

Capítulo 02

Método Racional

“As hipóteses são redes: só quem as lança colhe alguma coisa”..
Novalis

Capítulo 2 -Método Racional ($\leq 3\text{km}^2$)

2.1 Introdução

O método racional é um método indireto e foi apresentado pela primeira vez em 1851 por Mulvaney e usado nos Estados Unidos por *Emil Kuichling* em 1889 e estabelece uma relação entre a chuva e o escoamento superficial (deflúvio).

O nome método Racional é para contrapor os métodos antigos que eram empíricos e não eram racionais.

É usado para calcular a vazão de pico de uma determinada bacia, considerando uma seção de estudo.

Na Inglaterra Lloyd-Davies fez método semelhante em 1850 e muitas vezes o método Racional é chamado de Método de Lloyd-Davies.

A chamada fórmula racional é a seguinte:

$$Q = C \cdot I \cdot A / 360 \quad \text{(Equação 2.1)}$$

Sendo:

Q= vazão de pico (m^3/s);

C= coeficiente de escoamento superficial varia de 0 a 1. C= volume de runoff/ volume total de chuva

I= intensidade média da chuva (mm/h);

A= área da bacia (ha). $1\text{ha} = 10.000\text{m}^2$

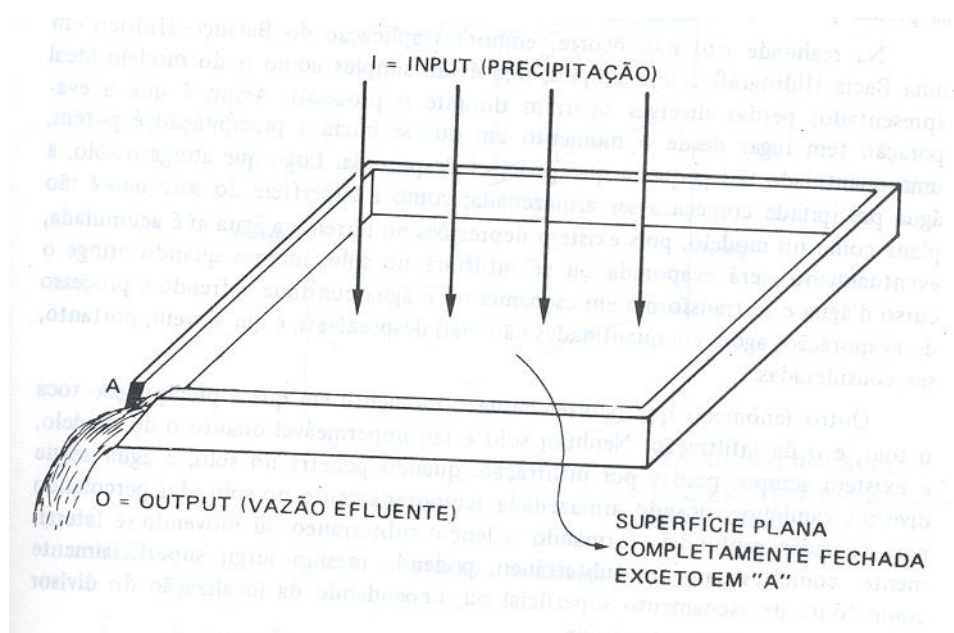


Figura 2.1-Modelo de sistema hidrológico simples
Fonte: Villela e Mattos, Hidrologia Aplicada

Na Inglaterra o método racional é usado com o nome de método de Lloyd-Davies.

Na Figura (2.2) apresenta como funciona o método racional. O tempo de duração da chuva é igual ao tempo de concentração. Na saída (output) a vazão efluente irá variar segundo um hidrograma triangular justificado por (Willian, 1950), (Pagan, 1972) e (Mitchi,1974).

Conforme esquema de hidrograma triangular da Figura (2.2), t_c é o tempo para o escoamento máximo e $2 \cdot t_c$ o tempo total de escoamento superficial.

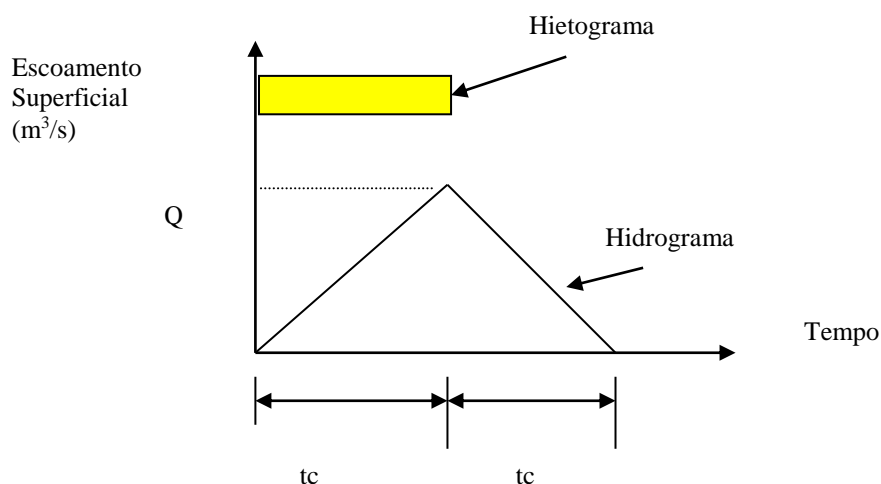


Figura 2.2- Representação esquemática do hidrograma do método Racional e não é o hidrograma real.

O método racional deve ser aplicado somente em pequenas bacias ou seja com área de drenagem inferior a 3km^2 (300 ha) conforme (Porto, 1993) ou quando o tempo de concentração seja inferior a uma hora.

Na Austrália é usado o Método Racional Probabilístico para pequenas bacias (25 km^2) e médias bacias (500 km^2), onde são aferidos os coeficientes de escoamento superficial “C” , comparando-se o calculado e medido. Não possuímos tais estudos no Brasil.

Akan,1993 admite para o método racional área da bacia até 13 km^2 .

Adotamos 3km^2 (três quilômetros quadrados) como limite máximo do Método Racional conforme recomendação das “Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo” elaborado em 1998 pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH).

O conceito de pequena, média e grande bacia é um conceito variável entre os hidrólogos. A mesma bacia ser considerada pequena por um e considerada média por outro. Não existe portanto, uma definição correta do que seja pequena, média e grande bacia.

Quando se aplicar o método racional, isto é, fazendo-se a síntese, não devemos nos esquecer da análise de como o mesmo é baseado. As hipóteses do método racional são as seguintes:

- toda a bacia contribui com o escoamento superficial e é porisso que o tempo de duração da tormenta deve ser igual ou exceder ao tempo de concentração da bacia;
- a chuva é distribuída uniformemente sobre toda a área da bacia;

c) todas as perdas estão incorporadas ao coeficiente de escoamento superficial.

A intensidade da chuva associada com o tempo de concentração e a frequência da ocorrência podem ser obtidas das curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) que é obtida por varias publicações. Os cálculos são simples e fáceis de serem obtidos.

2.2 Considerações sobre o limite da área da bacia

O método racional é muito usado, mas apresenta algumas discussões, entre elas a mais importante é o tamanho da bacia a ser considerado conforme Tabela (2.1). Adotamos como limite superior 3km² para a área da bacia.

Tabela 2.1- Valores limites da fórmula racional

Autores	Área	
	(ha)	(km ²)
David H. Pilgrim e Ian Cordery (Austrália) Método probabilístico, 1993	de 2000 a 50.000	20 a 500
Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica de São Paulo (FCTH) 1998 (*)	300	3
Wanielista et al.,1997	20 a 40	0,2 a 0,4
Ven Te Chow	40 a 81	0,4 a 0,81
DAEE, 2005 para pequenas barragens	200	2
DAEE-Cetesb	até 100	1
Porto,1995	até 300	3
Linsley et al.	40 a 486	0,4 a 4,86
Paulo Sampaio Wilken	até 500	5
Linsley e Franzini	até 500	5
Osman Akan, 1993	até 1300	13
Califórnia Hihgways	até 4.050	40,5
Otto Pfafstetter	até 20.000	200
ASCE,1992	até 80	0,8
Debo e Reese,1995	até 40	0,4
Regulamento do sul da Califórnia proíbe acima de oito hectares.	até 8	0,08
Queensland- para áreas urbanas		Até 5km2
Queensland- para áreas rurais		Até 25 km2
McCuen,1998	Pequenas Bacias	

(*) Adotado pelo Engº Plínio Tomaz

2.3 Período de retorno

Período de retorno (Tr) é o período de tempo médio que um determinado evento hidrológico é igualado ou superado pelo menos uma vez. Na prática em microdrenagem o período de retorno é maior ou igual a **25 anos**. Na Inglaterra está sendo usado para microdrenagem período de retorno de 30anos. Em bueiros e rios adotar **Tr=100anos**.

2.4 Intensidade da chuva

Intensidade (I ou i) é a precipitação por unidade de tempo, obtida como a relação $I = P / t$, se expressa normalmente em mm/hora ou mm/minuto.

Equação de Paulo S. Wilken para RMSP (Região Metropolitana de São Paulo)

$$I = \frac{1747,9 \cdot T_r^{0,181}}{(t + 15)^{0,89}} \quad (\text{mm/h})$$

Sendo:

I= intensidade média da chuva (mm/h);

T_r = período de retorno (anos);

t= duração da chuva (min).

Equação de Martinez e Magni,1999 para a RMSP.

$$I = 39,3015 (t + 20)^{-0,9228} + 10,1767 (t + 20)^{-0,8764} \cdot [-0,4653 - 0,8407 \ln \ln (T / (T - 1))]$$

Para chuva entre 10min e 1440min

Sendo:

I= intensidade da chuva (mm/min);

t= tempo (min);

ln= logaritmo neperiano

T= período de retorno (anos), sendo $T \leq 200$ anos

Nota: observar que a Equação (2.2) não se aplica a $T=1$ ano.

Dica: para transformar mm/min em L/s x ha multiplicar por 166,7

Dica: a Equação de Martinez e Magni de 1999 é a mais nova a ser usada na Região Metropolitana de São Paulo.

2.5 Tempo de concentração

O tempo de concentração é o tempo que leva uma gota de água mais distante até o trecho considerado na bacia.

Existem três maneiras em que a água é transportada em uma bacia: a primeira é o escoamento superficial, a segunda é o escoamento em tubos e a terceira é o escoamento em canais, incluso sarjetas.

Existem várias fórmulas empíricas para determinar o valor do tempo de concentração, mas sem dúvida o melhor é usar o método cinemático.

A obtenção do tempo de concentração é uma informação importante, porém difícil de ser obtida. Enfim como diz (McCuen,1993), o projetista deve saber que não é possível obter o valor do tempo de concentração por um simples método.

2.6 Coeficiente C da fórmula Racional

O coeficiente “C” de escoamento superficial é também conhecido como coeficiente de runoff ou coeficiente de deflúvio.

Por definição coeficiente de runoff é a razão entre o volume total de escoamento superficial no evento e o volume total precipitado (Tucci, RBRH,2000).

Para a determinação de C recomendamos não usar tabelas em sim a equação de Schueler, 1987.

$$R_v = 0,05 + 0,009 \times AI$$

Sendo:

R_v= coeficiente volumétrico

AI= area impermeavel (%)

Fazemos C= R_v e temos:

$$C = 0,05 + 0,009 \times AI$$

Deve-se ter o cuidado em adotar a area impermeavel AI (%). Quando em uma área no pré-desenvolvimento temos somente terra temos que pensar que há o pisoteio de animais, uma estrada de terra, uma pequena casa, enfim pode se adotar cerca de 5% a 10% de area impermeavel.

Exemplo 2.1

Dada área da bacia A= 5ha, com área impermeavel de 60% no pós-desenvolvimento e intensidade da chuva I= 200mm/h. Calcular a vazão de pico Q no pré-desenvolvimento e pós-desenvolvimento.

Para o pré-desenvolvimento

Adotamos AI= 10%

$$C = 0,05 + 0,009 \times AI$$
$$C = 0,05 + 0,009 \times 10 = 0,14$$

$$Q_{\text{pré}} = C \cdot I \cdot A / 360 = 0,14 \times 200\text{mm/h} \times 5\text{ha} / 360 = 0,39 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para o pós-desenvolvimento

AI=60%

$$C = 0,05 + 0,009 \times AI$$
$$C = 0,05 + 0,009 \times 60 = 0,59$$

$$Q_{pós} = C \cdot I \cdot A / 360 = 0,59 \times 200\text{mm/h} \times 5\text{ha} / 360 = 16,39 \text{ m}^3/\text{s}$$

Quando a bacia apresenta ocupação muito variada deve ser usada a média ponderada:

$$C = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2 + C_3 \cdot A_3 + \dots + C_i \cdot A_i}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_i}$$

Sendo:

$C_1, C_2, C_3, \dots, C_i$ = coeficientes de escoamento superficial para as áreas $A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_i$, respectivamente;

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_i$ = áreas que possuem coeficientes $C_1, C_2, C_3, \dots, C_i$.

C = coeficiente de escoamento superficial obtido pela média ponderada efetuada.

Quando se tratar de área impermeável e área permeável é necessário muito cuidado na aplicação da média ponderada, podendo a mesma nos levar a erros, pois muitas vezes somente a área impermeável fornece um valor bem superior a área permeável e a média irá enganar os resultados. Isto é mostrado nas p. 108 e 109 de Akan, 1993.

O Exemplo (2.2) esclarecerá melhor.

Area impermeável diretamente conectada:

Dizemos que uma área impermeável é diretamente conectada quando o lançamento das águas pluviais se dá diretamente em galerias de águas pluviais.

Akan e Bedient, 2008 ressaltam que quando a area impermeavel for diretamente conectada é necessario fazer um cálculo com ela separada da area a montante. O Exemplo (2.2) mostrará o que pode acontecer.

Exemplo 2.2- O objetivo deste exercício é esclarecer como funciona o método racional.

Calcular a vazão máxima para período de retorno $T_r=10$ anos, usando o método racional para uma bacia com 12ha. A bacia superior é permeável e tem área de 5ha e $C=0,2$.

A bacia inferior é mais desenvolvida e tem área de 7ha e $C=0,6$. O tempo de concentração até o ponto de controle considerando as duas bacias é de 30min. Considerando a existência de somente a bacia inferior com 7ha, $C=0,6$ e tempo de concentração de 10min.

Vamos calcular o coeficiente de escoamento superficial composto que será:

$$C = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2}{A_1 + A_2}$$

Sendo: $C_1=0,20$ $C_2=0,6$ $A_1=5\text{ha}$ $A_2=7\text{ha}$

$$C = \frac{0,20 \cdot 5 + 0,6 \cdot 7}{5 + 7} = 0,43$$

$$Q = C \cdot I \cdot A / 360$$

$A=12\text{ha}$

Supondo para $t_c=30\text{min}$, $T_r=10$ anos obtemos $I=92,0\text{mm/h}$

$$Q = 0,43 \times 92,0 \times 12 / 360 = 1,31 \text{ m}^3/\text{s}$$

Obtemos então a vazão de pico da bacia de 12ha de $1,31 \text{ m}^3/\text{s}$

Akan,1995 recomenda que quando a bacia inferior é desenvolvida, isto é, quando a mesma é mais impermeável que a superior, tem que ser feita verificação.

Assim usando somente a bacia inferior com 6ha, $C=0,6$, $t_c=10\text{min}$, $T_r=10$ anos obtemos:

$$I=146,4\text{mm/h e } A=6\text{ha}$$

$$Q= C \cdot I \cdot A/360 = 0,6 \times 146,4 \times 6 / 360 = 1,45 \text{ m}^3/\text{s}$$

Portanto, usando somente a bacia inferior mais desenvolvida achamos uma vazão de pico de $1,45\text{m}^3/\text{s}$ que é maior que a vazão achada da bacia toda usando o coeficiente C ponderado que resultou em vazão de $1,31\text{m}^3/\text{s}$.

A interpretação segundo Akan, é que o pico de vazão se dá a 10min com vazão de $1,45\text{m}^3/\text{s}$ e o tempo em que toda a bacia estará contribuindo na seção de controle é de 30min.

2.7 Análise de Incerteza do método racional

Os parâmetros do método racional C I A apresentam imprecisões. Na prática temos incerteza de 30% (0,30) no coeficiente de escoamento superficial “C”, 17% (0,17) da intensidade da chuva “I” e 5% (0,05) no cálculo da área da bacia de drenagem “A”, conforme Tomaz,1999 o coeficiente de variação da vazão é:

$$\Omega^2_Q = \Omega^2_c + \Omega^2_I + \Omega^2_A$$

Substituindo os valores:

$$\Omega^2_Q = (0,30)^2 + (0,17)^2 + (0,05)^2 = 0,1478$$

$$\Omega_Q = \sqrt{0,1478} = 0,38, \text{ ou seja, } 38 \%$$

O coeficiente de variação da vazão do método racional :

$$\Omega_Q = \sigma_Q / \mu_Q$$

Então, o desvio padrão será:

$$\sigma_Q = \Omega_Q \cdot \mu_Q$$

Supondo que a média . μ_Q seja de $13\text{m}^3/\text{s}$ teremos:

$$\sigma_Q = 0,38 \cdot 13 = 5\text{m}^3/\text{s}$$

Portanto, a vazão estará entre $8\text{m}^3/\text{s}$ a $18\text{m}^3/\text{s}$

2.8 Recomendações para o uso do método racional

Para se aplicar o método racional, isto é, para se fazer a síntese, é muito importante saber a análise, isto é, os limites em que o método racional tem validade.

O método racional deverá ser aplicado com as seguintes considerações:

- 1) A área da bacia deve ser sempre inferior a 3km^2 ;
- 2) O tempo de concentração deverá ser calculado de preferência pelo método cinemático;
- 3) O período de retorno deve ser maior quanto mais importante for a obra.
- 4) Deverá ser feita análise de sensibilidade dos parâmetros adotados
- 5) De modo geral o método racional conduz a resultados de picos de vazão maiores que outros métodos
- 6) Quando se precisar da hidrógrafa, isto é, da vazão de escoamento superficial variando com o tempo, usar outro método, como o Método Santa Bárbara, Método do SCN ou Método de Denver

2.9 Relacionamento de C com CN

Baseado nos estudos da cidade de Columbus, Ohio, achamos a equação do coeficiente de runoff C em função de CN.

$$C = 0,02083x \text{ CN} - 1,147$$

Com $R^2=0,99$ e variando CN de 68 a 98 e variando C entre 0,29 e 0,94

Seria importante para o Brasil que se fizessem pesquisas a respeito da relação entre o coeficiente de runoff C e o número da curva CN, pois o que fizemos foi somente mostrar que já estão sendo pesquisadas tais relações.

2.10 Hidrograma do método Racional triangular com base 2,67

O hidrograma do método Racional da Figura (2.3) é usado em *Mohave County* e é aplicado para áreas em bacias até 64ha cujos estudos foram feitos em *Maricopa County* para um tempo de concentração menor ou igual a 1h.

Conforme se pode ver no hidrograma o valor máximo ocorre quando o tempo/tempo de concentração é igual a 2,67 e o tempo de pico quando tempo/tempo de concentração é igual a 1.

Mohave County adota na microdrenagem período de retorno $Tr=25$ anos.

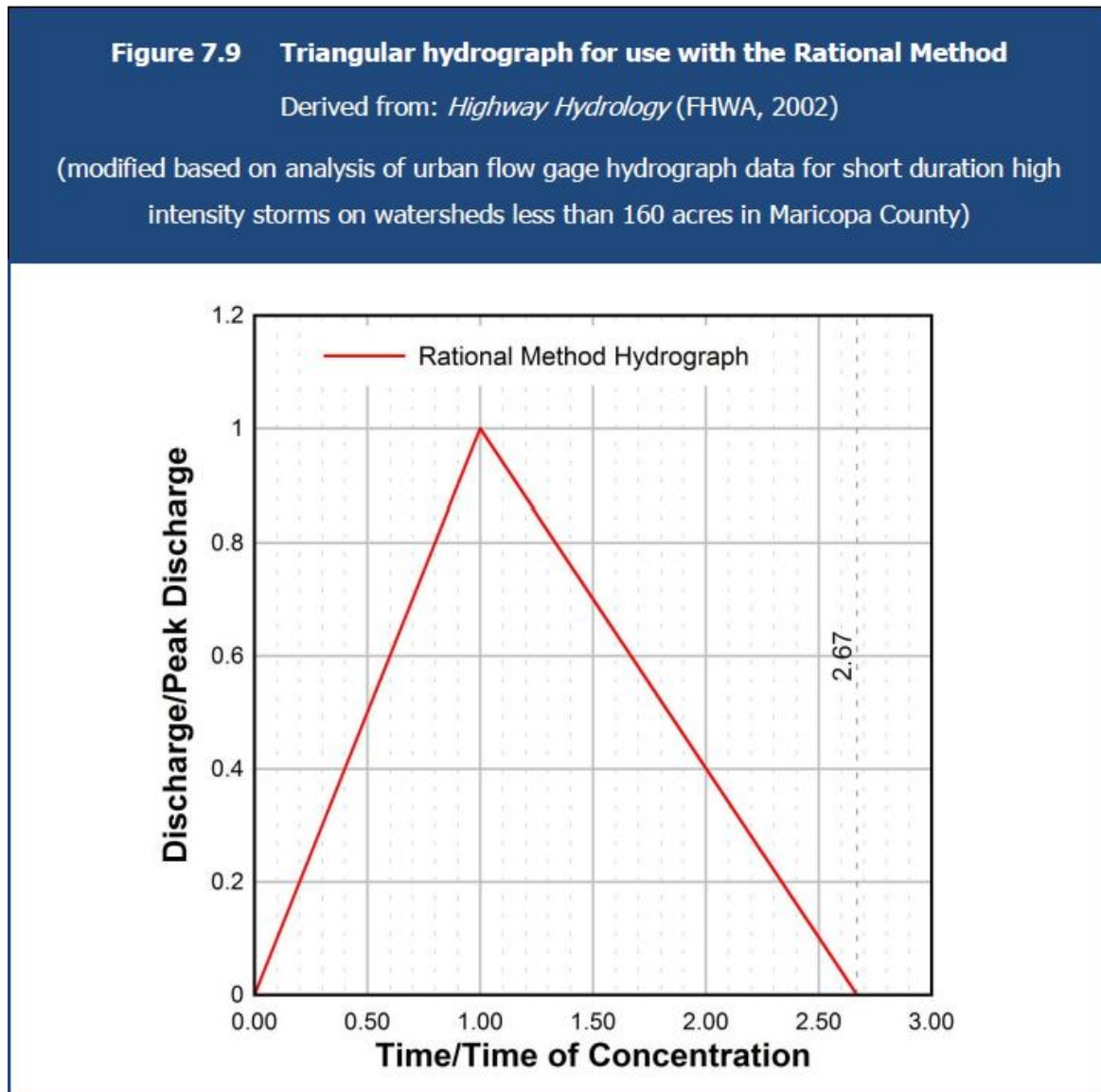
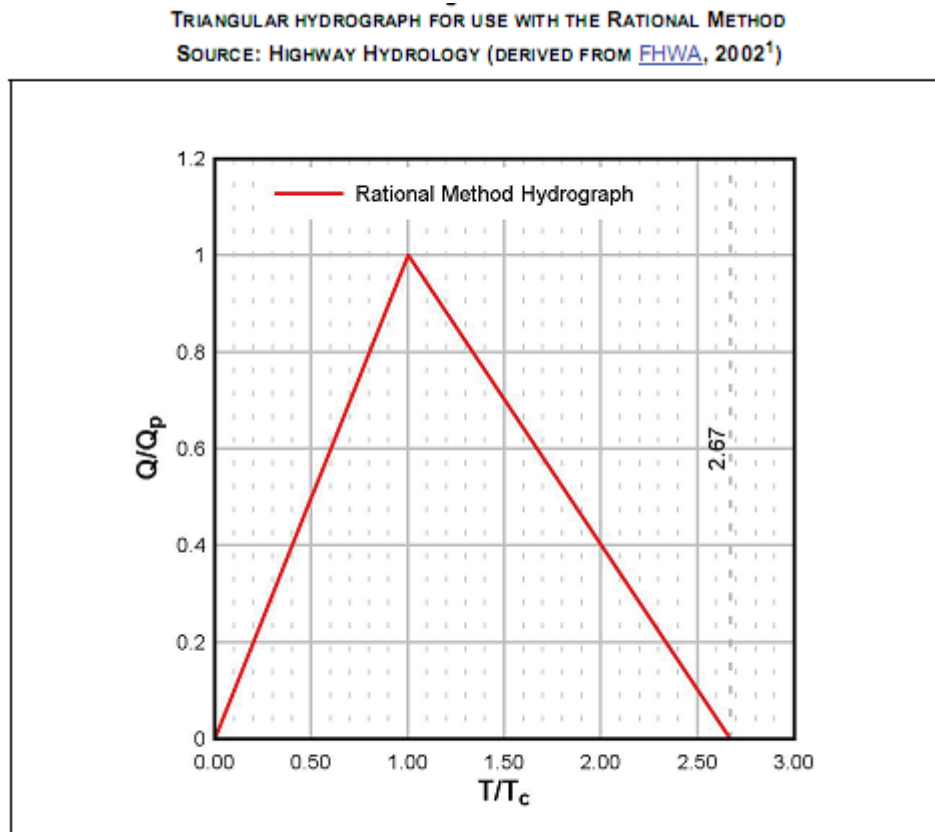


Figura 2.3- Hidrograma do método Racional utilizado em Mohave County



1. Receding limb of hydrograph set at $1.67T_c$ after review of representative measured urban runoff hydrographs from USGS flow gages in Mesa and Glendale, AZ.

Figura 2.4- Esquema original do Drainage Design Manual for Maricopa County, Arizona.

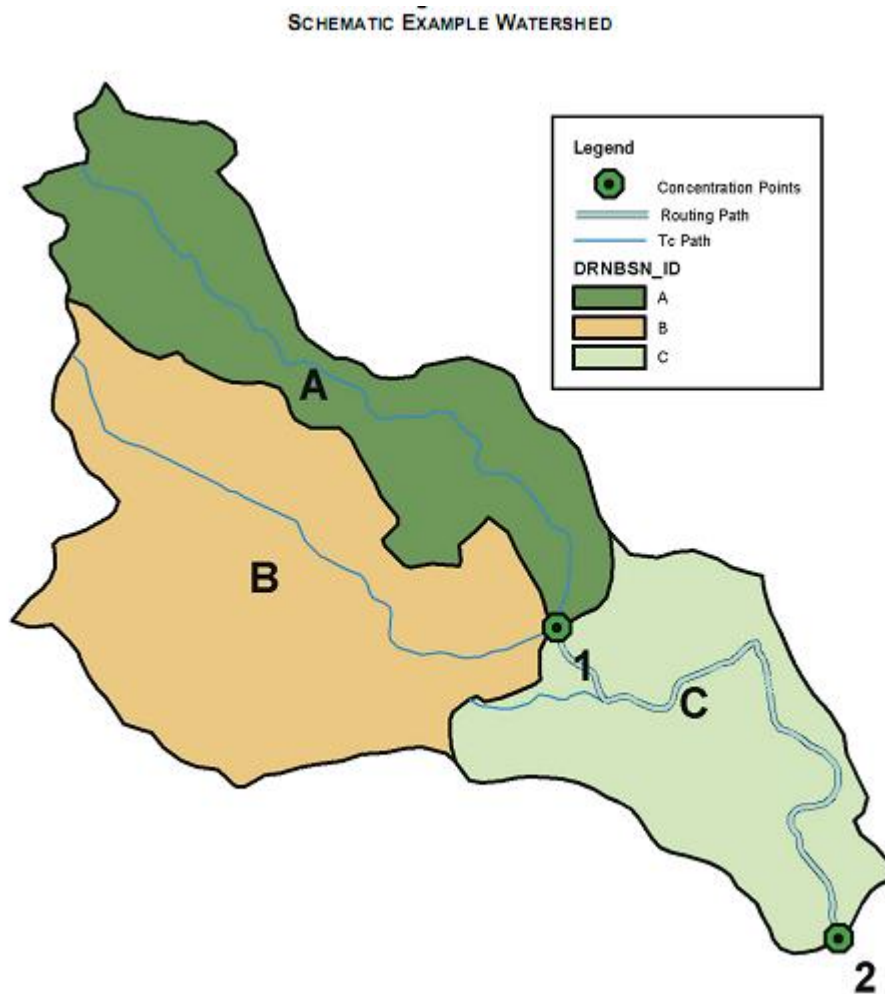


Figura 2.5- Cálculo de varias bacias com o método Racional
Fonte: Maricopa County, 2010

2.11 Cálculo de várias bacias usando o método Racional

Caso tenhamos várias bacias conforme Figura (2.5) podemos proceder de duas maneiras.

A maneira tradicional é achar o C ponderado das três bacias, calcular o tempo de concentração e achar a vazão de pico.

Mariposa County, 2010 trás como novidade o cálculo separado de cada sub-bacia para obter o resultado final.

No cálculo separado deve ser feito o hidrograma conforme Figura (2.5) para cada sub-bacia e depois proceder da seguinte maneira:

- Fazer o hidrograma do método Racional de cada uma das três sub-bacias
- No ponto 1 somar as ordenadas das sub-bacias 1 e 2.
- No ponto 2 devemos transladar o hidrograma obtido entre as sub-bacias e 2 no tempo de percurso (travel time) que vai do ponto 1 ao 2 usando a

fórmula de Manning para obter a velocidade e o tempo será a distância dividido pela velocidade.

- Após o traslado somar as ordenadas da sub-bacia C e então teremos o hidrograma final.
- Tal procedimento é o mesmo que pode ser feito usando o método do SCS.

Dica: o método do hidrograma do Método Racional pode ser usado para soma de hidrogramas e para o *routing* até área de bacias de 64ha.

2.12 Hidrograma triangular

Conforme Figura (26) temos:

$$V_s = 0,5x (Q_{pós} - Q_{pré}) x tb \times 60$$

Sendo:

V_s = volume necessário para deter enchentes (m^3);

$Q_{pós}$ = vazão de pico (m^3/s) no pós-desenvolvimento para determinado período de retorno;

t_b (min) no pós-desenvolvimento t_c = tempo de concentração;

$Q_{pré}$ = vazão de pico (m^3/s) no pré-desenvolvimento para determinado período de retorno.

O valor de t_b a ser adotado pode ser:

$$t_b = 2,0 \times t_c$$

$$t_b = 3,0 \times t_c$$

$$t_b = 2,67 \times t_c$$

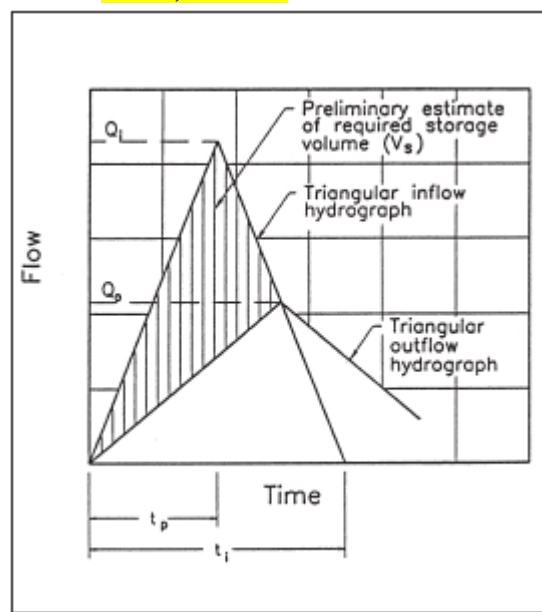


Figura 2.6- Hidrograma triangular

Dica: o método Racional com hidrograma triangular pode ser utilizado para dimensionamento, *routing* e pré-dimensionamento do reservatório. Observar que fica bem genérica a sua aplicação.

Exemplo 2.3

Consideramos aqui no exemplo que a vazão da galeria da av. Pacaembu de $13\text{m}^3/\text{s}$ seria a vazão de pico no pré-desenvolvimento e a vazão de pico no pós-desenvolvimento é de $65,47\text{m}^3/\text{s}$, calculado pelo método Racional. O tempo de concentração é de 15min. Período de retorno considerado foi de 25anos.

Adotando hidrograma triangular temos:

$$V_s = 0,5x (Q_{\text{pós}} - Q_{\text{pré}}) x t_b x 60$$

$$\text{Adotando } t_b = 2,67 x t_c = 2,67 x 15\text{min} = 40,5\text{min}$$

$$V_s = 0,5 x (65,47 - 13) x 40,5\text{min} x 60\text{s} = 63.751\text{m}^3$$

2.13 *Routing*

Com o hidrograma do método Racional podemos fazer o *routing* de reservatórios desde que o mesmo seja aceito pelos especialistas no assunto e concluímos que somente dá para fazer o *routing* com o hidrograma triangular do método Racional com base 2,67.

2.14 Bibliografia e livros consultados

- AKAN, A. OSMAN. *Urban hydrology, hydraulics and stormwater quality*. Editora John Wiley & Sons, 2003, 373 páginas. ISBN 0-471-432158-3.
- DHAKAL, NIRAJAN. *Development of guidance for runoff coefficient selection and Modified Rational, Unit Hydrograph Method for Hydrologic Design*. Tese de doutoramento obtida em 7 de maio de 2012, 175 páginas. Faculty of Auburn University.
- MARICOPA COUNTY. *Drainage design manual for Maricopa County*. 14 de junho de 2010, 374 páginas.
- MOHAVE COUNTY. *Drainage design manual for Mohave County*. 1ª edição 24 de agosto de 2009, 354 páginas.
- NICKLOW/BOULOS/MULETA. *Comprehensive urban hydrologic modeling handbook for engineers and planners*. 376 páginas, ISBN 0-97455689-6-1. Chapter five- Surface runoff. 2006