I)	0,00789 m/m
Tempo de concentração (T_c)	6,25 h
Tempo de pico (t_p)	3,75 h

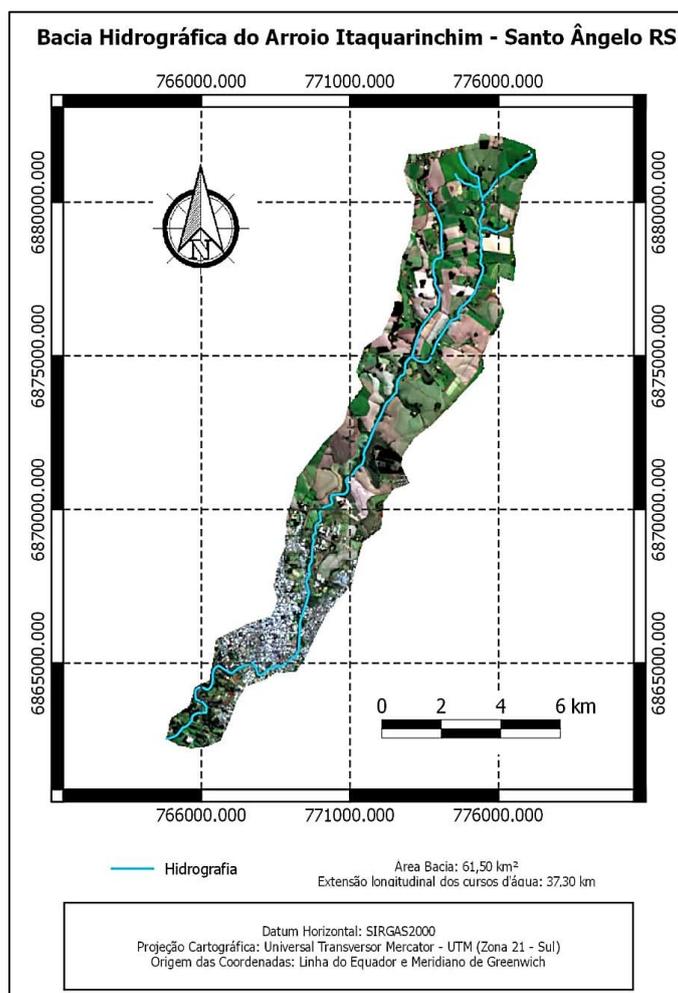


Figura 1: Mapa de delimitação da BHAI.

3.2 Uso e Ocupação do solo - CN

A classificação do solo da BHAI demonstrou a abrangência de dois tipos de solo: i) Latossolo Roxo Ditrófico (Latossolos Vermelhos), em maior percentual ao norte da bacia, e ii) Terra Roxa Estruturada Eutrófica (Nitossolos Vermelhos), em menor percentual e situada ao sul. Desse modo, analisando as condições de solo do SCS adaptadas por Sartori (2005) para o solo brasileiro, a BHAI enquadra-se integralmente no grupo hidrológico de tipo B. Após determinar o tipo de solo e a delimitação da bacia, obteve-se os mapas de uso e ocupação do solo multitemporais e os quantitativos correspondentes às classes pré-definidas, expressas pela Figuras 2 e pelos Quadros 3 e 4.

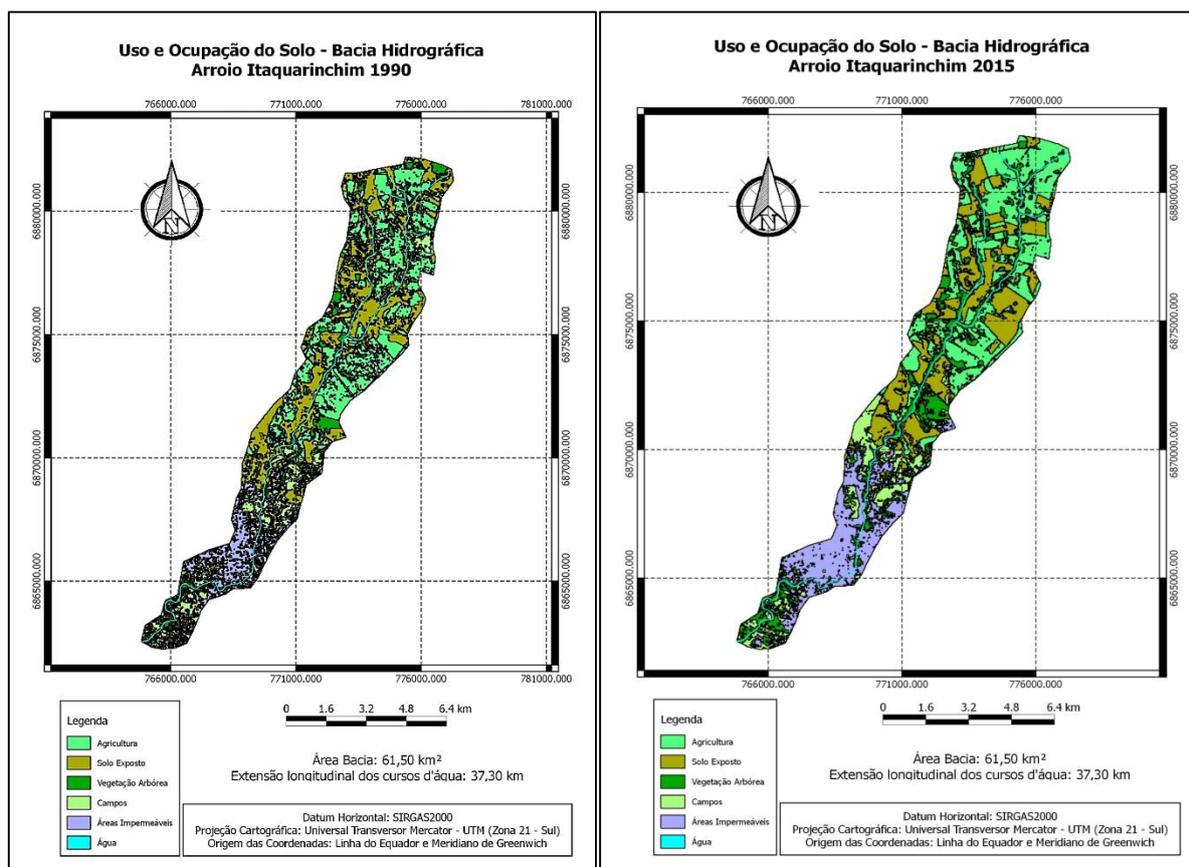


Figura 2: Mapa de uso e ocupação do solo da BHAi em 1990 e 2015.

Quadro 3: Quantitativo da classificação uso e ocupação do solo da BHAi em 1990.

Classe	Área (m ²)	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Agricultura	19259400,00	19,26	31,32
Solo Exposto	13932200,00	13,93	22,65
Veg. Arbórea	9198300,00	9,20	14,96
Campos	13879100,00	13,88	22,57
Áreas Impermeáveis	5042600,00	5,04	8,20
Água	188400,00	0,19	0,31
TOTAL	61500000,00	61,50	100,00

Pelo Quadro 3, o maior percentual da área da BHAi contempla as classes de agricultura e solo exposto, totalizando, em conjunto, 53,97% da ocupação em 1990 e de 62,32% em 2015. O solo exposto alcançou grande percentual em zona rural em razão da inter-relação com a agricultura, pois o mesmo é uma variável sensível a períodos de pós-colheita e preparo do solo para plantio de *commodities* agrícolas.

Quadro 4: Quantitativo da classificação uso e ocupação do solo da BHAÍ em 2015.

Classe	Área (m ²)	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Agricultura	22886200,00	22,89	37,21
Solo exposto	15440500,00	15,44	25,11
Vegetação arbórea	7081400,00	7,08	11,51
Campos	6102100,00	6,10	9,92
Áreas impermeáveis	9790800,00	9,79	15,92
Água	199000,00	0,20	0,32
TOTAL	61500000,00	61,50	100,00

O crescimento urbano por meio da classe de áreas impermeáveis apresentou uma expansão individual de aproximadamente 80,5%, passando de 8,20% (1990) para 15,92% (2015). Porém, oposto ao crescimento das classes de agricultura, de solo exposto e de áreas impermeáveis, as quais estão entre as classes de campos e de vegetação arbórea que resultaram em declínios de 12,65% e 3,45%, respectivamente, considerando suas porcentagens que possuem dentro da BHAÍ. Os resultados do Quadro 5 são semelhantes aos estudos desenvolvidos por De Paula et al. (2012), o qual analisou a mudança do uso e ocupação do solo em zona de expansão urbana na região norte de Londrina – PR, entre 1987 e 2004, e obteve aumento da área urbana de 0,39% para 3,09%, da agricultura de 34,30% para 79,65% e da redução de florestas, de 4,41% para 3,45%.

Após a análise do quantitativo da classificação uso e ocupação do solo da BHAÍ em 2015, para definir o CN foi necessário considerar as características do solo do grupo hidrológico B. Para o ano de 1990, o CN resultante foi de 73,50 e em 2015, foi de 77,92, conforme exibem os Quadros 5 e 6. Desse modo, verifica-se que o método CN contemplou variáveis que facilitam realizar a análise e gestão de elementos físicos de paisagem, utilizando diferentes classes para identificar as áreas frágeis e limitantes, ao considerar a evolução do uso e ocupação do solo (SOARES et al., 2017).

Quadro 5: CN da BHAÍ no ano de 1990 e 2015.

BHAÍ – 1990			
Classe	CN (Solo tipo B)	Porcentagem (%)	CN
Agricultura	73	0,31	22,86
Solo Exposto	86	0,23	19,48
Veg. Arbórea	65	0,15	9,72
Campos	58	0,23	13,09
Áreas Impermeáveis	98	0,08	8,04
Água	100	0,00	0,31
CN Ponderado Final			73,50

BHAI – 2015			
Classe	CN (Solo tipo B)	Porcentagem (%)	CN
Agricultura	73	0,37	27,17
Solo Exposto	86	0,25	21,59
Veg. Arbórea	65	0,12	7,48
Campos	58	0,10	5,75
Áreas Impermeáveis	98	0,16	15,60
Água	100	0,00	0,32
CN Ponderado Final			77,92

Foley et al. (2005) e Chen et al. (2017) salientam que a urbanização apresenta um dilema aos seres humanos, pois nota-se a importância do desenvolvimento urbano pelos aspectos positivos (conveniência de infraestrutura, serviços e bens necessários às pessoas, governo, desenvolvimento econômico, indústria e comércio), mas as modificações da superfície da terra são resultantes também do processo de urbanização (incluindo redução de vegetação, compactação do solo e alterações de superfícies permeáveis para superfícies impermeáveis, como telhados, estradas e estacionamentos). Em geral, o escoamento superficial e a descarga do rio aumentam com a diminuição da vegetação natural (BURNS et al., 2012; GITAU et al., 2016; VIETZ et al., 2016). Assim, as superfícies impermeáveis desenvolvidas durante a urbanização contribuem com mais escoamento superficial devido à diminuição da infiltração (SCHUELER et al., 2009; CHEN et al., 2017). A infiltração reduzida proporciona fluxos máximos elevados, mesmo para chuvas de baixa intensidade e de curta duração, resultando no aumento do risco de inundações (SURIYA e MUDGAL, 2012).

3.3 Precipitação Máxima e Chuva Excedente

Para determinação da chuva máxima, utilizou-se a equação de IDF de Giruá (SAMPAIO, 2011), para encontrar a intensidade da precipitação máxima e, posteriormente, multiplicou-se pelo respectivo intervalo de tempo. Os resultados simulados para o período de retorno de 5 e 10 anos são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6: Valores de precipitação máxima simulados.

TR = 5 anos				TR = 10 anos			
Td (min)	Td (h)	I (mm/h)	P (mm)	Td (min)	Td (h)	I (mm/h)	P (mm)
62,5	1,04	52,54	54,73	62,5	1,04	60,42	62,93
125	2,08	32,66	68,04	125	2,08	37,55	78,24
187,5	3,13	24,45	76,40	187,5	3,13	28,11	87,85
250	4,17	19,84	82,67	250	4,17	22,81	95,05
312,5	5,21	16,85	87,76	312,5	5,21	19,37	100,90
375	6,25	14,73	92,07	375	6,25	16,94	105,87

Com os dados resultantes da precipitação máxima, foi possível desacumular os mesmos e em seguida ordenou-os pelo *Bureau of Reclamation* (6, 4, 3, 2, 1, 5). Após o ordenamento, aglomerou-se a chuva desacumulada para obter a chuva excedente acumulada ($P_{ef. ac.}$). Assim, obtiveram-se os resultados demonstrados nos Quadros 7 e 8 e nos hietogramas de chuva das Figuras 3 e 4.

Quadro 7: Simulação de precipitação efetiva para tempo de retorno de 5 anos (SCS).

Pdesac. (mm)	Ordem	Preordenada (mm)	Pacum. (mm)	Ano de 1990		Ano de 2015	
				Pef. acum (mm)	Pef. desac. (mm)	Pef. acum (mm)	Pef. desac. (mm)
54,73	6	4,32	4,32	0,00	0,00	0,00	0,00
13,31	4	6,27	10,58	0,00	0,00	0,00	0,00
8,36	3	8,36	18,94	0,004	0,004	0,27	0,27
6,27	1	54,73	73,68	20,85	20,85	26,78	26,51
5,09	2	13,31	86,99	29,42	8,57	36,45	9,68
4,32	5	5,09	92,07	32,90	3,48	40,32	3,87

Quadro 8: Simulação de precipitação efetiva para tempo de retorno de 10 anos (SCS).

Pdesac. (mm)	Ordem	Preordenada (mm)	Pacum. (mm)	Ano de 1990		Ano de 2015	
				Pef. acum (mm)	Pef. desac. (mm)	Pef. acum (mm)	Pef. desac. (mm)
62,93	6	4,96	4,96	0,00	0,00	0,00	0,00
15,30	4	7,21	12,17	0,00	0,00	0,00	0,00
9,61	3	9,61	21,78	0,126	0,13	0,69	0,69
7,21	1	62,93	84,72	27,90	27,78	34,76	34,07
5,85	2	15,30	100,02	38,52	10,61	46,52	11,77
4,96	5	5,85	105,87	42,78	4,27	51,19	4,67

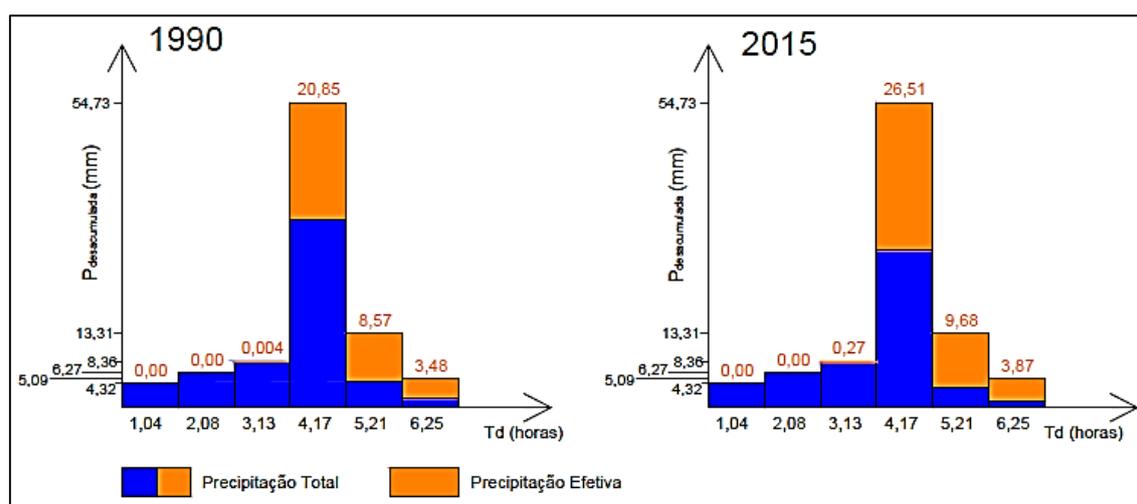


Figura 3: Hietogramas de chuva e chuva efetiva para os anos de 1990 e 2015 para tempo de retorno de 5 anos.

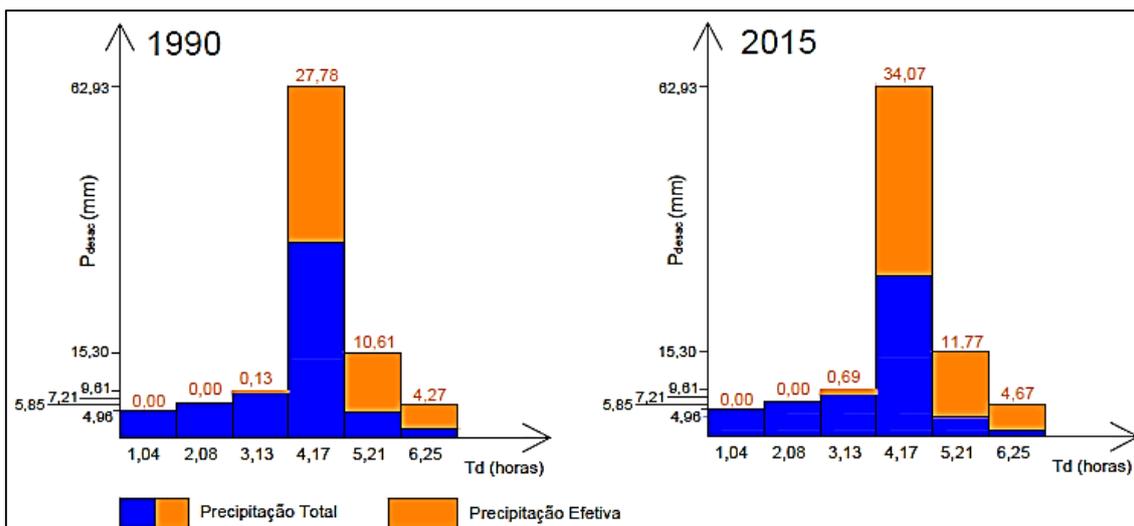


Figura 4: Hietogramas de chuva e chuva efetiva para os anos de 1990 e 2015 para tempo de retorno de 10 anos.

A partir dos Quadros 7 e 8 e das Figuras 3 e 4, nota-se o crescimento do escoamento superficial na BHAJ entre os anos de 1990 e 2015, os quais decorrem do avanço da urbanização e do crescimento das áreas cultiváveis. Para um período de retorno de 5 anos, a precipitação efetiva, em seu pico, obteve crescimento de 27,15%, passando de 20,85mm para 26,51mm. Para o tempo de retorno de 10 anos, o crescimento foi de 22,65%, passando de 27,78mm para 34,07mm. Nos primeiros dois intervalos de tempo (1,04 e 2,08 horas), a chuva não ocasionou escoamento superficial, pois como a precipitação acumulada foi menor do que 20% do valor da retenção potencial do solo (S), toda a água precipitada acabou por se infiltrar no solo. Os valores de perdas iniciais encontrados para os anos de 1990 e 2015 respectivamente foram de 18,32mm e 14,39mm.

3.4 Vazão Máxima

Os resultados de Q_p de enchente foram estimados de acordo com o tempo de pico calculado para a BHAJ que corresponde a 3,75 horas e são expressos conforme o Quadro 9 para diferentes períodos e tempos de recorrência (TR).

Quadro 9: Vazão Máxima simulada por *Ven Te Chow*.

Ano de 1990 – TR 5 anos									
T _d (min)	T _d (h)	I (mm/h)	P (mm)	P _e (mm)	T _d /T _p	X	Y	Z	Q _p (m ³ /s)
37,50	0,625	72,81	45,50	6,22	0,17	9,95	1,00	0,15	25,53
75,00	1,250	46,51	58,14	12,06	0,33	9,65	1,00	0,27	44,55
112,50	1,875	35,17	65,95	16,29	0,50	8,69	1,00	0,39	57,94
150,00	2,500	28,70	71,74	19,68	0,67	7,87	1,00	0,49	65,27
187,50	3,125	24,45	76,40	22,54	0,83	7,21	1,00	0,58	70,90
225,00	3,750	21,42	80,34	25,04	1,00	6,68	1,00	0,65	74,20
Ano de 1990 – TR 10 anos									
T _d (min)	T _d (h)	I (mm/h)	P (mm)	P _e (mm)	T _d /T _p	X	Y	Z	Q _p (m ³ /s)
37,50	0,625	83,71	52,32	9,20	0,17	14,73	1,00	0,15	37,77
75,00	1,250	53,48	66,85	16,80	0,33	13,44	1,00	0,27	62,06
112,50	1,875	40,44	75,83	22,18	0,50	11,83	1,00	0,39	78,87
150,00	2,500	32,99	82,49	26,43	0,67	10,57	1,00	0,49	87,67
187,50	3,125	28,11	87,85	30,00	0,83	9,60	1,00	0,58	94,38
225,00	3,750	24,63	92,37	33,10	1,00	8,83	1,00	0,65	98,11
Ano de 2015 – TR 5 anos									
T _d (min)	T _d (h)	I (mm/h)	P (mm)	P _e (mm)	T _d /T _p	X	Y	Z	Q _p (m ³ /s)
37,50	0,625	72,81	45,50	9,39	0,17	15,02	1,00	0,15	38,52
75,00	1,250	46,51	58,14	16,54	0,33	13,23	1,00	0,27	61,07
112,50	1,875	35,17	65,95	21,52	0,50	11,48	1,00	0,39	76,52
150,00	2,500	28,70	71,74	25,43	0,67	10,17	1,00	0,49	84,34
187,50	3,125	24,45	76,40	28,70	0,83	9,18	1,00	0,58	90,28
225,00	3,750	21,42	80,34	31,53	1,00	8,41	1,00	0,65	93,44
Ano de 2015 – TR 10 anos									
T _d (min)	T _d (h)	I (mm/h)	P (mm)	P _e (mm)	T _d /T _p	X	Y	Z	Q _p (m ³ /s)
37,50	0,625	83,71	52,32	13,09	0,17	20,94	1,00	0,15	53,71
75,00	1,250	53,48	66,85	22,11	0,33	17,69	1,00	0,27	81,66
112,50	1,875	40,44	75,83	28,29	0,50	15,09	1,00	0,39	100,61
150,00	2,500	32,99	82,49	33,10	0,67	13,24	1,00	0,49	109,80
187,50	3,125	28,11	87,85	37,10	0,83	11,87	1,00	0,58	116,72
225,00	3,750	24,63	92,37	40,55	1,00	10,81	1,00	0,65	120,18

Analisando os dados obtidos, percebe-se que ao longo dos 25 anos, para um TR de 5, a Q_p de enchente para a BHAI aumentou de 74,20m³/s para 93,44m³/s. Já para um tempo de retorno de 10 anos, a Q_p passou de 98,11m³/s para 120,18m³/s. Este aumento se baseia diretamente do crescimento urbano, assim como da agricultura no período considerado.

A decadência das áreas de matas e florestas também é um do fator relevante a ser considerado, pois conforme estudos de Bianchi et al. (2012), na Bacia do Rio Canguiri o aumento das áreas urbanizadas, da agricultura e da redução de florestas refletiram diretamente na elevação das vazões de pico ao longo dos anos, obtendo-se para um TR de 3 anos, com

condição normal de umidade a vazão de pico da bacia, 28,87m³/s (em 1976), 30,78 m³/s (em 1984) e 32,78m³/s (em 2009), condizentes com os resultados obtidos na BHAI.

Vendrame e Lopes (2005), em análise do crescimento urbano e das alterações do escoamento superficial da bacia do Pararangaba, obtiveram resultados expressivos de aumento das Q_p da bacia. Analisando três cenários distintos (pré-urbanização, urbanização atual e urbanização futura) obtiveram: i) TR 10 anos – 100,62 m³/s, 129,95 m³/s e 181,69 m³/s; ii) TR 25 anos – 143,03 m³/s, 174,96 m³/s e 230,92 m³/s; e iii) TR 50 anos – 178,21 m³/s, 212,90 m³/s e 270,43 m³/s. A Figura 5 apresenta a ascensão da estimativa das Q_p da BHAI nos anos de 1990 e 2015.

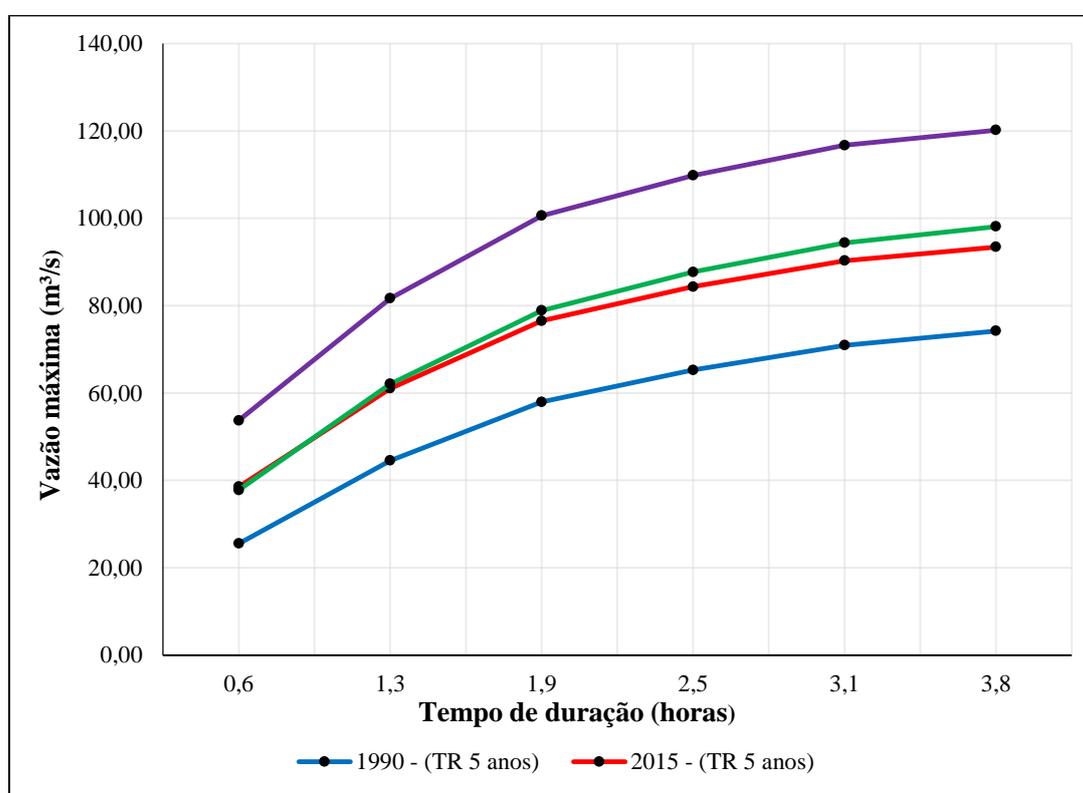


Figura 5: Vazões máximas (Q_p) da BHAI estimadas para os anos de 1990 e 2015.

Desse modo, pela Figura 5 nota-se que houve transformações da análise da vazão máxima em função do tempo de retorno para todos os cenários analisados, condizendo que quanto maior o período de recorrência simulado, maiores são as vazões decorrentes das precipitações efetivas. Além disso, ressalta-se que independente da estratégia determinada de análise, sendo essa com o foco na alteração temporal do uso do solo através da simulação para tempos de retornos reduzidos, o conhecimento quantitativo das vazões são indispensáveis para a gestão hídrica de bacias hidrográficas tanto urbanas quanto rurais.

4. Conclusões

O trabalho apresentou as principais características da BHAI, com a intenção de ser um agente facilitador que auxilie e direcione estratégias públicas industriais no processo, uma vez que, procura fazer um comparativo entre períodos delimitados. Desse modo, a pesquisa contribuiu para aqueles que buscam entender melhor as definições e conceitos referentes ao aumento dos centros urbanos, a novas mudanças nos padrões de uso e ocupação do solo, as quais podem acarretar em consequências no ciclo hidrológico da bacia. Assim, percebe-se que a urbanização é uma das principais mudanças antropogênicas do ambiente global. Na BHAI foi possível avaliar em termos quantitativos os impactos causados pela urbanização a partir dos métodos SCS e *Ven te Chow* que utilizam a CN.

Do ano de 1990 ao ano de 2015 o crescimento urbano por meio da classe de áreas impermeáveis apresentou um aumento de aproximadamente 80,5%. Predominante na BHAI, a agricultura e solo exposto também demonstraram uma expansão, com uma representação de 53,97% da ocupação em 1990 e de 62,32% em 2015. Além disso, com relação a precipitação efetiva pode-se destacar o aumento de 20,85 mm para 26,51 mm com um TR de 5 anos entre 1990 e 2015. Já para o TR de 10 anos, estimou-se uma passagem de 27,78 mm para 34,07 mm entre os respectivos anos.

No que diz respeito à vazão máxima de enchente, houve aumento no decorrer do período em análise. O aumento é justificado pela expansão urbana assim como da agricultura, pois com a diminuição das áreas de matas e florestas na BHAI há uma elevação da vazão máxima. É importante frisar os resultados obtidos para o ano de 2015, de modo que a estimativa foi de 93,44 mm para o TR de 5 anos e 120,18 mm para TR de 10 anos. Desse modo, os dados resultantes das características da BHAI do ano de 2015 podem ser utilizados na avaliação, dimensionamento e gestão de obras hidráulicas, visto que anteriormente havia uma lacuna de informações quantitativas da bacia.

A apresentação dos resultados da pesquisa proporciona à academia um conjunto de informações detalhadas e necessárias sobre a aplicação, deficiência e importância das estratégias em diferentes processos hidrológicos das bacias hidrográficas, um ramo de atividade que, conforme verificado durante este trabalho, apesar da sua importância no contexto econômico regional brasileiro, tem sido pouco estudado nas principais universidades e instituições de ensino da região sul e sudeste do Brasil.

As conclusões deste estudo contribuem também para reforçar as conclusões de outros estudos acadêmicos realizados em nível nacional, envolvendo a aplicação das bacias hidrográficas. Por fim, não existindo uma profusão de literatura científica em língua portuguesa sobre novas abordagens relacionando a BHAI, como proposta para estudos posteriores, propõe-

se a realização da estimativa do escoamento superficial da BHAJ por outros métodos existentes (Racional, de *I-Pai-Wu* Modificado, HU de *Snyder* e HU Regionalizado), com o objetivo de realizar um comparativo com os resultados obtidos pelo método do SCS da presente pesquisa. Além disso, sugere-se realizar uma nova reclassificação do uso e ocupação do solo por meio de imagens do satélite *Sentinel - 2*, recentemente disponibilizadas gratuitamente com resolução de 10 metros, refinando a precisão da classificação.

5. Referências

ANDREOLLI, I.; TUCCI, C. E. M. 2004. Simulação chuva-vazão pelo método SCS com propagação em canal por Muskingum Cunge linear na bacia do Alto Uruguai. *In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, Goiânia.*

BARROS, C. A. P.; MINELLA, J. P. G.; TASSI, R.; DALBIANCO, L.; OTTONELLI, A. S. 2014. Estimativa da infiltração de água no solo na escala de bacia hidrográfica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n.2, p.557-564.

BIANCHI, R. C.; RIZZI, N. E.; GUIMARÃES, R. Z.; SCHECHI, R. G. 2012. Estimativa da vazão máxima da bacia hidrográfica do Rio Canguiri através do método de Ven Te Chow. *RA'E GA*, Paraná, n. 25, p. 164-185.

BURNS, M. J.; FLETCHER, T. D.; WALSH, C. J.; LADSON, A. R.; HATT, B. E. 2012. Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform. *Landscape and Urban Planning*, v. 105, n. 3, p. 230 – 240.

CHEN, J.; THELLER, L.; GITAU, M. W.; ENGEL, B. A.; HARBOR, J. M. 2017. Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States. *Journal of Environmental Management*, v. 187, n. 1, p. 470-481.

CHOI, J. Y.; ENGEL, B. A.; MUTHUKRISHNAN, S.; HARBOR, J. 2003. GIS based long term hydrologic impact evaluation for watershed urbanization. *JAWRA - Journal of the American Water Resources Association*, v. 39, n. 3, p. 623 – 635.

COLET, K. M. 2012. *Avaliação do Impacto da Urbanização sobre o Escoamento Superficial na Bacia do Córrego do Barbado, Cuiabá-MT*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá – MT, 2012. 134 p.

DE PAULA, A.S.; CAINZOS, R. L. P.; BARROS, O. N. F.; RALISCH, R.. 2012. Análise multitemporal do uso e ocupação do solo entre 1987 e 2004 na zona de expansão urbana norte de Londrina-PR, utilizando Sensoriamento Remoto (SR) e Sistema de Informações Geográficas (SIG). *Ciências Agrárias*, Londrina, v. 33, n. 6, p. 2877-2890.

DOUGHERTY, M. et al. 2006. Quantifying long term hydrologic response in an urbanizing basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 12, p. 33–41.

DU, J.; QIAN, L.; RUI, H.; ZUO, T.; ZHENG, D.; XU, Y.; XU, C. Y. 2012. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China. *Journal of Hydrology*, v. 464–465, p. 127-139.

FAUSTINO, J. 1996. *Planificación y gestión de manejo de cuencas*. Turrialba: CATIE. 90p.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R. 2005. Global Consequences of Land Use. *Science*, v. 309, p. 570 – 574.

GENOVEZ, A. M. 2001. Vazões máximas. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (Org.). Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, p. 33-112.

GITAU, M. W.; CHEN, J.; MA, Z. 2016. Water Quality Indices as Tools for Decision Making and Management. *Water Resources Management*, v. 30, n. 8, p. 2591–2610.

GORSKI, M. C. B. 2010. *Rios e cidades: Ruptura e Conciliação*. São Paulo: Editora Senac, São Paulo.

IBGE. 2002. *Diretoria Geociências – DGC*. Mapa exploratório de solos do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: < <http://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2017.

LOPES, M. M.; TEIXEIRA, D. 2012. A trajetória do comitê da bacia hidrográfica do Rio Mogi Guaçu e suas contribuições para a gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 8, n. 3, p. 24-49.

NAVARRO, E. C. 2013. *Influência da urbanização na vazão máxima da microbacia hidrográfica do Córrego da Cachoeirinha, Lençóis Paulista, SP*. 2013. 81 f.. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu.

OGDEN, F. L.; PRADHAN, N. R.; DOWNER, C. W.; ZAHNER, J. A. 2011. Relative importance of impervious area, drainage density, width function, and subsurface storm drainage on flood runoff from an urbanized catchment. *Water Resources Research*, v. 47, p. 1-12.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. 2001. *Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH. 626 p.

PASE, H. L.; ROCHA, H. J.; SANTOS, E. R. 2017. A relação entre a gestão das bacias hidrográficas e o remanejamento das populações atingidas por hidrelétricas. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 13, n. 2.

SANTOS, K. R. 2012. Inundações urbanas: um passeio pela literatura. *Élisée Revista de Geografia UEG*, v. 1, n. 1.

SAMPAIO, M. V. 2011. *Determinação e espacialização das equações de chuvas intensas em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul*. 2011. 145 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Área de concentração Engenharia de Água e Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SARTORI, A. 2010. *Desenvolvimento de Critérios para Classificação Hidrológica de Solos e Determinação de Valores de Referência para o Parâmetro CN*. 2010. 235 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SCHUELER, T. R.; MCNEAL, L. F.; CAPIELLA, K. 2009. Is Impervious Cover Still Important? Review of Recent Research. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 14, n. 4.

SILVEIRA, A.L.L. 2000. Aspectos Históricos da Drenagem Urbana no Brasil. In: TUCCI, C.E.M. et al (Org.). Hidrologia Urbana na Bacia do Rio Prata. Porto Alegre: ABRH, v. 1, p. 11-17.

SOARES, M. R. G. J.; FIORI, C. O.; SILVEIRA, C. T.; KAVISKI, E. 2017. Eficiência do método curve number de retenção de águas pluviais. *Mercator*, Fortaleza, v. 16.

SURIYA, S.; MUDGAL, B. V. 2012. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. *Journal of Hydrology*, v. 412–413, p. 210-219.

TASSI, R.; ALLASIA, D. G.; MELLER, A.; MIRANDA, T. C.; HOLZ, J.; SILVEIRA, A. L. L. 2006. Determinação do Parâmetro CN para Sub-bacias Urbanas do Arroio Dilúvio – Porto Alegre/RS. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Curitiba.

TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. M. 2001. *Avaliação e controle da drenagem urbana*. Porto Alegre: ABRH. 548 p.

TUNG, Y. K., MAYS, L. W. 1981. State variable model for urban rainfall–runoff process. *JAWRA - Journal of the American Water Resources Association*, v. 17, p. 181–189.

VALEO, C., MOIN, S. M. A. 2000. Variable source area modelling in urbanizing watersheds. *Journal of Hydrology*, v. 228, p. 68–81.

VENDRAME, I. F.; LOPES, W. A. B. 2005. Análise do crescimento urbano e seus efeitos na dinâmica de escoamento superficial da bacia do Pararangaba. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. *Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Goiânia: INPE. p. 2555–2562.

VIETZ, G. J. 2016. Thinking outside the channel: Challenges and opportunities for protection and restoration of stream morphology in urbanizing catchments. *Landscape and Urban Planning*, v. 145, p. 34 – 44.

YANG, X. L.; REN, L.; SINGH, V. P.; LIU, X.; YUAN, F.; JIANG, S.; YONG, B. 2012. Impacts of land use and land cover changes on evapotranspiration and runoff at Shalamulun River watershed, China. *Hydrology Research*, v. 43, p. 23–37.

WILKEN, P. S. 1978. *Engenharia de drenagem superficial*. São Paulo, CETESB. P. 477.