

## Métodos de estimativa de vazão máxima para projetos de macrodrenagem urbana

Karolaine Fátima Patrício<sup>1</sup>,

Sabrina Baesso Cadarin<sup>2</sup>,

Álvaro José Back<sup>3</sup>.

**Resumo:** O aumento populacional afeta diretamente nas questões de drenagem urbana, podendo ser na ocupação de áreas de risco ou mesmo pelo fato da redução da área permeável que ocorre através da urbanização das cidades. Com um sistema de macrodrenagem dimensionado adequadamente, por meio da avaliação do melhor método de estimativa de vazão máxima pode-se reduzir e/ou acabar com os estragos causados por chuvas intensas. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi aplicar cinco metodologias de estimativa de vazão máxima, e discutir sua aplicabilidade para projetos de macrodrenagem urbana. Foram considerados os métodos Racional, I-Pai-Wu, Ven te Chow, Hidrograma e McMath. Para o tempo de concentração utilizou-se as fórmulas de Corps of Engineers, Ven Te Chow, Kirpich, Onda Cinemática, Califórnia Culverts Practice (E.U.A.) e Cinemático - SCS. Sendo que a área em estudo corresponde a uma bacia rural, sendo classificada como macrodrenagem, e após os cálculos dos tempos de concentração, optou-se pelo método Corps of Engineers para dar sequência ao estudo, além disso, foram avaliados o uso do solo para obtenção dos coeficientes C e CN, através de imagens aéreas utilizando o software ArcGis. Os resultados obtidos demonstraram que o método McMath subestima a vazão para áreas maiores que 8 km<sup>2</sup>, enquanto o método Racional superestima. Os métodos I-Pai-Wu e Ven te Chow obtiveram valores semelhantes, o método do Hidrograma que foi obtido através do software Hydrological Engineering Center, Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) mostrou-se adequado para todas as condições estudadas.

**Palavras-chave:** drenagem; escoamento superficial; tempo de concentração; bacia rural.

### Maximum flow estimation methods for urban macro drainage projects

**Abstract:** The population increase directly affects urban drainage issues, which may be in the occupation of risk areas or even because of the reduction in the permeable area that occurs through the urbanization of cities. It is possible to reduce or end the damage caused by heavy rains through the evaluation of the best method of estimating maximum flow, by using a properly sized macrodrainage system. The objective of the present study was to apply five

<sup>1</sup> Acadêmico do Curso de Engenharia Civil da UNESC. karolainepatricio@hotmail.com.

<sup>2</sup> Engenheira Ambiental e Sanitarista, Mestranda em Ciências Ambientais. bcadorin.sabrina@gmail.com.

<sup>3</sup> Professor do Curso de Engenharia Civil da UNESC, ajb@unesco.net.

maximum flow estimation methodologies, and to discuss their applicability for urban macro-drainage projects, being the methods which were the Rational, I-Pai-Wu, Ven te Chow, Hidrograma and McMath methods. For the concentration time, the formulas of Corps of Engineers, Ven te Chow, Kirpich, Cinematic Wave, California Culverts Practice (U.S.A.) and Cinematic - SCS were used. The study area corresponds to a rural basin, being classified as macrodrainage, and after calculating the concentration times, the Corps of Engineers method was chosen to proceed with the study. In addition, there was an analysis of land use to obtain coefficients C and CN, through aerial images using ArcGis software. The results showed that the McMath method underestimates the flow for areas greater than 8 km<sup>2</sup>, while the Racional method overestimates it. The I-Pai-Wu and Ven te Chow methods obtained similar values, and the Hydrogram method that was obtained through the Hydrological Engineering Center software, Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) proved to be suitable for all the studied conditions.

**Key-words:** drainage; runoff; concentration time; rural basin.

## Introdução

As chuvas intensas podem desencadear grandes problemas para a população, como alagamentos, inundações e deslizamentos. Com o avanço da urbanização muitas áreas estão sendo ocupadas de modo irregular, essas na maioria das vezes são as mais afetadas, além disso, o índice de permeabilidade das cidades também diminui afetando diretamente no escoamento (MIGUEZ, VERÓL e REZENDE, 2015). Para o planejamento e dimensionamento adequado do sistema de drenagem é necessária a estimativa adequada da vazão máxima.

Segundo Miguez, Veról e Rezende (2015) as atividades humanas provocam alterações no padrão de uso e ocupação do solo, as quais acabam por alterar uma série de processos que modificam a qualidade do ambiente, tanto natural como construído. As cheias urbanas estão diretamente associadas às falhas das redes de micro e macrodrenagem. Isso porque, situações de desequilíbrio no funcionamento da macrodrenagem podem trazer vários problemas para a drenagem. Quando a macrodrenagem não está adequadamente dimensionada, as águas geradas dos escoamentos vindas da microdrenagem acabam retidas na superfície gerando alagamento e represamento nas ruas por falha de captação do corpo receptor. Desta forma, o conhecimento dos métodos de estimativa de vazão máxima para a macrodrenagem é importante para a prevenção de desastres hidrológicos.



Existem diversos métodos disponíveis na literatura para a estimativa da vazão de projeto, ou seja, a vazão máxima associada a uma probabilidade de ocorrência e período de retorno (PRUSKI *et al.*, 2006) como método Racional (DNIT, 2005), I-Pai-Wu (SÃO PAULO, 1999), método Ven te Chow (WILKEN, 1978), método do Hidrograma, método McMath (BATISTA, NOVAES e SANTOS, 2002). O método Racional pela sua facilidade acaba sendo o mais utilizado para os cálculos. Como o método mencionado tende a superestimar a vazão para grandes áreas, alguns autores aplicam um coeficiente de redução do valor da vazão de pico.

Segundo Fendrich (2008), o método de Ven te Chow, amplamente utilizado no Brasil, permite simular a chuva crítica ou a vazão de projeto, empregadas na previsão de enchentes e no planejamento de obras hidráulicas em bacias que não possuam dados fluviométricos. Cada método está fundamentado em uma série de parâmetros que visam representar a vazão de projeto de uma área de drenagem.

Os métodos de estimativa da vazão máxima levam em consideração características da bacia de drenagem, como a área, declividade, condições da superfície, e também características climáticas, dadas pela chuva de projeto. Para cálculo da estimativa da chuva de projeto é preciso definir a duração da chuva, sendo o tempo de concentração da bacia (LIMA *et al.*, 2008).

No município de Sangão verifica-se a ocorrência de problemas de drenagem, onde as inundações devidas deficiência na macrodrenagem são mais frequentes que os alagamentos devidos a deficiência da microdrenagem. Desta forma, o presente estudo tem por objetivo aplicar e discutir sobre diferentes métodos para a estimativa da vazão máxima para macrodrenagem no município de Sangão.

## **Material e Métodos**

Foi realizado o estudo de rede de macrodrenagem e delimitação da área de estudo da bacia hidrográfica do rio Sangão, inserida no município de Sangão, localizado no Sul de Santa Catarina (Figura 1). A área de drenagem foi delimitada com base em hidrografia ottocodificada (BHO), conhecida como metodologia de ottobacias, disponibilizada pela Agência Nacional das Águas (ANA). Para a delimitação da bacia e processamento dos dados foi utilizado o *software*

ArcGis 10.7, com os arquivos vetoriais disponibilizados pela ANA. Com base nos arquivos vetoriais foi realizada a delimitação da bacia e determinação dos parâmetros morfométricos descritos em Back (2014).

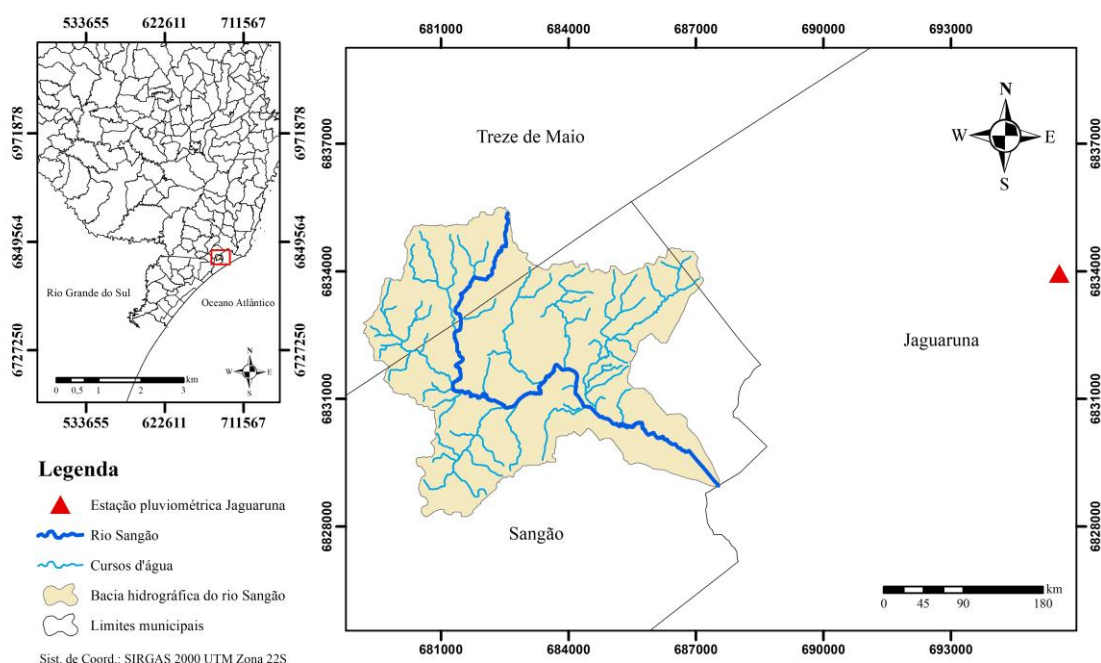


Figura 1. Localização e área de contribuição da bacia hidrográfica

De acordo com Tomaz (2002), o tempo de concentração é o tempo em que leva para que toda a bacia considerada contribua para o escoamento superficial, ou ainda, é o tempo que leva uma gota de água no ponto mais distante até o trecho considerado o limite da bacia.

As metodologias adotadas para o tempo de concentração foram: i) o método Corps of Engineers; ii) o método Ven te Chow; iii) o método de Kirpich; iv) o método da Onda Cinemática; v) o método Califórnia Culverts Practice (E.U.A.); vi) o método Cinemático - SCS.

O método Corps of Engineers é o mais indicado para bacias rurais de até 11162 km<sup>2</sup> segundo Silveira (2005). A Eq. 1 é conforme o manual do DNIT (2005).

$$tc = 0,30 \left( \frac{L}{10,25} \right)^{0,76} \quad (1)$$

em que:

tc = tempo de concentração (h);

L = comprimento do talvegue (km);

I = declividade do talvegue (%).

Para o cálculo do tempo de concentração para o método Ven te Chow foi usada a Eq. 2. (DNIT, 2005).

$$t_c = 25,2 \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0,64} \quad (2)$$

em que:

$t_c$  = tempo de concentração (h);

L = comprimento do talvegue (km);

S = declividade do talvegue (%).

O tempo de concentração é calculado pela Eq. 3 de Kirpich conforme Tucci (2002).

$$t_c = 0,0663 L^{0,77} S^{-0,385} \quad (3)$$

em que:

$t_c$  = tempo de concentração (min);

L = comprimento do talvegue (km);

S = declividade do talvegue ( $m km^{-1}$ ).

No método da Onda Cinemática o tempo de concentração é calculado pela Eq. 4 conforme (SILVEIRA, 2005).

$$t_c = 7,35 (n L)^{0,6} S^{-0,3} I^{-0,4} \quad (4)$$

em que:

$t_c$  = tempo de concentração (h);

n = rugosidade de Manning;

L = comprimento do talvegue (km);

S = declividade do talvegue ( $m m^{-1}$ );

I = intensidade da precipitação ( $mm h^{-1}$ ).

O método Carlifônia Culverts Practice é uma modificação do método de Kirpich, substituindo na Eq. 5 a declividade do talvegue pela diferença de cotas entre a saída da bacia e o ponto mais alto do talvegue (TUCCI, 2002).

$$t_c = 57 L^{1,155} H^{-0,385} \quad (5)$$

em que:

$t_c$  = tempo de concentração (min);

$L$  = comprimento do talvegue (km);

$H$  = diferença de cotas entre a saída da bacia e o ponto mais alto do talvegue (m).

No método Cinemático foi usada a Eq. 6 conforme Tucci (2002).

$$t_c = \frac{1000}{60} \sum \frac{L}{V} \quad (6)$$

em que:

$t_c$  = tempo de concentração (min);

$L$  = comprimento do talvegue (m);

$V$  = velocidade média no trecho ( $m s^{-1}$ ).

Para obtenção da equação intensidade-duração-frequência (IDF) foram utilizados dados da estação Jaguaruna, código 02849020, operada pela Epagri (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina), localizada no município de Jaguaruna (Latitude -28,6067; Longitude -49,0331). Sendo determinada a série de máximas anuais de 1976 a 2019, usando a distribuição de Gumbel-Chow e com base na metodologia descrita em Back (2013) foi ajustada a equação de chuvas intensas para período de retorno de 5 a 100 anos e duração de 5 a 1440 minutos

Para a estimativa de vazão máxima foram propostos cinco métodos, sendo i) o método Racional; ii) o método I-Pai-Wu; iii) o método Ven Te Chow; iv) o método do Hidrograma SCS; v) o método McMath.

Segundo o DNIT (2005) a Eq. 7 apresenta a fórmula do método racional.

$$Q = \frac{C i A}{3,6} \quad (7)$$

em que:

Q = descarga máxima ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );

C = coeficiente de deflúvio;

i = intensidade da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ );

A = área da bacia hidrográfica ( $\text{km}^2$ ).

Para estimativa da vazão máxima pelo método Racional calculou-se o coeficiente de escoamento superficial (C). Segundo Wilken (1978) ele está diretamente relacionado ao processo de crescimento e, assim, a urbanização de uma área ou cidade. Foram considerados os valores de C conforme indicados por Paiva e Paiva (2003) (Tabela 1).

Para a delimitação das áreas de uso e ocupação do solo foi utilizado o *software* ArcGis 10.7, onde foi elaborado o mapeamento por meio da fotointerpretação de imagens aéreas coloridas da bacia do rio Sangão fornecidas pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS), por meio do Levantamento Aerofotogramétrico 2010 – Ortofotomosaico RGB. A caracterização foi realizada por interpretação visual e observações de campo, sendo adotadas as seguintes classes de uso e ocupação do solo: área agrícola, área de pastagem, área de vegetação arbórea e área urbana.

Com base na Tabela 1, os usos do solo foram classificados como: as áreas agrícolas compreendem em sua grande maioria a cultivos de mandioca, classificadas como campos cultivados; as áreas de pastagem incluem campos nativos classificados como pastos; as áreas de vegetação arbórea em sua maioria é vegetação nativa, mas também foi inserida a vegetação exótica sendo classificada como florestas reflorestamento. As áreas urbanas são áreas mais urbanizadas, classificadas como concreto/telhado. Ressaltando que a declividade da bacia é menor que 1%, sendo considerada plana.

Tabela 1. Valores do coeficiente de escoamento superficial C (Fonte: Paiva e Paiva, 2003)

Tipos de Superfície	Período de retorno (anos)						
	2	5	10	25	50	100	500
<b>Áreas urbanas</b>							
Asfalto	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Concreto/Telhado	0,75	0,80	0,80	0,88	0,92	0,97	1,00
<b>Áreas rurais</b>							
<b>Campos Cultivados</b>							
Plana, 0 - 2%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
Média, 2 - 7%	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
Inclinada, > 7%	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
<b>Pastos</b>							
Plana, 0 - 2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Média, 2 - 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Inclinada, > 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
<b>Florestas Reflorestamento</b>							
Plana, 0 - 2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Média, 2 - 7%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
Inclinada, > 7%	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58

O método I-Pai-Wu, Eq. 8, foi calculado conforme a diretriz de projeto de hidráulica e drenagem de São Paulo (SÃO PAULO, 1999).

$$Q = 0,278 C i A^{0,9} K \quad (8)$$

em que:

Q = vazão de cheia ( $m^3 s^{-1}$ );

C = coeficiente de escoamento superficial;

i = intensidade da chuva crítica ( $mm h^{-1}$ );

A = área da bacia de contribuição ( $km^2$ );

K = coeficiente de distribuição espacial da chuva, o valor adotado foi de 0,95 conforme São Paulo (1999).

O método de Ven te Chow foi usado conforme descrito em Wilken (1978), em que a vazão máxima é estimada pela Eq. 9.

$$Q = 0,278 A X Y Z \tag{9}$$

em que:

Q = vazão máxima ( $m^3 s^{-1}$ );

A = área da bacia de contribuição ( $km^2$ );

Y = fator climático;

Z = fator de redução de tempo de pico de vazão;

X = fator de deflúvio (mm).

No método Ven te Chow o fator climático (Y) utilizado foi de 1,00, uma vez que foram usadas informações de precipitação de posto pluviométrico próximo a área de estudo. O fator de deflúvio (X) foi calculado pelo método SCS obtendo-se o valor de 17,99 mm e o fator de redução de tempo de pico de vazão (Z) foi obtido através da Tabela 2, sendo que o valor calculado de  $td tp^{-1}$  foi de 1,37, conseqüentemente o fator Z adotado foi de 0,82.

Tabela 2. Fatores de redução de pico de vazão, fator Z (Fonte: Wilken, 1978)

$td tp^{-1}$	Z	$td tp^{-1}$	Z	$td tp^{-1}$	Z	$td tp^{-1}$	Z	$td tp^{-1}$	Z
0,05	0,04	0,46	0,36	0,84	0,58	1,22	0,75	0,60	0,90
0,10	0,08	0,48	0,38	0,86	0,59	1,24	0,76	0,62	0,90
0,12	0,10	0,50	0,39	0,88	0,59	1,26	0,77	0,64	0,91
0,14	0,12	0,52	0,40	0,90	0,60	1,28	0,78	0,66	0,91
0,16	0,14	0,54	0,41	0,92	0,61	1,30	0,79	0,68	0,92
0,18	0,16	0,56	0,42	0,94	0,62	1,32	0,80	0,70	0,92
0,20	0,18	0,58	0,44	0,96	0,63	1,34	0,81	0,72	0,93
0,22	0,19	0,60	0,45	0,98	0,64	1,36	0,82	0,74	0,93
0,24	0,20	0,62	0,46	1,00	0,65	1,38	0,82	0,76	0,94
0,26	0,22	0,64	0,47	1,02	0,66	1,40	0,82	0,78	0,94
0,28	0,24	0,66	0,48	1,04	0,67	1,42	0,83	0,80	0,95
0,30	0,25	0,68	0,49	1,06	0,68	1,44	0,84	0,82	0,95
0,32	0,26	0,70	0,50	1,08	0,69	1,46	0,85	0,84	0,96
0,34	0,28	0,72	0,51	1,10	0,70	1,48	0,86	0,86	0,96
0,36	0,29	0,74	0,52	1,12	0,71	1,50	0,86	0,88	0,97
0,38	0,30	0,76	0,54	1,14	0,72	1,52	0,87	0,90	0,97
0,40	0,32	0,78	0,55	1,16	0,73	1,54	0,88	0,92	0,98
0,42	0,33	0,80	0,56	1,18	0,74	1,56	0,88	0,94	0,98
0,44	0,34	0,82	0,57	1,20	0,74	1,58	0,89	0,96	0,99

O método McMath é expresso pela Eq. 10 que foi determinado em função da fórmula racional.

$$Q = 0,0091C IA^{0,8}S^{0,2} \quad (10)$$

em que:

Q = vazão ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );

C = coeficiente de escoamento;

I = intensidade de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ );

A = área da bacia (ha);

S = declividade (m/m).

Para o método do Hidrograma Unitário o cálculo foi realizado através do programa HEC-HMS, a área impermeável utilizada foi de 8%. O tempo de pico foi calculado considerando 60% do tempo de concentração, conforme Santos (2010), onde se usou essa relação no método que foi adotado, Corps of Engineers, resultando em 98,03min. Para valores do número da curva (CN) foi considerada a ocupação do solo, de acordo com a tabela 5, usando os coeficientes conforme Tucci (2002). O parâmetro CN é fundamental na estimativa da lâmina de escoamento superficial ou da chuva efetiva. O seu valor é obtido em função do tipo de solo e das características da superfície, além de levar em conta a umidade do solo (TUCCI, 2003). O solo foi considerado tipo B, ressaltando que o CN médio calculado foi de 68,78.

## Resultados e discussões

A área da bacia delimitada foi de 34,54  $\text{km}^2$ , com perímetro de 36,83 km (Tabela 3). O coeficiente de compacidade da bacia ( $K_c$ ) é de 1,767 e o fator de forma ( $K_f$ ) é de 0,204. Esses índices indicam que pela forma a bacia é classificada como bacia não sujeita a enchentes (BACK, 2014). Assim os problemas de cheias observados na bacia podem ser atribuídos mais as condições climáticas e ao uso e ocupação do solo.

Tabela 3. Dados da bacia de contribuição

Índice	Valor
Área (km <sup>2</sup> )	34,54
Perímetro (km)	36,83
Comprimento do rio (km)	15,45
Desnível (m)	225,80
Declividade S1 (m km <sup>-1</sup> )	14,62
Declividade S2 (m km <sup>-1</sup> )	5,17

A equação de chuvas intensas foi ajustada conforme a Eq. 11.

$$i = \frac{864,21T^{0,22}}{(t+9,78)^{0,72}} \quad (11)$$

em que:

$i$  = intensidade (mm h<sup>-1</sup>);

$T$  = período de retorno de (5 a 100 anos);

$t$  = duração da chuva (95 a 1440 minutos).

Para a determinação dos diferentes métodos de tempo de concentração foram usados os dados fisiográficos da Tabela 3. Conforme Silveira (2005), os métodos mais indicados para bacias rurais são respectivamente Corps of Engineers, Ven te Chow, Kirpich e Onda Cinemática. Os métodos Califórnia Culverts Practice e Cinemático foram calculados por também serem para bacias rurais. As diferenças entre os métodos foram inferiores a 10%. O maior tempo de concentração foi obtido como o método Ven te Chow e o menor com o método do Corps of Engineers (Tabela 4).

O método de Kirpich foi desenvolvido com dados de sete pequenas bacias rurais do Tennessee, com declividades variando 3% a 10% e áreas de no máximo 0,50 km<sup>2</sup>. Quando o comprimento do talvegue é superior a 10 km a fórmula parece subestimar o valor de tempo de concentração (TUCCI, 2002). Silveira (2005) comenta que, apesar de ser para bacias até 0,45 km<sup>2</sup>, a fórmula de Kirpich funcionou bem para bacias entre 153 e 11.162 km<sup>2</sup>.

O método da Onda Cinemática baseia-se na teoria da onda cinemática, considerando a superfície do escoamento como canal de grande largura e partindo-se das hipóteses de escoamento turbulento e chuva de intensidade constante (SANTOS, 2010).

O método Cinemático é o mais correto do ponto de vista conceitual, pois permite levar em consideração as características específicas do escoamento da bacia em estudo, porém é o mais trabalhoso considerando os dados necessários para sua obtenção (TUCCI, 2002).

Para o presente estudo foi adotado o tempo de concentração calculado pelo método do Corps of Engineers que conforme destacado por Silveira (2005), é indicado para bacias rurais. Vale ressaltar que o método da onda cinemática é o único que ocorre variação conforme o tempo de retorno (T), para o valor da Tabela 4, foi utilizado de 100 anos.

Tabela 4. Tempo de concentração (Tc)

Método	Tc (min)
Cinemático - SCS	171,64
Kirpich	166,56
Califórnia Culverts Practice	167,04
Onda Cinemática	165,06
Corps of Engineers	163,39
Ven te Chow	179,45

O mapa de uso e cobertura do solo para obtenção do CN está apresentado na Figura 2, com as áreas de uso do solo que foram obtidas pelo *software* ArcGis 10.7, através de análise de imagens aéreas da bacia de estudo.

Dessa forma foi possível obter as taxas de uso e ocupação do solo indicadas na Tabela 5.

Na Tabela 6 constam os valores do coeficiente de escoamento superficial médio (Cmédio) adotados para cada período de retorno e na Tabela 7 a média do número da curva (CN).

A vazão máxima de um rio é entendida como sendo o valor associado a um risco de ser igualado ou ultrapassado. Entendendo que a vazão é calculada conforme o volume de água escoada da bacia por intervalo de tempo, é importante ressaltar que ela pode ser estimada com base no ajuste de uma distribuição estatística, na regionalização de vazões e na precipitação.

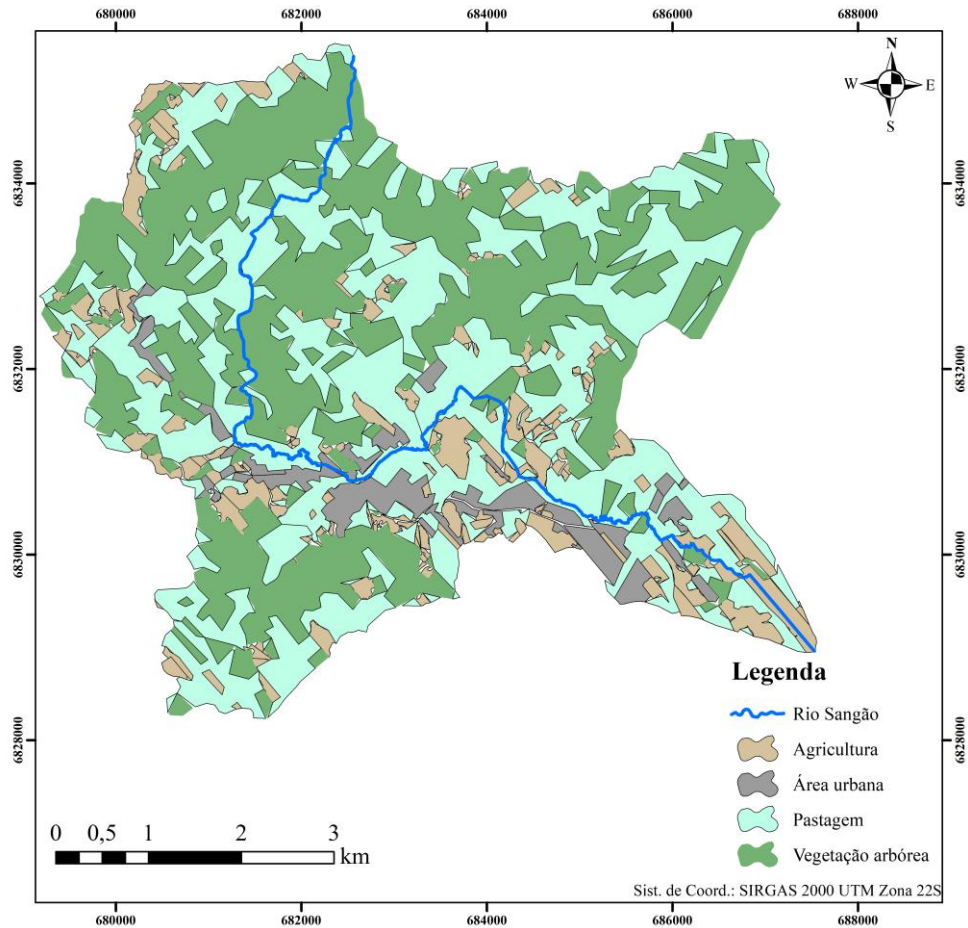


Figura 2. Análise do uso do solo

Tabela 5. Taxa de ocupação o solo

Uso e ocupação	Área (ha)	Área (%)
Área agrícola	392,2	11,4
Área de pastagem	1443,7	41,8
Área de vegetação arbórea	1428,0	41,3
Área urbana	189,7	5,5
<b>Total</b>	<b>3453,7</b>	<b>100,0</b>

Tabela 6. Coeficiente de escoamento superficial médio (Cmédio)

Ocupação da bacia	Período de Retorno (anos)		
	25	50	100
Área urbana	0,88	0,92	0,97
Área agrícola	0,40	0,43	0,47
Área de vegetação arbórea	0,31	0,35	0,39
Área de pastagem	0,34	0,37	0,41
<b>Cmédio</b>	<b>0,36</b>	<b>0,40</b>	<b>0,44</b>

Tabela 7. Número da curva (CN)

Superfície	Coefficiente CN
Área agrícola	71,90
Área de pastagem	79,00
Área de vegetação arbórea	55,00
Área urbana	72,00
Média	67,78

A escolha ocorre conforme a detenção de dados históricos de vazão e as condições da bacia se houve ou não alteração desde que os dados foram obtidos (TUCCI, 2002). Sendo assim, a vazão máxima pode ser estimada com base nas precipitações e para isto existem vários métodos que podem ser adotados.

Tucci (2002) afirma que a vazão máxima pode ser estimada com base na precipitação, por métodos que representam os principais processos da transformação da precipitação em vazão e pelo método racional, que engloba todos os processos em apenas um coeficiente.

A principal equação do método Racional foi apresentada em 1851 e atribuída a Mulvaney, engenheiro irlandês, sendo mais largamente utilizado, alguns anos depois, a partir da aplicação de Emil Kuichling. O método estabelece uma relação entre a chuva e o escoamento superficial, sendo utilizado para calcular a vazão de pico de determinada bacia, considerando uma seção de estudo e deve ser aplicado somente em pequenas bacias (TOMAZ, 2002).

Segundo São Paulo (1999), o método I-Pai-Wu constitui-se num aprimoramento do Método Racional (vide Estudos Hidrológicos – Método Racional - DP-H03 da SVP/PMSP), podendo ser aplicado para bacias com áreas de drenagem de até 200 km<sup>2</sup>. Calculado conforme a Eq. 8.

O método Ven Te Chow utiliza o princípio dos hidrogramas unitários; embora tenha sido originalmente desenvolvido para grandes bacias hidrográficas, muitos pesquisadores mostraram posteriormente que também é aplicável a pequenas bacias hidrográficas.

O método do Soil Conservation Service (SCS) é um método de distribuição temporal determinado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, em 1986. Ele especifica um hidrograma unitário adimensional (HOEPFNER, 2007). Para o cálculo deste método foi utilizado o software Hydrological Engineering Center (HEC) Hydrologic Modeling System

(HMS), conhecido como HEC-HMS que simula a precipitação em pequenas e grandes bacias hidrográficas, urbanas ou rurais, gerando como resultados hidrogramas de cheia.

Nas Figuras 5, 6 e 7 tem-se representado as vazões máximas respectivamente com períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos. Observa-se que o método McMath apresentou valores muito inferiores aos demais métodos. Conforme Batista, Novaes e Santos (2002), o método de McMath possui um fator de redução de área que evita um aumento linear e irreal das vazões em função das áreas de contribuição. Enquanto o método Racional apresentou valores superiores a todos os métodos em todos os tempos de retorno, com tendência a estarem superestimados. Os demais métodos obtiveram resultados mais próximos, porém conforme o tempo de retorno houve variação nas diferenças entre eles.

Para o tempo de retorno de 25 anos (Figura 5), o método Racional apresentou vazões com diferenças de 26,92% superior ao método Ven te Chow, e valor 24,35% superior ao método do Hidrograma. O método I-Pai-Wu apresentou vazão inferior a todos os métodos, exceto o de McMath, que por sua vez obteve um valor muito abaixo dos demais, estando subestimado, comparando ao método Racional a diferença é de 363%.

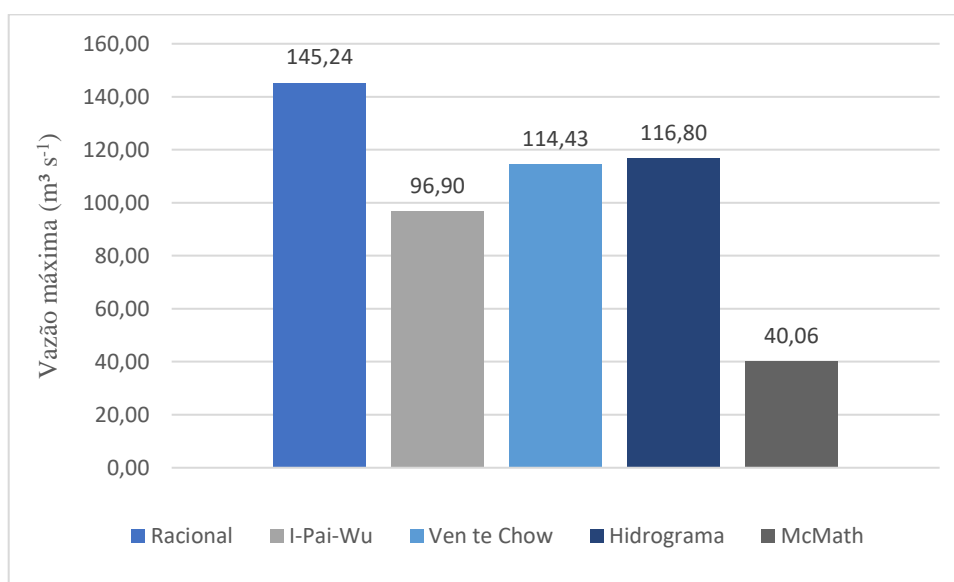


Figura 5. Estimativa de vazão máxima para período de retorno de 25 anos

Para o tempo de retorno de 50 anos (Figura 6) o método McMath manteve valores bem abaixo dos demais métodos, enquanto o método Racional permaneceu sendo o maior, com

diferença de 21,48% do segundo maior, o método Ven te Chow. Os métodos I-Pai-Wu e Hidrograma tiveram uma diferença de 9,99% entre eles, sendo o último maior.

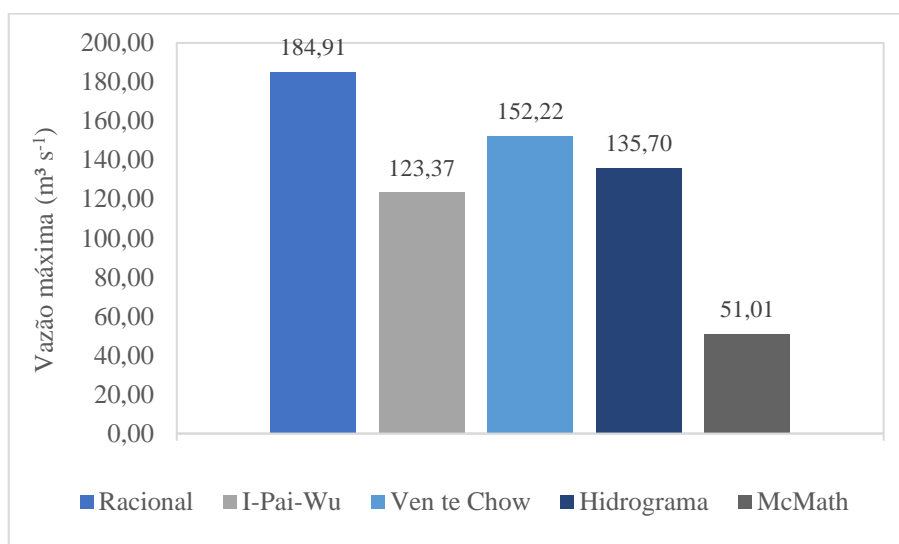


Figura 6. Estimativa de vazão máxima para período de retorno de 50 anos

Para o tempo de retorno de 100 anos (Figura 7) o método Racional seguiu apresentando valor superior a todos os demais métodos, enquanto o valor do método McMath foi inferior. O método Ven te Chow, obteve valores maiores comparados aos demais tempos de retorno, diferença de 18,96% inferior ao Racional, enquanto a diferença entre o Hidrograma e o I-Pai-Wu foi de apenas 0,11%.

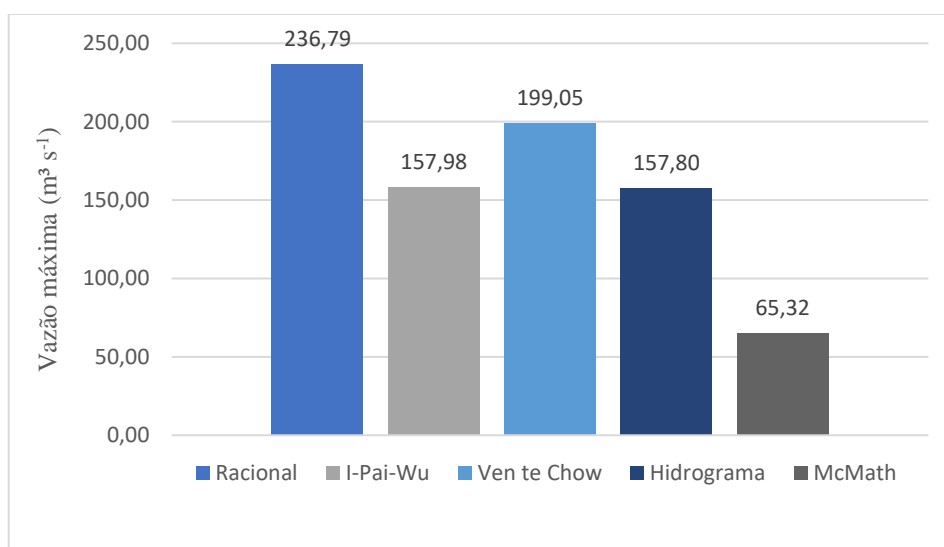




Figura 7. Estimativa de vazão máxima para período de retorno de 100 anos

Num geral se observa que quanto maior o tempo de retorno, maior é a diferença entre o método do Racional dos demais, enquanto o McMath em todos os tempos de retorno fica muito abaixo se tornando subestimado. Analisando que para todos os períodos de retornos os métodos I-Pai-Wu, Hidrograma e Ven te Chow apresentaram valores muito semelhantes, em geral com pequenas diferenças comparado aos outros métodos de estimativa de vazão máxima.

## Conclusões

O intuito deste estudo foi aplicar e discutir diferentes métodos de estimativas de vazão máxima para projetos de macrodrenagem urbana, para isto foi necessário calcular o tempo de concentração que através dos resultados obtidos, estes foram muito próximos, foi adotado o método Corps of Engineers conforme Silveira (2005), para dar sequência ao estudo.

Os resultados da estimativa de vazão máxima modificam dependendo de cada método, além de que para cada tempo de retorno há uma grande alteração. O método McMath obtém valores subestimado para bacias com áreas acima de 8 km<sup>2</sup> (BATISTA, NOVAES e SANTOS, 2002), conforme os resultados encontrados no presente estudo. Os resultados alcançados com o método Racional foram superiores a todos os métodos e para todos os tempos de retorno, podendo ser considerados superestimados. Os métodos Ven te Chow e I-Pai-Wu demonstram bons resultados, mas há uma grande variação nos valores obtidos com os métodos quando ocorre a alteração no tempo de retorno. O método do Hidrograma através do HEC-HMS é o mais indicado, por usar diversos parâmetros para análise da vazão da bacia, apesar de ser um método que necessita maior conhecimento, sendo sensível ao valor de CN da bacia.

## Referências bibliográficas

BACK, A. J. **Bacias hidrográficas: Classificação e caracterização física (com programa HidroBacias para cálculos)**. Florianópolis, Epagri. 2014. 162p.

BACK, A. J. **Chuvas intensas e chuva para dimensionamento de estruturas de drenagem para o Estado de Santa Catarina: (com programa HidroChuSC para cálculos)**. Florianópolis: EPAGRI, 2013. 197 p. ISBN 9788585014728.



BATISTA, M. de J.; NOVAES, F. de; SANTOS, D. G. dos. **Drenagem como instrumento de dessalinização e prevenção da salinização de solos**. 2ª ed., rev. e ampliada. Brasília: CODEVASF, 2002. 216 p. il. (Série Informes Técnicos). Disponível em: <<https://www.codevasf.gov.br/acesso-a-informacao/institucional/biblioteca-geral-rocha/publicacoes/arquivos/DrenagemcomoInstrumentodeDessalinizaoePrevenodaSalinizaodeSolos.PDF>> Acesso em: 08 nov. 2019.

DNIT. **Manual de Hidrologia Básica para estruturas de drenagem**. Rio de Janeiro, 2005. 133p.

FENDRICH, R. **Canais de drenagem de pequenas bacias hidrográficas**. Curitiba. Editora UFPR, 2008. 121 p.

HOEPFNER, A. C. **Estudo comparativo entre vazões de pico estimadas pelo método racional e pelo método do SCS para a bacia hidrográfica do rio bom retiro em Joinville-SC**. 2007. 57 p. Dissertação (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/124392/103.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 17 out. 2019.

LIMA, J. S. S. et al. Variabilidade temporal da precipitação mensal em Alegre – ES. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 39, n. 02, p. 327-332, 2008.

MIGUEZ, M. G.; VEROL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem Urbana. Do projeto tradicional à sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 366 p.

PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, M. C. D. de. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 628 p.

PRUSKI, F.F. et al. **Hídros: Dimensionamento de sistemas hidroagrícolas**. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 259 p.

SANTOS, L. C. C. **Estimativa de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos**. 2010. 173 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2010. Disponível em: <[http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese\\_4366\\_.pdf](http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_4366_.pdf)>. Acesso em: 14 out. 2019.

SÃO PAULO. S. **Diretrizes de projeto para estudos Hidrológicos – Método de I-PAI-WU**. 1999. 15 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.

TOMAZ, P. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais**. Guarulhos: Navegar, 2002. 452 p. ISBN 85-87678-07. Disponível em: <[http://wiki.urca.br/dcc/lib/exe/fetch.php?media=livro10\\_calculos\\_hidrologicos-ler.pdf](http://wiki.urca.br/dcc/lib/exe/fetch.php?media=livro10_calculos_hidrologicos-ler.pdf)>. Acesso em: 13 out. 2019.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 943 p. ISBN 85-7025-663-9.



TUCCI, C. E. M. Parâmetros do hidrograma unitário para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n.02, p.195–199, 2003.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: Cetesb, 1978. 477 p.