

# Capítulo 111

## Hidrogramas do método Racional

## Introdução

Até o presente o autor achou somente o Método do Hidrograma Triangular do Método Racional que está exposto no fim do capítulo e que pode ser usado para o routing, soma de hidrogramas e para pré-dimensionamento de reservatório de detenção.

A discussão fica para a área limite do método Racional que usamos de 2km<sup>2</sup> a 3km<sup>2</sup> enquanto que foi usado como limite somente 64 ha, mas propomos que pode ser aplicado até bacias com até 200ha (2km<sup>2</sup>).

Guarulhos, 31 de julho de 2013

Engenheiro Plínio Tomaz

## Capítulo 111- Hidrogramas do método Racional

### 111.1 Introdução

O método Racional pode ser usado para achar a vazão de pico para bacias até 3km<sup>2</sup>, entretanto quando queremos fazer o *routing* do reservatório deparamos com um problema: o método Racional não tem um hidrograma aceito por todos. O DAEE São Paulo adota como máximo de área de 2km<sup>2</sup> para aplicação do Método Racional.

Segundo Akan, 2003 o método Racional Modificado é usado somente para o **dimensionamento preliminar** de um reservatório de retenção como o Método de Aron e Kibler, 1990. Observemos o termo usado por Akan que é para **dimensionamento preliminar**.

O objetivo nosso é apresentar as cinco formas que conhecemos do hidrograma do método Racional.

Vamos apresentar 5 (cinco) hidrogramas do método Racional:

1. Método Racional modificado de São Diego, Califórnia.
2. Método de Dekalb
3. Método Universal do hidrograma do método Racional
4. Método da duração da chuva e do tempo de concentração
5. **Método Racional conforme hidrograma triangular**

### 111.2- Hidrograma do método Racional modificado de São Diego, Califórnia.

Conforme Nicklow et al, 2006 o condado de São Diego, Califórnia adotou um hidrograma do método Racional modificado e válido para áreas menores que 2,57km<sup>2</sup>.

O hidrograma está baseado em uma chuva de duração de 6 horas.

O pico da chuva está na posição 4 horas e outros blocos estarão na posição 2/3 e 1/3 alternando um bloco para a esquerda e outro para a direita.

Não consegui até o momento a justificativa da proposição do hidrograma do método Racional modificado de São Diego.

#### 111.2.1 Duração da chuva

A duração da chuva de 6 horas em cada bloco deve ser calculada pela equação:

$$P_N = 0,124 \cdot P_{6h} \left\{ (N \cdot tc)^{0,3555} - [(N-1) \cdot tc]^{0,3555} \right\}$$

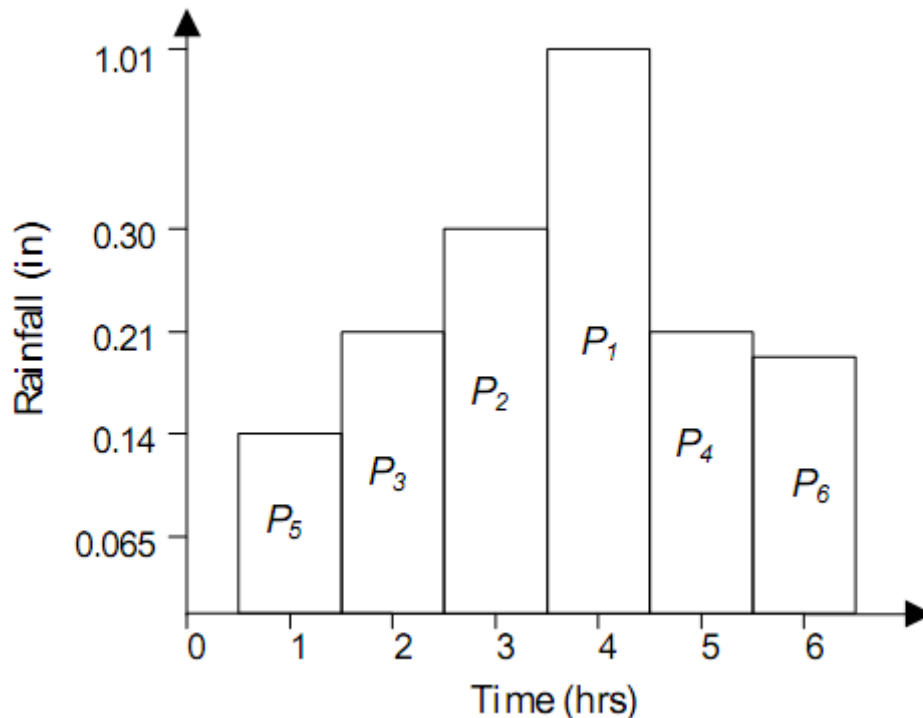
Sendo:

$P_N$  = duração da chuva em cada bloco (mm/h)

$P_{6h}$  = precipitação em seis horas para determinado período de retorno (mm)

**tc = tempo de concentração (min)**

**N= é o tempo em horas variando de 1 a 6**



**Figura 111.1- Distribuição dos blocos. Fonte: NICKLOW et al, 2006**

### Exemplo 111.1

Calcular o hidrograma pelo método Racional modificado de São Diego para área de bacia com  $A=257\text{ha}$  usando chuva de 6h da RMSP sendo tempo de concentração  $t_c=1\text{h}$  e  $C=0,85$ .

Para a RMSP conforme P.S.W temos:

$$I = 1747,9 \times Tr^{0,181} / (t+15)^{0,89}$$

$I$ = intensidade de chuva (mm/h)

$Tr$ = período de retorno (anos)

$t$ = tempo de duração da chuva (min)

Adotando  $Tr=25\text{anos}$  e duração da chuva de  $6\text{h}= 6*60=360\text{min}$  acharemos:

$$I = 1747,9 \times Tr^{0,181} / (t+15)^{0,89}$$

$$I = 1747,9 \times 25^{0,181} / (6*60+15)^{0,89}$$

$$I = 16\text{mm/h}$$

$$\text{Para chuva de 6horas: } P_6 = 6 \times I = 6 \times 16 = 96,1\text{mm}$$

Para  $P_1$  temos  $N=1$

$$P_N = 0,124 \cdot P_{6h} \{ (N \cdot tc)^{0,3555} - [(N-1) \cdot tc]^{0,355} \}$$
$$P_N = 0,124 \times 96,1 \{ (1 \times 60)^{0,3555} - [(1-1) \times 60]^{0,355} \} = 51,09 \text{ mm/h}$$

Para  $P_2$  temos  $N=2$

$$P_N = 0,124 \cdot P_{6h} \{ (N \cdot tc)^{0,3555} - [(N-1) \cdot tc]^{0,355} \}$$
$$P_N = 0,124 \times 96,1 \{ (2 \times 60)^{0,3555} - [(2-1) \times 60]^{0,355} \} = 14,28 \text{ mm/h}$$

E assim por diante.

Podemos contruir a Tabela (111.1):

Método Racional

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

Q= vazão de pico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

C= coeficiente de runoff

I= intensidade de chuva ( $\text{mm}/\text{h}$ )

A= área da bacia (ha)

**Tabela 111.1- Cálculos**

P	N (horas)	I mm/h	C	Area (ha)	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
P1	1	51,09	0,85	257	31,0
P2	2	14,28	0,85	257	8,7
P3	3	10,14	0,85	257	6,2
P4	4	8,13	0,85	257	4,9
P5	5	6,90	0,85	257	4,2
P6	6	6,06	0,85	257	3,7

Vamos agora colocar na forma da Figura (111.1) acrescentando que no tempo 0,5 a vazão será zero e no tempo 7,5 também será zero:

### Tabela 111.3- Hidrograma do método Racional modificado de San Diego

Tempo(h)	Q(m <sup>3</sup> /s)
0,5	0
1	P5=4,2
2	P3=6,2
3	P2=8,7
4	P1=31,0
5	P4=4,9
6	P6=3,7
7,5	0

#### Exemplo 111.2

Calcular a vazão de pico para  $T_r=25$ anos,  $t_c=60$ min para a RMSP com área  $A=257$ ha,  $C=0,85$  e  $I=67,1$ mm/h.

$$Q=CIA/360= 40,7\text{m}^3/\text{s}$$

Observar que usando o método Racional tradicional a vazão de pico será de  $40,7\text{m}^3/\text{s}$  enquanto usando o método Racional modificado de São Diego a vazão de pico será de  $31\text{m}^3/\text{s}$ ;

**Podemos fazer um gráfico:**

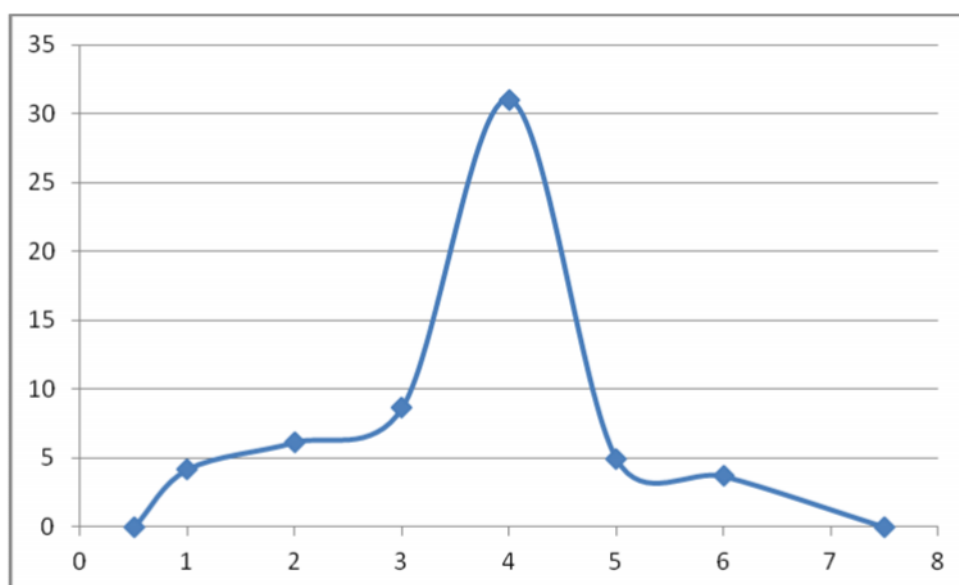


Figura 111.1- Hidrograma do método Racional modificado de São Diego

### 111.3 Hidrograma do Método Racional conforme Dekalb

No County de Dekalb na Geórgia, USA foi apresentado um hidrograma inspirado na teoria do hidrograma unitário. O método é aplicado na região para áreas menores ou iguais a 4ha e constam no DeKalb County Manual. Na prática várias cidades dos Estados Unidos usam para áreas acima de 4ha.

O método pode ser aplicado para duas situações:

- Quanto do tempo de concentração for < 20min
- Quando o tempo de concentração for ≥ 20min

Calcula-se a vazão de pico  $Q_p$  pelo método racional.

**Tabela 111.4- Valores sem dimensões originais da cidade de Dekalb**

Dimensionless Time and Hydrograph Ordinates		
$t/t_c$	$Q/Q_p$ for $t_c < 20$ min	$Q/Q_p$ for $t_c \geq 20$ min
0	0.00	0.00
1	0.16	0.04
2	0.19	0.08
3	0.27	0.16
4	0.34	0.32
5	1.00	1.00
6	0.45	0.30
7	0.27	0.11
8	0.19	0.05
9	0.12	0.03
10	0.00	0.00

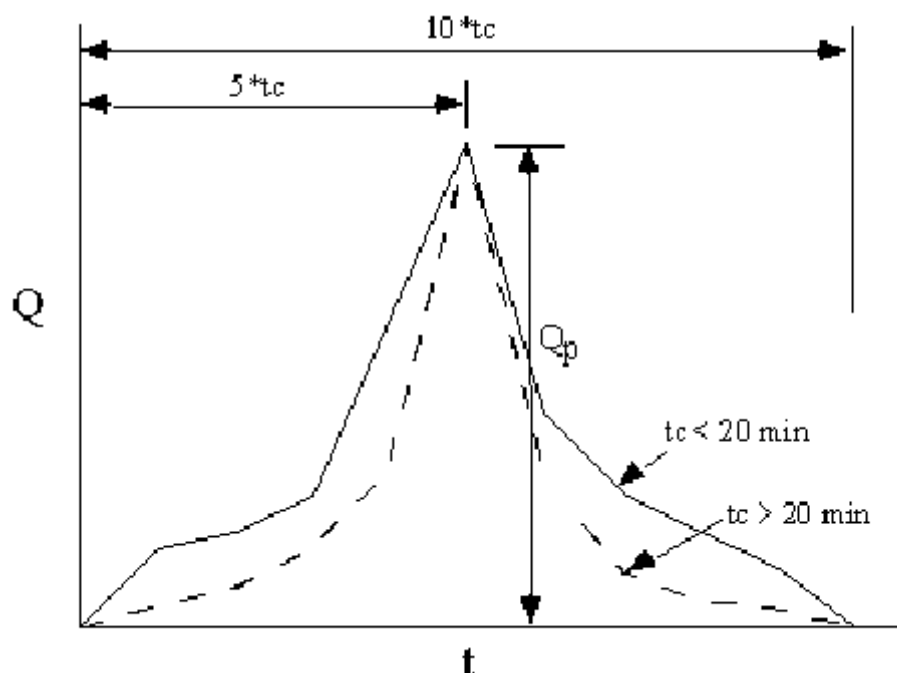


Figura 111.2= Hidrograma da cidade de Dekalb para o método racional

**Exemplo 111.3**

Aplicação do hidrograma de Dekalb

**Tabela 111.5- Aplicação do hidrograma de Dekalb**

t/tc	Q/Qp tc<20min	Q/Qp tc>=20min	t tc=21,4 min	Q Qp=25,1m <sup>3</sup> /s
			21,4	25,1
0	0,00	0,00	0,0	0,0
1	0,16	0,04	21,4	1,0
2	0,19	0,08	42,8	2,0
3	0,27	0,16	64,2	4,0
4	0,34	0,32	85,6	8,0
5	1,00	1,00	107,0	25,1
6	0,45	0,30	128,4	7,5
7	0,27	0,11	149,8	2,8
8	0,19	0,05	171,2	1,3
9	0,12	0,03	192,6	0,8
10	0,00	0,00	214,0	0,0



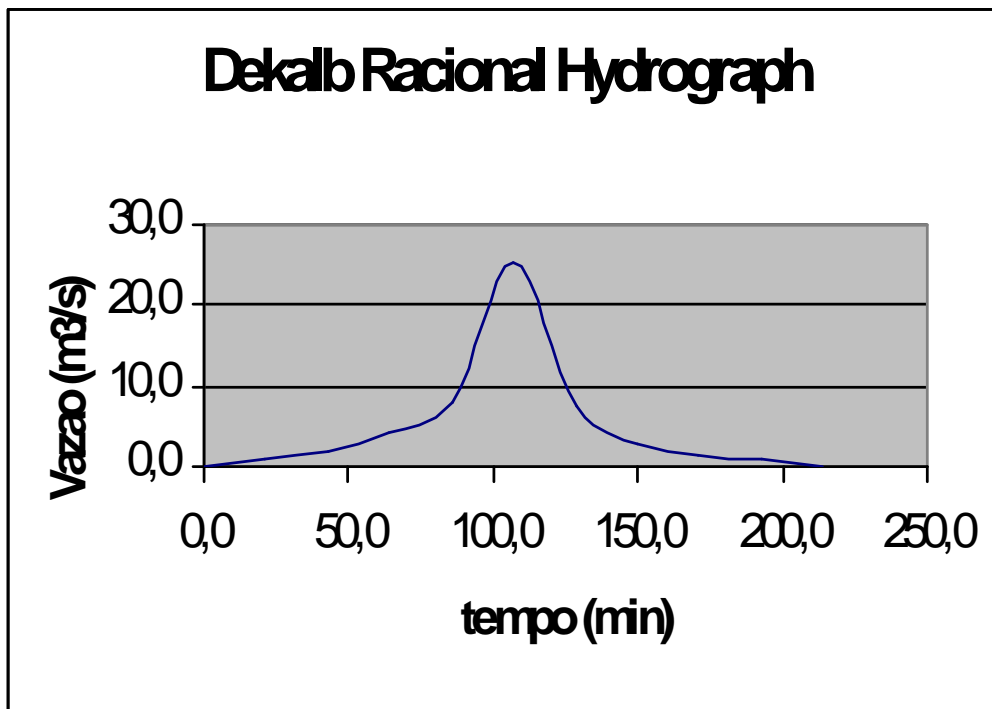


Figura 111.3- Gráfico do hidrograma de Decalb aplicando o método Racional

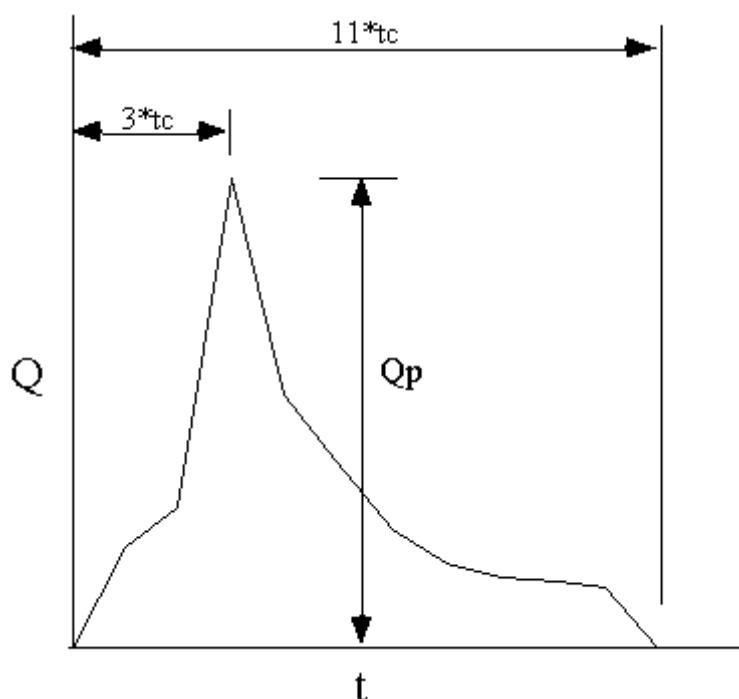
### 111.4 Hidrograma universal do método Racional

Para se obter o diagrama universal do método Racional tempos que ter o tempo de concentração  $t_c$  e a vazão de pico  $Q_p$ . A relação entre  $t/t_c$  e  $Q/Q_p$  está na Tabela (111.6).

**Tabela 111.6- Valores adimensionais de  $t/t_c$  e  $Q/Q_p$**

Dimensionless Time and Hydrograph Ordinates	
$t/t_c$	$Q/Q_p$
0	0.00
1	0.21
2	0.30
3	1.00
4	0.54
5	0.39
6	0.25
7	0.18
8	0.15
9	0.14
10	0.13
11	0.00

Notar que o pico ocorre a  $3.t_c$  e que o tempo base é  $11.t_c$ .



**Figura 111.4- Esquema do hidrograma universal do método Racional**

where:

$t_c$  = time of concentration.

$Q$  = Flow at time  $t$ , in cfs.

$Q_p$  = Peak flow.

### 111.5 Hidrograma dependendo do tempo de duração da chuva “ $d$ ” e de “ $t_c$ ”.

O objetivo do hidrograma que iremos explicar é para uso em routing.

É usado para pequenas bacias e em hipótese alguma deve ser usado para dimensionamento de um reservatório de detenção ou retenção.

O hidrograma é baseado no método Racional.

A base do método é supor que o hidrograma pode ter forma triangular ou trapezoidal, dependendo da duração da chuva “ $d$ ”.

Os hidrogramas são em função da duração da chuva “ $d$ ” e de “ $t_c$ ” sendo de 3 tipos conforme Figura (111.5):

#### Tipo 1:

Quando a duração da chuva  $d > t_c$  e assim teremos hidrograma trapezoidal.

#### Tipo 2:

Quando  $d = t_c$  teremos hidrograma triangular

#### Tipo 3:

Quando  $d < t_c$  teremos hidrograma trapezoidal

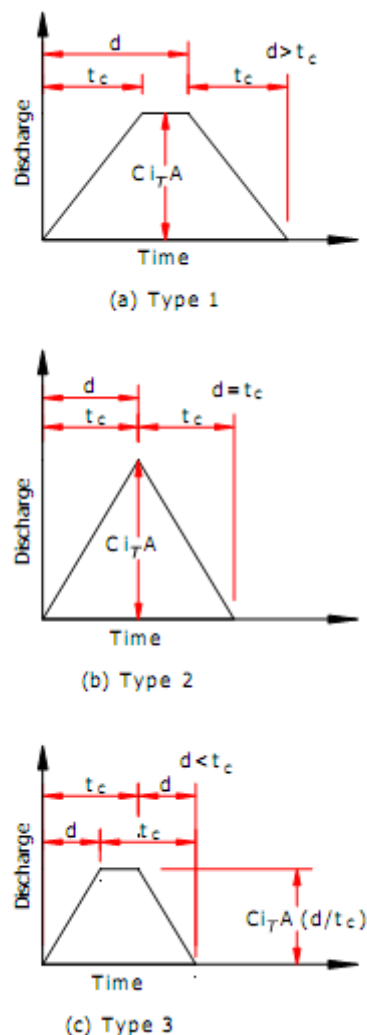


Figura 111.5- Temos 3 tipos dependendo da duração da chuva “d” e de “tc”

### 111.6 Método Racional Modificado (MRM) aplicado no TEXAS

Dhacal, 2012 fez estudos em 90 bacias com 1600 eventos de precipitações no Texas onde aplicou os métodos: Racional, Gamma, Clark e SCS.

As áreas das bacias variaram de  $0,8\text{km}^2$  a  $440,3\text{km}^2$  sendo a mediana de  $17\text{km}^2$  e a média de  $41,1\text{km}^2$ .

As porcentagens de área impermeáveis variaram de 0 a 74% sendo a mediana de 18% e a média de 28,4%.

Dhacal, 2012 ressalta a importância do valor do coeficiente C que deve ser obtido para áreas em desenvolvimento usando:

$$C = 1,66 \cdot \text{IMP}^3 - 2,11 \cdot \text{IMP}^2 + 1,3 \cdot \text{IMP} + 0,04$$

Outra equação simplificada é:

$$C = 0,85 \cdot \text{IMP} + 0,15$$

Sendo:

C= coeficiente volumétrico = coeficiente de runoff

IMP= area impermeável em fração.

Observamos que adotamos  $C=Rv=0,05+0,009 \times AI$  que é a equação volumétrica de Shueller, 1987 e que fazemos  $C=Rv$ .

O coeficiente C que estimamos se deve ainda aos estudos iniciais de Kuichling feito em 1889.

Dhacal, 2012 observou que o valor do coeficiente de runoff C não inclui a chuva antecedente, isto é, quando chove vários dias e o solo quase não infiltra mais água e aumenta o escoamento superficial.

Observou ainda que o valor de C aumenta com o período de retorno, mas não recomendou nenhuma mudança. O interessante é que Dhacal, 2012 não advoga nenhum limite para o uso da área de drenagem do método Racional e acha que no futuro estudos intensivos deverão achar o limite.

Segundo Dhakal, 2012 citando Smith e Lee, 1984, Walesh, 1989 e Viessaman e Lewis, 2003 o hidrograma do método racional modificado pode ser triangular ou trapezoidal dependendo da relação da duração da chuva "D" e do tempo de concentração "tc".

Caso A quando  $D=tc$

Então o hidrograma é triangular

Caso B quando  $D>tc$

O hidrograma será trapezoidal com  $Q_p=CIA$

Caso C quando  $D<tc$

No caso da duração da chuva D for menor que Tc conforme Smith e Lee, 1984 in Dhakal, 2012 o valor de  $Q'p$  é dado pela equação:

$Q'p= CIA (D/tc)$  se  $D<tc$

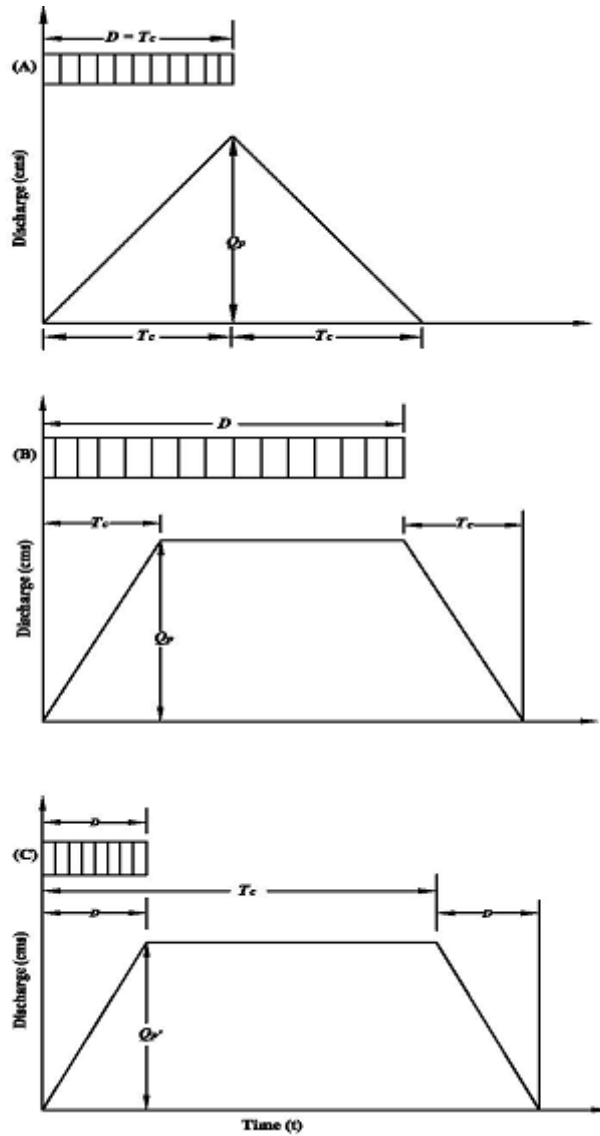


Figura 111.16- Três casos de hidrogramas do método Racional  
Fonte: Dhakal, 2012.

**Tabela 111.7- Comparação entre os valores de C**

AI	AI fração	Texas Simplificado	Texas completo	Schueller
0	0	0,15	0,04	0,05
10	0,1	0,24	0,15	0,14
20	0,2	0,32	0,23	0,23
30	0,3	0,41	0,28	0,32
40	0,4	0,49	0,33	0,41
50	0,5	0,58	0,37	0,50
60	0,6	0,66	0,42	0,59
70	0,7	0,75	0,49	0,68
80	0,8	0,83	0,58	0,77
90	0,9	0,92	0,71	0,86
100	1,0	1,00	0,89	0,95

### 111.7 Hidrograma do método Racional triangular com base 2,67

O hidrograma do método Racional da Figura (111.17) 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 quanto 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  $T_r=25$  anos.

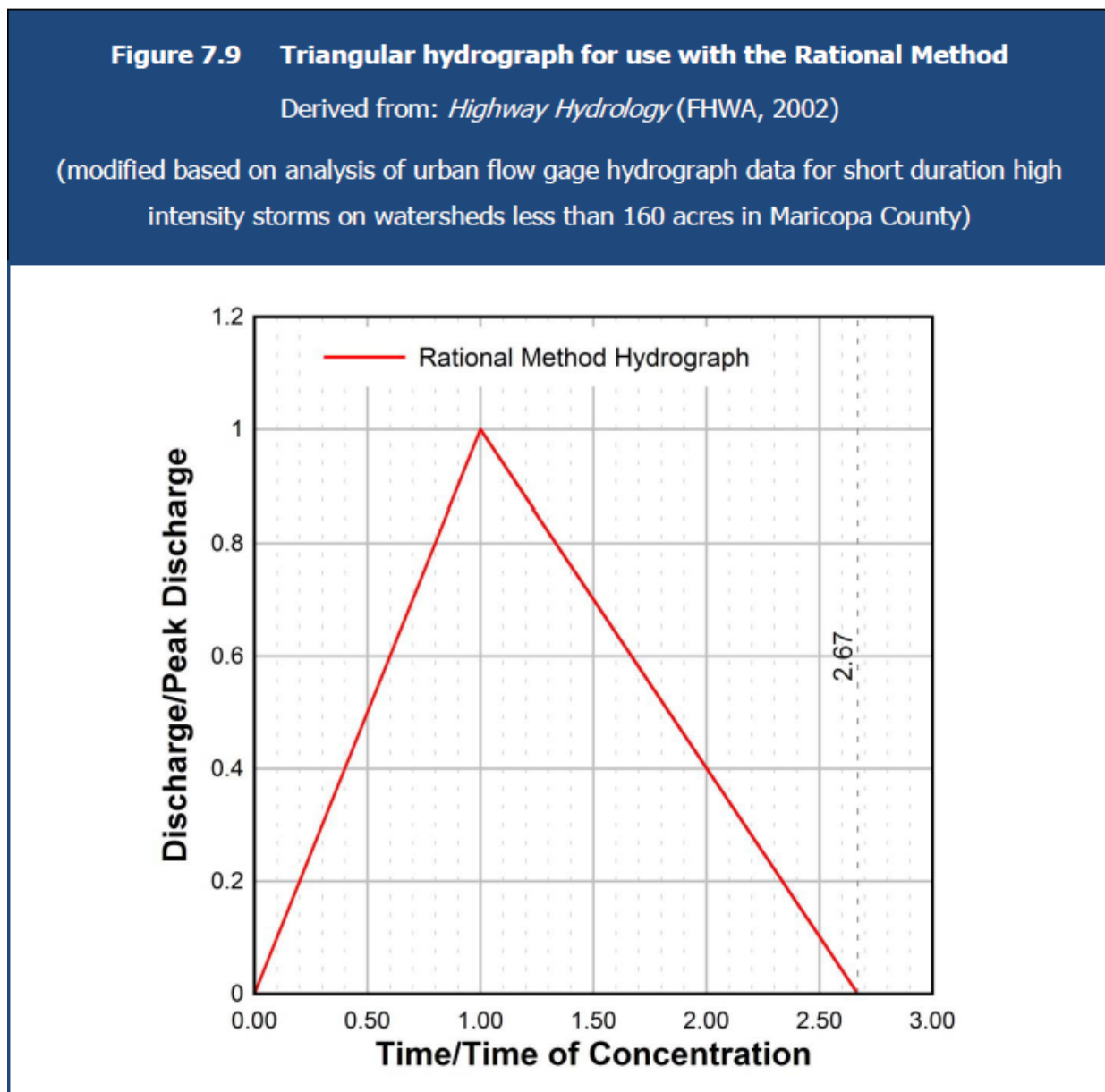
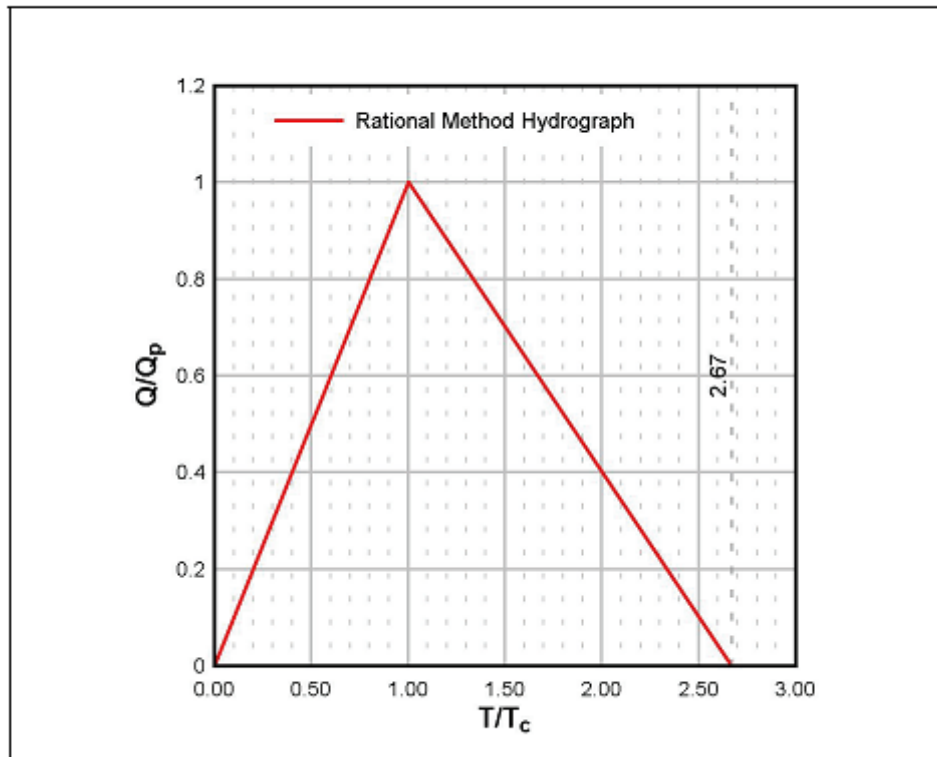


Figura 111.17- Hidrograma do método Racional utilizado em Mohave County

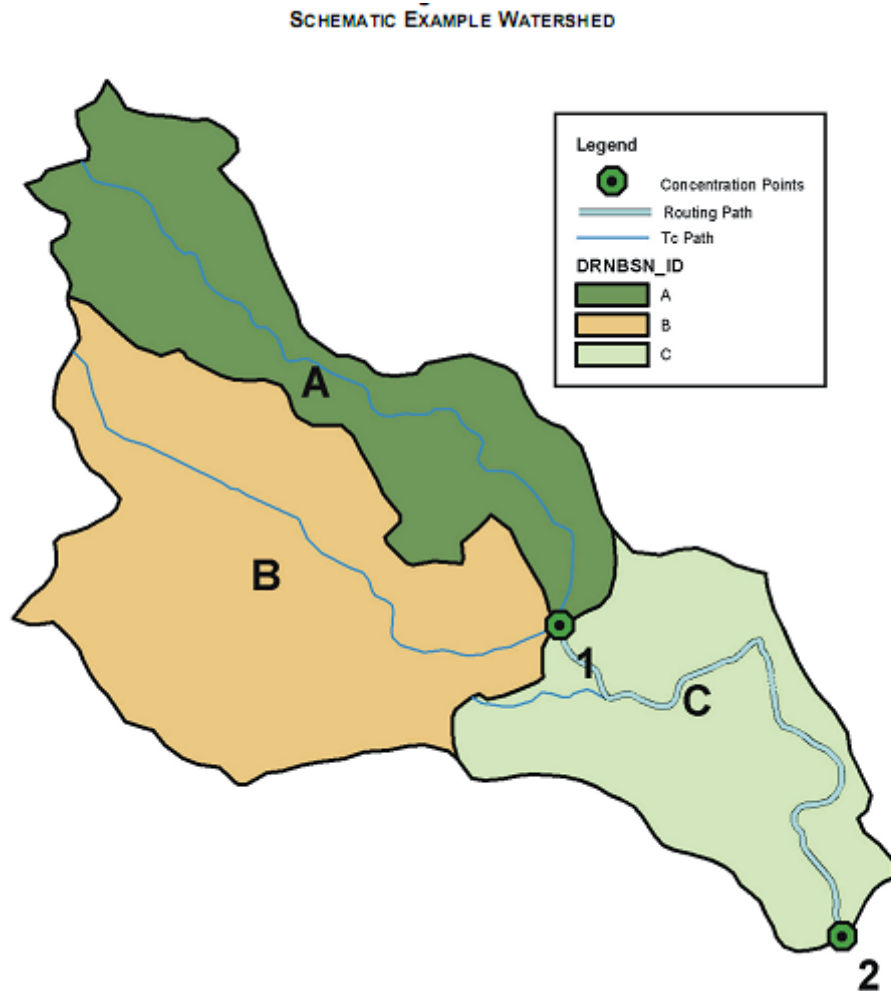


TRIANGULAR HYDROGRAPH FOR USE WITH THE RATIONAL METHOD  
SOURCE: HIGHWAY HYDROLOGY (DERIVED FROM [FHWA, 2002<sup>1</sup>](#))



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



**Figura 111.19- Cálculo de varias bacias com o método Racional**  
**Fonte: Maricopa County, 2010**

### 111.8 Cálculo de varias bacias usando o método Racional

Caso tenhamos várias bacias conforme Figura (111.19) 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 calculo separado deve ser feito o hidrograma conforme Figura (111.18) 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 distancia dividido pela velocidade.

- Após o translado 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 area de bacias de 64ha.

### 111.9 Hidrograma triangular

Conforme Figura (111.20) temos:

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

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.

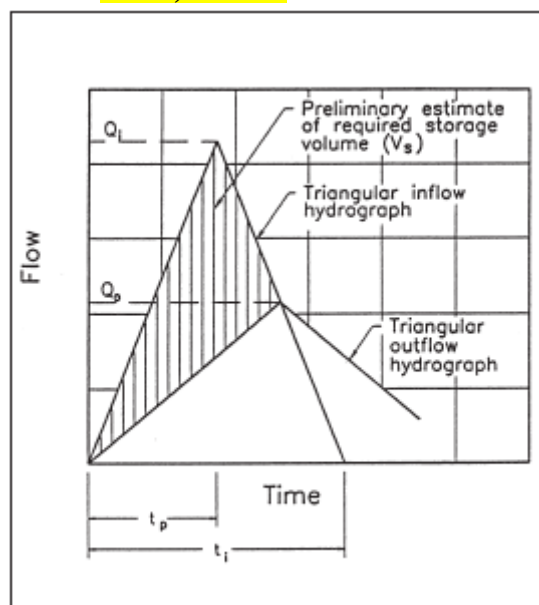
**O valor de  $t_b$  a ser adotado pode ser:**

$$t_b = 1,5 x t_c$$

$$t_b = 2,0 x t_c$$

$$t_b = 3,0 x t_c$$

$$t_b = 2,67 x t_c$$



**Figura 111.20- 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 111.3**

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:

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

Adotando  $t_b = 2,67 x t_c = 2,67 x 15\text{min} = 45\text{min}$

$$V_s = 0,5 x (65,47 - 13) x 45\text{min} x 60\text{s} = 62.570\text{m}^3$$

### **111.10 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.

### **111.11 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