

Capítulo 113

Método de Clark

**"Admiro os poetas.
O que eles dizem com duas palavras a gente
tem que exprimir com milhares de tijolos."
Vilanova Artigas**

Capítulo 113- Método de Clark

113.1 Introdução

Vamos mostrar o **Método de Clark** conforme modelo apresentado por Gupta, 2008 e outros.

Segundo Ponce, 1989 o Método de Clark pode ser chamar também de Método do Tempo-Área.

McCuen, 1998 na página 526 do seu livro, cita o Método de Clark, porém, o chama de **Método Tempo-Área**.

Subramanya, 2013 chama o Método de Clark de Método tempo-área do histograma.

O método de Clark foi criado baseado em Muskingum e se baseava somente em bacias onde havia medições. Entretanto com o passar dos anos o mesmo começou a ser aplicado em bacias onde não há medições.

O método de Clark data de 1943 e foi facilitado com curvas tempo-área (curvas TA) que é usado em programas americanos como HEC-1 e HEC-HMS.

Wanielista et al, 1997 informa que o tempo de concentração na bacia é dividido em pedaços em inúmeros intervalos de parte do tempo de concentração.

O método de Clark usa o **hidrograma unitário para chuva excedente de 1cm**.

Depois de obtido o **hidrograma unitário de Clark** fazemos a chamada **convolução** normalmente usados no SCS, Snyder, Denver, Espey e outros.

A convolução nada mais é que a operação matemática entre duas funções resultante numa terceira função. Na convolução teremos translação, multiplicação e adição.

É importante salientar que o método do hidrograma unitário é baseado na relação linear que existe entre a chuva excedente e as vazões diretas do *runoff* conforme Akan, 2003. Esta linearidade é que permite usar o princípio da superposição para calcular o hidrograma final.

O método de Clark possui **três parâmetros básicos**:

1. **Tempo de concentração** da bacia desde o ponto mais a montante da bacia até o local considerado;
2. **K ou R coeficiente de armazenamento** em horas obtido em dados do hidrograma no ponto de inflexão ou estimado.
3. **Curva do tempo-área**.

Até o momento não sabemos o limite de área em km² do uso do Método de Clark.

É importante salientar que o Método de Clark vem sendo usado em pequenas áreas de bacias, substituindo algumas vezes o método Racional. Mas devemos ter o cuidado, pois, achamos o hidrograma unitário de Clark e depois temos que fazer a CONVOLUÇÃO usando o número da curva CN e a precipitação excedente e tudo isto dá muito trabalho.

113.2 Estimativa da curva tempo-área

No método de Clark achar as áreas conforme Figura (113.1) dá muito trabalho e alguns desistem de usar o método. Isócronas são linhas de mesmo tempo de trânsito.

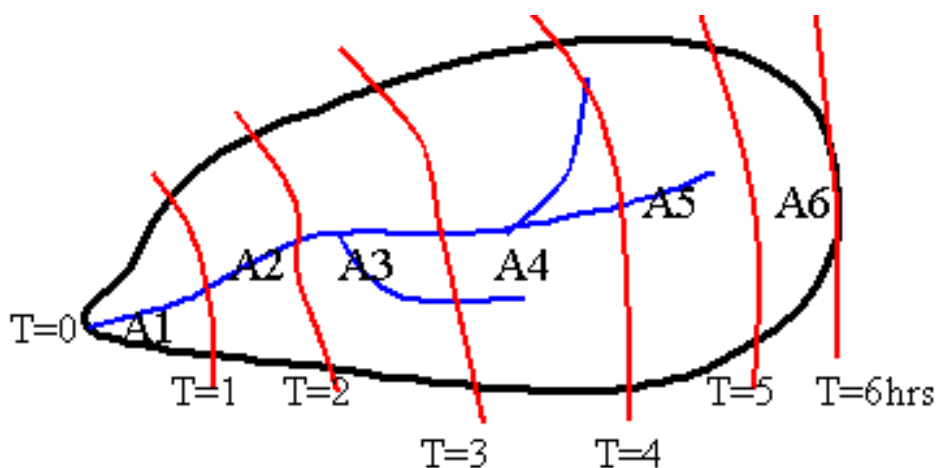


Figura 113.1- Isócronas e respectivas áreas

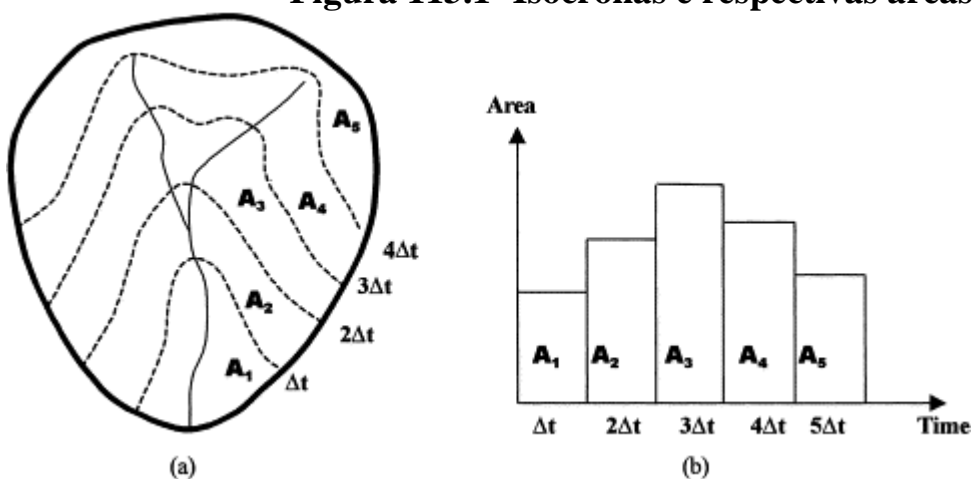


Figura 113.2- Isócrona (áreas para uso do método de Clark com o mesmo tempo de concentração)

Não há dúvida que a separação das áreas com o mesmo tempo de concentração é a melhor solução para o uso do Método de Clark. Entretanto na prática torna-se muito trabalhoso usar tal medida e se procede usando um método aproximado estabelecido pela USACE, 1987.

Akan, 2003 usa as áreas acumuladas pode ser estimada pelas seguintes equações conforme USACE, 1987:

$$A_c = 1,414 \cdot A \cdot (t/t_c)^{1,5} \quad \text{para} \quad 0 \leq t/t_c < 0,5$$

$$A_c = A [1 - 1,414 (1 - t/t_c)^{1,5}] \quad \text{para} \quad 0,5 \leq t/t_c \leq 1,0$$

Sendo:

A_c = área acumulada (Km^2)

t = tempo (h)

t_c = tempo de concentração (h)

A = área total (Km^2)

Lembremos que o cálculo das áreas acumuladas é uma estimativa sendo que a melhor alternativa é calcular o tempo de trânsito com o intervalo de tempo considerado.

Mohave County, 2009 recomenda a Tabela (113.1) para se achar as áreas acumuladas.

A área “A” deve ser usada em áreas urbanas.

A área “C” deve ser usada em região desértica e de pastagens com montanhas.

A área “B” deve ser usada em casos que não se define se é “A” ou “C”.

Mohave County, 2009 salienta ainda que a curva “B” é a relação default Tempo-Área usado pelo programa HEC-1.

Tabela 113.1- Áreas acumuladas usadas em Mohave County, 2009 para aplicação do Método de Clark.

Travel Time as a percent of T_c	Contributing Area, as a Percent of Total Area ^a		
	A	B ^b	C
(1)	(2)	(3)	(4)
0	0	0.0	0
10	5	4.5	3
20	16	12.6	5
30	30	23.2	8
40	65	35.8	12
50	77	50.0	20
60	84	64.2	43
70	90	76.8	75
80	94	87.4	90
90	97	95.5	96
100	100	100.0	100

Mohave County, 2009 apresenta ainda a Figura (113.1) onde mostra as curvas A,B e C e sua aplicação.

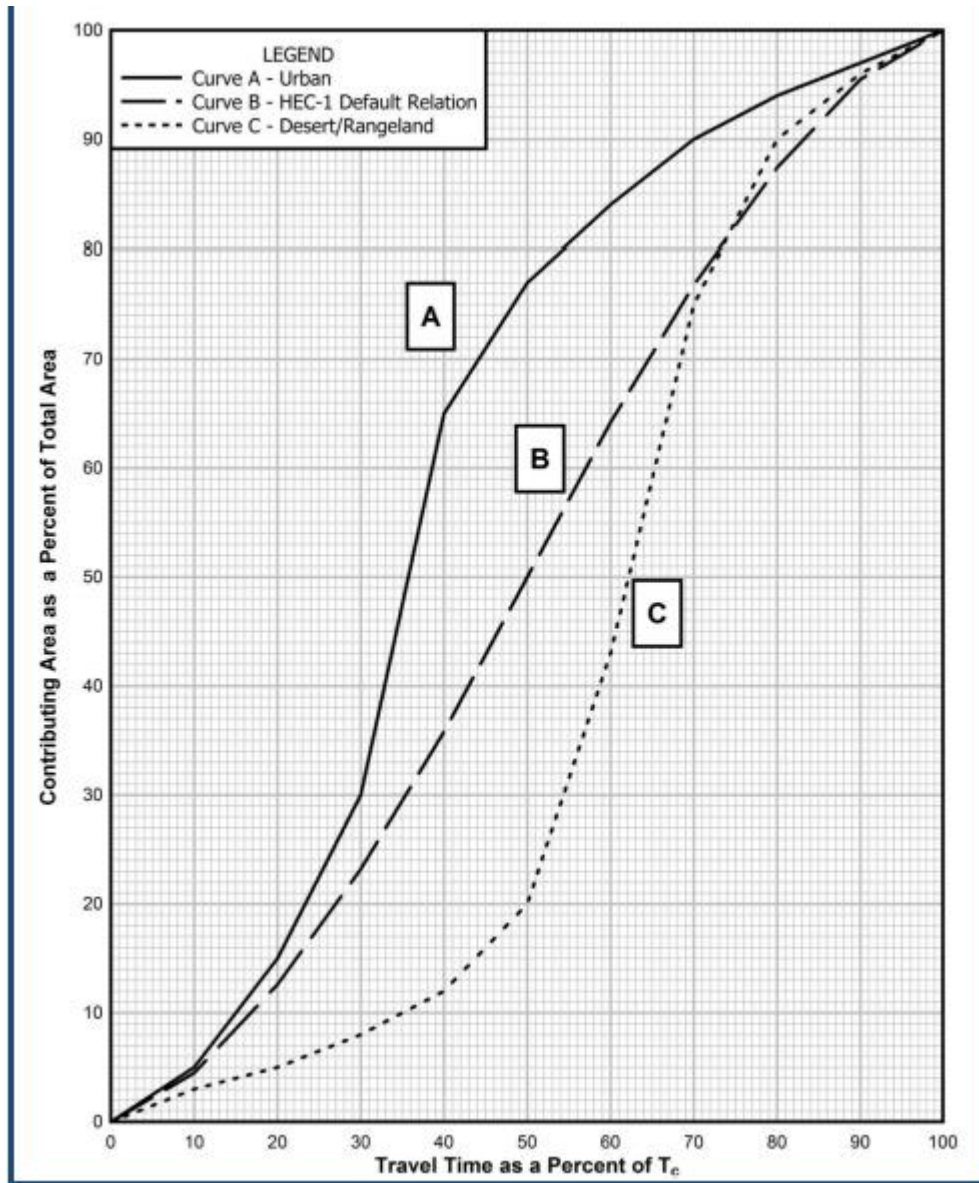


Figura 113.3- |Porcentagens das áreas acumuladas conforme a porcentagem do tempo de concentração. Fonte: Mohave County, 2009

113.3 Método de Clark conforme Gupta, 2008

O balanço de massa é:

$$dS/dt = I_t - Q_t$$

Sendo:

dS/dt = variação no armazenamento com o tempo

I_t = média da vazão de entrada no tempo t

Q_t = média da vazão de saída no tempo t .

Considerando que o reservatório tenha um **modelo linear** de armazenamento para um particular tempo “ t ” relativa a vazão de saída é:

$$S_t = K \cdot Q$$

Sendo:

K = constante que representa os efeitos de armazenamento da bacia e geralmente representado pelo tempo de translação t_L .

Q = vazão

S_t = armazenamento no tempo

O valor K é um coeficiente empírico de armazenamento também denominado de coeficiente de Clark que tem que ser obtido usando um **hidrograma conhecido** do local e quando não se tem dados de campo usamos:

$$K = 0,6 \times t_c$$

Sendo:

t_c = tempo de concentração (h)

K = coeficiente conhecido ou adotado do local (h) suposto constante.

Conforme Maniak, 1997 o tempo de concentração a ser achado no Método de Clark é dado pela equação:

$$\begin{aligned} \text{SI } K &= 0,5 \times t_c \\ \text{SI } T_c &= 0,5 \times A^{0,6} \end{aligned}$$

Sendo:

T_c = tempo de concentração (h)

A = área da bacia em Km^2

K = constante de armazenamento (h) *Speicherkonstante* em alemão

Maniak, 1997 apresenta também a equação para fornecer o valor de K .

$$\text{SI } K = 0,339 \cdot Mq^{-0,15} \cdot A^{0,62}$$

Sendo

K = constante de armazenamento (h)

A = área da bacia em Km^2

Mq = em $\text{L/s} \times \text{Km}^2$

O valor de M_q pode ser explicado com um exemplo. Supomos precipitação de 2 horas para período de retorno de 100 anos, com chuva excedente de 10 kcm obtida pelo número da curva CN do SCS.

Vamos achar em $L \times Km^2$

$$10 \text{ cm} \times 10\text{mm}/2\text{h} \times 3600 = 0,01289 \text{ L/s} / \text{m}^2$$

$$1\text{Km}^2 = 100 \text{ há} = 100 \times 10000$$

$$0,012890 \times 1000.000 = 12890 \text{ L/s} / \text{Km}^2$$

Supomos também que K o coeficiente de armazenamento de Clark é constante o que na verdade não é.

Colorado e Mohave County, 2009 usam muito o Método do Hidrograma Unitário de Clark e recomendam para determinação do coeficiente de armazenamento K a seguinte equação:

$$\text{Si } K = 0,435 \cdot t_c^{1,11} \cdot L^{0,80} / A^{0,57}$$

Sendo:

K = coeficiente de armazenamento (h)

t_c = tempo de concentração (h)

L = comprimento do talvegue até a divisa (Km)

A = área da bacia (Km^2)

Nas unidades inglesas.

No Estado de Arizona e Colorado se usa a fórmula:

$$K = 0,37 \cdot t_c^{1,11} \cdot L^{0,80} / A^{0,57}$$

Sendo:

K = coeficiente de armazenamento (h)

t_c = tempo de concentração (h)

L = comprimento do talvegue até a divisa (mi)

A = área da bacia (mi^2)

O interessante é que no Arizona se usa o intervalo de tempo de 2 minutos para chuvas de 3h e 6 h. Para chuvas até 24 h se usa o intervalo de 5 min.

A chuva de duração de 3h é para $t_c < 2,5$ horas

A chuva de duração de 6h é para $2,5 < t_c \leq 5$ h

Para $t_c > 5$ h usar duração da chuva de 24 horas.

No Arizona e Colorado se usam os seguintes t_c :

Para áreas de montanhas

$$T_c = 2,4 A^{0,1} \cdot L^{0,25} \cdot L_{ca}^{0,25} \cdot S^{-0,2}$$

$$\text{SI } T_c = 1,24 A^{0,1} \cdot L^{0,25} \cdot L_{ca}^{0,25} \cdot S^{-0,2}$$

Para áreas agrícolas]

$$T_c = 7,2 A^{0,1} \cdot L^{0,25} \cdot L_{ca}^{0,25} \cdot S^{-0,2}$$

$$\text{SI } T_c = 1,71 A^{0,1} \cdot L^{0,25} \cdot L_{ca}^{0,25} \cdot S^{-0,2}$$

Para áreas urbanas

$$\mathbf{T_c = 3,2 A^{0,1} \cdot L^{0,25} \cdot L_{ca}^{0,25} \cdot S^{-0,14} \cdot AI^{-0,36}}$$
$$\mathbf{SI \quad T_c = 1,65 A^{0,1} \cdot L^{0,25} \cdot L_{ca}^{0,25} \cdot S^{-0,14} \cdot AI^{-0,36}}$$

Sendo para unidades inglesas:

Tc= tempo de concentração para o método de Clark (h)

L= comprimento do talvegue (mi)

Lca= distância do centro de gravidade da área até a área considerada (mi)

S= declividade (ft/mi)

AI= área impermeável (%)

Sendo para SI:

Tc= tempo de concentração para o método de Clark (h)

L= comprimento do talvegue (Km)

Lca= distância do centro de gravidade da área até a área considerada (Km)

S= declividade (m/Km)

AI= área impermeável (%)

O valor de R no Arizona é:

$$\mathbf{R = 0,37 t_c^{1,11} L^{0,80} A^{-0,57}}$$

Exemplo 113.1

Dada uma bacia com 270 Km², comprimento do talvegue de 35 km e tc=11,6h. Calcular o valor de K.

$$\mathbf{K = 0,437 \cdot t_c^{1,11} \cdot L^{0,80} / A^{0,57}}$$
$$\mathbf{K = 0,437 \cdot 11,6^{1,11} \cdot 35^{0,80} / 270^{0,57} = 4,67 \text{ h}}$$

O *U.S Army Corps of Engineers* do Centro Hidrológico de Engenharia observou quem em algumas regiões a relação **K/ (tc +K)** tende a ficar constante e isto é válido somente para aquela região.

113.4 Valor de K usando um hidrograma conhecido conforme Gupta, 2008

Quanto temos um hidrograma na seção de controle da bacia que estamos estudando, podemos calcular o valor de K usando o hidrograma conforme Figuras (113.4) e (113.5).

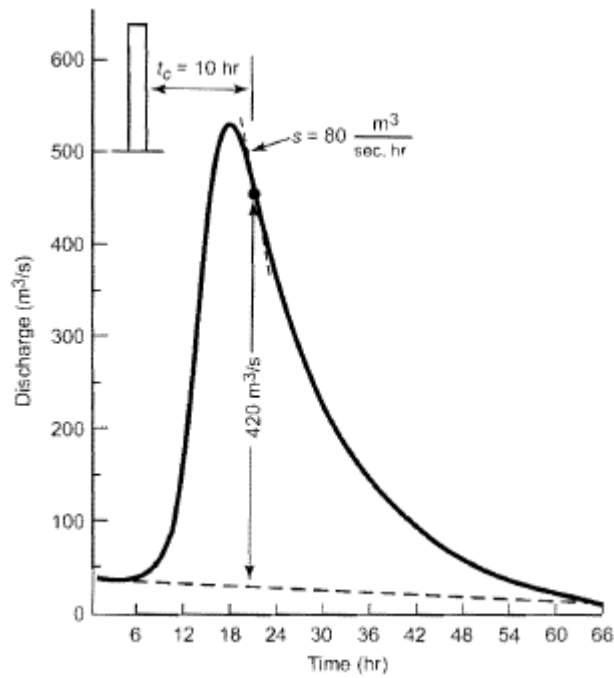


Figura 113.4- Esquema para achar o valor de K quando temos o hidrograma. Notar que o $t_c = 10h$ e temos a vazão de $420 m^3/s$

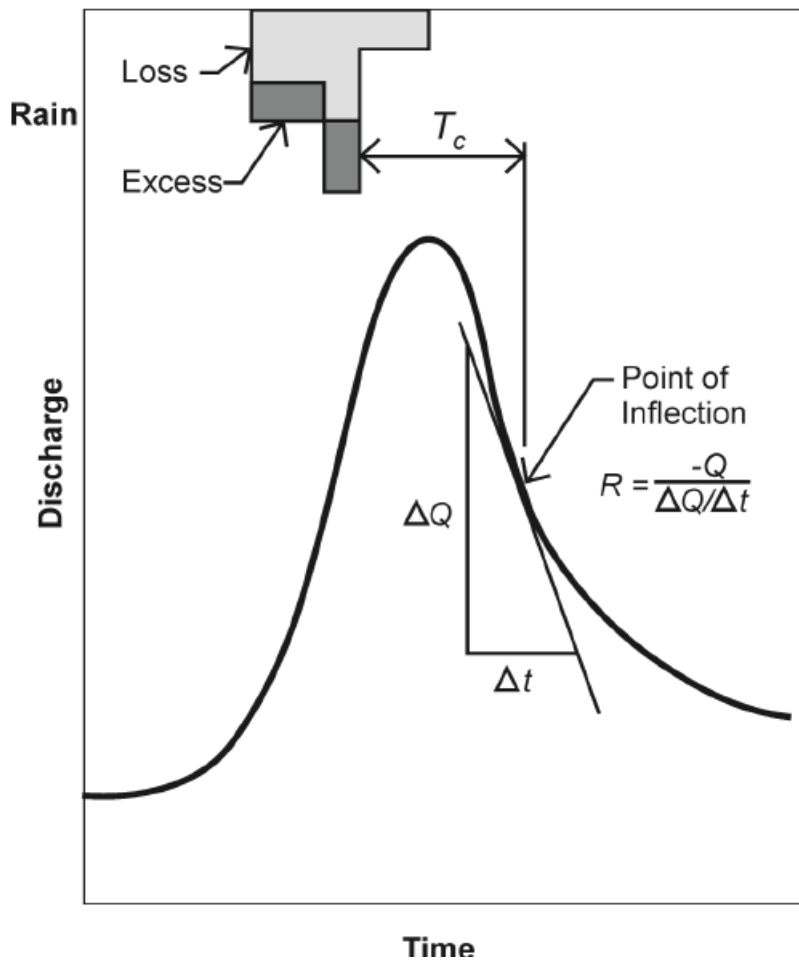


Figura 113.5- Esquema para achar o valor de K quando temos o hidrograma.

O valor de K conforme Gupta, 2008 será:

$$K = -Q / (dQ/dt)$$

Observar que a tangente no ponto de inflexão é negativa e então para ficar positivo multiplicamos por -1.

Exemplo 113.1- Achar o valor de K quando temos o hidrograma

K= (ordenada do hidrograma no ponto de inflexão)/ (tangente do ângulo do hidrograma no ponto de inflexão)

$$K = -Q / (dQ/dt)$$

$$K = 420 \text{ m}^3/\text{s} / 80 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{h} = 5,25 \text{ h}$$

113.5 Ordenadas da descarga

$$I_i = (A_{pf} \times 10^6 \times 0,01\text{m}) / (\Delta t(\text{h}) \times 60 \times 60)$$

Sendo:

I_i = ordenada da descarga (m^3/s)

A_{pf} = área por faixa (Km^2)

$\Delta t(\text{h})$ = intervalo de tempo em horas adotada. Nota: temos que transformar em segundos multiplicando por 60min e depois por 60 segundos.

0,01m = é o 1cm que usaremos no diagrama unitário.

10^6 = para transformar a área de Km^2 para m^2 .

Combinando as equações teremos:

$$Q_t = C_1 \cdot I_t + C_2 \cdot Q_{t-1}$$

$$C_1 = \Delta t / (K_s + 0,5 \cdot \Delta t)$$

$$C_2 = 1 - C_1$$

No tempo Δt calculamos a média e achamos as vazões do hidrograma unitário em $\text{m}^3/\text{s}/\text{cm}$:

$$Q_t = (Q_{t-1} + Q_t) / 2$$

113.6 Intervalo de tempo mínimo

Mohave County, 2009 do Estado de Illinois, usa muito o método de Clark adotada como intervalo adequado **0,15.tc** e como **máximo 0,25 .tc**.

Quando há várias bacias com valores diferentes de tc deve ser adotado o menor valor de todas as bacias.

Outro critério usado em Mohave County, 2009 é que o intervalo de tempo deve ser de **2 min** para chuvas de duração de 6 h em bacias até 2,59 km^2 . Para bacias

maiores que 2,59 Km² deve ser adotado intervalo de **5 min** para chuvas de 24h de duração.

Exemplo 113.2- Quando temos as áreas acumuladas e um hidrograma

Calcular o hidrograma unitário sintético de Clark usando modelo de Gupta para uma bacia com tc=10h, área 595 Km², com intervalo Δt=2h para usar com chuva excedente com intervalo de 2h.

K= 0,525h calculado usando o hidrograma obtido no Exemplo (113.1).

Δt=1,00h,

$$C_1 = \Delta t / (K + 0,5 \cdot \Delta t)$$
$$C_1 = 1,0 / (6 + 0,5 \times 1,00) = \mathbf{0,154}$$
$$C_2 = 1 - C_1 = 1 - 0,154 = \mathbf{0,846}$$

Vamos colocar os cálculos na Tabela (113.2) e vamos explicar coluna por coluna.

Coluna 1: Intervalo de tempo

Colocamos o intervalo de tempo de maneira que seja compatível depois com a precipitação excedente para fazer a convolução.

No caso o intervalo de tempo é Δt=2,0h.

Coluna 2: Áreas acumuladas.

As áreas acumuladas são obtidas nas plantas sendo pela ordem da seção de controle: 0; 35 km²; 140 km²; 275 km²; 455 km² e 595 km².

Coluna 3- Área da bacia em Km² que contribui para a vazão na seção de saída no intervalo de tempo.

É a diferença da linha 2 com a anterior.

Assim 140- 35= 105 km².

Coluna 4- É a vazão obtida multiplicando a coluna (3) por 1 cm (0,01m) de chuva excedente e por 10⁶ para transformar em m² e dividindo o resultado por Δt=2,0h, só que colocando em segundos.

Assim:

$$35 \text{ km}^2 \times 10^6 \times 0,01 / (2,0 \times 60 \times 60) = 48,6 \text{ m}^3/\text{s/cm}$$

Coluna 5- É o cálculo da vazão de saída através do *routing*.

Usamos a equação:

$$Q_t = C_1 \cdot I_t + C_2 \cdot Q_{t-1}$$

$$C_1 = \Delta t / (K_s + 0,5 \cdot \Delta t) = 2 / (5,65 + 0,5 \times 2) = 0,154$$

$$C_2 = 1 - C_1 = 1 - 0,154 = 0,846$$

$$Q_t = C_1 \cdot I_t + C_2 \cdot Q_{t-1}$$

$$Q_t = 0,154 \cdot I_t + 0,846 \cdot Q_{t-1}$$

Para o tempo t=2,0h temos:

$$Q_t = 0,154 \cdot I_t + 0,846 \cdot Q_{t-1}$$

$$Q_t = 0,154 \times 48,6 + 0,846 \times 0 = 15,56 \text{ m}^3/\text{s/cm}$$

Para o tempo t=4,0h temos:

$$Q_t = 0,154 \cdot I_t + 0,846 \cdot Q_{t-1}$$

$$Q_t = 0,154 \times 145,8 + 0,846 \times 15,56 = 57,24 \text{ m}^3/\text{s/cm}$$

Coluna 6- Média de duas linhas dos valores Q_t da coluna 5.

$$\text{Assim} = (15,56 + 0) / 2 = 7,78$$

$$36,40 = (15,56 + 57,24) / 2 = 36,40$$

Tabela 113.2- Cálculos do Método de Clark conforme RAGHUNATH, 2006 para quando temos dados de entrada como as áreas acumuladas e hidrograma para obter o valor de K.

		tc(h)=	10	Δt (min)=	120
		K(h)=	5,25	Δt (h)=	2
Area (km²)=	595			C1=	0,320
				C2=	0,680
Tempo (h)	Área acum (Km²)	Ac (Km²)	It (m³/s/cm)	Qt (m³/s/cm)	Q (m³/s/cm)
1	2	3	4	5	6
0,0	0	0	0	0	0
2,0	35	35	48,6	15,56	7,78
4,0	140	105	145,8	57,24	36,40
6,0	275	135	187,5	98,93	78,09
8,0	455	180	250,0	147,27	123,10
10,0	595	140	194,4	162,37	154,82
12,0	0	0	0,0	110,41	136,39
14,0	0	0	0,0	75,08	92,74
16,0	0	0	0,0	51,05	63,07
18,0	0	0	0,0	34,72	42,88
20,0	0	0	0,0	23,61	29,16
22,0	0	0	0,0	16,05	19,83
24,0	0	0	0,0	10,92	13,48

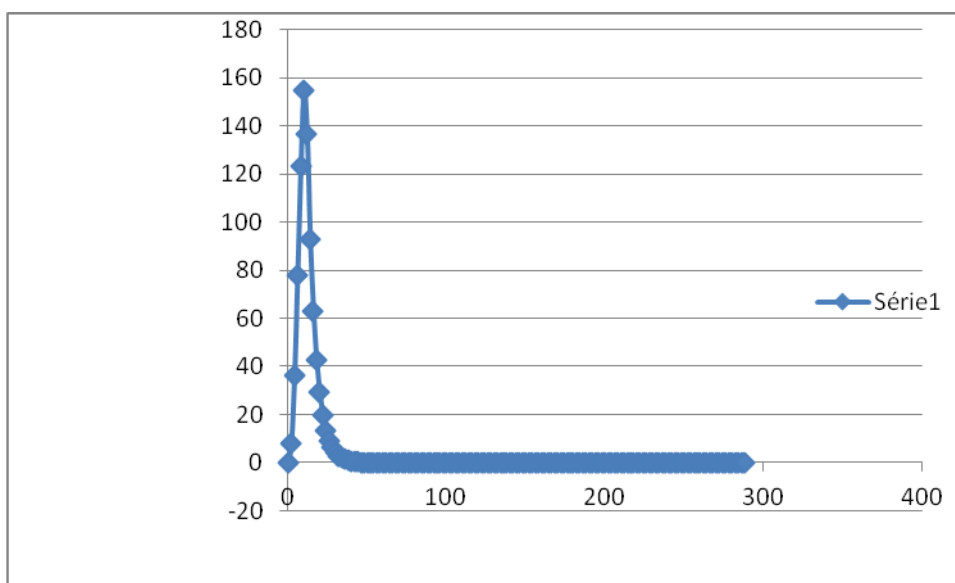


Figura 113.6- Hidrograma unitário de Clark para quando temos dados e sendo o tempo em horas e vazão $m^3/s/cm$.

Exemplo 113.3 - Quando não temos hidrograma e nem as áreas acumuladas

Calcular o hidrograma unitário sintético de Clark usando modelo de Gupta para uma bacia com $t_c=10h$, área 595 Km^2 , com intervalo $\Delta t=2h$ para usar com chuva excedente com intervalo de $2h$.

$$K = 0,6 \times t_c = 0,6 \times 10 = 6h$$

$$\Delta t = 2,00h$$

$$C_1 = \Delta t / (K + 0,5 \cdot \Delta t)$$

$$C_1 = 2,0 / (6 + 0,5 \times 2,00) = 0,320$$

$$C_2 = 1 - C_1 = 1 - 0,320 = 0,680$$

Vamos colocar os cálculos na Tabela (113.3) e vamos explicar coluna por coluna.

Coluna 1: Intervalo de tempo

Colocamos o intervalo de tempo de maneira que seja compatível depois com a precipitação excedente para fazer a convolução.

No caso o intervalo de tempo é $\Delta t=2,0h$.

Coluna 2: Cálculos das áreas acumuladas.

As áreas acumuladas podem ser estimadas pelas seguintes equações conforme USACE, 1987:

$$A_c = 1,414 \cdot A \cdot (t/t_c)^{1,5} \quad \text{para} \quad 0 \leq t/t_c < 0,5$$

$$Ac = A[1 - 1,414 (1 - t/t_c)^{1,5}] \quad \text{para} \quad 0,5 \leq t/t_c \leq 1,0$$

Sendo:

Ac = área acumulada (Km^2)

t = tempo (h)

t_c = tempo de concentração (h)

A = área total (Km^2) = 595 km^2

Coluna 3- Área da bacia em Km^2 que contribui para a vazão na seção de saída no intervalo de tempo.

É a diferença da linha 2 com a anterior.

Assim teremos 75 Km^2 , 138 km^2 , 169 km^2 , 138 km^2 e 75 km^2 .

Coluna 4- É a vazão obtida multiplicando a coluna (3) por 1 cm (0,01m) de chuva excedente e por 10^6 para transformar Km^2 em m^2 e dividindo o resultado por $\Delta t = 2,0h$, só que colocando em segundos.

Assim:

$$75 \text{ Km}^2 \times 10^6 \times 0,01 / (2,0 \times 60 \times 60) = 104,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{cm}$$

Coluna 5- É o cálculo da vazão de saída através do *routing*.

Usamos a equação:

$$Q_t = C_1 \cdot I_t + C_2 \cdot Q_{t-1}$$
$$Q_t = 0,286 \cdot I_t + 0,714 \cdot Q_{t-1}$$

Para o tempo $t = 2,0h$ temos:

$$Q_t = 0,286 \cdot I_t + 0,714 \cdot Q_{t-1}$$
$$Q_t = 0,286 \cdot 104,5 + 0,714 \cdot 0 = 29,86 \text{ m}^3/\text{s}/\text{cm}$$

Para $t = 4h$

$$Q_t = 0,286 \cdot 191,1 + 0,714 \cdot 29,86 = 75,93 \text{ m}^3/\text{s}/\text{cm}$$

Coluna 6- Média de duas linhas dos valores Q_t da coluna 5.

$$14,93 = (29,86 + 0) / 2$$

$$52,90 = (29,86 + 75,93) / 2$$

Tabela 113.3- Cálculos do Método de Clark conforme RAGHUNATH, 2006 para o caso que não temos as áreas acumuladas e nem o hidrograma para achar o valor de K

		tc(h)=	10	Δt (min)=	120
		K(h)=	6	Δt (h)=	2
Área (km2)=	595			C1=	0,286
				C2=	0,714
Tempo (h)	Área acum (Km2)	Ac (Km2)	It (m3/s/cm)	Qt (m3/s/cm)	Q (m3/s/cm)
1	2	3	4	5	6
0,0	0	0	0	0	0
2,0	75	75	104,5	29,86	14,93
4,0	213	138	191,1	75,93	52,90
6,0	382	169	235,2	121,42	98,68
8,0	520	138	191,1	141,33	131,38
10,0	595	75	104,5	130,81	136,07
12,0	0,000	0	0,0	93,44	112,12
14,0	0,000	0	0,0	66,74	80,09
16,0	0,000	0	0,0	47,67	57,21
18,0	0,000	0	0,0	34,05	40,86
20,0	0,000	0	0,0	24,32	29,19
22,0	0,000	0	0,0	17,37	20,85
24,0	0,000	0	0,0	12,41	14,89
26,0	0,000	0	0,0	8,86	10,64
28,0	0,000	0	0,0	6,33	7,60
30,0	0,000	0	0,0	4,52	5,43

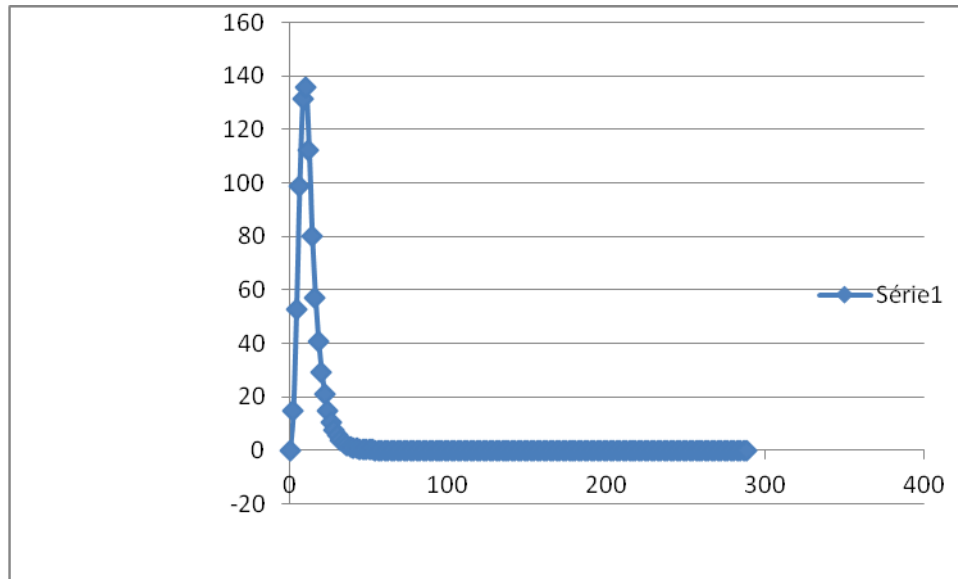


Figura 113.7- Hidrograma unitário sintético de Clark para quando não temos dados, sendo o tempo em horas e vazão em $m^3/s/cm$.

Com o hidrograma unitário sintético de Clark e tendo a chuva excedente, podemos fazer a convolução e calcular o hidrograma de saída na seção considerada.

Exemplo 113.4- Baseado em RAGHUNATH,2006

Dado bacia com área com 1950 Km², intervalo de tempo de 3h e K=12h achar o hidrograma unitário pelo método de Clark.

Tabela 113.4- Cálculos do Método de Clark conforme RAGHUNATH, 2006 para quando temos dados de entrada como as areas acumuladas e hidrograma para obter o valor de K.

		tc(h)=	24	Δt (min)=	180
		K(h)=	12	Δt (h)=	3
Area (km2)=	1950			C1=	0,2222
				C2=	0,7778
Tempo (h)	Área acum (Km2)	Ac (Km2)	It (m3/s/cm)	Qt (m3/s/cm)	Q (m3/s/cm)
1	2	3	4	5	6
0,0	0	0	0	0	0
3,0	32	32	29,6	6,58	3,29
6,0	99	67	62,0	18,91	12,75
9,0	189	90	83,3	33,22	26,07
12,0	305	116	107,4	49,71	41,47
15,0	440	135	125,0	66,44	58,07
18,0	677	237	219,4	100,44	83,44
21,0	1263	586	542,6	198,70	149,57
24,0	1950	687	636,1	295,90	247,30
27,0	0	0	0,0	230,14	263,02
30,0	0	0	0,0	179,00	204,57
33,0	0	0	0,0	139,22	159,11
36,0	0	0	0,0	108,28	123,75
39,0	0	0	0,0	84,22	96,25
42,0	0	0	0,0	65,51	74,86
45,0	0	0	0,0	50,95	58,23
48,0	0	0	0,0	39,63	45,29
51,0	0	0	0,0	30,82	35,22
54,0	0	0	0,0	23,97	27,40
57,0	0	0	0,0	18,64	21,31
60,0	0	0	0,0	14,50	16,57
63,0	0	0	0,0	11,28	12,89
66,0	0	0	0,0	8,77	10,03
69,0	0	0	0,0	6,82	7,80
72,0	0	0	0,0	5,31	6,06
75,0	0	0	0,0	4,13	4,72
78,0	0	0	0,0	3,21	3,67
81,0	0	0	0,0	2,50	2,85

Curso de Manejo de águas pluviais

Capítulo 113- Método de Clark

Engenheiro Plínio Tomaz 15 de fevereiro de 2016 pliniotomaz@uol.com.br

84,0	0	0	0,0	1,94	2,22
87,0	0	0	0,0	1,51	1,73
90,0	0	0	0,0	1,17	1,34
93,0	0	0	0,0	0,91	1,04
96,0	0	0	0,0	0,71	0,81
99,0	0	0	0,0	0,55	0,63
102,0	0	0	0,0	0,43	0,49
105,0	0	0	0,0	0,33	0,38
108,0	0	0	0,0	0,26	0,30
111,0	0	0	0,0	0,20	0,23
114,0	0	0	0,0	0,16	0,18
117,0	0	0	0,0	0,12	0,14
120,0	0	0	0,0	0,10	0,11
123,0	0	0	0,0	0,07	0,08
126,0	0	0	0,0	0,06	0,07
129,0	0	0	0,0	0,04	0,05
132,0	0	0	0,0	0,03	0,04
135,0	0	0	0,0	0,03	0,03
138,0	0	0	0,0	0,02	0,02
141,0	0	0	0,0	0,02	0,02
144,0	0	0	0,0	0,01	0,01
147,0	0	0	0,0	0,01	0,01
150,0	0	0	0,0	0,01	0,01
153,0	0	0	0,0	0,01	0,01
156,0	0	0	0,0	0,00	0,01
159,0	0	0	0,0	0,00	0,00
162,0	0	0	0,0	0,00	0,00
165,0	0	0	0,0	0,00	0,00
168,0	0	0	0,0	0,00	0,00
171,0	0	0	0,0	0,00	0,00
174,0	0	0	0,0	0,00	0,00
177,0	0	0	0,0	0,00	0,00
180,0	0	0	0,0	0,00	0,00
183,0	0	0	0,0	0,00	0,00
186,0	0	0	0,0	0,00	0,00
189,0	0	0	0,0	0,00	0,00
192,0	0	0	0,0	0,00	0,00
195,0	0	0	0,0	0,00	0,00
198,0	0	0	0,0	0,00	0,00
201,0	0	0	0,0	0,00	0,00
204,0	0	0	0,0	0,00	0,00
207,0	0	0	0,0	0,00	0,00
210,0	0	0	0,0	0,00	0,00
213,0	0	0	0,0	0,00	0,00

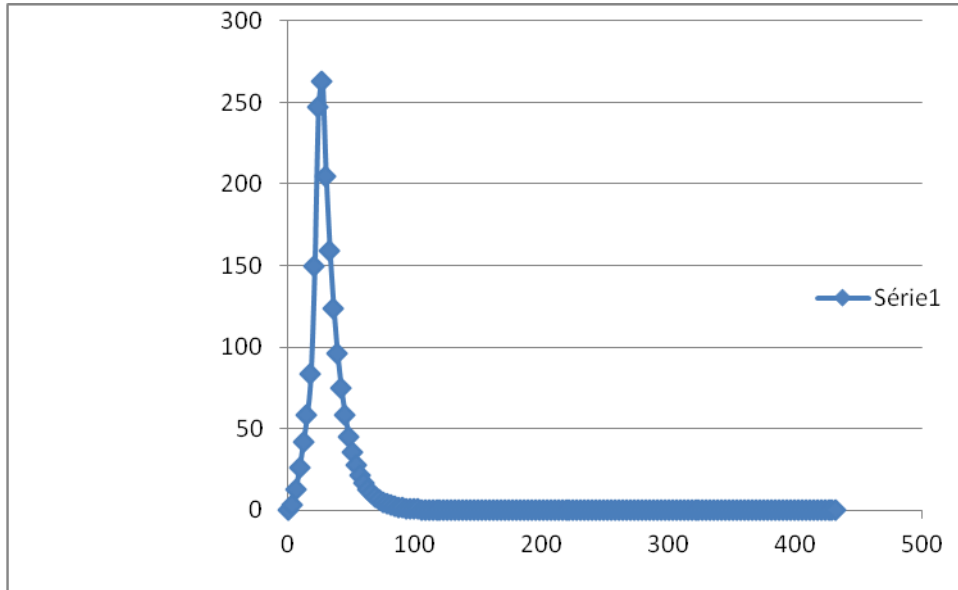


Figura 113.8- Hidrograma unitário do Método de Clark para área com 1950 Km² sendo o tempo em horas e vazão em m³/s/cm.

113.7 Convolução

Para a convolução, isto é, obter o hidrograma das vazões no tempo precisamos de:

113.8 Equações de chuvas intensas

Deverá ser usada a equação de chuvas intensas local.

113.9 Hietograma de chuva

Usamos o hietograma de Huff e o quartil desejado dependerá do tempo de concentração. A duração da chuva é maior que aproximadamente 25% a 30% do tempo de concentração.

Huff

Huff, 1990 salienta a importância e a dificuldade em se estabelecer a distribuição das precipitações com o tempo, isto é, os hietogramas, afirmando categoricamente que as diferenças podem ser significantes. Huff, 1990 cita um exemplo feito nos Estados Unidos na área de Kentucky onde acharam diferenças de 30% no pico da vazão devido a escolha adequada do hietograma.

Historicamente, Huff em 1967 pesquisou em Illinois durante 12 anos no período de 1955 a 1966 cerca de 261 tempestades numa área que variava de 130 km² a 1036 km². Foram pesquisadas também todas as precipitações acima de 13 mm.

Enquanto isto a curva mais usada é aquela de mediana 50% de probabilidade para o primeiro quartil e as outras são esquecidas.

Huff, 1990 em documentos afirmou que o primeiro e segundo quartis fosse usado para áreas menores que 1.037 km² na região de Illinois nos Estados Unidos.

Huff, 1990 definiu pequenas bacias aquelas menores que 1.036 km². Para pequenas bacias 37% das precipitações estão no primeiro, 27% no segundo quartil e 21% no terceiro 21% e 15% no quarto quartil.

Na Figura (113.9) temos quatro distribuições de Huff, 1990 sendo recomendado o seguinte:

- Primeiro quartil para chuvas menores ou igual a 6 h;
- Segundo quartil para chuvas de 6,1 h a 12 h;
- Terceiro quartil para chuvas entre 12,1 h e 24 h e o
- Quarto quartil para chuvas maiores que 24 h.

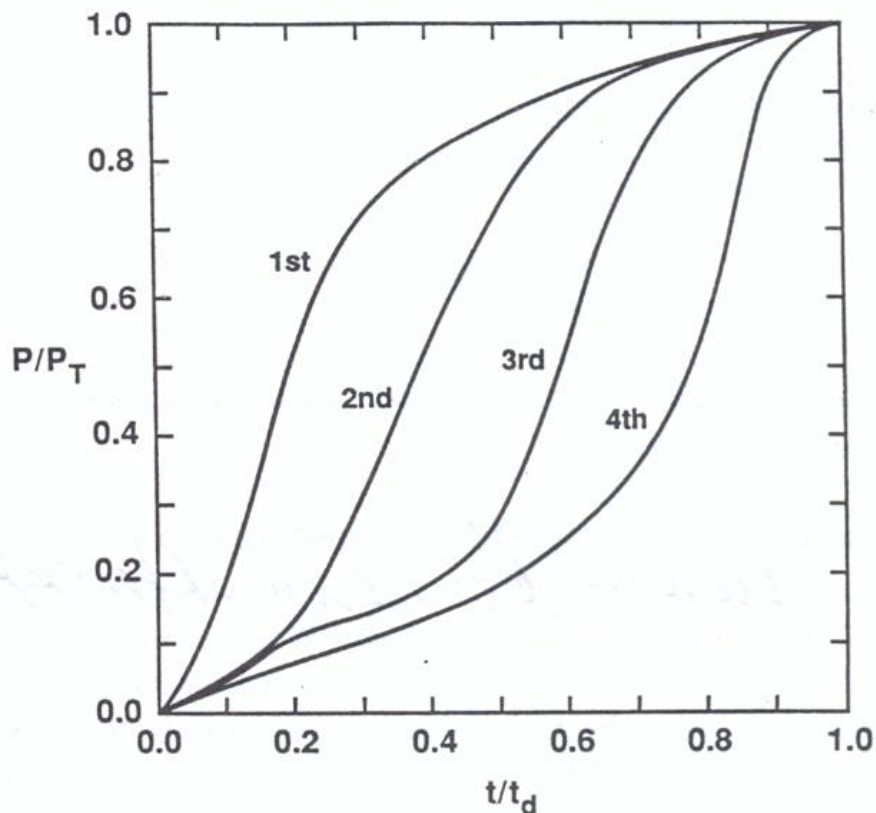


Figura 113.9- Hietograma de Huff no primeiro quartil, segundo quartil, terceiro quartil e quarto quartil. Fonte: Akan

Dica: conforme Huff, 1990 pela duração da chuva achamos o quartil que queremos.

Akan nos mostra que tendo a precipitação, por exemplo, de 2h de 85mm podemos escolher o tipo de curva e calcular ponto a ponto.

Por exemplo, para o primeiro quartil entrando tom $t/t_d = 0,2$, isto é, $t = 0,2 \times 2h = 0,4h$

Achamos na ordenada $0,55 = P / 85mm$
e $P = 85mm \times 0,55 = 47mm$

Conforme Bonta, 2004 as curvas de Huff são usadas nos Estados Unidos em nove estados e segundo o próprio Huff e Angel, 1992 aconselharam tal aplicação. Daí podemos concluir a importância das curvas de Huff.

Ainda segundo Bonta, 2004 vários softwares americanos usam as curvas de Huff, entre eles, *CREAMS*, *Haestad Methods*, *SWMM* e *ILLUDAS*.

Akan e Houghtalen, 2003 citados por Huff, mostram que as curvas de Huff também são usadas na **Europa**.

Segundo Bonta, 2004 **não há nenhuma correspondência** entre as curvas de Huff e as curvas do SCS (Tipo I, IA, II e III).

Tabela 113-5- Curvas acumuladas de Huff para os quartis: I., II. III e IV

% Storm time	% Cumulative storm rain			
	QI	QII	QIII	QIV
0	0	0	0	0
5	16	3	3	2
10	33	8	6	5
15	43	12	9	8
20	52	16	12	10
25	60	22	15	13
30	66	29	19	16
35	71	39	23	19
40	75	51	27	22
45	79	62	32	25
50	82	70	38	28
55	84	76	45	32
60	86	81	57	35
65	88	85	70	39
70	90	88	79	45
75	92	91	85	51
80	94	93	89	59
85	96	95	92	72
90	97	97	95	84
95	98	98	97	92
100	100	100	100	100

113.10 Chuva excedente pelo número da curva CN

Praticamente todos os métodos usam o número da curva CN para calcular a chuva excedente.

113.11 Método Santa Bárbara

Uma informação interessante é que o método Santa Bárbara (um parâmetro) foi baseado no método de Clark (três parâmetros) e este foi baseado em Muskingum.

113.12 Hidrograma unitário de Clark usado em pequenas bacias

O *Drainage Design Manual de Maricopa County, Arizona*, fevereiro de 2011 adota para áreas urbanas até 25,6 km² o hidrograma unitário de Clark. O tempo de concentração deverá ser menor ou igual a 1,5h.

Isto nos parece bastante estranho, visto que o Método de Clark é usado para áreas grandes.

O intervalo normalmente usado é igual a 0,15tc. Entretanto o intervalo poderá estar entre 0,10tc a 0,25tc.

As durações das chuvas são:

2h,

6h (áreas maiores que 51,2 Km² e

24h (para áreas maiores que 256 km²).

Sendo o período de retorno de 100 anos.

A duração básica da chuva adotada em Maricopa é de 6h e a chuva de 2h é adotada em caso de armazenamento somente.

113.13 USGS- Illinois

O Departamento do Interior dos Estados Unidos fez estudos do método de Clark para pequenas bacias rurais em Illinois.

As bacias variam de 0,05 Km² até 5,9 Km²;

As pesquisas concluíram por duas equações, uma para o tempo de concentração t_c (h) e outra para o valor de R (h). No presente trabalho temos usado $K=R$.

$$SI \quad T_c = 0,76 \cdot L^{0,875} / S^{0,181}$$

$$SI \quad R=K= 3,75 \cdot L^{0,342} / S^{0,790}$$

Dica: no uso do Método de Clark deve ser usado o t_c feito para o método de Clark e não outro valor do t_c . Cuidado não errar !!!

Sendo:

T_c = tempo de concentração (h)

L= comprimento do talvegue desde a seção considerada até a divisa da bacia (Km)

S= declividade do talvegue (m/Km)

R=K= coeficiente de armazenamento (h)

Esclarecemos que as equações citadas valem para áreas até 5,9 Km² somente.

Exemplo 113.5- adaptado do USGS- Illinois

Determinado bacia tem comprimento do talvegue 2,176 km e declividade de 7,5 m/Km. Achar t_c e K ?

$$T_c = 0,76 \cdot L^{0,875} / S^{0,181}$$

$$T_c = 0,76 \cdot 2,176^{0,875} / 7,5^{0,181}$$

$$T_c = 1,03 \text{ h}$$

$$R=K= 3,75 \cdot L^{0,342} / S^{0,790}$$

$$R=K= 3,75 \cdot 2,176^{0,342} / 7,5^{0,790}$$

$$R=K= 0,99 \text{ h}$$

Exemplo 113.6 Usando dados nas unidades inglesas

$$T_c = 1,54 \cdot L^{0,875} / S^{0,181}$$

$$R = 16,4 \cdot L^{0,342} / S^{0,790}$$

$$\text{SI } T_c = 0,76 \cdot L^{0,875} / S^{0,181}$$

$$\text{SI } R = 3,75 \cdot L^{0,342} / S^{0,790}$$

Sendo nas unidades inglesas:

R=em h

L= mi

S= ft/mi

Sendo nas unidades SI:

R=em h

L= Km

S= m/Km

Conversão de unidades inglesas em SI.

1 inch= 25,4mm

1 square mile (mi²)= 2,59 Km²

1 Foot per mile)ft/mi)= 0,1894 m/Km

Exemplo de transformação de unidades:

$T_c = 1,54 \cdot L^{0,875} / S^{0,181}$	$1,54 \cdot (1/1,6)^{0,875} / (1/0,1894)^{0,181} = 0,76$
--	--

Ficou assim: SI $T_c = 0,76 \cdot L^{0,875} / S^{0,181}$

Sados dados a Área da bacia (Km²), comprimento do talvegue (Km) e declividade do talvegue S (m/Km). Calcular tc e R.

Os resultados estão na Tabela (113.6)

Tabela 113.6- Cálculo de tc e R para diversas bacias

Bacia	Area (km ²)	Comprimento (Km)	S (m/km)	tc (h)	R (h)
1	16,317	10,24	0,59	6,396	14,728
2	0,199	0,528	10,47	0,284	0,338
3	92,463	18,56	2,58	8,250	8,352
4	0,155	0,96	2,65	0,615	0,918
5	51,023	21,6	0,61	12,214	21,165
6	33,670	17,28	1,06	9,106	11,950
7	54,649	26,56	1,00	13,393	14,710
8	44,548	12,48	0,91	7,041	14,837
9	95,830	20,64	1,51	9,968	12,870

Fonte: USGS. 2000 adaptado as unidades SI

113.14 Bibliografia e livros recomendados

- AKAN, A. OSMAN E HOUGHTALEN, ROBERT J. *Urban Hydrology, hydraulics and stormwater quality*. Editora John Wiles& Sons, 2003, 371 páginas.ISBN 0-471-43158-3 USA
- ASCE (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS). *Hydrology Handbook*. 2a ed.1996, 784 páginas. ISBN 07844-0138-1
- BEDIENT, PHILIP B. et al. *Hydrology and floodplain analysis*. 4a ed. Prentice-Hall,795 páginas, 2008, ISBN 13-97809-0-13-174589-6.
- GUPTA, RAM S. *Hydrology and hydraulic systems*. 3a ed. Editora Waveland, 2008, 896 páginas, ISBN 1-57766-455-8
- HEC-HMS. *Hec Hms and Hydrologic Modeling*, fevereiro de 2003 ENVI 512.
- HIGSON, KENNETH RUSSEL. *An evaluation of instantaneous unit hydrograph methods with a study os selected basins in the Saint John River Valley*, Tese de doutoramento, abril, 1969, 92 páginas, University of New Brunswick.
- MANIAK, ULRICH. *Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Editora Springer. Berlin, 650 páginas, ISBN 3-540-6329292-1, ano 1997.
- MOHAVE COUNTY. *Drainage design manual for Mohave County*. 24 de agosto de 2009, 354 páginas.
- PONCE, VICTOR MIGUEL. *Engineering Hydrology- principles and practices*. Prentice Hall, 1989, 640 páginas, ISBN 0-13-315466-1
- PORTO, RUBEM LA LAINA et al. *Escoamento superficial*. EPUSP, 1999, São Paulo Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária PHD 307- Hidrologia Aplicada.
- RAGHUNATH, H. M. *Hydrology- principles, analysis and design*. Editora New Age International, 2a edição, New Delhi, ano 2006, ISBN 81-224-2332-9 com 477 páginas.
- SUBRAMANYA, K. *Engineering hydrology*. 3a ed. Editora Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2008, 414 páginas, ISBN 978-0-07.015146-8.
- SUBRAMANYA, K. *Engineering Hydrology*. 4ª ed. New Delhi, McGraw Hill, 2013, ISBN (13) 978-9-38-328653-9 com 534 páginas.
- TUCCI, CARLOS E. M. et al. *Drenagem Urbana*. ABRH, UFRS Porto Alegre, 1995,428 páginas. ISBN 85-7025-364-8
- USGS (US GEOLOGICAL SURVEY)- DEPARTMENT OF THE INTERIOR, *Equations for estimating Clark Unit Hydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois*. Ano 2000, 30 páginas.
- WANIELISTA, MARTIN et al. *Hydrology- Water Quantity and quality control*. 2a ed. John Wiley & Sons, 1997, John Wiley & Sons, 1997, 567 páginas, ISBN 0-471-072559-.