

## Modelagem chuva-vazão na avaliação de picos de vazão em bacia hidrográfica urbana: córrego Três Pontes (1962 e 2011), Região Metropolitana de São Paulo (SP)

Rainfall-runoff modeling to evaluate peak flows in urban site: Três Pontes Creek (1962 and 2011), São Paulo Metropolitan Region (SP)

Modelo lluvia-escorrentía en la evaluación de caudales máximos en sitio urbano: arroyo Três Pontes (1962 y 2011), Zona Metropolitana de São Paulo (SP)



Yuri Veneziani

Universidade de São Paulo - São Paulo - São Paulo - Brasil

[yuri.veneziani@usp.br](mailto:yuri.veneziani@usp.br)



Juliana da Costa Mantovani

Universidade de São Paulo - São Paulo - São Paulo - Brasil

[juliana.mantovani@usp.br](mailto:juliana.mantovani@usp.br)

**Resumo:** As vazões de pico são indicadores prioritários na gestão das águas urbanas. Pesquisadores e técnicos realizam esforços na compreensão de processos hidráulico-hidrológicos envolvidos para desenvolvimento de soluções técnicas de minimização e mitigação de seus impactos. A falta de séries fluviométricas longas e consistentes restringe as análises dos impactos provenientes da mudança do uso da terra e, conseqüentemente, da adequação de medidas de minimização. Tendo em vista essa limitação, este estudo realizou a avaliação da mudança do pico de vazão na bacia hidrográfica do córrego Três Pontes (10 km<sup>2</sup>) localizada na periferia da Região Metropolitana de São Paulo, por meio da aplicação do modelo hidrológico chuva-vazão Ven Te Chow-SCS em condições de pré-urbanização (1962) e urbanizada (2011). Como pré-requisitos de modelação, obtivemos valores de intensidade de chuvas (IDF), usos da terra, chuvas excedentes, *curve number* e fator de redução de pico. Os resultados demonstraram que a urbanização ocorreu a uma taxa de 12,5ha/ano e ofereceram uma medida da sobrecarga que drenagem urbana sofre em relação à vazão de pico, que nos casos mais representativos (tormenta com ~2 a 3h de duração) aumentaram em aproximadamente 140%.

**Palavras-Chaves:** Modelo chuva-vazão Ven Te Chow-SCS; vazão extrema, bacia urbana, Região Metropolitana de São Paulo.

**Resumen:** Los caudales máximos son indicadores fundamentales en la gestión de aguas urbanas. Investigadores y técnicos han hecho esfuerzos en comprender los procesos hidráulicos-hidrológicos involucrados buscando desarrollar soluciones de ingeniería para mitigar y disminuir sus impactos. La carencia de datos de estaciones de aforo consistentes restringe los análisis de los impactos de los cambios en el uso del suelo y, luego, de las medidas posibles de mitigación. Así, realizamos una evaluación de los cambios del caudal máximo en la cuenca del arroyo Três Pontes (10km<sup>2</sup>), ubicado en la Zona Metropolitana de São Paulo, con aplicación de modelo lluvia-escorrentía Ven Te Chow-SCS en condiciones pre-urbanización (1962) y urbanizada (2011). Como entrada del modelo, obtuvimos valores de intensidad de lluvia (IDF), uso del suelo, lluvia excedente, *curve number* y factor de reducción de pico. Demostramos que la tasa de urbanización fue de 12,5ha/año, sobrecargando el drenaje urbano, lo cual, en casos representativos y ordinarios (tormenta de ~2 a 3h de duración) ampliaron ~140%.

**Palavras-Chaves:** Modelo lluvia-escorrentía Ven Te Chow-SCS; caudal máximo, cuenca urbana, Zona Metropolitana de São Paulo.

**Abstract:** The peak flow is an indicator for urban water management. Along last decades, researchers have made efforts to understand hydrological processes involved in flooding in order to develop technical solutions for urban drainage. However, the lack of historical streamflow consisted data restricts the analysis and assessment of urban impacts and the development of measures to minimize the problem. Given this limitation, this study assessed peak flows in the watershed Três Pontes Creek (10 km<sup>2</sup>) located at Metropolitan Region of São Paulo (SP), through the application of rain-flow model Ven Te Chow-SCS, which was an essential tool to the generation of the peak flow data. The analysis covered two historical periods: a moment before urbanization (1962) and afterwards (2011). Besides extreme flow data, we obtained the intensity of extreme rainfall (by applying intensity-duration-frequency curve), the land use from those two scenarios (1962 e 2011), effective precipitation, curve number (*CN*) and the factor of peak flood wave reduction. The results demonstrated that the urbanization occurred at rate about 12.5 ha/year and offered a parameter of peak discharge, which in the most representative cases (rainfall of 2 until 3 hours) increased about 140%.

**Keywords:** rain-flow hydrologic model Ven Te Chow-SCS; peak flow; urban watershed, Metropolitan Region of São Paulo.

## Introdução

As enchentes representam uma das calamidades públicas mais recorrentes nas regiões metropolitanas brasileiras (CUSTÓDIO, 2002; TUCCI, 2005) e a compreensão deste fenômeno e seus diversos níveis de riscos associados passa, necessariamente, pelo entendimento das características físicas do meio (regime pluvial, morfologia do relevo, funcionalidade, estrutura e litologia, regime de vazões) e do histórico e forma de ocupação das bacias hidrográficas (RODRIGUES, 1997, 2010). A urbanização produz inúmeras alterações nas estruturas, morfologia e arranjos dos sistemas físicos envolvidos, as quais implicam, sumariamente em termos hidrológicos, a redução da infiltração e a aceleração do escoamento superficial, cujas respostas incidem na reduzindo o tempo de concentração das bacias hidrográficas, em uma proporção de até quatro vezes os valores naturais observados (RIGHETTO, 1998).

O aumento da abrangência dos problemas decorrentes das enchentes urbanas, desde meados dos anos noventa em metrópoles e cidades médias brasileiras, somado à crescente complexidade decorrente do acúmulo de (novas) infraestrutura de macro e microdrenagem, motivou o aumento de pesquisas em drenagem urbana e o desenvolvimento de técnicas de mapeamentos e modelagens estocásticas e determinísticas (TUCCI, 1997, 2004; TUCCI e BERTONI, 2003; FILHO, SZÉLIGA e SZESZ, 2000; FERRAZ, 1998; HORA e GOMES, 2009, MARTINS, 2012; DECINA, 2012; OLIVEIRA, SALDANHA e GUASSELLI, 2010; BRANDÃO e BARROS, 2007).

A bacia hidrográfica do Córrego Três Pontes, tributária do rio Tietê e localizada no extremo leste da cidade de São Paulo, esteve submetida a significativas alterações do meio físico, com vigorosa ocupação urbana nas últimas quatro décadas. A bacia abrange bairros caracterizados por vulnerabilidade social com presença de aglomerados subnormais e precariedade de infraestruturas de saneamento, exemplificado pelo Jardim Romano, bairro adjacente ao córrego Três Pontes, que sofre anualmente com enchentes severas e prolongadas, cuja duração, não raro, supera intervalos semanais. Apesar do notório reconhecimento público dos problemas de enchentes deste bairro, inexistem estudos voltados à caracterização das alterações hidrológicas decorrentes da urbanização no local, fato que é justificado, em outras razões, pela ausência de dados fluviais sistemáticos na bacia hidrográfica especificamente.

As modelagens hidrológicas oferecem uma alternativa à carência de séries históricas de dados sistemáticos de vazão e sua limitação temporal, algo pertinente, sobretudo, em pequenas bacias urbanas no Brasil. O modelo hidrológico chuva-vazão proposto para aplicação é uma adaptação do modelo proposto por Ven Te Chow com parâmetros de deflúvio elaborados pelo SCS que permitem estimar a produção de escoamento superficial a partir do uso e cobertura da terra. A modelagem matemática Ven Te Chow-SCS integra métodos de estimativas de vazões de projeto e de previsão de cenários de riscos a inundação (RAMOS ET.AL., 1989). A facilidade técnica de obtenção das variáveis de entrada e implementação do modelo justificam uma ampliação de estudos de caso que realizem testes e obtenham estimativas em diferentes condições ambientais, abrangendo contextos climáticos e dinâmicas de modificações do uso da terra diversos (NUNES, 2007, NUNES E FIORI, 2007).

O objetivo deste estudo foi analisar os picos de vazão entre 1962 e 2011 na bacia do córrego Três Pontes ( $\approx 10 \text{ km}^2$ ) para diferentes Tempos de Retorno (Trs) e Tempos de Duração de tormentas (tds), por meio da aplicação de modelo hidrológico chuva-vazão Ven Te Chow- SCS, com suporte em Sistema de Informação Geográfica.

Os procedimentos envolveram a obtenção das variáveis básicas da equação principal do modelo Ven Te Chow-SCS: estimativa de total pluviométrico (R) para diferentes Trs e tds baseados em equação IDF local; estimativa de chuva excedente (Re) derivada de R e da capacidade de retenção do solo (S), este último composto pelo parâmetro de CN (*Curve Number*) do SCS obtido do mapeamento de uso da terra em escala 1:10.000; e, por fim, aferição do fator de redução de pico (Z) por fatores topográficos, obtidos de Modelo Digital de Elevação, compatível à escala 1:10.000.

Os aumentos dos picos de vazão estimados para a bacia do Córrego Três Pontes sob diferentes Tempos de Retorno e Duração de tormenta demonstraram que alterações mais significativas ocorrem em chuvas intensas mais frequentes e de menor duração (<3h).

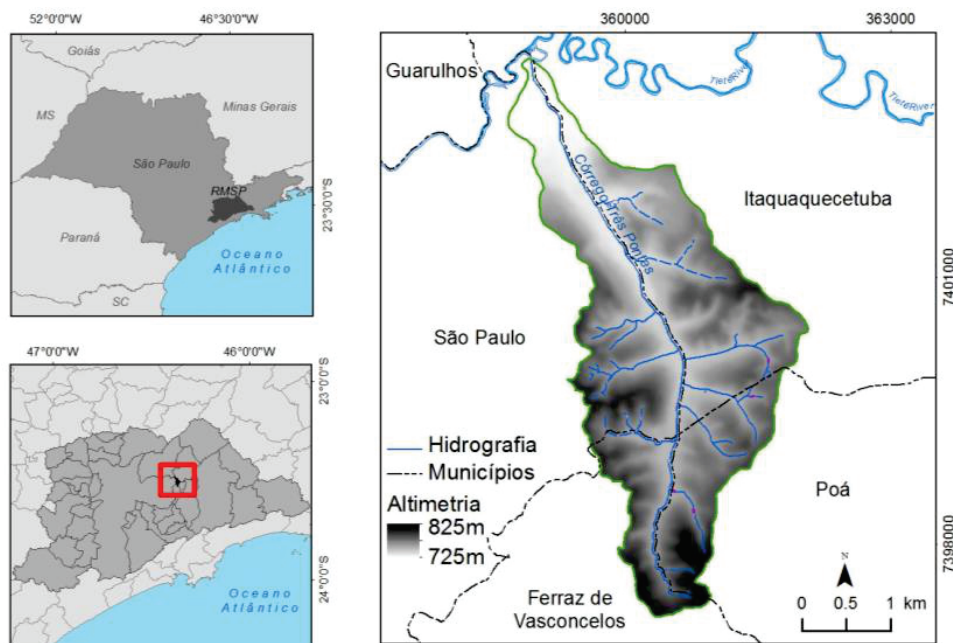
## Metodologia e procedimentos

### *Recortes espacial e temporal*

A bacia hidrográfica do córrego Três Pontes (FIGURA 01) abrange os municípios de São Paulo, Itaquaquetuba, Poá e Ferraz de Vasconcelos e seu canal principal se estende por 7 km, com amplitude de 62m, de 789m (interflúvio) a 727m (foz),

abrangendo o distrito do Itaim Paulista e os bairros de Jardim Romano, Jardim Pantanal, Vila Popular, na margem esquerda do rio Tietê.

**Figura 01 - Localização da área de estudo**



Fonte: EMPLASA (1993, 1996a, 1996b, 1997)

Organizado pelos autores

Geologicamente, de modo geral, a bacia hidrográfica está sobre sedimentos terciários e a migmatitos e outras metamórficas de baixo grau que estruturam e podem aflorar nos topos de interflúvios e vertentes mais íngremes ( $>30^\circ$ ). Nos terços médio e inferior da bacia, nos fundos de vale do córrego em questão e do rio Tietê predominam sedimentos holocênicos referentes à dinâmica de inundações (COUTINHO, 1980; ROSS e MOROZ, 1997). O clima da cidade de São Paulo é classificado como subtropical úmido de verões quentes e chuvosos, e invernos frios e relativamente secos (Koppen Cwa), com precipitação anual média de ~1.300 mm, concentrados no verão (CIIAGRO, 2016), podendo variar significativamente. Os três tipos de solos principais são: (i) Latossolos amarelos e vermelhos (mais abundantes) associados aos sedimentos terciários da Formação São Paulo (variegados de composição de argilas, areias e conglomerados de estrutura plano-paralelos sub-horizontais); (ii) argissolos vermelho-amarelo e cambissolos associados ao embasamento cristalino (xistos e migmatitos) com profundos mantos de alteração que ocorrem nas vertentes mais íngremes ( $>30^\circ$ ) e topos menos aplainados; (iii)

solos hidromórficos mal drenados e pouco porosos, circunscritos aos fundos de vales, planícies de inundação, terraços e demais sistemas de depósitos quaternários (ROSS e MOROZ, 1997; MOROZ, 2010).

No contexto do desenvolvimento da cidade de São Paulo, o distrito do Itaim Paulista sofreu acelerado processo de urbanização ao longo de 50 anos aproximadamente, fazendo com toda área fosse urbanizada rapidamente entre as décadas de 1970 e 2000, com ínfima presença de parques e praças, permanecendo com tais características até os dias atuais.

O recorte temporal abrange os anos de 1962 e 2011. O ano de 1962 foi definido pela disponibilidade de pares de fotografias áreas com estereoscopia (nadir) históricas no Acervo de Fotografias Aéreas do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo e cartas topográficas de mesmo período que permitiram reconstituição de ocupações em condições pré-urbanas; o ano de 2011 foi definido pelo acesso a material recente disponível no Laboratório de Geomorfologia do DG/USP (*World View-2*) que representa o atual estado de ocupação urbana da bacia hidrográfica, sendo suficiente para permitir mapeamento do uso da terra atual. Utilizou-se o *software* de Sistema de Informação Geográfica (ArcGis 10.1, *student license*) para sistematização dos dados geoespaciais.

### Modelagem hidrológica chuva-vazão: Ven Te Chow-SCS

Para o estudo, optou-se por um modelo empírico-determinístico com discretização concentrada (TUCCI, 1998), tendo como variáveis de entrada unicamente valores de precipitação extremas e características da bacia nos cenários de 1962 e 2011. Os valores de precipitação foram obtidos por curva IDF gerada para a região de estudo (DAEE, 1999), e o levantamento e obtenção de parâmetros da bacia por meio de SIG e dados topográficos de bases sistemáticas da EMPLASA (1981).

A aplicação da metodologia Ven Te Chow segue as recomendações de Wilken (1971) sintetizado por Nunes e Fiori (2007) e Nunes (2007) sendo acompanhado pelas demonstrações e deduções de fórmulas auxiliares colocadas por Ramos et. al. (1989), Tucci (1998), FCTH (2003), DAEE (1999) e Righetto (1998).

A equação principal da metodologia é descrita por (equação 1):

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{A.X.Y.Z}{3,6} \dots\dots\dots(1)$$



Na qual  $Q_{m\acute{a}x}$  é a vazão máxima (dada em m<sup>3</sup>/s); A é a área da bacia (dada em km<sup>2</sup>); Y é o fator climático (adotou-se 1, devido a existência de curva IDF para a localidade, dispensando coeficientes de ajustes); Z é o fator de redução do tempo de pico de vazão; X é o fator de deflúvio. Para calcular chuvas excedentes e geração de *runoff* usou-se o modelo SCS.

Definiram-se intensidades das chuvas de entrada na modelagem por curvas IDF desenvolvidas para a região (DAEE, 1999). Arbitrou-se tempos de duração (*td*) para diferentes tempos de retorno (*Tr*), conforme proposto por Nunes e Fiori (2007), as quais foram utilizadas para estimativas de totais pluviométricos (R, em mm).

As precipitações excedentes (Re) em 1962 e 2011 foram calculadas a partir do número de deflúvio (N), equivalente ao parâmetro CN do SCS. Com os valores de  $X$  e Re estipulados, obteve-se X, por:  $X = \frac{Re}{td}$ .

O fator de redução de pico (Z) deriva da razão entre os tempos de duração e o tempo do pico de vazão ( $\frac{td}{tp}$ ), este último dependente de fatores físicos da bacia.

## Intensidade de precipitação ( $i_{td,Tr}$ ) e total acumulado (R)

Para determinação do valor de intensidade de precipitação ( $i_{td,Tr}$ ) a equação IDF mais recente (equação 2) existente para a região foi usada (DAEE, 1999):

$$i_{td,Tr} = 39,3015(td + 20)^{-0,9228} + 10,1767(td + 20)^{-0,8764} \cdot \left[ -0,4653 - 0,8407 \cdot \ln \left( \ln \left( \frac{td}{td - 1} \right) \right) \right] \dots\dots(2)$$

Onde,  $i_{td,Tr}$  é a intensidade de chuva (mm/min) a duração *td* e retorno *Tr*; *td* é a duração em minutos (10, 30, 60, 120, 150, 180, 210 e 240); e *Tr* é o período de retorno em anos (2, 5, 10, 25, 50 e 100). A chuva total acumulada (R) é estimada pelo produto entre a intensidade e a duração do evento.

## CN (Curve Number) pelo SCS

O valor de CN é condicionado ao tipo hidrológico de solo (A, B, C ou D), à condição de umidade antecedente (AMC I, II ou III) e aos usos da terra e tratamentos dados a superfície (Figura 02). Diversos autores sistematizaram referências onde realizaram aproximações aos valores de CN conforme os usos e tratamentos da terra, dentre os quais citam-se Patel (1986), Ponce e Hawkins (1996), Tucci (1998), FCTH (2003). Para o presente estudo, definiu-se solo do tipo C (barrentos, com teores de argila entre 20% e 30%,

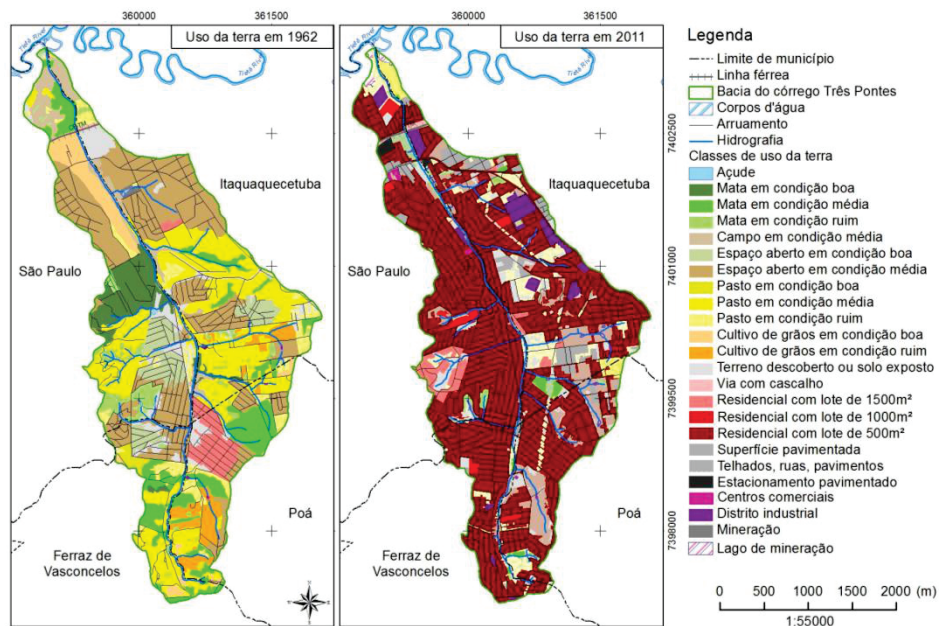
sem lentes impermeáveis, bem desenvolvidos até 1,2 m e pouco seixo), e condição de saturação intermediária AMC II (média na época mais úmida, onde os totais acumulados dos últimos 5 dias resultam entre 15 e 40 mm). Os valores de CN determinados estão na tabela 01.

**Tabela 01** - Valores de CN parciais e média ponderada para 1962 e 2011

Classes de uso da terra (SCS)	CN	Área (%)		CN médio ponderado		
		1962	2011	1962	2011	
Campos em boas condições	71	4,5	0,1	3,2	0,0	
Distrito industrial	91	0,0	2,8	0,0	2,5	
Uso comercial	94	-	0,2	-	0,2	
Estacionamento pavimentado, telhados, alta impermeabilização	98	-	64,5	-	63,2	
Espaços abertos, parques, jardins						
Boas condições, cobertura de grama > 75%	74	4,8	0,7	3,6	0,5	
Médias condições, cobertura de grama > 50%	79	25,7	8,0	20,3	6,3	
Florestas	Condições ruins	77	3,3	0,9	2,5	0,7
	Condições médias	73	14,0	0,7	10,2	0,5
	Condições boas	70	0,7	-	0,5	-
Cultura de grãos em linha reta	Condições ruins	84	3,8	-	3,2	-
	Condições boas	83	4,0	-	3,3	-
Pasto s/ curva de nível	Condições ruins	86	5,2	6,2	4,4	5,3
	Condições médias	79	23,8	1,3	18,8	1,0
	Condições boas	74	0,7	0,0	0,5	0,0
Uso residencial (tamanho médio do lote)	500m <sup>2</sup>	91	-	6,5	-	5,9
	1000m <sup>2</sup>	83	-	1,3	-	1,1
	1500m <sup>2</sup>	81	3,3	2,4	2,7	1,9
Terreno descoberto (solo exposto)	91	5,9	4,3	5,4	3,9	
Via com cascalho	89	0,3	0,3	0,2	0,3	
Mineração	Não se aplica	0,2	0,3	Não se aplica		
Açude	Não se aplica	0,0	0,0	Não se aplica		
<b>Totais</b>	-	100	100	<b>78</b>	<b>93</b>	



**Figura 02** – Cobertura e usos da terra na bacia hidrográfica do córrego Três Pontes (1962 e 2011).



Sistema de projeção UTM/SAD69/23S.

Fonte: Foto aérea 1962 (LASERE/DG/USP) e WorldView-2 (LABGEOM/DG/USP)

Organizado pelos autores.

## Precipitação excedente (Re) e Fator de deflúvio (X)

A precipitação excedente é pré-requisito para o fator de deflúvio (X) da equação geral do modelo e está em função das condições de permeabilidade da superfície, da retenção potencial do solo e do total de chuva acumulada, podendo ser obtida a partir da equação 3:

$$Re = \frac{(R - 0,2S)^2}{R + 0,8S} \quad \text{Para } R > 0,2S \dots \dots \dots (3)$$

Para obter S, aplica-se a equação 4:

$$S = 25,4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \dots \dots \dots (4)$$

Em que CN é o parâmetro adimensional de deflúvio. A chuva excedente é determinada, assim, de modo geral para a bacia estudada (FCTH, 2003).

O fator de deflúvio foi calculado por (equação 5):

$$X = \frac{Re}{td} \dots \dots \dots (5)$$

Onde td é o tempo de duração da tormenta e Re é a chuva excedente.

## Fator de Redução do Pico (Z)

Descrito por Wilken (1971), o fator de redução (Z) é obtido pela relação entre o pico de vazão, produzido por uma chuva de uma determinada duração, e o deflúvio resultante de precipitação igualmente intensa (equação 6).

O valor de Z está relacionado à correlação entre o tempo de duração (*td* em min) e a razão de ascensão de pico (*tp* em min), sendo igual a *tp/td*, este último dependente das características topográficas da bacia hidrográfica: declividade (%) e comprimento do canal (m), e é dado pela seguinte relação, conforme Nunes e Fiori (2007) e Wilken (1971):

$$t_p = 0,005055 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{I}}\right)^{0,64} \dots\dots\dots(6)$$

Em que, *t<sub>p</sub>* é o tempo de pico da descarga (min); *L* é a extensão longitudinal do canal principal (metros) obtidas para cada um dos cenários estudados (1962 e 2011), com base na carta topográfica 1:10.000 da EMPLASA (1981); *I* é a declividade média do rio principal (%), também obtida para 1962 e 2011. Para a bacia hidrográfica estudada os valores foram: tempo de pico de 1,4 horas; *I* igual a 1%, e *L* igual à 6929 m.

As estimativas da declividade e do comprimento do canal decorreram em alguns valores da relação *tp/td* superiores aos contidos nas tabelas constantes na literatura de referência citadas (que apresentam até =1,98). Assim, para contemplá-los produziu-se a curva de relação entre os parâmetros e Z, (equação 7), com R<sup>2</sup> = 0,9996:

$$Z = 0,0249 \cdot \left(\frac{td}{tp}\right)^3 - 0,02279 \cdot \left(\frac{td}{tp}\right)^2 + 0,8517 \cdot \left(\frac{td}{tp}\right) + 0,0099 \dots\dots\dots(7)$$

## Resultados

td (min)	td (horas)	Im	R	td/tp	Z	Re <sub>1962</sub>	X <sub>1962</sub>	Qmáx <sub>1962</sub>	Re <sub>2011</sub>	X <sub>2011</sub>	Qmáx <sub>2011</sub>
Tr = 2 anos											
10	0,2	97,3	16,2	0,1	0,1	0,0	0,3	0,1	5,2	31,1	7,8
30	0,5	60,7	30,3	0,4	0,3	2,9	5,8	4,2	16,0	31,9	23,2
60	1,0	39,3	39,3	0,7	0,5	6,4	6,4	8,2	23,7	23,7	30,2
120	2,0	23,4	46,8	1,4	0,8	10,1	5,1	10,5	30,5	15,2	<b>31,7</b>
150	2,5	19,6	48,9	1,8	0,9	11,2	4,5	<b>10,6</b>	32,4	13,0	30,5
180	3,0	16,8	50,5	2,1	1,0	12,1	4,0	10,5	33,8	11,3	29,2
210	3,5	14,8	51,7	2,5	1,1	12,8	3,7	10,1	35,0	10,0	27,6
240	4,0	13,2	52,8	2,8	1,2	13,4	3,4	9,8	36,0	9,0	26,2

Tr = 5 anos											
10	0,2	97,3	16,2	0,1	0,1	0,6	3,6	0,9	8,6	51,9	13,0
30	0,5	60,7	30,3	0,4	0,3	6,7	13,3	9,7	24,1	48,3	35,1
60	1,0	39,3	39,3	0,7	0,5	12,9	12,9	16,4	35,0	35,0	44,7
120	2,0	23,4	46,8	1,4	0,8	19,1	9,6	<b>19,9</b>	44,7	22,4	<b>46,5</b>
150	2,5	19,6	48,9	1,8	0,9	21,0	8,4	19,8	47,5	19,0	44,7
180	3,0	16,8	50,5	2,1	1,0	22,5	7,5	19,4	49,6	16,5	42,8
210	3,5	14,8	51,7	2,5	1,1	23,7	6,8	18,7	51,3	14,7	40,5
240	4,0	13,2	52,8	2,8	1,2	24,7	6,2	18,0	52,8	13,2	38,4
Tr = 10 anos											
10	0,2	97,3	16,2	0,1	0,1	1,2	7,5	1,9	11,1	66,8	16,7
30	0,5	60,7	30,3	0,4	0,3	9,7	19,4	14,1	29,8	59,5	43,2
60	1,0	39,3	39,3	0,7	0,5	17,8	17,8	22,7	42,8	42,8	54,5
120	2,0	23,4	46,8	1,4	0,8	25,9	12,9	<b>26,9</b>	54,4	27,2	<b>56,5</b>
150	2,5	19,6	48,9	1,8	0,9	28,3	11,3	26,7	57,7	23,1	54,3
180	3,0	16,8	50,5	2,1	1,0	30,2	10,1	26,1	60,3	20,1	51,9
210	3,5	14,8	51,7	2,5	1,1	31,8	9,1	25,1	62,3	17,8	49,2
240	4,0	13,2	52,8	2,8	1,2	33,1	8,3	24,1	64,1	16,0	46,7
td (min)	td (horas)	Im	R	td/tp	Z	Re <sub>1962</sub>	X <sub>1962</sub>	Qmáx <sub>1962</sub>	Re <sub>2011</sub>	X <sub>2011</sub>	Qmáx <sub>2011</sub>
Tr = 25 anos											
10	0,2	97,3	16,2	0,1	0,1	2,3	14,1	3,5	14,4	86,7	21,7
30	0,5	60,7	30,3	0,4	0,3	14,1	28,2	20,5	37,0	74,1	53,8
60	1,0	39,3	39,3	0,7	0,5	24,7	24,7	31,5	52,7	52,7	67,2
120	2,0	23,4	46,8	1,4	0,8	35,1	17,6	<b>36,5</b>	66,7	33,3	<b>69,3</b>
150	2,5	19,6	48,9	1,8	0,9	38,3	15,3	36,1	70,7	28,3	66,6
180	3,0	16,8	50,5	2,1	1,0	40,8	13,6	35,1	73,8	24,6	63,7
210	3,5	14,8	51,7	2,5	1,1	42,8	12,2	33,8	76,4	21,8	60,3
240	4,0	13,2	52,8	2,8	1,2	44,5	11,1	32,4	78,5	19,6	57,2
Tr = 50 anos											
10	0,2	97,3	16,2	0,1	0,1	3,3	20,1	5,0	17,0	102,0	25,6
30	0,5	60,7	30,3	0,4	0,3	17,6	35,3	25,6	42,5	85,0	61,8
60	1,0	39,3	39,3	0,7	0,5	30,2	30,2	38,4	60,1	60,1	76,6
120	2,0	23,4	46,8	1,4	0,8	42,4	21,2	<b>44,1</b>	75,9	37,9	<b>78,9</b>
150	2,5	19,6	48,9	1,8	0,9	46,1	18,4	43,4	80,5	32,2	75,8
180	3,0	16,8	50,5	2,1	1,0	48,9	16,3	42,2	84,0	28,0	72,4
210	3,5	14,8	51,7	2,5	1,1	51,3	14,7	40,5	86,9	24,8	68,6
240	4,0	13,2	52,8	2,8	1,2	53,3	13,3	38,8	89,3	22,3	65,0
Tr = 100 anos											
10	0,2	97,3	16,2	0,1	0,1	4,5	26,8	6,7	19,6	117,6	29,5
30	0,5	60,7	30,3	0,4	0,3	21,4	42,8	31,1	48,0	96,0	69,8
60	1,0	39,3	39,3	0,7	0,5	35,8	35,8	45,7	67,6	67,6	86,1
120	2,0	23,4	46,8	1,4	0,8	49,8	24,9	<b>51,8</b>	85,1	42,5	<b>88,5</b>
150	2,5	19,6	48,9	1,8	0,9	54,0	21,6	50,9	90,2	36,1	85,0
180	3,0	16,8	50,5	2,1	1,0	57,4	19,1	49,4	94,1	31,4	81,1
210	3,5	14,8	51,7	2,5	1,1	60,1	17,2	47,4	97,3	27,8	76,8
240	4,0	13,2	52,8	2,8	1,2	62,4	15,6	45,4	100,1	25,0	72,9

## Discussões

Os mapeamentos de uso da terra de 1962 e 2011 evidenciaram modificação das condições superficiais da bacia do córrego Três Pontes, a qual foi submetida à impermeabilização na ordem de 65% de sua área, implicando taxa de urbanização de

12,5ha/ano, redução da capacidade de infiltração e aumento do *runoff* em níveis superiores aos das ações de mitigação.

Para o ano de 1962, predominavam usos rurais, sendo que, aproximadamente, 65% eram compostos de pasto de média qualidade, campo em boa condição e floresta degradada, cujos CNs são inferiores a 80. O único uso urbano presente em 1962 constituiu-se de residencial de baixa densidade, associado a solos expostos e vias em abertura, relativos ao início de urbanização. Assim, as condições superficiais de infiltração do cenário de 1962 não remetem à originalidade das funções hidrológicas, contudo as taxas de processos relativos ao escoamento superficial deste período são as mais próximas aos naturais que tivemos acesso por janela de interpretação.

O contexto da bacia em 2011 é majoritariamente urbano, com padrão residencial, serviços e misto, com 82% de sua área impermeabilizados, compostos por telhados, pavimentos e quintais de residência. Os restantes 18% são representados por remanescentes de vegetação arbórea e arbustiva em praças, parques, fragmentos em matas ciliares, áreas livres e gramíneas em terrenos baldios. O valor de CN médio ponderado obtido de 93,4 é elevado e corresponde a um aumento do potencial de deflúvio em cerca de 20%.

Este valor reflete os valores de chuvas excedentes, fator de deflúvio e vazão de pico. Para esta última, comparando-se os anos de 1962 e 2011, observam-se aumentos na ordem de 10 vezes para eventos com *td* de 10 e 20 minutos, e de 100 a 200% nas vazões máximas em cada *Tr*. Estes incrementos decorrem, evidentemente, do aumento do volume de escoamento superficial, mas também de sua velocidade de transmissão na bacia hidrográfica. As vazões de pico para *Tr* de 5 anos passaram de 19,9 m<sup>3</sup>/s para 46,5 m<sup>3</sup>/s, representando um aumento de 133%; para *Tr* de 50 anos passou de 44,1 m<sup>3</sup>/s para 78,9 m<sup>3</sup>/s, o que corresponde à 79% de aumento, ilustrando a magnitude das modificações. Como tendência, o percentual de aumento é tão maior quanto menor for *Tr*.

Esses volumes de escoamento das vazões de pico (2011) superiores aos relativos do sistema original (1962) podem impor reorganização dos subsistemas da bacia em busca da assimilação desses novos excedentes, expressando-se, por exemplo, na erosão do canal, aumento da área inundada, do volume acumulado na planície, ou ainda, aumento do tempo de permanência da lâmina de inundação. O aumento das vazões de pico é um indicador hidromorfológico de processo fluvial que pode ser lido como um parâmetro do grau de comprometimento da bacia e do canal, para avaliação da adequação de estruturas de

drenagem que visem assimilar esses aumentos e mitigar seus impactos.

O modelo chuva-vazão Ven Te Chow-SCS é uma metodologia versátil e de rápida aplicação à elaboração de cenários de projetos hidráulicos, para qualquer bacia hidrográfica. Porém, a inexistência de variáveis de perdas hídricas na interface atmosfera-superfície e simplificações do escoamento de base, presumindo-o como débito constante no canal, são restritivos à difusão de seu uso. Outras limitações são:

- Obtenção do fator de redução ( $k$ ) dentro de intervalos pré-determinados da relação entre tempo de duração e tempo de pico, que dependem das condições físicas específicas de cada canal fluvial, e que não estão contemplados nas tabelas de referência e possibilidades de resultados da relação acima descrita, como que indicando certo intervalo de fator de redução mais habitual, e, portanto, restringindo sua aplicação, e;
- Necessidade de definir um valor de  $CN$  mais adequado aos tipos ou conjunto de tipos de ocupação da superfície e seus múltiplos subsistemas e diferentes características internas, tratando as superfícies da bacia hidrográfica como homogênea. O tempo de pico é função da intensidade da precipitação e das, e os mosaicos de uso do solo como contínuos entre si. Estes aspectos e seus impactos sobre os resultados das estimativas são minimizados ou eclipsados na concepção do modelo, principalmente para simulações em ambientes urbanizados, para os quais, sabe-se, de antemão, que os mosaicos de usos da terra e as inúmeras estruturas de micro e macrodrenagem tornam a circulação hidráulica em superfície e em subsuperfície extremamente mais complexas do que os níveis de  $CN$  são, atualmente, capazes de representar e de produzir.

## Discussões

Nos cenários aplicados os resultados obtidos apontaram para um aumento nas vazões de pico entre 1962 e 2011, sendo mais intensos para  $td$  mais curtos em  $Tr$  menores, podendo atingir a razão 10 vezes. Os resultados também permitem concluir que, para a região estudada, as precipitações de  $td$  entre 1 e 3 horas são as mais preocupantes, pois nelas se concentraram as vazões

extremas em todos os *Trs* modelados.

Estes aumentos implicam reorganização do sistema hidrológico para atendimento de novas demandas de escoamento. Esta discussão está orientada ao impacto da urbanização e à necessidade de planejamento territorial e hidráulico-hidrológico tendo em vista a assimilação dos fluxos excedentes em taxas “não-naturais” e minimização e mitigação dos impactos.

O modelo hidrológico chuva-vazão Ven Te Chow – SCS está estruturado em fatores básicos dos processos envolvidos entre a chuva e a vazão de pico, dos quais: deflúvio superficial, redução do pico por fatores físicos da bacia, área da bacia e fator climático. O estudo demonstrou que a facilidade de sua aplicação permite simulação do dado de vazão extrema em diversas condições de uso e ocupação da terra, constituindo, portanto, ferramenta à pesquisa e ao planejamento. É necessário, outrossim, reconhecer as limitações presentes nesta modelagem e a necessidade de realizar testes comparativos e calibrações para diferentes características de uso e tratamento da superfície, particularmente em áreas urbanas, identificando e particularizando o papel que as estruturas de macro e microdrenagens, individualmente e em seu complexo, possuem no conjunto de variáveis hidrodinâmicas que incidem sobre a dinâmica de escoamento superficial e geração de deflúvio, cujos impactos refletem diretamente na chuva excedente, tempos de concentração e pico, e, conseqüentemente, níveis de riscos de inundação em diferentes pontos da bacia hidrográfica.

## Agradecimento

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp).

## Referências Bibliográficas

- BRANDÃO, J. L. B.; BARROS, M. T. L. de. Determinação de áreas de inundação para uma bacia urbana. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. SP: São Paulo. 2007.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrología aplicada**. (Traduzido por SALDARRIAGA, J. G.) Bogotá: MCGRAW-HILL Interamericana, S.A. 1994. 584 f.
- COUTINHO, J. M. V. Carta Geológica da Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo. EMPLASA. 2 folhas. Escala 1:100.000. São Paulo, 1980.
- CUSTÓDIO, V. **A persistência das inundações na Grande São Paulo**. 2002. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.



DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica). **Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo**. Convênio DAEE-USP. (JUNIOR, F. M. e MAGNI, N. L. G. (org)). São Paulo. 1999.

DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos - SP**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2012. 177 f.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLINATO S.A. (EMPLASA). Carta topográfica. Folha Jardim São Miguel (articulação SF-23-Y-D-IV-I-NO-B). EMPLASA. 1 folha. Escala 1:10.000. São Paulo, 1996a.

\_\_\_\_\_. Carta topográfica. Folha Poá (articulação SF-23-Y-D-IV-I-NE-A). EMPLASA. 1 folha. Escala 1:10.000. São Paulo, 1996b.

\_\_\_\_\_. Carta topográfica. Folha São Miguel Paulista (articulação SF-32-Y-D-I-3-SO-F). EMPLASA. 1 folha. Escala 1:10.000. São Paulo, 1993.

\_\_\_\_\_. Carta topográfica. Folha Itaquaquecetuba (articulação SF-23-Y-D-I-3-SE-E). EMPLASA. 1 folha. Escala 1:10.000. São Paulo, 1997.

FCTH (Fundação Centro de Tecnologia Hidráulica). **Hidrologia urbana. Capacitação Tecnológica e Transferência de Tecnologia em Drenagem urbana** (Curso ministrado no município de Praia Grande entre agosto e setembro de 2003). FCTH. 2003. 48f.

Disponível em: <<http://www.fcth.br/public/cursos/praiagrande.html>>. Obtido em: 02 de maio de 2013.

FERRAZ, F. F. *et al.* Previsão de áreas inundadas na cidade de Piracicaba (SP) através de sistema de informações geográficas (SIG). In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 3. n. 3. P. 17-37. 1998.

FILHO, A. G. de A.; M. R. SZÉLIGA; J. R. S. SZESZ. Utilização de micro-reservatórios de retenção para atenuação de inundações em bacias urbanas. In: **Publicatio UEPG - Ciências Exatas e da Terra, Ciência Agrárias e Engenharias**, Ponta Grossa, v. 6, p. 47-68. 2000.

HORA, S. B. da.; GOMES, R. L. Mapeamento e avaliação do risco a inundação do rio Cachoeira em trecho da área urbana no município de Itabuna/BA. In: **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, n. 21; v. 2, p. 57-75, 2009.

MARTINS, L. G. de B. **Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2012. 115f.

MOROZ (CACCIA-GOUVEIA), I. C. **Da originalidade do sítio urbano de São Paulo às formas antropogênicas: aplicação da abordagem da Geomorfologia Antropogênica na Bacia Hidrográfica do Rio Tamanduateí, Região Metropolitana de São Paulo.** Tese (Doutorado em Geografia Física) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010. 363f.

NUNES, F. G. **A Influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do rio Atuba.** Dissertação (Mestrado em Hidrologia) – Setor de ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2007. 187f.

NUNES, F. G.; e FIORI, A. P. A utilização do método de Ven Te Chow – Soil Conservation Service (SCS) na estimativa da vazão máxima da bacia hidrográfica do rio Atuba. In: **Revista Eletrônica Geografar.** Curitiba, v.2, n.2, p.139-155. 2007.

OLIVEIRA, G. G. de.; SALDANHA, D. L.; GUASSELLI, L. A. Espacialização e análise das inundações na bacia hidrográfica do rio Caí (RS). In: **Geociências. São Paulo**, UNESP, v. 29, n. 3, p. 413-427, 2010.

PATEL, J. N. **Urban hydrology for small watersheds.** Technical release 55 of USDA/NRCS. 1986. Disponível em: <http://www.professorpatel.com/uploads/7/6/5/6/7656897/tr55.pdf>

Obtido em: 20 abril de 2013.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff curve number: Has it reached maturity? In: **Journal of Hydrologic Engineering.** v. 1, p. 11-19, 1996.

RAMOS, et al. **Engenharia hidráulica.** Rio de Janeiro: Editora da UFRJ. v. 2. 1989, 404 f.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos.** São Carlos, EESC/USP. 1998.

RODRIGUES, C. **Geomorfologia Aplicada: Avaliação de experiências e de instrumentos de planejamento físico-territorial e ambiental brasileiros.** Tese (Doutorado em Geografia Física) – Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

\_\_\_\_\_. Morfologia Original e Morfologia Antropogênica na definição de unidades espaciais de planejamento urbano: exemplo na metrópole paulista. In: **Revista do Departamento de Geografia,** São Paulo, n. 17, p. 101-111, 2005.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo.** São Paulo: Laboratório de Geomorfologia DG/FFLCH/USP. Laboratório de Cartografia Geotécnica - Geologia Aplicada - IPT/FAPESP, 1997. 63p.

TUCCI, C. E. M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** São Paulo, v. 2, n. 2, p. 5-12, 1997.

\_\_\_\_\_. **Modelos Hidrológicos** (Coleção da ABRH). 1ª ed. Poro Alegre – RS, Editora da UFRGS. 1998.

\_\_\_\_\_. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. In: **Revista de Gestão de Água da América Latina** (Rega), v. 1, n. 1, p. 59-73, 2004.

\_\_\_\_\_. **Gestão das inundações urbanas** (Curso de gestão das inundações urbanas). Global Water Partnership e UNESCO. Porto Alegre, RS. 2005. 197 f.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

WILKEN, P. S. **Águas Pluviais: Contribuição ao Estudo dos Métodos de Dimensionamento de Estruturas Hidráulicas para o Esgotamento de Águas Pluviais**. 1ª ed. São Paulo, Edição do autor, 1971.

Foto aérea de 1962, Acervo de Fotografias Aéreas, Laboratório de Sensoriamento Remoto e Aerofotogeografia, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, LASERE/DG/USP. Vão solicitado pelo Instituto Agrônomo de Campinas e executado por Natividade aerofotogrametria.

Imagem de Satélite de Alta Resolução *WorldView-2*, acervo de imagens do Laboratório de Geomorfologia, LABGEOM/DG/USP.

## Contribuição individual

Os autores ofereceram contribuição conjunta nas etapas de realização do trabalho.

**Yuri Veneziani** - Geógrafo com mestrado em Geografia física pela Universidade de São Paulo. Possui doutorado em Geografia (Geografia Física) pela mesma Universidade. Atualmente é analista de Geoprocessamento / Soluções do Hexagon Geospatial Brasil. ORCID - <https://orcid.org/0000-0002-7734-5344>

**Juliana da Costa Mantovani** - Geógrafa graduada no Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo, mestre em Geografia Física pela USP, com pesquisa desenvolvida na área de geomorfologia e planejamento ambiental. Atualmente realiza Doutorado junto ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da USP, desenvolvendo pesquisa sobre as possibilidades de aplicação da Geomorfologia em análises forenses ambientais.

ORCID - <https://orcid.org/0000-0003-0104-4446>

Recebido para publicação em 12 de junho de 2020

Aceito para publicação em 10 de agosto de 2020

Publicado em 28 de dezembro de 2020