

Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso

(Hydrologic response of watershed to land use changes: integration of methods and application to a case study)

Herlander Mata-Lima

Depart. de Matemática e Engenharias, Univ. da Madeira, Portugal. E-mail: hlima@uma.pt

Hugo Vargas

CMRP-Instituto Superior Técnico (IST)
E-mail: hugo.vargas@ist.utl.pt

Julia Carvalho

Coordenadora de Projectos Ambiente e Biofísica, SINFIC, S.A.R.L. - E-mail: jcarvalho@sinfic.com

Marcia Gonçalves

CMRP-Instituto Superior Técnico (IST)
E-mail: mgoncalves@ist.utl.pt

Hugo Caetano

CMRP-Instituto Superior Técnico (IST)
E-mail: pcl42082@popsvr.ist.utl.pt

Andreia Marques

ERM Iberia - Environmental Resource Management
Spain. E-mail: andreia.marques@erm.com

Cristina Raminhos

Engenheira dos Recursos Hídricos da Universidade de Évora, Portugal. E-mail: c_raminhos@sapo.pt

Resumo

O tempo de concentração é uma variável que assume um papel fulcral na determinação do caudal e hidrograma do escoamento numa bacia hidrográfica.

Esse trabalho pretende constituir uma fonte exaustiva de informação sobre os diferentes métodos de cálculo do tempo de concentração e vazão de ponta na bacia hidrográfica. Subdividem-se os métodos em estritamente empíricos e semi-empíricos, evidenciando-se as vantagens e constrangimentos de aplicação de cada um deles a partir dos resultados obtidos para a bacia hidrográfica da ribeira do Livramento na região de Setúbal (Portugal). Os tempos de concentração obtidos pelos métodos empíricos e semi-empíricos são depois utilizados no cálculo da vazão de ponta pelos métodos Racional e de Soil Conservation Service (SCS) para ilustrar o impacto nos resultados bem como a vantagem de aplicação de cada um dos métodos.

Os resultados demonstram que os métodos semi-empíricos possibilitam a avaliação do impacto das intervenções de engenharia no comportamento hidrológico da bacia, visto que permitem considerar a variabilidade espacial e espaço-temporal das características biofísicas da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Tempo de concentração, método estritamente empírico, método semi-empírico, vazão de ponta, variabilidade espaço-temporal.

Abstract

This article intends to present different methods to calculate the concentration time (t_c) and discharge in watersheds. The methods are divided into empirical and process-based and were applied to the Livramento watershed in Portugal.

Due to the watershed's spatial heterogeneity and space-time variability, one suggests use of the process-based method rather than the empirical in order to achieve more accurate results, since watershed occupation does not remain the same over time. The time of concentration obtained by empirical and process-based methods are then used to compute watershed discharge through the Rational and Soil Conservation Service methods. With this procedure one can predict the impact of man-made projects on watershed hydrology.

The results show that process-based methods can be useful to assess the impact of a project in hydrologic system.

Keywords: Time of concentration, empirical method, process-based method, flood discharge, space-time variability.

1. Introdução

Não obstante existirem vários métodos de cálculo do tempo de concentração em bacias, é comum recorrer-se aos métodos estritamente empíricos, provavelmente devido à facilidade associada à sua aplicação, descurando as limitações dos mesmos em representar a situação real - sobretudo quando se tratam de bacias fisiográfica e ocupacionalmente heterogêneas.

O tempo de concentração (t_c) é o tempo de percurso da água precipitada desde o ponto cinematicamente mais afastado da bacia hidrográfica até a seção de referência. Sendo o tempo de concentração uma grandeza fundamental para a compreensão do escoamento produzido na bacia hidrográfica e também para o dimensionamento de sistemas de drenagem, armazenamento e controle, a sua determinação deve ser tão rigorosa quanto possível.

O trabalho analisa, de modo comparativo, os diferentes métodos de cálculo do tempo de concentração e a sua influência na vazão de ponta de bacias hidrográficas. Houve a preocupação de subdividir os métodos em dois grupos:

- i) Estritamente empíricos.
- ii) Semi-empíricos.

Consideram-se métodos *semi-empíricos* todos aqueles que, não sendo fisicamente baseados, permitem ter

em conta a heterogeneidade espaço-temporal da bacia no que concerne às características biofísicas (e.g. tipo de vegetação e densidade, tipo de ocupação e uso do solo, topografia) que, como se sabe, varia no espaço e no tempo. Essa variabilidade espaço-temporal leva a que os modelos distribuídos, i.e., que não consideram a bacia como uma unidade única e homogênea, conduzam a resultados mais condizentes com a realidade.

O trabalho faz referência, ainda, ao domínio de aplicação dos métodos, bem como à adequação dos mesmos às diferentes situações.

Os resultados obtidos para os diferentes métodos são apresentados, de modo comparativo, entre si, com o fim de evidenciar a relação entre os mesmos.

2. Metodologia

2.1 Aspectos gerais

Como já foi referido, o tempo de concentração é uma grandeza fundamental no estudo hidrológico da bacia, visto que representa a influência conjugada de diferentes fatores (e.g. o tipo de ocupação e uso, a rugosidade da superfície do terreno, a geometria dos canais e planos de escoamento e o declive).

2.1.2. Rugosidade da superfície

Bacias rurais produzem pouco es-

coamento comparativamente a bacias urbanas (ver Figura 1). As bacias rurais possuem terrenos com maior capacidade de infiltração e o escoamento sofre retardamento provocado pelo coberto vegetal que funciona como macrorrugosidade, oferecendo resistência ao escoamento (Chaveca, 1999; Raminhos, 2002). Por outro lado, a interceptação da precipitação pelo coberto (e.g. árvores e arbustos) é fundamental para redução da quantidade e o impacto do escoamento.

No caso de bacias urbanas, a quantidade de precipitação que atinge a superfície do solo (ou precipitação efetiva) e o escoamento são manifestamente superiores pelos seguintes motivos: i) reduzida interceptação pelo coberto vegetal; ii) fraca infiltração conseqüente da elevada percentagem de área impermeabilizada; e iii) o escoamento ocorre segundo planos e canais muito bem definidos (e.g. estradas, valas, coletores pluviais, etc.). Todos esses fatores contribuem para que o tempo de concentração seja inferior em bacias com características urbanas.

2.1.3. Precipitação e teor de humidade do solo

De acordo com Ramser (*apud* Hotchkiss & McCallum, 1995), o tempo de concentração varia ligeiramente com a intensidade de precipitação e o teor de humidade inicial do solo. Portanto o tem-

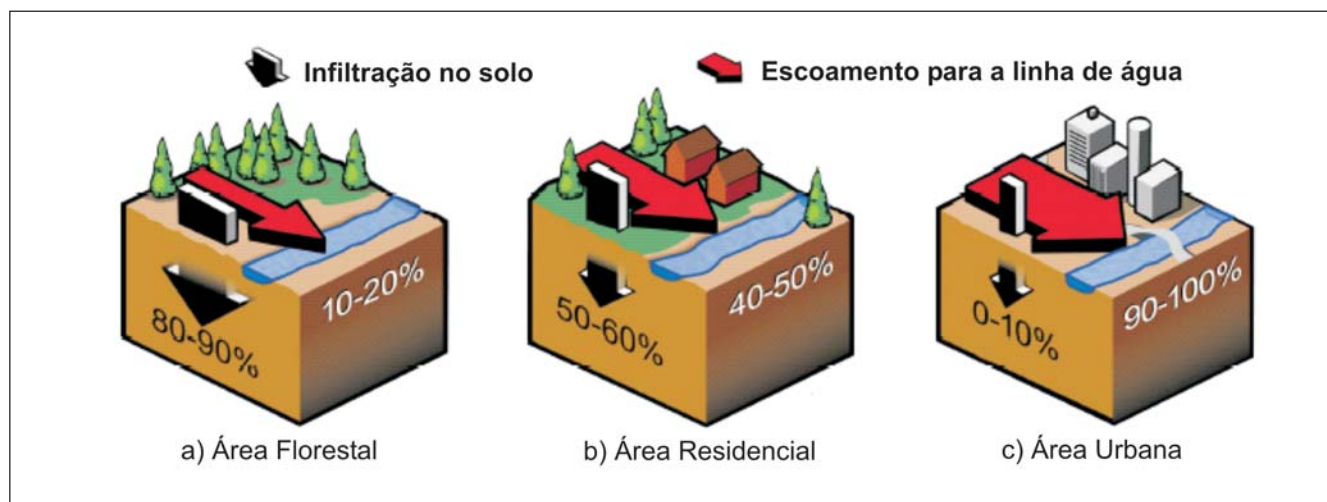


Figura 1 - Alterações hidrológicas consequentes do crescimento urbano (modificada de Marsh, 1983).

po de concentração é tanto menor quanto maior for a intensidade de precipitação e o teor de humidade inicial do solo.

2.1.4 Geometria dos canais e planos de escoamento

Em bacias não-urbanas, o tempo de concentração depende, essencialmente, do escoamento sobre o terreno. Contudo o crescimento urbano reduz, progressivamente, o escoamento sobre o terreno, substituindo-o pelo escoamento em canais prismáticos. Visto que esses canais possuem elevada “eficiência hidráulica”, a velocidade do escoamento é elevada, o que diminui, consideravelmente, o tempo de concentração das bacias hidrográficas.

2.1.5 Declive

No que diz respeito ao declive, a situação não é óbvia como nos casos anteriores. O crescimento urbano (ou urbanização) de uma dada bacia não significa, necessariamente, o aumento do declive, pois tudo dependerá da geomorfologia da região e da perícia do projetista. Porém sabe-se que, após a urbanização da bacia, os efeitos do declive, no escoamento, ganham maior significado se houver a tendência de se construírem canais impermeáveis (em betão), retilíneos e perpendiculares aos planos de encostas para recolher e drenar a água pluvial.

MOTH (1998) apresenta os seguintes valores mínimos do tempo de concentração (t_c) recomendados para diferentes tipos de bacias de pequenas dimensões: i) urbana - 5 minutos; ii) residencial - 10 minutos; e iii) rural - 15 minutos.

Também WSDOT (1997) afirma que o valor de tempo de concentração a adotar no estudo hidrológico não deve ser nunca inferior a 5 minutos.

Informação mais exaustiva sobre os fatores que afetam o tempo de concentração constam de Laurenson et alii. (1985), Schueler (1987), ASDOT (1995) e Wong et alii. (1998).

O tempo de concentração (t_c) influencia a forma e o pico do hidrograma do escoamento e vários autores publicaram estudos nesse âmbito (ver, e.g., Marsh, 1983, Correia, 1984; Portela et alii., 2000). É, por conseguinte, uma grandeza fundamental na avaliação hidrológico-ambiental da bacia.

Nesse trabalho, os métodos de cálculo do tempo de concentração são subdivididos em duas categorias: i) *estritamente empíricos*; e ii) *semi-empíricos*.

2.1.6 Métodos estritamente empíricos

Resultam da análise estatística de grandes volumes de informação de campo que conduzem à obtenção de equações de regressão. Esses métodos baseiam-se no estabelecimento de uma relação entre o tempo de concentração e as características fisiográficas da bacia através da análise de regressão linear múltipla, o que leva a que a sua aplicação seja mais segura em situações que estiveram na base do seu desenvolvimento. São, por isso, métodos rígidos e estáticos, que não consideram a variabilidade espacial e temporal da bacia. Porém são métodos expeditos (não exigem dados de entrada detalhados), importantes para a fase preliminar do estudo (estudo prévio ou anteprojecto) de uma dada bacia.

2.1.7 Métodos semi-empíricos

Nesse trabalho, consideram-se métodos semi-empíricos (ou *process-based methods*) aqueles que não são estritamente empíricos e estáticos por incluírem parâmetros que variam em função das características ocupacionais da bacia, denotando, portanto, flexibilidade no uso. Trata-se de métodos particularmente importantes por permitirem analisar os diferentes cenários e, sobretudo, por viabilizarem a previsão do comportamento hidrológico face às alterações propostas (Mata-Lima, 2006). É com base nesses métodos que se deve avaliar a necessidade de adotar sistemas de controle do escoamento, tais como bacias de retenção e detenção, entre outros.

Dos vários métodos semi-empíricos existentes, o método do Soil Conservation Service (SCS, 1972) é daqueles que se podem considerar menos empírico por reflectir, de certo modo, os processos que ocorrem na bacia, visto incluir o número do escoamento na sua expressão de cálculo.

2.2 Métodos de cálculo do tempo de concentração nas bacias hidrográficas

Esse subitem apresenta os diferentes métodos, estritamente empíricos (ver Quadro 1) e semi-empíricos (ver Quadro 2), utilizados para calcular o tempo de concentração nas bacias hidrográficas.

Ainda sobre o método designado por SCS Lag (equação 14a do Quadro 2) convém realçar os seguintes aspectos:

- O parâmetro CN procura definir, mediante um valor numérico, a influência do terreno no comportamento do escoamento superficial. A atribuição do CN está associada à constituição geológica da área e ao tipo de ocupação e uso do solo.
- USDA (1997) chama atenção para o fato de o declive médio da bacia (i) na equação (14a) ser obtido através do mapa topográfico medindo-se os declives das encostas na direção do escoamento sobre o terreno, sendo (i) a média dos declives dos terrenos medidos:

$$i = \frac{100L_c I_c}{A} \quad (17)$$

onde: i é o declive médio da bacia [%], A é a área da bacia [m^2], L_c é o comprimento total da curva de nível [m] e I_c é a equidistância entre as curvas de nível [m].

- Esse método reflete, essencialmente, o escoamento concentrado. É apontado como aquele que se pode considerar mais fisicamente baseado por reflectir, de certa forma, os processos que ocorrem na bacia (USA-CE, 1994), daí a possibilidade de se

Quadro 1 - Métodos estritamente empíricos para o cálculo do t_c na bacia hidrográfica.

Método	Equação	Nº da equação	Termos da equação	Comentários	Fonte
Ventura	$t_c = 240 \sqrt{\frac{AL}{H}}$	(1)	t_c - tempo de concentração [min], A- área da bacia [km ²], L- comprimento do talvegue [km], e H- diferença de cotas [m] do talvegue entre o ponto mais afastado e a seção de referência da bacia [m].	Recomendado pela <i>École Nationale des Ponts et Chaussées (France)</i> .	IEP (2001)
Temez	$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{i^{0.25}} \right)^{0.76}$	(2)	t_c [h], L- comprimento da linha de água principal [km], i- declive médio da linha de água principal da bacia [m/m].	Esse método é recomendado pelo IEP (ver IEP, 2001). É um método muito testado nas bacias hidrográficas da Espanha e é recomendado para bacias naturais de área até 300*10 ³ ha.	Temez (1978) e LNEC (1995)
Kirpich	$t_c = 0.0195 L^{0.77} i^{-0.385}$	(3)	t_c [min], L [m], e i [m/m].	O valor de t_c obtido deve ser multiplicado por 0.2 ou 0.4, conforme sejam canais de betão ou superfícies asfaltadas, respectivamente; é recomendado para bacias rurais (0.50 - 45.3 ha) com canais bem definidos e de declives situados entre 3 e 10%.	Kirpich (1940), AISI (1984) e Chow et alii. (1988) e USDA (1996).
Pickering	$t_c = \left(\frac{0.871L^3}{H} \right)^{0.385}$	(4)	t_c [h], L [km] e H [m] e tem o mesmo significado já referido na equação (1).	Método equivalente ao de Kirpich e muito usado nos projetos da Brisa, SA.	Brisa (1974)
California Culverts Practice (CHPW)	$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$	(5)	t_c [min], L [km], e H [m].	Desenvolvido a partir de pequenas bacias montanhosas da Califórnia.	Chow et alii. (1988)

Continuação...

Quadro 1 (continuação) - Métodos estritamente empíricos para o cálculo do t_c na bacia hidrográfica.

Método	Equação	Nº da equação	Termos da equação	Comentários	Fonte
Bransby Williams	$t_c = 0.605 \frac{L}{i^{0.2} A^{0.1}}$	(6)	t_c -tempo de concentração [h], L-comprimento da linha de água principal [km], i-declive médio da linha de água [%], e A - área da bacia [km ²].	Especialmente recomendado para bacias rurais.	MOTH (1998) e ASDOT (1995)
Giandotti	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + \frac{3}{2}L}{0.8\sqrt{H_m}}$	(7)	t_c [h], L [km], A [km ²], e H_m - a altitude média da bacia [m].	Derivada a partir de dados de bacias hidrográficas italianas.	Giandotti (1940)
Pasini	$t_c = \frac{0.108(AL)^{1/3}}{i^{0.5}}$	(8)	t_c [h], L [km], A [km ²], e i [m/m].		Lo Bosco et al. (2002)
Picking	$t_c = 0.088333 \left(\frac{L^2}{i} \right)^{0.333}$	(9)	t_c [h], L [km], A [km ²], e i [m/m].	--	Lança (2000)
Ven Te Chow	$t_c = 0.8773 \left(\frac{L}{\sqrt{i}} \right)^{0.64}$	(10)	t_c [h], L [km], e i [m/km].	--	Lança (2000)
Epsy	$t_c = 1.24 \left(\frac{L}{\sqrt{i}} \right)^{0.36}$	(11)	t_c [h], L [mile], e i [ft/mil].	Método desenvolvido para bacias naturais.	Hotchkiss & McCallum (1995)
Schaake	$t_c = \frac{0.503L^{0.24}}{i^{0.16} A_i^{0.26}}$	(12)	t_c [min], L [ft], i [ft/ft], A- área impermeável na bacia [%].	Aplicável a bacias urbanas, incluindo ruas pavimentadas com sarjetas ao longo do passeio.	Schaake et alii., 1967; citado por Martins et alii. (2003)

Quadro 2 - Métodos semi-empíricos para o cálculo do t_c na bacia hidrográfica.

Método	Equação	Nº da equação	Termos da equação	Comentários	Fonte
Hathaway	$t_c = \frac{(rL)^{0.467}}{1.651^{0.234}}$	(13)	t_c [h], L [km], i [m/m], e r- coeficiente de rugosidade definido pelo tipo de ocupação e de uso do solo [-].	--	Hathaway (1945) e AISI (1984)
SCS Lag	$t_{lag} = \frac{2.587 L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{1900 i^{0.5}}$	(14a)	t_{lag} - tempo de atraso da bacia [h], L- comprimento da bacia [m], CN- número de escoamento [-], e i- declive médio da bacia [%].	Recomendado para bacias homogêneas não urbanas de área até 810 ha. Esse método reflete essencialmente o escoamento concentrado. Pode sobrestimar o t_{lag} quando aplicado a bacias mistas.	SCS (1972), SCS (1986) e USDA (1997)
	$t_c = t_{lag}/0.6$	(14b)			
Soil Conservation Service	$t_c = \frac{L}{k\sqrt{i}}$	(15)	t_c [min], L [m], I [m/m], e K - coeficiente relacionado com o tipo de ocupação do solo [m/min].	Recomendado pelo Departamento de Transportes de Washington (WSDOT)	SCS (1975): citado por WSDOT (1997)
Federal Aviation Administration	$t_c = 1.8(1.1 - C)L^{0.5}i^{-0.333}$	(16)	t_c [min], C - o coeficiente de escoamento do método racional [-], L - comprimento do plano de escoamento ou linha de água [ft], e i - declive médio [%].	Este método tem sido mais utilizado no estudo de bacias urbanas.	Chow et alii. (1988)

obterem valores diferentes para o período de pré e pós-desenvolvimento, permitindo testar a influência dos diferentes cenários de ocupação da bacia hidrográfica.

lho, os métodos semi-empíricos, uma vez que a informação necessária para aplicação dos mesmos é acessível. Além disso, a magnitude de erro resultante da aplicação de uma metodologia imprópria é muito mais acentuada no caso de encostas devido à pequenez do universo do estudo, que não permite a atenuação sucessiva do erro. (Quadro 3).

Cálculo do tempo de concentração nos planos de escoamento

Para o cálculo do tempo de concentração nos planos de escoamento (e.g. encostas), recomendam-se, nesse traba-

2.3. Atribuição do coeficiente de escoamento da fórmula racional (C) e número de escoamento (CN) à bacia hidrográfica

O método racional é, inquestionavelmente, o método de cálculo da vazão mais divulgado. Uma das razões que contribuem para o maior uso do método racional é a sua relativa simplicidade.

Quadro 3 - Métodos semi-empíricos para o cálculo do t_c num plano de escoamento.

Método	Equação	Nº da equação	Termos da equação	Comentários	Fonte
Seelye	$t_c = 0.225 \frac{L^{0.42}}{i^{0.19} C}$	(18)	t_c - tempo de concentração [min], L- comprimento do plano medido na direcção do escoamento [ft], i- declive do plano do escoamento [-] e C- coeficiente do escoamento da fórmula racional [-].	--	VDOT (2001)
Onda cinemática	$t_c = 0.007 \frac{(Ln)^{0.8}}{P_2^{0.5} i^{0.4}}$	(19)	t_c [h], L [ft], n- coeficiente de rugosidade de Manning (ver Engman, 1986), P- precipitação com a duração de 24 h correspondente ao período de retorno de 2 anos [in] e i- declive do plano do escoamento [-].	Método válido para qualquer superfície de comprimento não superior a 91 m.	Overton & Meadows (1976) e SCS (1986)
Onda cinemática	$t_c = \frac{418 L^{0.6} n^{0.6}}{60 I^{0.4} i^{0.3}}$ com $I = a(t_c)^b$	(20)	t_c [min], L [m], n- coeficiente de rugosidade de Manning, I- intensidade de precipitação [mm/h], a e b são parâmetros curva da Intensidade-Duração Freqüência (I-D-F) da precipitação e i - declive do plano do escoamento [m/m].	O domínio de aplicação deste método está limitado a superfícies impermeáveis de comprimento não superior a aproximadamente 100 m.	Ragan (1971) e McCuen et alii. (1996)
Friend	$t_c = \frac{107 n L^{0.333}}{i^{0.2}}$	(21)	t_c [min], L [m], n- coeficiente de rugosidade de Horton, que freqüentemente, se considera igual ao do Manning (ver , e.g., Engman, 1986 e Lencastre, 1996) e i - declive do terreno [%].	--	DIDM (2001)

Por outro lado, o método do Soil Conservation Service (SCS) é de aplicação mais complexa, designadamente no que concerne à atribuição do número do escoamento (*curve number*, CN), que, tal como o coeficiente de escoamento (C) da fórmula racional, caracteriza as condições biofísicas da bacia hidrográfica. A dificuldade advinda da atribuição do parâmetro CN às bacias inibe a aplica-

ção desse método em situações de projeto, por isso as entidades de consultoria em engenharia realizam estudos hidrológico-ambientais baseados, essencialmente, no método racional.

Com o intuito de ultrapassar esta dificuldade, apresenta-se, nesse trabalho, uma equação empírica que relaciona o parâmetro CN com o coeficiente do

escoamento C, com a precipitação total (P_{tot}) e com o parâmetro $f_a = I_a/S$ (ver Smith, 2004).

Visto que existe o conhecimento suficiente para a atribuição tão rigorosa quanto possível do coeficiente C às bacias, o parâmetro CN pode ser aproximado com base na equação (22) (Smith, 2004):

$$CN = \frac{1000}{10 + P_{\text{tot}} \left[\frac{1}{f_a} + \frac{1-f_a}{2f_a^2} C \left[1 - \left(1 + \frac{4f_a}{(1-f_a)^2} \frac{1}{C} \right)^{1/2} \right] \right]}, \text{ com } f_a = I_a/S \quad (22)$$

onde: P_{tot} é a precipitação total, I_a são perdas iniciais da precipitação, S é a máxima capacidade de retenção do solo e C é o coeficiente de escoamento da fórmula racional. Os valores de P_{tot} , I_a e S são expressos em polegadas (25.4 mm).

A equação anteriormente apresentada vem facilitar, sobremaneira, a aplicação dos métodos semi-empíricos, de cálculo do tempo de concentração, que permitem ter em consideração a evolução das condições biofísicas da bacia (i.e. condição de ocupação e uso da bacia), sendo, por essa razão, métodos dinâmicos. Os métodos semi-empíricos são fundamentais para avaliar o impacto das intervenções de engenharia no meio natural.

2.4 Métodos de cálculo da vazão de cheia

Para o cálculo da vazão de cheia, consideram-se dois métodos, a saber: i) *método Racional modificado* (ver, e.g., Chow et alii., 1988, WSDOT, 1997, DIDM, 2001, GDOE, 2001, VDOT, 2001, DMR, 2002) e ii) *método do Soil Conservation Service - SCS* (ver, e.g., SCS, 1972, 1986; Mata-Lima et alii., 2006; Mata-Lima, 2006).

A obtenção da vazão de cheia pelo método Racional corresponde à seguinte equação:

$$Q_p = k_f \left(\frac{CIA}{360} \right) \quad (23a)$$

$$I = a(t_c)^b \quad (23b)$$

onde: Q_p é a vazão de ponta um determinado período de retorno [m^3/s], A é a área da bacia [ha], I é a intensidade de precipitação [mm/h], a e b são parâmetros da curva I-D-F (ver quadros 3 e 5), C é o coeficiente de escoamento [-] (ver, e.g., GDOE, 2001, VDOT, 2001); k_f é o factor de frequência do período de retorno (assume o valor de 1.25 para o período de retorno de 100 anos - ver, e.g., WSDOT, 1997, VDOT, 2001).

Quando se considera k_f igual à unidade, independentemente do período de retorno considerado, o método racional diz-se simples (ou convencional).

A aplicação do método do SCS é mais complexa relativamente ao método Racional e implica a resolução das seguintes equações:

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}, \text{ com } S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right), I_a = 0.2S \text{ e } P > I_a \quad (24a)$$

$$Q_p = 0.278 \frac{RA}{t_c} \quad (24b)$$

onde: R é o escoamento acumulado ou precipitação efetiva [mm], P é a precipitação acumulada (escoamento potencial máximo) [mm], S é a capacidade máxima de armazenamento no solo [mm], I_a são as perdas iniciais (de precipitação) devido à interceptação pelo coberto vegetal, infiltração e retenção em depressões de terreno [mm], CN é o número do escoamento, que varia em função do tipo de solo e da ocupação e uso da bacia hidrográfica, Q_p é a vazão de ponta para um determinado período de

retorno [m^3/s]. Detalhes acerca da aplicação do método de SCS pode ser consultado em Mata-Lima et alii. (2006).

3. Estudo de caso: bacia hidrográfica da ribeira do Livramento

Recorre-se a um caso de estudo de modo a ilustrar as metodologias anteriormente descritas. Considera-se a bacia hidrográfica da ribeira do Livramento, afluente do estuário do Sado, cujo limite de jusante corresponde à entrada em coletor no início da cidade de Setúbal - de acordo com a Figura 2 (Rego & Correia, 2000).

O Quadro 4 sintetiza as principais características fisiográficas da bacia, de acordo com Rego e Correia (2000). Os parâmetros da curva Intensidade-Duração-Frequência (I-D-F) da precipitação utilizados são os correspondentes à região de Setúbal (Quadro 5).

4. Resultados e discussão

Nessa seção, apresentam-se, de modo comparativo, os resultados da aplicação dos diferentes métodos empíricos e semi-empíricos, anteriormente descritos, privilegiando-se a informação gráfica de modo a facilitar a sua interpretação.

Os resultados revelam uma grande amplitude de variação entre os valores de t_c obtidos para os diferentes métodos. Merece destaque o fato de os valores do tempo de concentração, apresentados na Figura 3a, permitirem a subdivisão em dois grandes grupos:

- i) $164 < t_c [\text{min}] < 235$ (Ventura, Temez, B. Williams, Pasini & Giandotti).
- ii) $56 < t_c [\text{min}] < 100$ (Kirpich, Ven Te Chow, Picking, CHPW & Epsy).

Estabelecendo a analogia com a Figura 3b, constata-se que os grupo (i) e (ii) possuem uma ordem de grandeza próxima do valor obtido para os métodos de

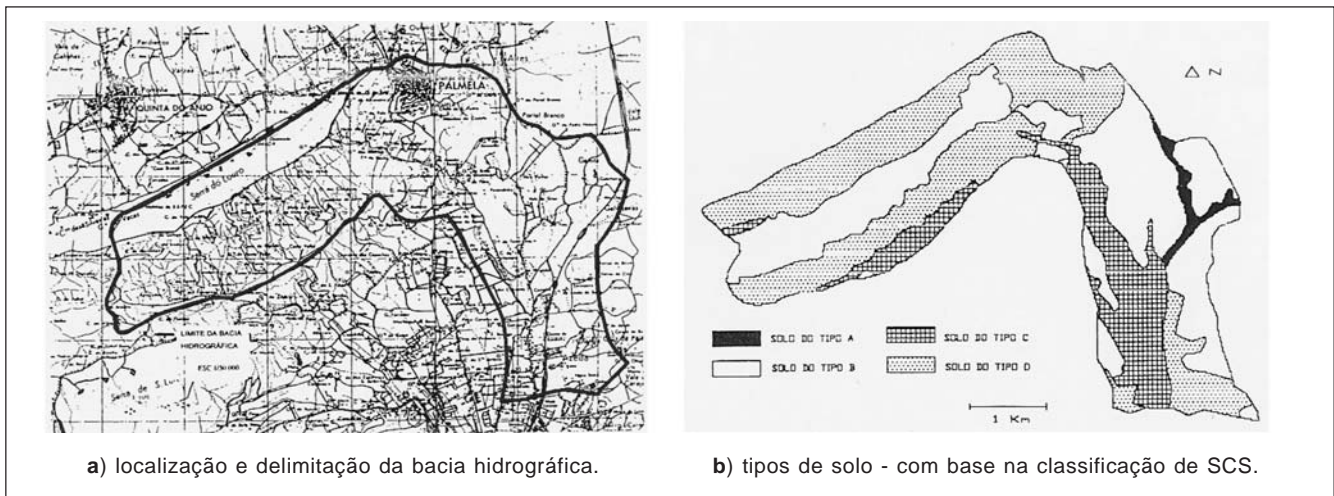


Figura 2 - Características da bacia hidrográfica da ribeira do Livramento.

Quadro 4 - Características fisiográficas da bacia hidrográfica da ribeira do Livramento.

Área (A)		Comprimento da linha de água (L)	Altitude (H)		Declive médio (i)	Curve number*	
			Máxima	Mínima		CNo	CNi
[ha]	[km ²]	[m]	[m]	[m]	[m/m]	[-]	[-]
1280	12.80	6800	188	6	0.015	88.5	95(?)

Legenda: CNo e CNi representam o número do escoamento (*curve number*) do período pré e pós-desenvolvimento, respectivamente.

(?) - considera-se, por hipótese, que o CNi terá um valor de 95.0 após a realização de determinados empreendimentos de engenharia que irão aumentar a porção da área impermeável da bacia.

Quadro 5 - Parâmetros a e b da curva I-D-F (Matos, 1987) para o cálculo de I_p em mm/h, de acordo com a equação (23b).

Período de Retorno, T (anos)	10	20	50	100
a [-]	290.68	317.74	349.54	365.62
b [-]	-0.549	-0.538	-0.524	-0.508

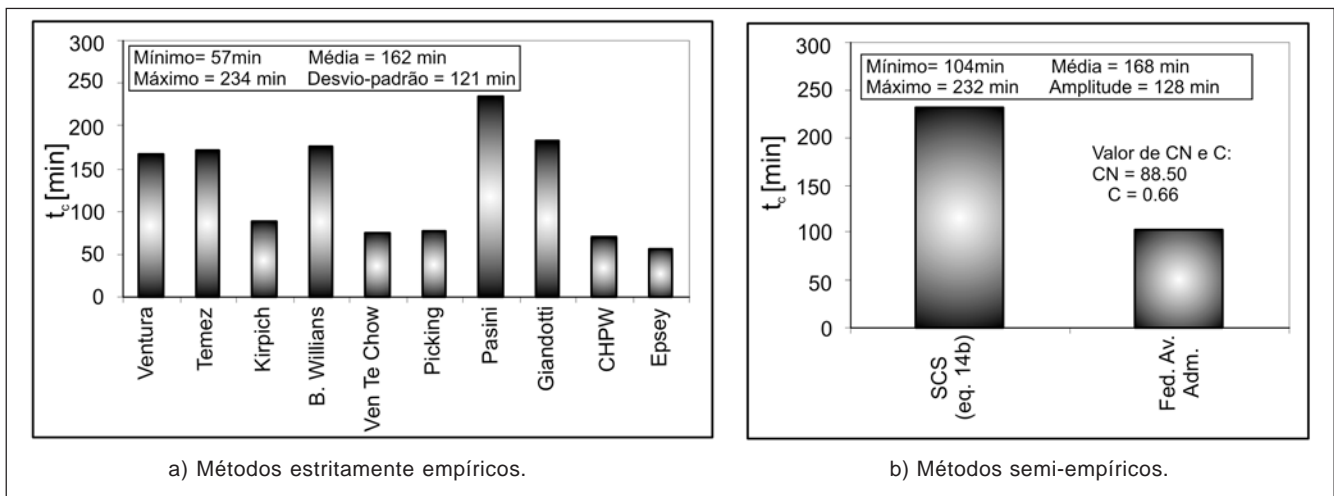


Figura 3 - Resultados da aplicação dos métodos empíricos e semi-empíricos à bacia hidrográfica.

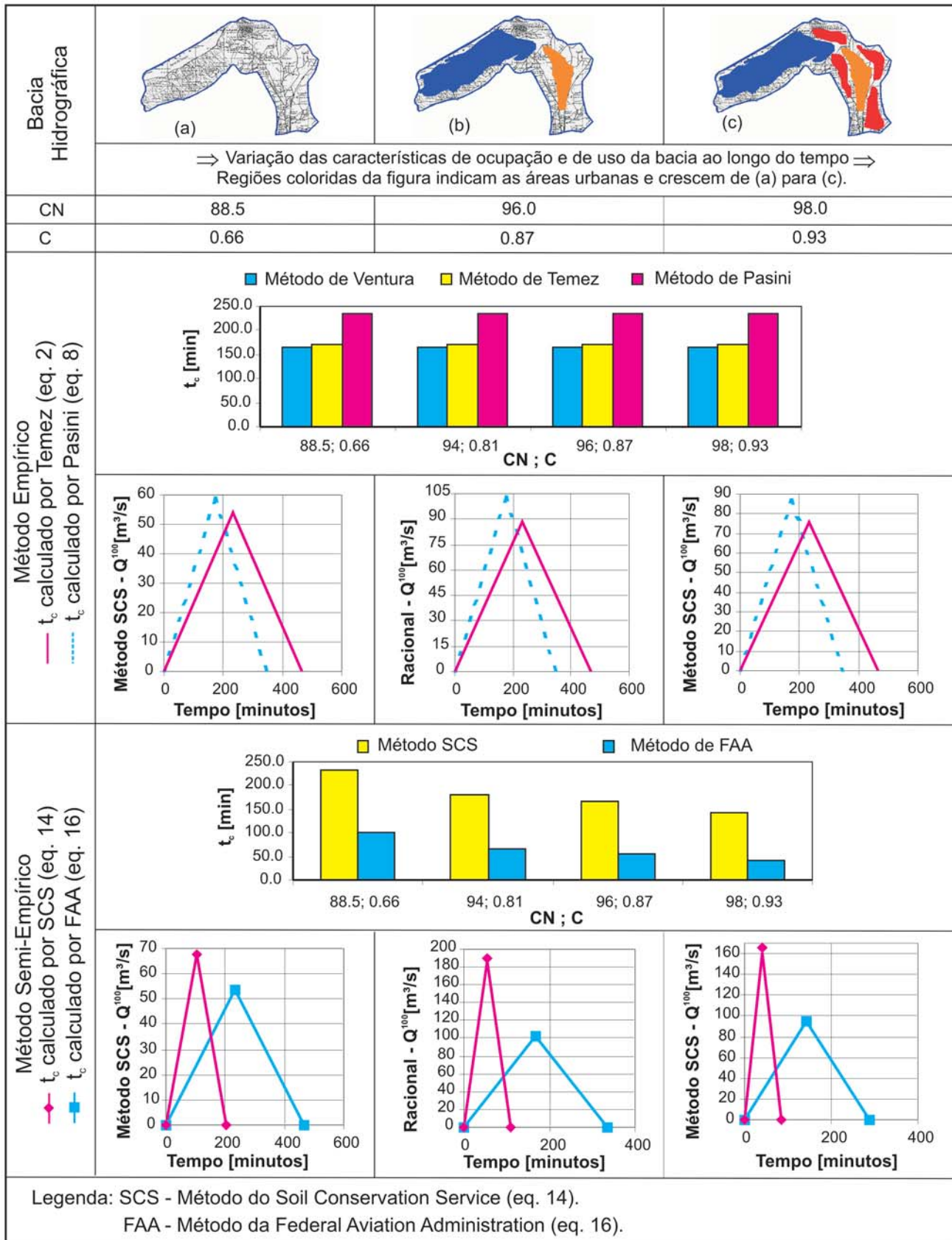


Figura 4 - Comparação entre métodos estritamente empíricos e semi-empíricos (tempos de concentração e caudais) para período de retorno de 100 anos.

SCS Lag e Federal Aviation Administration, respectivamente. Importa salientar que os métodos enquadrados no grupo (i) simulam resultados (ver Figura 4) mais próximos dos observados para a bacia de Livramento que constam de Rego e Correia (2000) e Correia et alii. (1999).

Finalmente, é importante ter em atenção o fato de que, em situações de projeto, os métodos enquadrados no grupo (ii) simulam a caudais de ponta mais elevados e menor duração do hidrograma do escoamento.

4.1 Evolução do tempo de concentração e caudal em função das condições biofísicas da bacia hidrográfica

A análise comparativa entre os métodos estritamente empíricos e semi-empíricos, cujos resultados constam da Figura 4, revela a vantagem de aplicação dos métodos semi-empíricos relativamente aos primeiros. Os resultados dos métodos semi-empíricos demonstram uma evolução temporal em função das condições de ocupação de uso da bacia contrariamente aos dos métodos estritamente empíricos, que são completamente estáticos (i.e. constantes no tempo). Essa diferença de comportamento dos dois métodos deve-se ao facto de os métodos semi-empíricos terem em consideração um parâmetro (e.g. CN, C) que reproduz as características biofísicas da bacia hidrográfica, não se limitando, apenas, aos parâmetros geométricos da mesma.

5. Conclusões

O tempo de concentração é função das características biofísicas (e.g. ocupação e uso do espaço) da bacia e a sua magnitude influencia o pico e a forma (designadamente a largura da base) do hidrograma do escoamento na bacia, sendo, por conseguinte, uma grandeza fundamental para avaliação hidrológica das bacias.

Os métodos estritamente empíricos são de aplicação mais simples, uma vez que consideram apenas os parâmetros geométricos da bacia e, por essa razão, são mais utilizados na prática de engenharia. No entanto, os métodos semi-empíricos têm a vantagem de permitir considerar as características biofísicas da bacia, geralmente representadas pelo coeficiente de escoamento (C) ou pelo número de escoamento (CN), parâmetros úteis para se avaliar o impacto das intervenções de engenharia (e.g. obras que provocam a impermeabilização da superfície) no comportamento hidrológico da bacia (ver Figura 4). Tal vantagem deve-se ao fato de esses métodos integrarem parâmetros que caracterizam a variabilidade espaço-temporal da bacia hidrográfica.

Convém realçar, também, que a determinação dos parâmetros que definem as características de ocupação e de uso da bacia (e.g. coeficiente de escoamento, número de escoamento e coeficiente de rugosidade) deve basear-se em modelos distribuídos (*distributed models*), uma vez que os modelos concentrados (*lumped models*) não permitem ter em consideração a heterogeneidade espacial da bacia.

6. Agradecimento

Os autores aproveitam o ensejo para expressar agradecimento aos *referees* pelas contribuições apresentadas.

7. Referências bibliográficas

AISI. *Handbook of steel drainage and highway construction products*. Washington, DC: American Iron and Steel Institute (AISI), 1984.

ASDOT. *Alaska highway drainage manual*. Alaska (USA): Alaska State Department of Transportation. 1995. Chapter 7: Hydrology.

CHAVECA, C.S. *Resistência ao escoamento sobre o terreno. Efeitos da macrorrugosidade e vegetação*. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 1999. (Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos).

CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W. *Applied hydrology*, New York: McGraw-Hill, 1988.

CORREIA, F.N. *Proposta de um método para a determinação de caudais de cheia em pequenas bacias naturais e urbanas*. Lisboa: ITH n. 6, LNEC, 1984.

CORREIA, F.N., SARAIVA, M.D., DA SILVA, F.N., RAMOS, I. Floodplain management in urban developing areas. Part II. GIS-based flood analysis and urban growth modelling, *Water Resources Management*, v. 13, n. 1, p.23-37, 1999.

DIDM. *Urban stormwater management manual for Malaysia*. Department of Irrigation and Drainage Malaysia (DIDM), River Engineering Division, Malaysia, 2001.

DMR. *Road drainage design manual*. Queensland: Department of Main Roads (DMR), Queensland Government. Chapter 4. Design, 2002.

ENGMAN, E.T. Roughness coefficients for routing surface runoff, *Journal of Irrigation and Drainage, American Society of Civil Engineers*, v. 112, n. 4, p.39-53, 1986.

GDOE. Georgia stormwater management manual. V. 2, Technical Handbook, 1th Edition, Prepared by AMEC Earth & Environmental (formerly the Edge Group), Center for Watershed Protection, Debo & Associates, Jordan Jones & Goulding and Atlanta Regional Commission. Georgia: Georgia Department of the Environment (GDOE), 2001.

HATHAWAY, G.A. Symposium on Military Airfields-Design of Drainage Facilities. *Transactions American Society of Civil Engineers*, v. 110, p.697-733, 1945.

HOTCHKISS, R.H., MCCALLUM, B.E. Peak discharge for small agricultural watersheds, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 121, n. 1, p.36-47, 1995.

IEP. *Manual de drenagem superficial em vias de comunicação*. Lisboa: Instituto das Estradas de Portugal (IEP), 2001.

KIRPICH, Z.P. Time of concentration in small agricultural watersheds, *Civil Engineering*, v. 10, n. 6, p.362-, 1940.

LANÇA, R.M.M. *Contribuição para o estudo de cheias recorrendo a um modelo distribuído*. Portugal: Universidade de Évora, 2000. (Dissertação de Mestrado).

LAURENSEN, E.M., CODNER, G.P., MEIN, R.G. *Giralang/Gungahalin paired catchment study: a review*, Consulting Report for Department of Housing and Construction, ACT, 1985.

- LENCASTRE, A. *Hidráulica geral*. Lisboa: 1996. (Edição do Autor)
- LNEC. *Curso sobre drenagem de águas superficiais em vias de comunicação*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 16 e 17 de fevereiro, 1995.
- LO BOSCO, D., LEONARDI, G., SCOPELLITI, F. *Il dimensionamento delle opere idrauliche a difesa del corpo stradale*. Italy: Facoltà di Ingegneria, Università Degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, 2002. (Serie didattica).
- MARSH, W. *Landscape planning: environmental applications*. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- MARTINS, F.J.P., PINHEIRO, A. N., CARMO, J.S.A. Passagens hidráulicas. Dimensionamento hidrológico e hidráulico e estimativa de custo assistido por computador, *Recursos Hídricos*, v. 24, n. 3, p.37-51, 2003.
- MATA-LIMA, H. Hydrologic design that incorporates environmental, quality and social aspects, *Environmental Quality Management*, v. 15, n. 3, p.51-60. doi: 10.1002/tqem.20092, 2006.
- MATA-LIMA, H., SILVA, E., RAMINHOS, C. Bacias de retenção para gestão do escoamento: métodos de dimensionamento e instalação, *REM: Rev. Esc. Minas*, Ouro Preto, v. 59, n. 1, p.97-109. doi: 10.1590/S0370-44672006000100013, 2006.
- MATOS, M.R. *Métodos de análise e de cálculo de caudais pluviais em sistemas de drenagem urbana*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1987. (Tese de Especialista do LNEC).
- MCCUEN, R., JOHNSON, P., RAGAN, R. *Highway hydrology. Hydraulic design series No. 2*. Washington, DC: Federal Highway Administration (FHWA), 1996.
- MOTH. *Hydraulics manual*. Columbia: Ministry of Transportation and Highways (MOTH), Engineering Branch. Province of British, 1998.
- OVERTON, D.E., MEADOWS, M.E. *Stormwater modelling*. New York: Academic Press, 1976. p.58-88.
- PORTELA, M., MARQUES, P., CARVALHO, F.F. Hietogramas de projeto para a análise de cheias baseada no modelo do hidrograma unitário do Soil Conservation Service (SCS). In: *Actas do 5º Congresso da Água*, Lisboa, Portugal, 25 a 29 de setembro, 2000.
- RAGAN, R.M. *A nomograph based on kinematic wave theory for determining time of concentration for overland flow*. Report Number 44, Civil Engineering Department, University of Maryland at College Park (USA), 1971.
- RAMINHOS, C. *Experimentação e análise de resistência ao escoamento com macrorugosidades*. Évora: Universidade de Évora, 2002. (Relatório técnico).
- REGO, F.C., CORREIA, F. Utilização de sistemas de informação geográfica (SIG) e de modelação hidrológica e hidráulica na delimitação de leitos de cheia. *Revista Recursos Hídricos*, v. 21, n. 2, p.27-36, 2000.
- SCHUELER, T.R. *Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs*. Washington Metropolitan Water Resources Planning Board, 1987.
- SCS. *National engineering handbook*. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS), 1972.
- SCS. *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release 55. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS), 1986.
- SMITH, A. *Reference manual*. Ontario: Alan A. Smith Inc., Canada, 2004. (MIDUSS Version 2).
- TEMEZ, J.R. *Calculo hidrometeorologico de caudales maximos em pequenas cuencas naturales*. Madrid: Ministério de Obras Publicas y Urbanismo (MOPU). Direccion General de Carreteras, n. 12, 1978.
- USACE. *Flood-runoff analysis*. Washington, DC: Department of the Army. U.S. Army Corps of the Engineers (USACE), 1994.
- USDA. *A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds*. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1973.
- USDA. *SITES -Water Resource Site Analysis Computer Program*. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service, 1996.
- USDA. *Ponds - planning design and construction*. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture. Natural Resource Conservation Service (NRCS), 1997.
- VDOT. *Drainage manual*. Virginia (USA): Virginia Department of Transportation (VDOT), 2001.
- WSDOT. *Hydraulic manual*. Washington, DC: Washington State Department of Transportation (WSDOT), 1997.
- WONG, T.H.F., BREEN, P., BRIZGA, S. *Hydrological, geomorphological and ecological effects of catchment urbanisation*. Australia: Technical Report, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Monash University, 1998.

Artigo recebido em 21/03/2006 e
aprovado em 07/12/2006.



REM - Revista Escola de Minas
71 anos divulgando CIÊNCIA.
