

Geografia

Estimativa do escoamento superficial das bacias hidrográficas urbanizadas inseridas no perímetro urbano do município de Londrina/PR

Estimate of runoff from urbanized watersheds within the urban perimeter of the city of Londrina/PR

André Luís Nocêra Mansour¹, Hemerson Donizete Pinheiro¹

¹Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, Brasil

RESUMO

O crescimento populacional nas áreas urbanas, observado nas últimas décadas, aliado à falta de planejamento urbano e ao aumento da intensidade pluviométrica tem sido motivo de inundações frequentes nos municípios de médio e grande porte. Desta forma, esta pesquisa se propõe a obter, por sensoriamento remoto, informações sobre a evolução do uso e ocupação do solo, a partir da análise de imagens de satélites, e implementá-las, utilizando o Método do SCS, para fornecer hidrogramas de escoamento superficial das bacias hidrográficas inseridas no perímetro urbano do município de Londrina/PR. Para tanto foram obtidas imagens de satélite da série LANDSAT e, logo após, realizada uma classificação supervisionada por regiões a fim de obter quatro coberturas de solo distintas: solo exposto, vegetação rasteira, vegetação densa e áreas urbanizadas. Na sequência, após obter os valores de CN puderam-se traçar os hietogramas e os hidrogramas de escoamento superficial a partir do Método dos Blocos Alternados e do Método do SCS, respectivamente. Os resultados obtidos demonstraram que todas as bacias sofreram processo de urbanização e, conseqüentemente, aumento do CN médio e tempo de concentração no decorrer dos anos. Os hidrogramas mostraram que a vazão de pico e o tempo de pico foram, respectivamente, aumentando e diminuindo com o decorrer dos anos.

Palavras-chave: Urbanização; Sensoriamento remoto; Escoamento superficial

ABSTRACT

Population growth in urban areas, observed in recent decades, combined with the lack of urban planning and the increase in rainfall intensity has been the reason for frequent flooding in medium and large cities. Thus, this research aims to obtain, by remote sensing, information on the evolution of land use

and occupation, from the analysis of satellite images, and implement them, using the SCS Method, to provide flow hydrographs surface of the hydrographic basins inserted in the urban perimeter of the city of Londrina/PR. For this purpose, satellite images of the LANDSAT series were obtained and, soon after, a supervised classification by regions was carried out in order to obtain four distinct soil covers: exposed soil, undergrowth, dense vegetation and urbanized areas. Subsequently, after obtaining the CN values, it was possible to trace the surface runoff hietograms and hydrographs using the Alternate Blocks Method and the SCS Method, respectively. The results obtained showed that all the basins underwent an urbanization process and, consequently, an increase in the average CN and concentration time over the years. The hydrographs showed that the peak flow and the peak time were, respectively, increasing and decreasing over the years.

Keywords: Urbanization; Remote sensing; Surface runoff

1 INTRODUÇÃO

O aumento da intensidade pluviométrica em algumas regiões, aliada à falta de planejamento urbano, tem sido motivo de inundações frequentes em municípios de médio e grande porte em todas as regiões do mundo. Neste sentido, para munir a administração pública e a comunidade científica de dados relativos ao escoamento superficial, são necessários estudos históricos relativos às precipitações e vazões de pico nas bacias hidrográficas urbanas.

A partir da segunda metade do século XX, pôde-se observar uma migração acentuada de residentes da zona rural em direção às áreas urbanas (IBGE, 2010). Esse fenômeno, ligado a uma taxa de crescimento populacional positiva do Brasil, acarretou na expansão da mancha urbana e no adensamento populacional, contribuindo para o aumento das áreas impermeáveis dos municípios. Tal processo, ao ocorrer de maneira desordenada, resultava num maior volume de escoamento superficial dentro de menor intervalo de tempo, apresentando como consequência direta, a redução do tempo de concentração de determinada bacia hidrográfica e, conseqüentemente, aumento do risco de inundações (Tucci, 2001).

Ademais, maximizando os riscos de incidência de inundações nos grandes centros urbanos, cita-se a ausência de sistemas adequados de drenagem e de regras mais rígidas para o uso e ocupação do solo, assim como a ocupação irregular das margens dos corpos hídricos.

O Método CN-SCS (*Curve Number – Soil Conservation Service*), é um modelo chuva-deflúvio para estimativa do escoamento superficial em bacias rurais e urbanas. Ele consiste na aproximação empírica entre um dado evento de chuva e as condições de superfície da bacia hidrográfica, a partir de dados de precipitação, classe hidrológica, umidade antecedente do solo e seu tipo de ocupação. A junção deste método com o sensoriamento remoto possibilita a obtenção da variação temporal do solo e estimativa de vazões de escoamento superficial. Liu e Li (2008), buscando encontrar uma relação entre os valores de escoamento medidos em uma estação hidrológica, localizada na saída da bacia hidrográfica, e os valores de escoamento calculados a partir do Método do SCS, encontraram uma precisão de 75%, demonstrando que a integração de sensoriamento remoto e o modelo do SCS formam uma poderosa ferramenta de simulação do escoamento superficial.

Ao analisar o município de Londrina/PR pode-se observar, anualmente, principalmente entre os meses de dezembro e fevereiro, problemas de inundações decorrentes do grande volume de águas pluviais direcionado às galerias dos sistemas de drenagem e, conseqüentemente, aos cursos d'água naturais e artificiais. É o caso do sistema de lagos e canais que formam o Lago Igapó (Chang, 2016), que frequentemente transborda, causando danos ambientais, sociais e prejuízos financeiros ao município e à população.

Desta forma, para interromper o cenário atual de aumento da vazão acima da capacidade dos canais inseridos no meio urbano, não bastam apenas medidas estruturais que transferem o problema para jusante, mas devem-se buscar, principalmente, soluções não estruturais que possam reduzir as vazões aduzidas para essas estruturas. Vergutz, Pereira e Schmidt (2019), ao estudarem a bacia hidrográfica São Pedro, no perímetro urbano do município de Uberlândia (MG), apontam os benefícios trazidos pela implantação de reservatórios de detenção. Estes observaram que, ao variar as dimensões dos reservatórios, era possível alterar as vazões superficiais da bacia hidrográfica para condições de pré-urbanização. Já Palla e Gnecco

(2015), utilizando como objeto de estudo a cidade de Génova (Itália), demonstram que a redução de 36% da área efetiva impermeabilizada utilizando telhados verdes e pavimentos porosos, reduz em até 0,45 a vazão de pico do hidrograma.

No entanto, políticas compensatórias de drenagem urbana, como as citadas no parágrafo anterior, só foram implantadas no início do ano de 2021 no município de Londrina/PR. Anteriormente, tais políticas praticamente inexistiam, com exceção da Resolução nº 18 do Comsemma (Londrina, 2009), que orienta sobre o uso racional da água ao recomendar a adoção de sistemas de aproveitamento de águas pluviais nas edificações com área acima de 200 m².

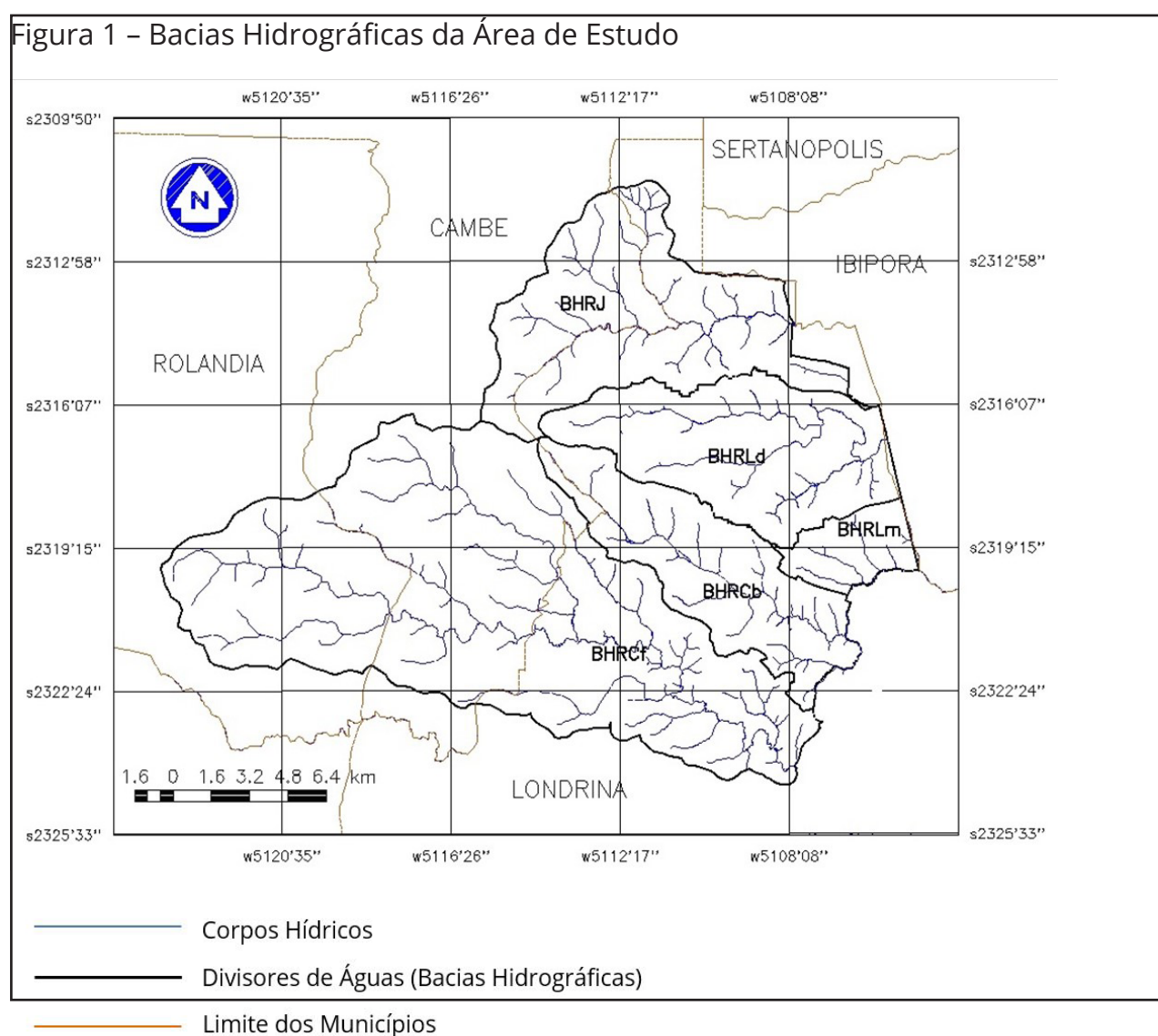
Portanto, tendo em vista que o município estudado sofreu intensa urbanização nas últimas décadas, similarmente ao que ocorreu em outras regiões do Brasil, esta pesquisa buscou obter, por sensoriamento remoto, informações sobre a evolução do uso e ocupação do solo, a partir da análise de imagens de satélites, e implementá-las, utilizando o Método do SCS, para fornecer hidrogramas de escoamento superficial para cinco bacias hidrográficas inseridas no perímetro urbano da área de estudo. E assim, construir um banco de informações sobre a evolução das vazões de projeto a serem utilizadas para dimensionamento dos sistemas de drenagem urbana do município em suas áreas de expansão e adaptação das áreas que hoje apresentam problemas relacionados ao escoamento de águas pluviais, a partir da elaboração de cenários futuros de escoamento superficial com base nas projeções do crescimento urbano municipal.

2 MÉTODO

Para o desenvolvimento do estudo proposto foram apresentadas as informações a respeito da área de estudo, obtenção e análise das imagens de satélite do local, determinação dos hietogramas, por meio do Método dos Blocos Alternados, e geração dos hidrogramas de projeto, utilizando o Método do SCS, e, por fim, a obtenção das condições de saturação das bacias hidrográficas estimadas por intermédio da população de saturação do município.

2.1 Área de estudo

Este estudo analisou as cinco bacias hidrográficas inseridas no perímetro urbano do município de Londrina/PR, mesmo as que adentram sobre outros municípios vizinhos, como Rolândia e Cambé, conforme indicado na Figura 1. Deste modo, as bacias analisadas foram: Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jacutinga (BHRJ), Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lindóia (BHRLd), Bacia Hidrográfica do Ribeirão Limoeiro (BHRLm), Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cambé (BHRCb) e Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cafezal (BHRCf).



Fonte: Acervo particular dos autores (outubro de 2019)

Vale ressaltar que a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Três Bocas não foi incluída no estudo, pois apesar de estar situada dentro do perímetro urbano do município, não apresenta sinais significativos de urbanização.

As características físicas das bacias hidrográficas, obtidas por meio do software SPRING 5.5.2, podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados morfométricos das bacias hidrográficas

DADOS MORFOMÉTRICOS					
PARÂMETROS	BHRJ	BHRLd	BHRLm	BHRCb	BHRCf
Área de Drenagem (km ²)	78,04	62,99	13,80	51,75	202,83
Perímetro da Bacia (km)	52,06	41,36	18,21	44,58	76,04
Comprimento do Curso Principal (km)	14,32	18,02	6,98	16,44	36,87
Comprimento total dos cursos d'água (km)	70,98	53,45	14,22	39,81	156,75
Altitude Mínima (m)	463	452	456	427	424
Altitude Máxima (m)	660	626	588	611	760

Fonte: Mansour (2019)

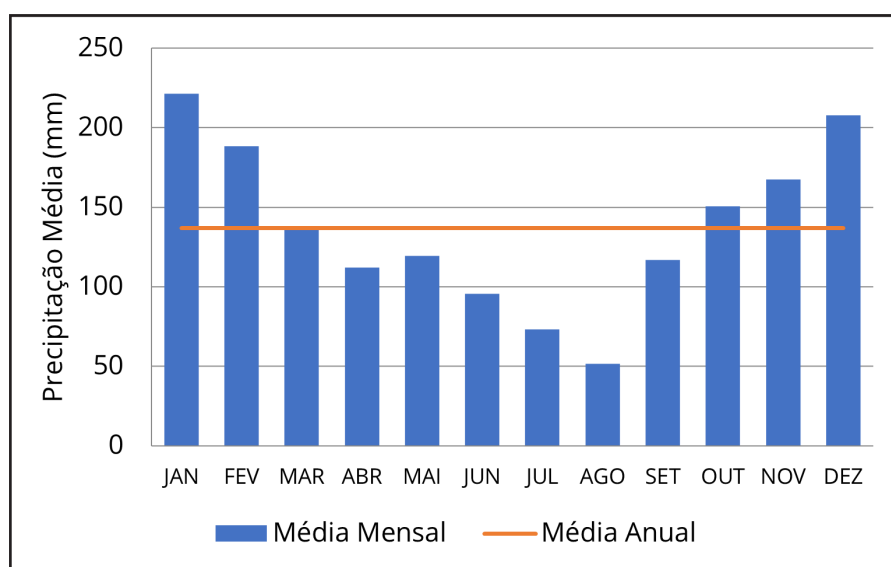
A cidade de Londrina/ PR abrange uma área aproximada de 1.653 Km² (IBGE, 2010) e está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi (BHT), localizada entre as coordenadas geográficas 22° 47' 22" e 25° 36' 25" de latitude sul, e 49° 36' 00" e 51° 27' 36" de longitude oeste. A BHT possui área de 24.712 km², correspondente a 13% da área total do Estado do Paraná e compõe uma das bacias hidrográficas da Região Hidrológica do Paraná (Pinese, 2002).

De acordo com os dados históricos do município, obtidos entre 1976 e 2017 pelo IAPAR (2018), o clima é classificado como subtropical úmido (Cfa – Método de Köppen) com temperatura média anual do ar de 21,1°C, umidade relativa média de 70,5% e precipitação anual média de 1.641mm, e média anual de 122 dias de chuva. A Figura 2 apresenta a precipitação média mensal e anual do local de estudo, mostrando que ocorrem chuvas em todas as estações, porém com menor volume no período de inverno.

Segundo Cavalcante *et al.* (2007), a geologia da região é caracterizada por

extensos derrames de basalto da Formação Serra Geral e o solo sobrejacente à rocha é de origem residual. Desta forma, o perfil geotécnico característico é constituído por um horizonte superficial evoluído (horizonte B), apresentando fortes características de solo laterítico, com cerca de 10 metros de espessura, que origina solos bem drenados, com elevado volume de vazios e baixa massa específica aparente, em consequência da estrutura macroporosa e microporosa, características dos solos lateríticos.

Figura 2 – Precipitação média mensal e anual da estação 2351003 (latitude 23° 18' e longitude 51° 09'), instalada em Londrina/PR, com dados obtidos entre os anos de 1976 e 2017



Fonte: Adaptado de IAPAR (2018)

2.2 Obtenção e Análise das Imagens de Satélites

A fim de observar a variação temporal da cobertura do solo, foram obtidas quatro imagens de satélite, com intervalo de 10 anos entre elas, sendo a primeira referente ao ano de 1985 e as demais referentes a 1995, 2005 e 2015. Tais imagens são oriundas dos satélites LANDSAT-5 e LANDSAT-8, que foram obtidas, gratuitamente, no portal eletrônico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Os satélites da série LANDSAT apresentam vantagens na realização de estudos

temporais quando comparados às imagens fornecidas por outras missões espaciais, uma vez que tais satélites permanecem constantemente imageando a superfície terrestre e as imagens obtidas são armazenadas em um banco de dados, o que permite a sua recuperação (INPE, 2018). Além disso, ao comparar especificamente com a missão CBERS, o LANDSAT possui um banco de dados mais abrangente ao fornecer imagens desde o ano de 1972.

O processo de delimitação e análise das imagens foi realizado no software SPRING 5.5.2 e consistiu, basicamente, em quatro etapas. Primeiramente, as imagens foram ilustradas por meio das composições de cores luz (RGB), assim, selecionaram-se bandas espectrais das imagens e a cada uma delas atribuíram-se uma das cores (R-vermelho, G-verde, B-azul), conforme indicado no Quadro 1.

Quadro 1 – Imagens de satélite utilizadas

DATA	SATÉLITE	INSTRUMENTO	ÓRBITA	PONTO	BANDAS
23/07/1985	LANDSAT-5	MSS e TM	222	076	B3 - B4 - B5
23/10/1995	LANDSAT-5	MSS e TM	222	076	B3 - B4 - B5
09/04/2005	LANDSAT-5	MSS e TM	222	076	B3 - B4 - B5
11/08/2015	LANDSAT-8	OLI e TIRS	222	076	B4 - B5 - B6

Fonte: Organização dos autores

Após a etapa descrita anteriormente, efetuou-se o georreferenciamento das imagens, a partir de uma imagem com georreferenciamento preciso, obtida no portal eletrônico do INPE, denominada GLS-LANDSAT, datada de 15/06/2006, da órbita 222/076. Tal processo é fundamental para a realização deste estudo, uma vez que ele unifica o referencial de todas as imagens dos diferentes anos analisados.

O processo de georreferenciamento foi realizado utilizando-se da função “registro” do software SPRING 5.5.2. A fim de quantificar a qualidade do processo realizado, o software informa o erro, em *pixels*, dos pontos de controle após o posicionamento de seis ou mais pontos de controle pelo operador. Desta forma, buscando uma boa qualidade no processo de registro, fixou-se em 0,6 *pixels* o limite

máximo para aceitação da imagem georreferenciada.

Posteriormente, as bacias hidrográficas contidas no perímetro urbano do município foram delimitadas a partir de arquivos shapefile (SHP), obtidos na página eletrônica do Sistema de Informação Geográfica de Londrina (Siglon, 2018), e a critério de validação, utilizou-se uma imagem SRTM (SF-22-Y-D) da região estudada, obtida na página eletrônica da EMBRAPA (2017). Tal imagem identifica em preto os pontos mais baixos, os quais seriam os corpos hídricos e, em branco os pontos mais altos – divisores de água.

Finalmente, realizou-se a classificação supervisionada por regiões, por meio do algoritmo classificador *Bhattacharya*, método que permite boa aproximação com a classificação real de uma imagem (Disperati, Servello e Oliveira, 2008; Cândido, Silva e Paranhos Filho, 2015). Como as imagens disponibilizadas gratuitamente pelo INPE possuem média resolução (30 metros), as regiões foram associadas à apenas cinco tipos de cobertura de solo, devido à dificuldade em analisar áreas com características semelhantes por ser uma imagem que pode ser considerada de baixa resolução. Deste modo, as chaves estabelecidas para determinação da ocupação do solo foram: água, solo exposto, vegetação rasteira, vegetação densa e urbanização.

Vale ressaltar que a qualidade da delimitação das áreas de cobertura do solo está diretamente relacionada ao conhecimento do operador sobre a área estudada, portanto, o auxílio de outros softwares que fornecem imagem com melhores resoluções, como o GOOGLE EARTH, e até mesmo visitas em campo foram fundamentais para a escolha mais acertada da cobertura do solo de alguns pontos duvidosos da região.

2.3 Obtenção de Hietogramas e Hidrogramas

Para a geração dos hietogramas foi utilizada a distribuição temporal da chuva, determinada pelo Método dos Blocos Alternados, com pico de vazão na metade da duração da chuva. Para isso, utilizou-se a equação de Intensidade – Duração - Frequência (IDF) desenvolvida por Fendrich (2011), representada na Equação 1.

$$i = \frac{1636,44 * T_r^{0,148}}{(t_d + 17)^{0,858}} \quad (1)$$

onde:

i = intensidade pluviométrica, em mm.h-1;

T_r = tempo de retorno, em anos;

t_d = tempo de duração, em minutos;

Após a obtenção dos hietogramas, com intervalo de tempo de 10 minutos, as alturas de precipitação foram acumuladas para correlacionar a precipitação acumulada com a chuva excedente ou chuva efetiva (Q), obtida através do Método do SCS, constituído pelas Equações 2 e 3.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (2)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

onde:

Q: precipitação excedente ou efetiva, em mm;

P: precipitação, em mm;

I_a : abstração inicial, em mm;

S: potencial máximo de retenção após começar o escoamento, em mm;

CN: coeficiente curva número (adimensional);

Como determinado empiricamente pelo *Soil Conservation Service* nos Estados Unidos, considerou-se que a abstração inicial corresponde a 20% do potencial máximo de retenção após o início do escoamento.

O coeficiente CN foi determinado a partir da premissa estabelecida por Chang (2016), que realizou uma média ponderada para determinar o CN médio de cada uma das coberturas de solo estabelecidas. O Quadro 2 indica a porcentagem de cada cobertura de solo considerada na média ponderada e o CN médio de cada ocupação. Para determinar os valores de CN, foram adotadas os seguintes princípios: solos do grupo hidrológico "C" e

condição II de umidade antecedente do solo.

Quadro 2 – Ponderação de CN por tipo de utilização e cobertura do solo

Utilização ou Cobertura do Solo	Ponderação	CN médio
Urbanizada	20%: Zonas Comerciais e Escritórios 60%: Lotes residenciais com área impermeável de 65% 10%: Vias asfaltadas com drenagem de água pluvial 10%: Parques de estacionamentos, telhados, viadutos, etc.	92
Vegetação Densa	25%: Bosques (cobertura ruim) 75% Florestas (cobertura boa)	72
Vegetação Rasteira	20%: Zonas cultivadas: sem conservação do solo 30%: Zonas cultivadas: com conservação do solo 30%: Pastagens ou terrenos em más condições 20%: Prado em boas condições	81
Solo Exposto	100%: Terrenos baldios em boas condições	74

Fonte: Chang (2016)

Em seguida, foram obtidos os valores do tempo de concentração das bacias hidrográficas para cada ano estudado, a partir da Equação 4, desenvolvida por George Ribeiro, em 1961 (Silveira, 2005). E, logo após, pela correlação entre os valores de tempo de pico e vazão de pico, mostrada na Tabela 2 (McCUEN, 1998), obtiveram-se os hidrogramas unitários sintéticos curvilíneos por meio do Método do SCS.

$$t_c = \frac{16 * L_t}{(1,05 - 0,20 * p) * (100 * S_m)^{0,04}} \quad (4)$$

Onde:

t_c : tempo de concentração, em minutos;

L_t : comprimento do talvegue, em Km;

S_m : declividade média da bacia, em m.m-1;

p : fração da área da bacia coberta por vegetação (adimensional);

A partir dos valores de escoamento superficial ou precipitação excedente, representado pela variável “Q” na Equação 2, e do hidrograma unitário sintético curvilíneo, ambos para intervalos regulares de 10 minutos, e aplicando os princípios da proporcionalidade das descargas e da superposição, processo denominado convolução

(Collischonn; Dornelles, 2015), finalmente obtiveram-se os dados do hidrograma de escoamento superficial ou hidrograma de cheia.

Tabela 2 – Correlações para obtenção do hidrograma unitário curvilíneo adimensional do Método SCS

t/t_p	Q/Q_p	t/t_p	Q/Q_p	t/t_p	Q/Q_p
0,000	0,000	1,100	0,990	2,400	0,147
0,100	0,030	1,200	0,930	2,600	0,107
0,200	0,100	1,300	0,860	2,800	0,077
0,300	0,190	1,400	0,780	3,000	0,055
0,400	0,310	1,500	0,680	3,200	0,040
0,500	0,470	1,600	0,560	3,400	0,029
0,600	0,660	1,700	0,460	3,600	0,021
0,700	0,820	1,800	0,390	3,800	0,015
0,800	0,930	1,900	0,330	4,000	0,011
0,900	0,990	2,000	0,280	4,500	0,005
1,000	1,000	2,200	0,207	5,000	0,000

Fonte: McCuen (1998)

2.4 Previsão de escoamentos futuros para as bacias hidrográficas

A partir do Método de Crescimento Logístico, representado pelas Equações 5 e 6, obtiveram-se as projeções de população para os próximos anos nas bacias estudadas, até atingir a população de saturação – capacidade suporte (K). Em seguida, estabeleceu-se uma correlação entre o crescimento populacional e o aumento da urbanização, estimando, deste modo, a porcentagem de saturação da bacia hidrográfica referente à área urbanizada. Depois, através da correlação entre a porcentagem de urbanização e o coeficiente CN médio, determinou-se o CN médio de saturação de cada uma das bacias hidrográficas para a taxa de urbanização de saturação.

Após a obtenção dos valores de saturação da porcentagem de urbanização e do CN médio, aplicaram-se tais dados na Equação 4 para definir o tempo de concentração de cada bacia hidrográfica. A seguir, realizaram-se os passos

descritos no item anterior, para obter os hidrogramas de escoamento superficial para as bacias hidrográficas em sua condição de saturação.

$$N = \frac{K}{1 + (K - N_0) * e^{-rt}} \quad (5)$$

$$K = \frac{2 * N_0 * N_1 * N_2 - N_1^2 * (N_0 + N_2)}{(N_0 * N_2) - N_1^2} \quad (6)$$

onde:

N: número da população no ano "t";

K: população de saturação;

N_0, N_1, N_2 : número da população nos anos t_0, t_1, t_2 ;

r: coeficiente obtido pela análise da regressão;

t: ano;

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

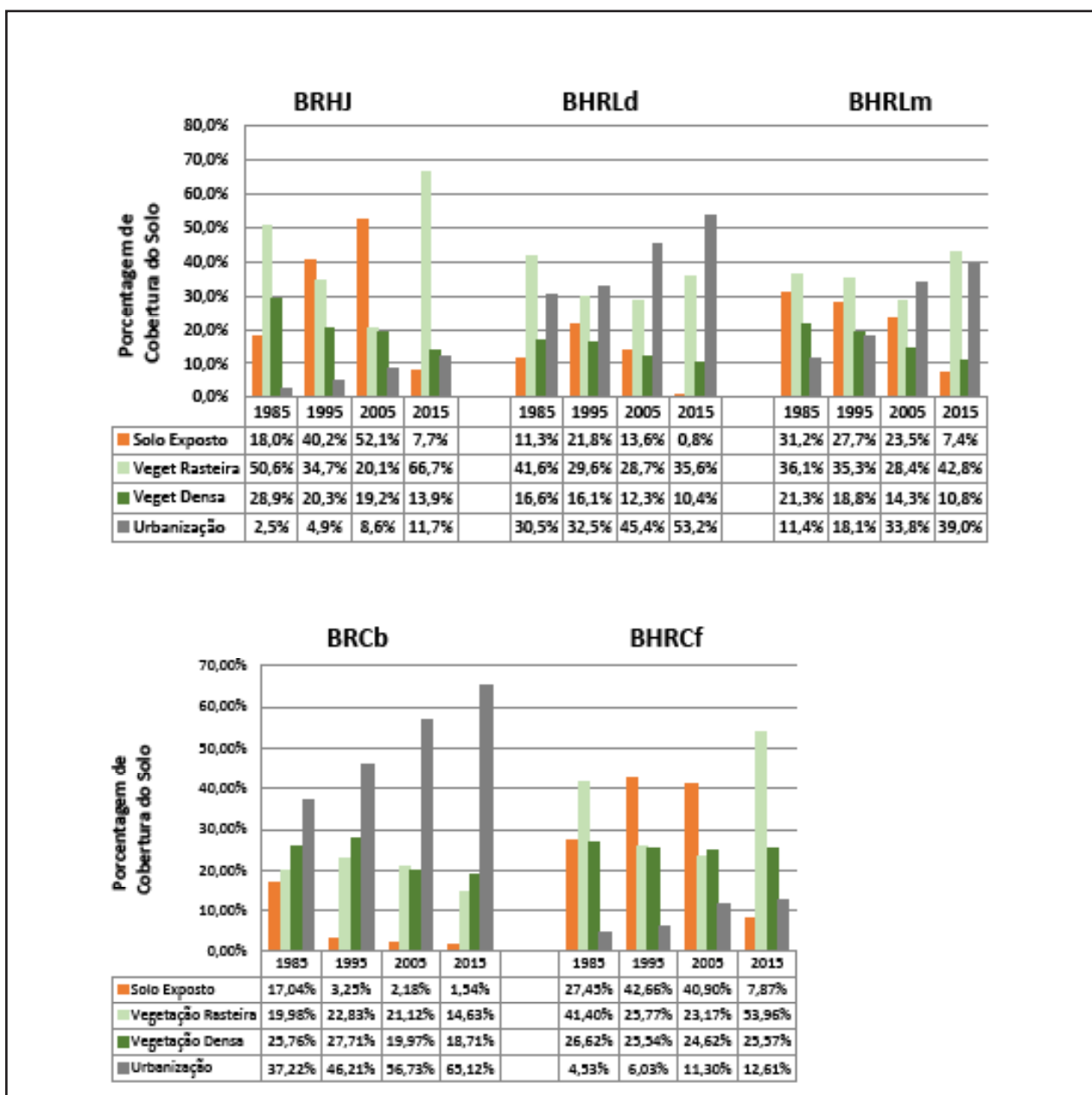
3.1 Classificação de Uso e Cobertura do Solo

A partir da análise das imagens, por meio do software SPRING 5.5.2, pôde-se obter a área ocupada por cada tipo de ocupação de solo pré-determinada. Deste modo, desenvolveram-se os gráficos demonstrados na Figura 3, que ilustram a variação da cobertura do solo com o passar dos anos, de cada bacia hidrográfica estudada.

Percebe-se que todas as bacias hidrográficas apresentaram aumento da área urbanizada entre os anos de 1985 e 2015. Dentre elas, torna-se evidente o acentuado processo de urbanização sofrido pela BHRCb e BHRLd, uma vez que em 1985 contavam com, respectivamente, 37,22% e 30,50% da área total urbanizada e, em 2015, tais valores eram de, aproximadamente, 56,73% e 45,41%.

No outro extremo, tem-se a BHRJ e BHRCf, que apesar de terem aumentado suas áreas urbanizadas em 4,68 e 2,78 vezes no período analisado. Em 2015 possuíam apenas 11,73% e 12,61% de suas áreas tomadas por urbanização, respectivamente, mantendo-se ainda como bacias predominantemente agrícolas.

Figura 3 – Variação temporal do uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas estudadas



Fonte: Acervo particular dos autores (outubro de 2019)

3.2 Obtenção do Coeficiente CN

A partir do CN médio obtido pelo processo de ponderação proposto por Chang (2016), desenvolveu-se a Tabela 3, que demonstra a variação do coeficiente CN médio

das bacias hidrográficas no decorrer do tempo.

Tabela 3 – Variação temporal dos valores de CN Médio das bacias hidrográficas

Bacia Hidrográfica	1985	1995	2005	2015
BHRJ	77,42	76,89	76,57	80,50
BHRLd	82,08	81,61	83,94	85,85
BHRLm	78,16	79,36	81,79	83,80
BHRCb	81,58	83,36	85,29	86,37
BHRCf	77,18	76,38	77,16	79,53

Fonte: Organização dos autores

Os resultados indicados na Tabela 3 demonstram que o CN médio de todas as bacias hidrográficas apresentou crescimento, apesar de haver diminuição do coeficiente quando tomado algum intervalo de ano isolado. É o caso da BHRLd e da BHRCf, que no intervalo entre os anos de 1985 e 1995 apresentaram redução, provavelmente em virtude da variação acentuada da vegetação rasteira em comparação ao solo exposto.

De modo geral, o movimento ascendente do valor do CN médio das bacias hidrográficas ocorreu, principalmente, em virtude do aumento da urbanização e consequente diminuição das áreas permeáveis.

3.2 Tempo de Concentração

A variação do tempo de concentração, obtido pela Equação 4, indica que todas as bacias hidrográficas apresentaram decréscimo de seu valor com o decorrer do tempo. A Tabela 4 expõe o tempo de concentração obtido para cada ano estudado.

Tabela 4 – Tempo de concentração, em minutos, de cada bacia hidrográfica e ano estudado

Tempo de Concentração (minutos)				
Bacia Hidrográfica	1985	1995	2005	2015
BHRJ	264,56	263,13	260,84	258,99
BHRLd	316,90	315,53	306,89	301,91
BHRLm	124,34	122,47	118,28	116,95

BHRCb	283,28	277,88	271,81	267,15
BHRCf	689,26	686,86	678,56	676,54

Fonte: Organização dos autores

Dentre as bacias analisadas, observa-se que a BHRLm apresentou o maior decréscimo do tempo de concentração, com variação total de -5,94%, ao relacionar os valores obtidos em 1985 com 2015, seguida da BHRCb, BHRLd, BHRJ e BHRCf que possuem, respectivamente, variações de -5,69%, -4,73%, -2,11% e -1,84%.

A magnitude da variação se dá em função do crescimento da área urbanizada da bacia hidrográfica, uma vez que o fator variável na Equação 4 é, justamente, a fração da bacia hidrográfica coberta por áreas permeáveis.

3.3 Hidrogramas de Escoamento Superficial

Para simulação de diversos cenários, foram elaborados os hidrogramas de escoamento superficial de todas as bacias hidrográficas estudadas. Para tanto, foram adotados os valores de CN e t_c obtidos a partir da metodologia citada. O tempo de duração da chuva (t_d) igual ao tempo de concentração (t_c) e tempo de retorno (T_r) de 5, 25, 50 e 100 anos.

A Tabela 5, elaborada a partir dos resultados alcançados no desenvolvimento dos hidrogramas, mostra as vazões de pico obtidas para cada bacia hidrográfica e ano estudado.

A BHRJ, que possui predominância de atividade agrícola, apresentou pequeno decréscimo na vazão de pico entre os anos de 1985 a 2005. Isto pode ser explicado em virtude do aumento da cobertura de solo exposto em detrimento à vegetação rasteira, uma vez que o valor de CN para solo exposto é inferior à vegetação rasteira, conforme demonstrado no Quadro 2. Todavia, de 2005 para 2015, com o aumento de 3,11 pontos percentuais da área urbanizada e de 46,63 pontos percentuais da vegetação rasteira em relação ao solo exposto, houve um acréscimo expressivo da vazão de pico.

A BHRLd e BHRCf apresentaram comportamento similar à BHRJ, entre os anos

de 1985 a 1995, com a redução da vazão de pico. Entretanto, a partir de 1995, com a crescente urbanização destas bacias observou-se aumento da vazão de pico.

Os resultados obtidos para a BHRLm e BHRCb indicam que a vazão de pico aumentou em todos os intervalos de tempo estudados. Além disso, dentre todas as bacias hidrográficas analisadas, elas apresentaram a maior variação da vazão de pico, principalmente entre os anos de 1995 e 2005, com um acréscimo da vazão de pico de 8,84% para a BHRLm e de 7,46% para a BHRCb, ao considerar um tempo de retorno igual a 5 anos.

Tabela 5 – Tempo de concentração, em minutos, de cada bacia hidrográfica e ano estudado

BHRJ					BHRLd				
T_r (anos)	Vazão de Pico (m³.s⁻¹)				T_r (anos)	Vazão de Pico (m³.s⁻¹)			
	1985	1995	2005	2015		1985	1995	2005	2015
5	170,74	168,72	168,66	191,15	5	140,08	138,70	152,15	162,07
25	244,21	241,84	241,37	269,25	25	195,27	193,95	210,50	221,95
50	282,77	280,28	279,96	310,24	50	224,40	222,84	240,87	253,25
100	326,99	324,38	324,34	356,90	100	256,96	255,59	275,15	288,07

BHRLm					BHRCb				
T_r (anos)	Vazão de Pico (m³.s⁻¹)				T_r (anos)	Vazão de Pico (m³.s⁻¹)			
	1985	1995	2005	2015		1985	1995	2005	2015
5	50,77	53,60	58,34	63,04	5	122,48	131,66	141,48	148,51
25	73,09	76,58	82,40	88,01	25	171,58	182,76	194,73	202,98
50	84,71	88,96	95,26	101,31	50	197,51	209,37	222,37	231,44
100	98,33	103,00	109,80	116,29	100	226,45	239,48	253,52	263,28

BHRCf				
T_r (anos)	Vazão de Pico (m³.s⁻¹)			
	1985	1995	2005	2015
5	222,83	218,73	225,78	241,44
25	314,69	309,90	318,87	337,40
50	363,18	358,13	368,03	387,87
100	417,76	412,63	423,52	444,69

Fonte: Organização dos autores

Ao relacionar os valores de CN médio entre os anos de 1985 e 2015 com os valores de vazão de pico, confirma-se a alta sensibilidade deste último fator, conforme

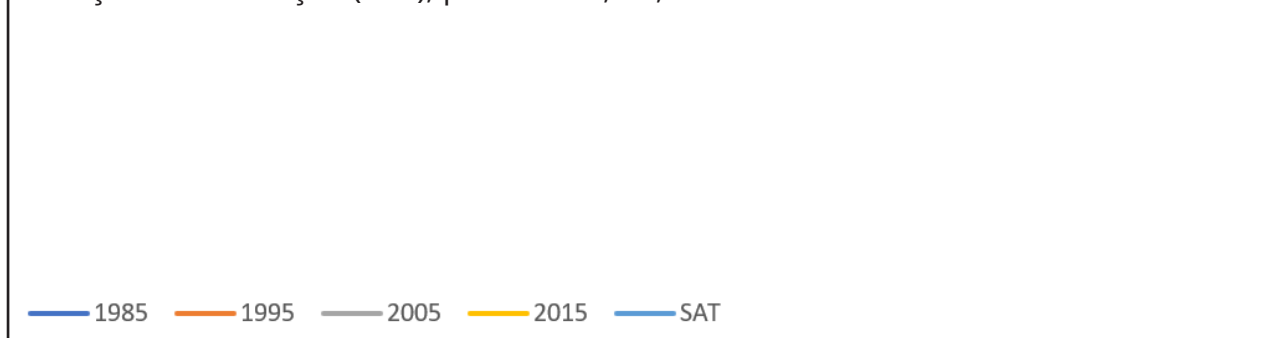
apontado por Paulino (2014). A título de exemplo, pode-se citar a BHRLm, que ao sofrer um acréscimo de 7,2% do coeficiente CN em 30 anos, culminou em um aumento de 24,2% da vazão de pico do hidrograma de escoamento superficial, ao considerar um tempo de retorno de 5 anos.

3.4 Previsão dos Hidrogramas de Escoamento Superficial a partir das projeções da população

A partir das projeções populacionais, estimadas de acordo com o Método do Crescimento Logístico, pôde-se estimar os hidrogramas de escoamento superficial para todas as bacias hidrográficas nos anos estudados e na condição de saturação, conforme pode-se observar nas Figuras 4 a 8.

Pode-se perceber em todas as bacias hidrográficas que, com o contínuo crescimento populacional e, considerando que isso irá continuar influenciando o crescimento das áreas impermeáveis, haverá acréscimo do valor das vazões de pico nos hidrogramas. Além disso, tais picos de vazão tendem a ocorrer dentro de um menor intervalo de tempo.

Figura 4 – Hidrogramas de Escoamento Superficial da BHRJ dos anos estudados e condição de saturação (SAT), para $Tr = 5, 25, 50$ e 100 anos



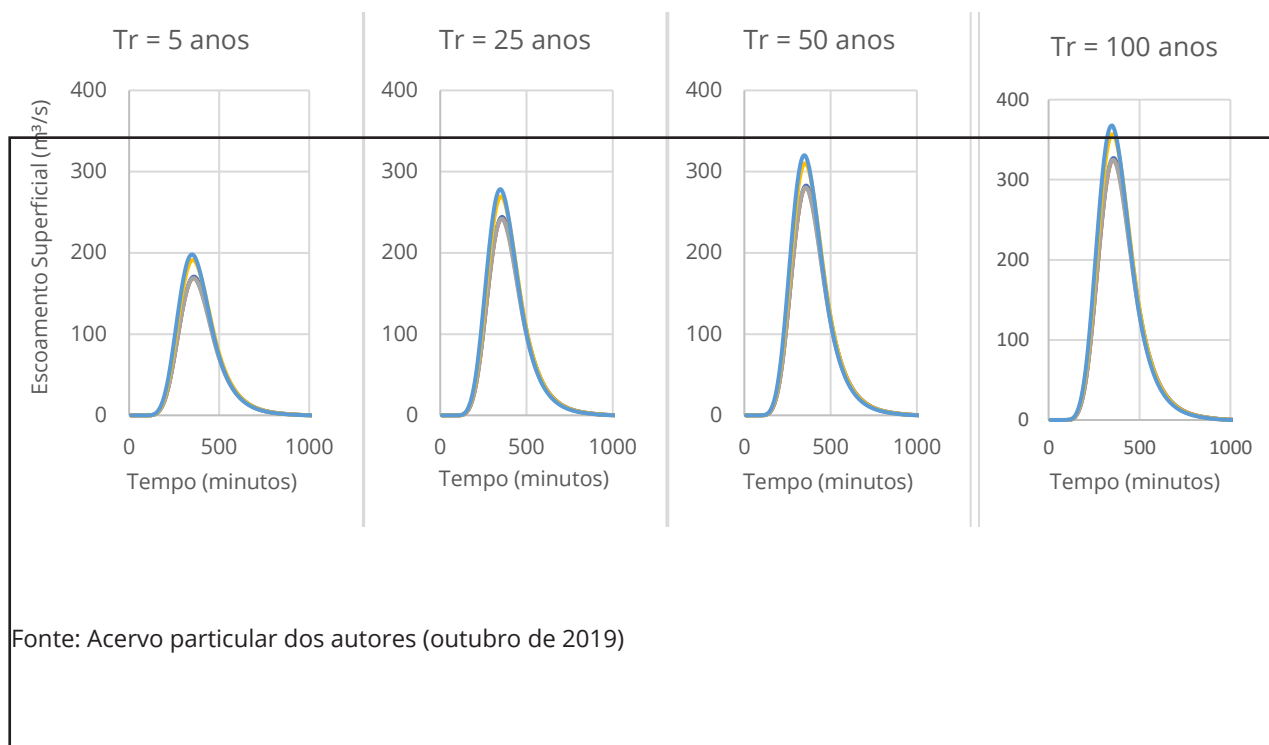


Figura 5 – Hidrogramas de Escoamento Superficial da BHRLd dos anos estudados e condição de saturação (SAT), para $Tr = 5, 25, 50$ e 100 anos

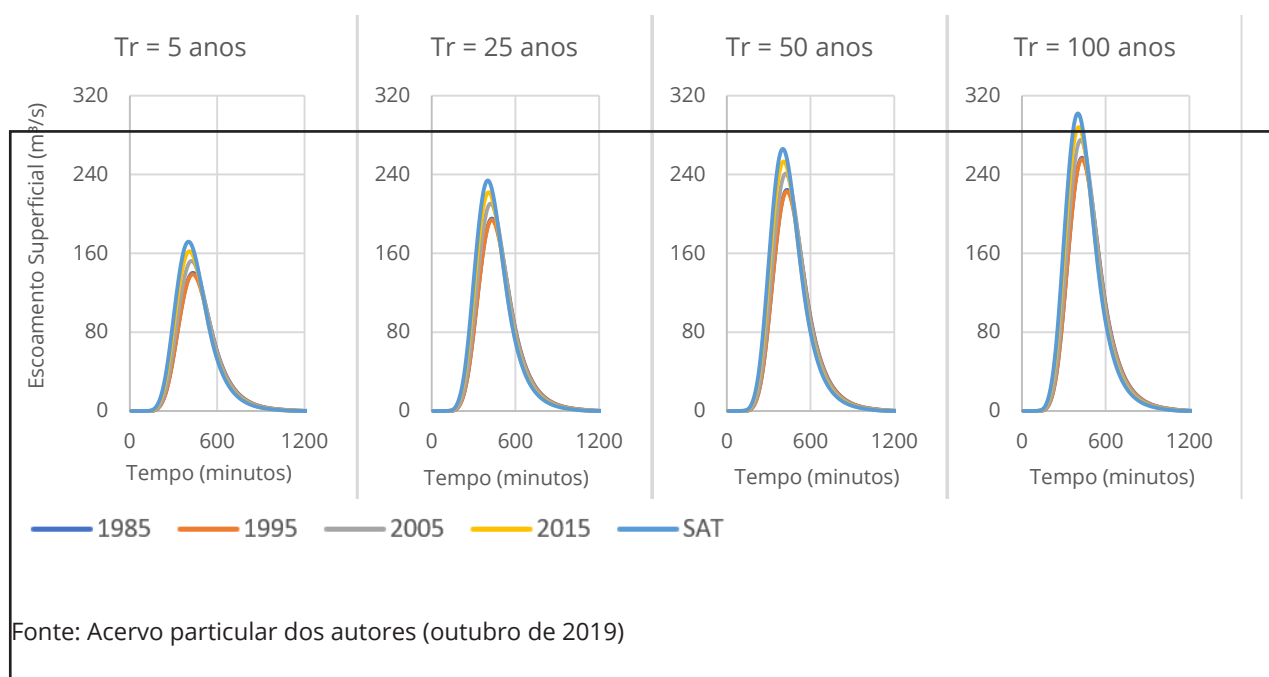
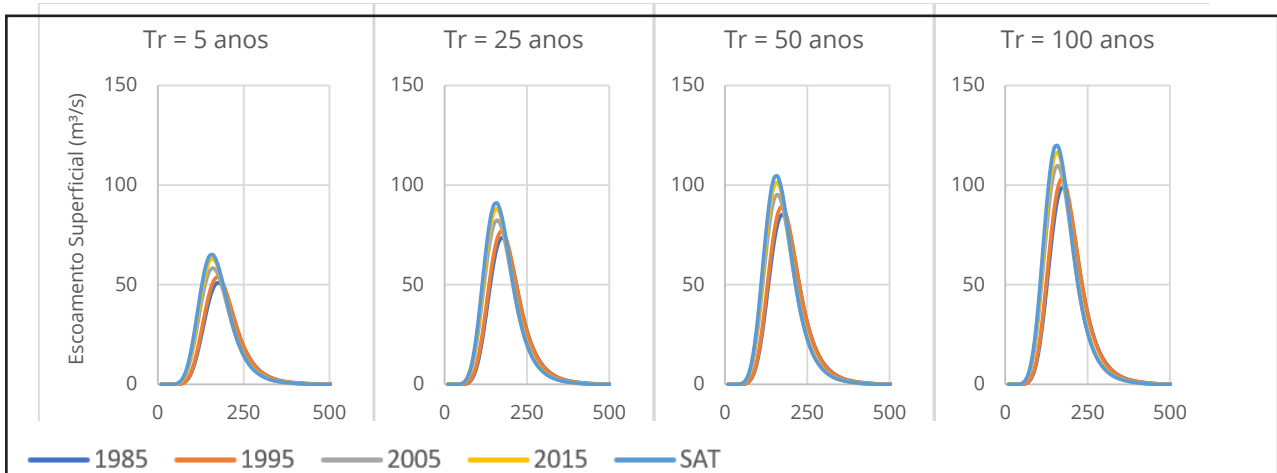


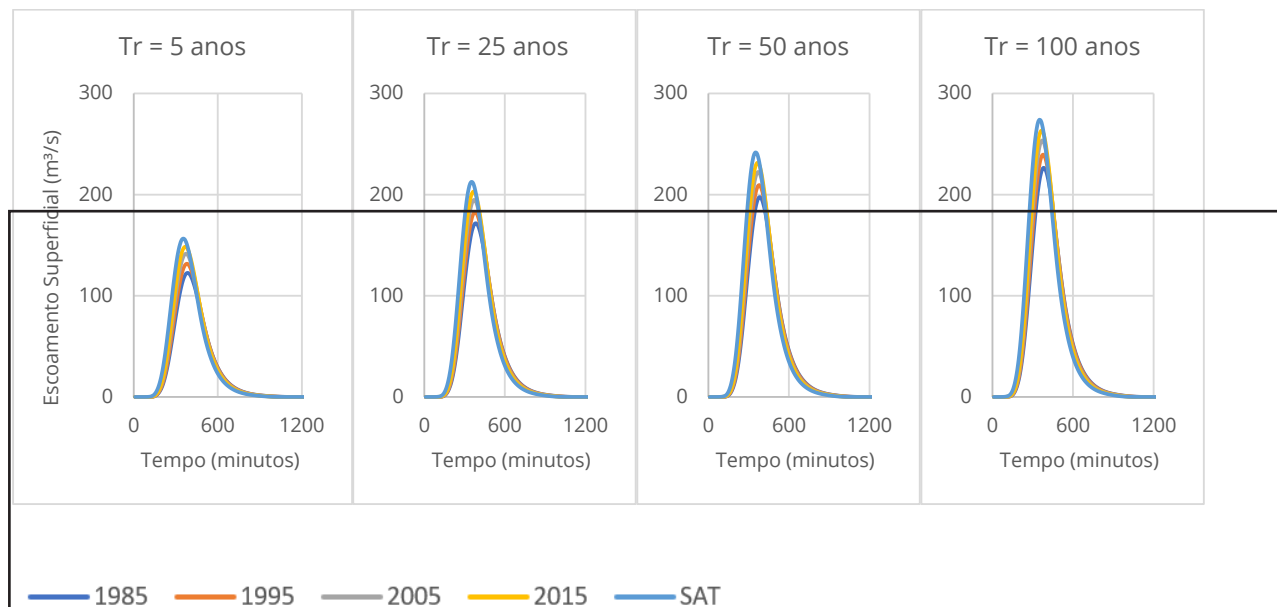
Figura 6 – Hidrogramas de Escoamento Superficial da BHRLm dos anos estudados e

condição de saturação (SAT), para $Tr = 5, 25, 50$ e 100 anos



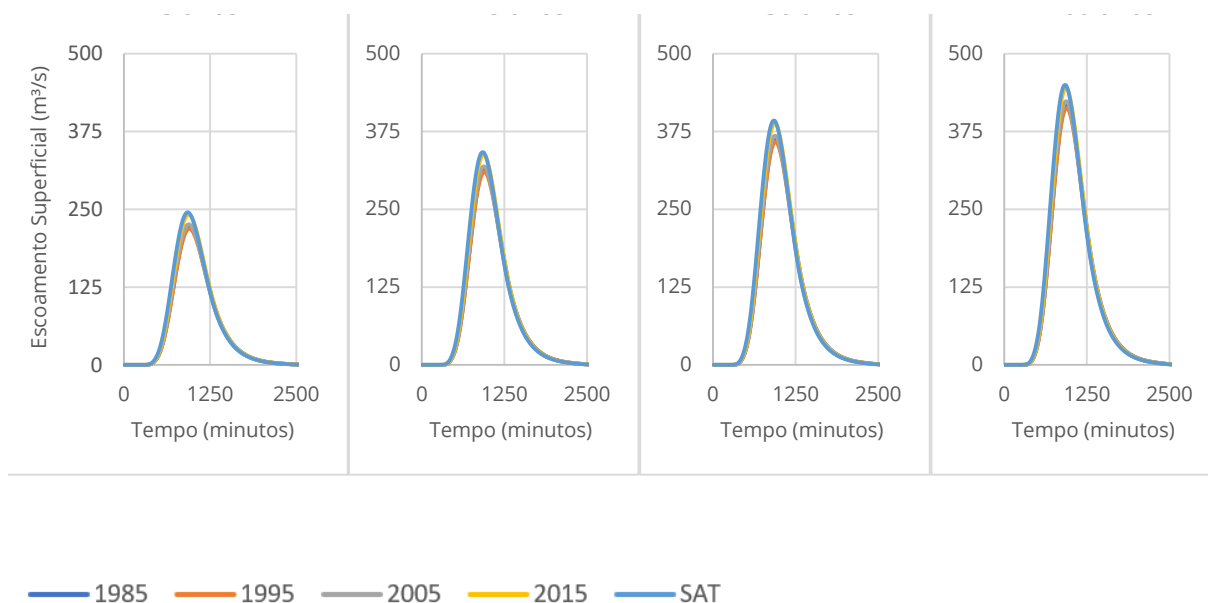
Fonte: Acervo particular dos autores (outubro de 2019)

Figura 7 – Hidrogramas de Escoamento Superficial da BHRCh dos anos estudados e condição de saturação (SAT), para $Tr = 5, 25, 50$ e 100 anos



Fonte: Acervo particular dos autores (outubro de 2019)

Figura 8 – Hidrogramas de Escoamento Superficial da BHRCh dos anos estudados e condição de saturação (SAT), para $Tr = 5, 25, 50$ e 100 anos



Fonte: Acervo particular dos autores (outubro de 2019)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As bacias hidrográficas analisadas apresentam grande variedade em sua extensão, com áreas entre 13,8 a 202,83 Km². Dentre elas, tem-se três com maior urbanização (BHRLd, BHRLm e BHRCb) e duas com áreas predominantemente agrícolas, com solo exposto e vegetações (BHRJ e BHRCf).

O tempo de concentração de todas as bacias hidrográficas apresentou redução com o passar dos anos, possuindo maior variação nas que possuem maiores índices de área urbanizada.

O coeficiente CN médio de todas as bacias hidrográficas apresentou elevação ao considerar todo o período estabelecido. Além disso, verificou-se alta sensibilidade da vazão de pico em relação ao CN médio, uma vez que pequenas variações neste parâmetro foram muito significativas na vazão de pico. Assim, é importante destacar que a fase de análise das imagens é de extrema importância e a utilização de imagens com melhores resoluções devem conferir maior precisão aos resultados.

Deste modo, percebe-se que o aumento desenfreado da urbanização pode causar

acentuada variação nos hidrogramas de cheia das bacias hidrográficas, alertando-se para a necessidade de projetos públicos que busquem soluções estruturais, ou não, para mitigar os efeitos da urbanização nos grandes centros urbanos.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Resolução nº 18, de 31 de agosto de 2009. Estabelece o Programa Racional de Uso da Água. Conselho Municipal Do Meio Ambiente. **Jornal Oficial**, Londrina, PR, 10 de setembro de 2009.

CÂNDIDO, A. K. A. A.; SILVA, N. M.; PARANHOS FILHO, A. C. Imagens de alta resolução espacial de veículos aéreos não tripulados (VANT) no planejamento do uso e ocupação do solo. **Anuário do Instituto de Geociências**, UFRJ, v. 38, n. 1, p. 147-156, 2015.

CAVALCANTE, E. H.; DANZIGER, F. A. B.; GIACHETI, H. L.; SOUZA, A.; KORMANN, A. C. M.; BELINCANTA, A.; PINTO, C. S.; BRANCO, C. J. M. C.; CARVALHO, D.; FERREIRA, C. V.; MARINHO, F. A. M.; CINTRA, J. C. A.; DOURADO, K. C. A.; MORAES, L. S.; ALBUQUERQUE FILHO, L. H.; ALMEIDA, M. S. S.; GUTIERREZ, N. H. M.; ALBUQUERQUE, P. J. R.; CHAMEKI, P. R.; CUNHA, R. P.; TEIXEIRA, R. S.; MENEZES, S. M. Campos Experimentais Brasileiros. **Geotecnia**, Lisboa, v. 111, p. 99-205, 2007.

CHANG, M. M. **Análise Temporal do Uso e Cobertura do Solo e a Relação com Inundações Urbanas na Bacia do Ribeirão Cambé – Londrina/PR**. 2016. 118 p. Dissertação (Mestrado em Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Londrina, 2016.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Downloads do SRTM - PR**. 2017. Disponível em:

<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/pr/pr.htm>. Acesso em: 16 nov. 2017.

FENDRICH, R. **Chuvas intensas para obras de drenagem no Estado do Paraná**. 3. ed. Curitiba: Roberto Fendrich, 2011. 89 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico**. 2010 - Brasil. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8>. Acesso em: 15 ago. 2017.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). **Médias Históricas**. 2018. Disponível em: http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Londrina.htm. Acesso em: 19 abr. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **CBERS**. 2018. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br>. Acesso em: 29 ago. 2018.

LIU, X.; LI, J. Application of SCS Model in Estimation of Runoff from Small Watershed in Loess Plateau

of China. **Chinese Geographical Science**, v. 18, n. 3, p. 235-241, set. 2008.

MANSOUR, A. L. N. **Estimativa do escoamento superficial para bacias urbanas a partir da análise do histórico de uso e ocupação do solo**. 2019. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Londrina, 2019.

MCCUEN, R.H. **Hydrologic analysis and design**. 2. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.

PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. **Journal of Hydrology**, v. 528, p. 631-368, 2015.

PAULINO, P. F. **Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas**. 2014. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PINESE, J. P. P. Síntese Geológica da Bacia do Rio Tibagi. *In*: MEDRI, M. E.; BIANCHINI, E.; SHIBATTA, O. A.; PIMENTA, J. A. (Org.). **A Bacia do Rio Tibagi**. Londrina, 2002. 595 p.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005.

SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA DE LONDRINA (SIGLON). **Downloads**. 2018. Disponível em: http://www.londrina.pr.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=20114&Itemid=1988. Acesso em: 20 abr. 2018.

TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 943 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4).

VERGUTZ, L. A. A.; PEREIRA, C. E.; SCHMIDT, M. A. R. Análise da implantação de reservatórios de retenção de forma que sejam minimizados os impactos causados por inundações. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, p. 1267-1277, 2019.

Contribuições de Autoria

1 – André Luís Nocêra Mansour

Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil

<https://orcid.org/0000-0003-3510-7601> • mansour.andre@uel.br

Contribuição: Primeira Redação, Investigação e Análise Formal

2 – Hemerson Donizete Pinheiro