

O Hidrograma Unitário

Uma bacia pode ser imaginada como um sistema que transforma chuva em vazão. A transformação envolve modificações no volume total da água, já que parte da chuva infiltra no solo e pode retornar à atmosfera por evapotranspiração, e modificações no tempo de ocorrência, já que existe um atraso na ocorrência da vazão em relação ao tempo de ocorrência da chuva.

No capítulo sobre geração de escoamento está descrito o processo da separação da chuva em uma parte que infiltra no solo e outra que escoar superficialmente. A fração da chuva ocorrida num evento que gera escoamento superficial é conhecida como chuva efetiva.

A chuva efetiva é responsável pelo crescimento rápido da vazão de um rio durante e após uma chuva. No capítulo anterior foi apresentado um método simplificado para estimar a chuva efetiva, com base em um parâmetro que está relacionado às características da bacia, como o tipo de solo e o tipo de vegetação ou ocupação humana.

Nem toda a chuva efetiva gerada numa bacia chega imediatamente ao curso d'água. A partir dos locais em que é gerado, o escoamento percorre um caminho, com velocidades variadas de acordo com características como a declividade e o comprimento dos trechos percorridos, e a resposta da bacia a uma entrada de chuva depende destas características.

Em particular, se imaginamos um pulso de chuva de curta duração, a bacia hidrográfica é um sistema que transforma uma entrada quase imediata em uma saída distribuída ao longo do tempo, como mostrado na figura a seguir. A figura mostra um gráfico de vazão (hidrograma) resultante de uma chuva efetiva na bacia. Considera-se que o hidrograma corresponda a medições realizadas na saída (exutório) da bacia. Imediatamente após, e mesmo durante a ocorrência da chuva a vazão começa a aumentar, refletindo a chegada da água que começou a escoar na região mais próxima do exutório, como indicado. Após algum tempo é atingido o valor máximo e,

finalmente, inicia uma recessão, quando a água da chuva efetiva gerada na região mais distante da bacia atinge o exutório. No final da recessão o escoamento superficial cessa.

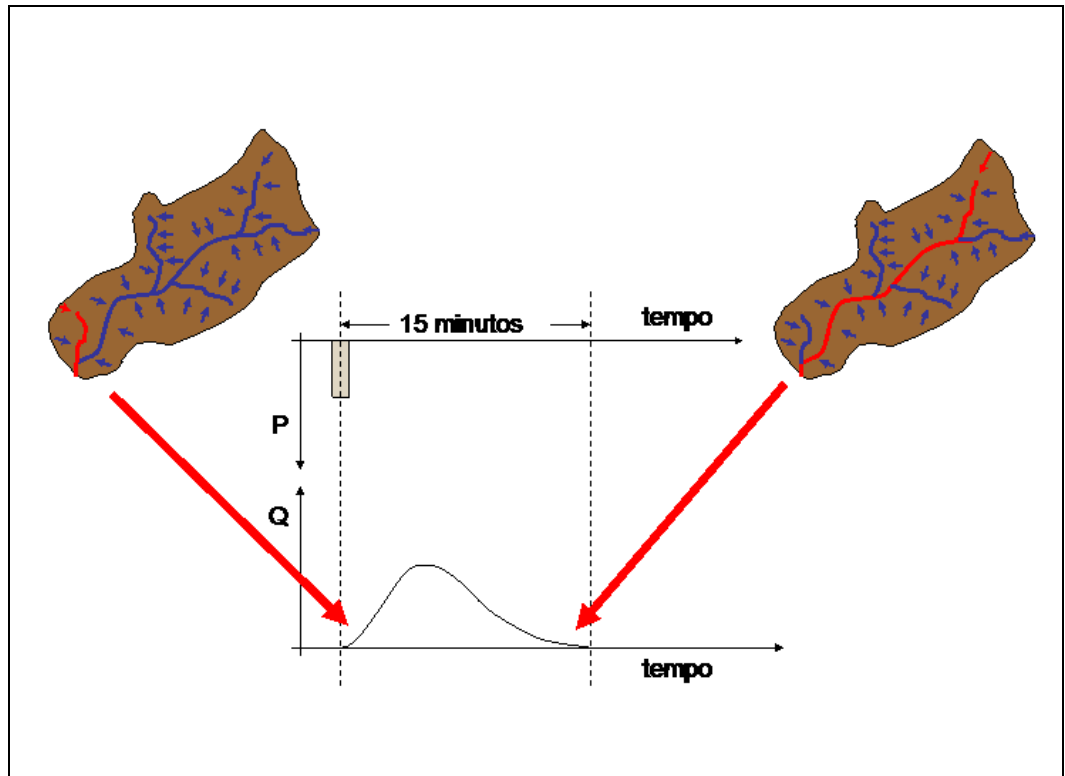


Figura 11. 1: Imaginando uma bacia hidrográfica como um sistema que transforma um evento de chuva em um hidrograma distribuído no tempo.

A resposta de uma bacia a um evento de chuva depende das características físicas da bacia e das características do evento, como a duração e a intensidade da chuva. Chuvas de mesma intensidade e duração tendem a gerar respostas de vazão (hidrogramas) semelhantes. Chuvas mais intensas tendem a gerar mais escoamento e hidrogramas mais pronunciados, enquanto chuvas menos intensas tendem a gerar hidrogramas mais atenuados, com menor vazão de pico.

Para simplificar a análise e para simplificar os cálculos, é comum admitir-se que existe uma relação linear entre a chuva efetiva e a vazão, lembrando que a chuva efetiva é a parcela da chuva que gera escoamento superficial.

Uma teoria útil, mas não inteiramente correta, baseada na relação linear entre chuva efetiva e vazão em uma bacia é a teoria do Hidrograma Unitário.

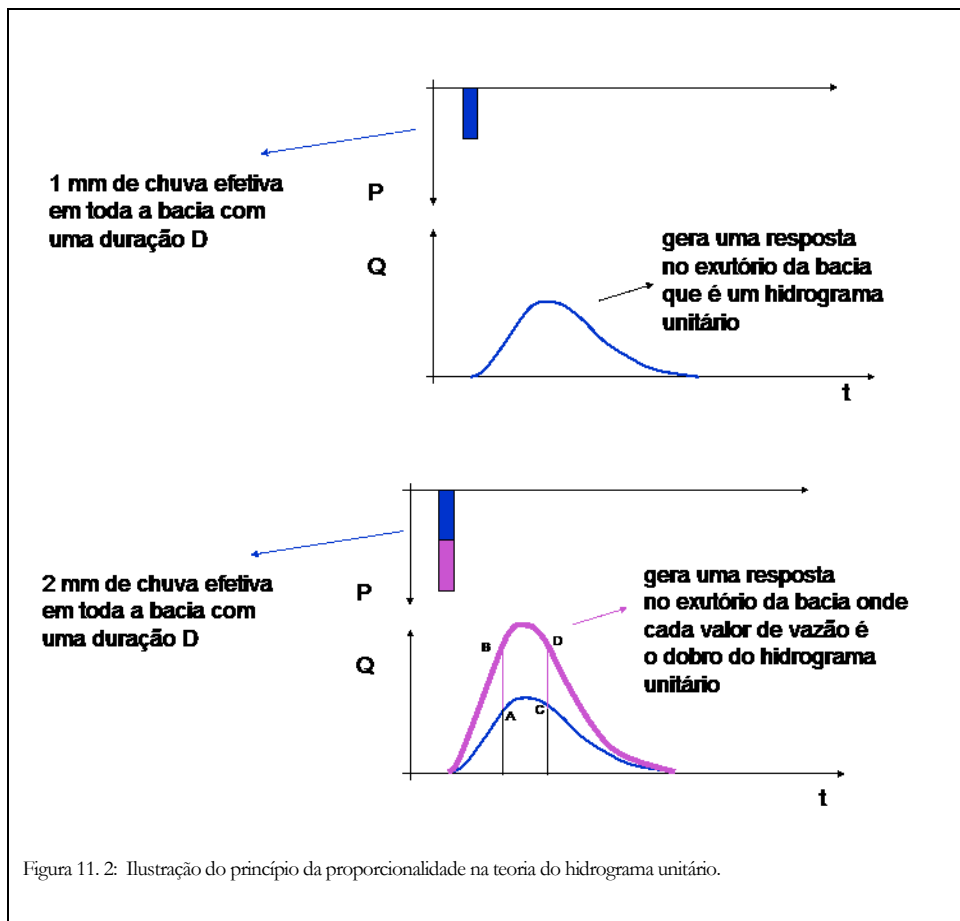
Conceitualmente o Hidrograma Unitário (HU) é o hidrograma do escoamento direto, causado por uma chuva efetiva unitária (por exemplo, uma chuva de 1mm ou 1 cm), por isso o método é chamado de Hidrograma Unitário. A teoria do hidrograma

unitário considera que a precipitação efetiva e unitária tem intensidade constante ao longo de sua duração e distribui-se uniformemente sobre toda a área de drenagem.

Adicionalmente, considera-se que a bacia hidrográfica tem um comportamento linear. Isso significa que podem ser aplicados os princípios da proporcionalidade e superposição, descritos a seguir. Com a teoria do hidrograma unitário é possível calcular a resposta da bacia a eventos de chuva diferentes, considerando que a resposta é uma soma das respostas individuais.

Proporcionalidade

Para uma chuva efetiva de uma dada duração, o volume de chuva, que é igual ao volume escoado superficialmente, é proporcional à intensidade dessa chuva. Como os

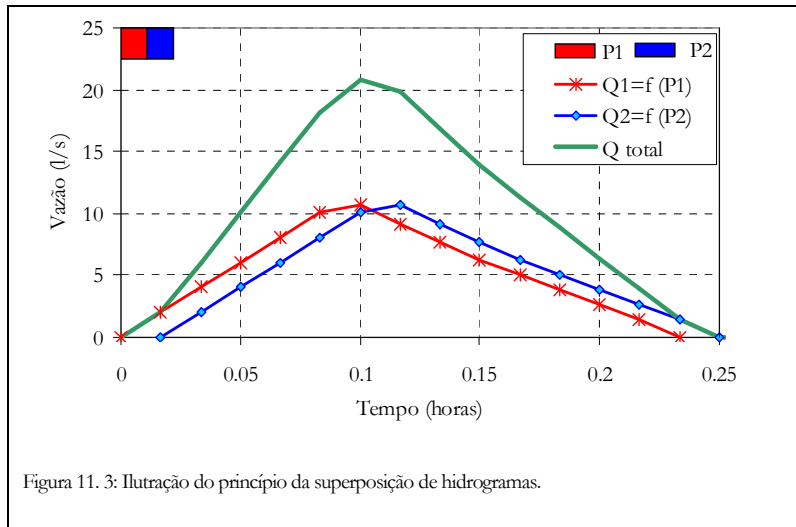


hidrogramas de escoamento superficial correspondem a chuvas efetivas de mesma duração, têm o mesmo tempo de base, considera-se que as ordenadas dos hidrogramas serão proporcionais à intensidade da chuva efetiva, como mostra a Figura 11. 2.

Na figura observa-se que o hidrograma resultante da precipitação efetiva de 2 mm é duas vezes maior do que o hidrograma resultante da chuva efetiva de 1 mm, que é o hidrograma unitário. A vazão do ponto A é duas vezes menor do que a vazão no ponto B e a vazão no ponto D é duas vezes maior do que a do ponto C, e assim para todos os valores de vazão dos hidrogramas é respeitada a mesma proporção.

Superposição

As vazões de um hidrograma de escoamento superficial, produzidas por chuvas efetivas sucessivas, podem ser encontradas somando as vazões dos hidrogramas de escoamento superficial correspondentes às chuvas efetivas individuais.



A Figura 11. 3 ilustra o princípio da superposição, mostrando como o hidrograma de resposta de duas chuvas unitárias sucessivas pode ser obtido somando dois hidrogramas unitários deslocados no tempo por uma diferença D , que, neste caso, é a duração da chuva.

Convolução

Aplicando os princípios da proporcionalidade e da superposição é possível calcular os hidrogramas resultantes de eventos complexos, a partir do hidrograma unitário. Este cálculo é feito através da convolução. Em matemática, particularmente na área de análise funcional, convolução é um operador que, a partir de duas funções, produz uma terceira. O conceito de convolução é crucial no estudo de sistemas lineares invariantes no tempo, como é o caso da teoria do hidrograma unitário (veja definição na Wikipedia).

O hidrograma unitário é, normalmente, definido como uma função em intervalos de tempo discretos. A vazão em um intervalo de tempo t é calculada a partir da convolução entre as funções P_{ef} (chuva efetiva) e h (ordenadas do hidrograma unitário discreto).

$$Q_t = \sum_{i=1}^t P_{ef_i} h_{t-i+1} \quad \text{para } t < k$$

$$Q_t = \sum_{i=t-k+1}^t P_{ef_i} h_{t-i+1} \quad \text{para } t \geq k$$

onde: Q_t é a vazão do escoamento superficial no intervalo de tempo t ; h é a vazão por unidade de chuva efetiva do HU; P_{ef} é a precipitação efetiva do bloco i ; k é o número de ordenadas do hidrograma unitário, que pode ser obtido por $k = n - m + 1$, onde m é o número de pulsos de precipitação e n é o número de valores de vazões do hidrograma.

A convolução discreta fica mais clara quando colocada na forma matricial. Considerando uma chuva efetiva formada por 3 blocos de duração D cada um, ocorrendo em seqüência, e uma bacia cujo hidrograma unitário para a chuva de duração D é dado por 9 ordenadas de duração D cada uma, a aplicação da convolução para calcular as vazões Q_i no exutório da bacia seria:

$Q_1 =$	$P_{ef1}.h_1$
$Q_2 =$	$P_{ef2}.h_1 + P_{ef1}.h_2$
$Q_3 =$	$P_{ef3}.h_1 + P_{ef2}.h_2 + P_{ef1}.h_3$
$Q_4 =$	$P_{ef3}.h_2 + P_{ef2}.h_3 + P_{ef1}.h_4$
$Q_5 =$	$P_{ef3}.h_3 + P_{ef2}.h_4 + P_{ef1}.h_5$
$Q_6 =$	$P_{ef3}.h_4 + P_{ef2}.h_5 + P_{ef1}.h_6$
$Q_7 =$	$P_{ef3}.h_5 + P_{ef2}.h_6 + P_{ef1}.h_7$
$Q_8 =$	$P_{ef3}.h_6 + P_{ef2}.h_7 + P_{ef1}.h_8$
$Q_9 =$	$P_{ef3}.h_7 + P_{ef2}.h_8 + P_{ef1}.h_9$
$Q_{10} =$	$P_{ef3}.h_8 + P_{ef2}.h_9$
$Q_{11} =$	$P_{ef3}.h_9$

Neste caso $m=3$ porque a chuva é definida por três blocos, $k=9$ porque o hidrograma unitário tem 9 ordenadas e $n=11$ porque a duração total do escoamento resultante é de 11 intervalos de duração D cada um.

A convolução para o cálculo das vazões usando o HU é uma tarefa trabalhosa. Normalmente o HU é utilizado como um módulo dentro de um modelo hidrológico, e sua aplicação é facilitada.

EXEMPLO

- 1) Repetidas medições mostraram que uma pequena bacia respondia sempre da mesma forma às chuvas efetivas de 10 mm e de meia hora de duração,

INTRODUZINDO HIDROLOGIA

apresentando um hidrograma unitário definido pela tabela A abaixo. Calcule qual é a resposta da bacia ao evento de chuva definido pela tabela B.

Tabela A: Hidrograma unitário

Intervalo de tempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tempo (horas)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
H ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / 10\text{mm}$)	0,5	2,0	4,0	7,0	5,0	3,0	1,8	1,5	1,0

Tabela B: Evento de chuva

Intervalo de Tempo	Tempo (horas)	Chuva efetiva (mm)
1	0,5	20
2	1,0	25
3	1,5	10

Intervalo de Tempo	Chuva efetiva mm	Chuva efetiva (múltiplos de 10 mm)	Ordenadas do Hidrograma unitário									Q
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
			0.5	2.0	4.0	7.0	5.0	3.0	1.8	1.5	1.0	
1	20	2.0	1.0									1.0
2	25	2.5	1.3	4.0								5.3
3	10	1.0	0.5	5.0	8.0							13.5
4				2.0	10.0	14.0						26.0
5					4.0	17.5	10.0					31.5
6						7.0	12.5	6.0				25.5
7							5.0	7.5	3.6			16.1
8								3.0	4.5	3.0		10.5
9									1.8	3.8	2.0	7.6
10										1.5	2.5	4.0
11											1.0	1.0

A resposta da bacia é calculada por convolução da função P_{ef} que é a chuva efetiva e da função H que é a função que descreve o hidrograma unitário, como mostrado abaixo.

Portanto o hidrograma de saída tem 11 intervalos de tempo de meia hora cada um, e a vazão máxima ocorre no quinto intervalo, atingindo $31,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Obtenção do Hidrograma Unitário em uma bacia com dados de chuva e vazão

O hidrograma unitário de uma bacia hidrográfica pode ser estimado observando a sua resposta a chuvas de curta duração. A forma do hidrograma unitário depende da duração da chuva.

Para determinar o HU em uma bacia hidrográfica, é necessário dispor de registros de vazão e precipitação simultâneos. Recomenda-se identificar eventos causados por chuvas que tenham uma duração entre 1/3 a 1/5 do tempo de concentração. De preferência são utilizados eventos simples, com chuvas de curta duração e mais ou menos constantes.

Para cada evento de chuva e vazão com estas características, o hidrograma unitário para esta duração de chuva pode ser obtido através dos passos descritos a seguir.

- 1) Calcular o volume de água precipitado sobre uma bacia hidrográfica, que é dado por

$$V_{tot} = P_{tot} \cdot A$$

onde: V_{tot} é o volume total precipitado sobre a bacia; P_{tot} é a precipitação; e A é a área de drenagem da bacia.

- 2) Fazer a separação do escoamento superficial, onde para cada instante t , a vazão que escoar superficialmente é a diferença entre a vazão observada e a vazão de base

$$Q_e = Q_{obs} - Q_b$$

onde: Q_e é a vazão que escoar superficialmente; Q_{obs} é a vazão observada no posto fluviométrico; e Q_b é a vazão base.

- 3) Determinar o volume escoado superficialmente, calculando a área do hidrograma superficial, que pode ser obtida conforme

$$V_e = \sum Q_{ei} \cdot \Delta t$$

onde: V_e é o volume escoado superficialmente; Q_{ei} é a vazão que escoar superficialmente; e Δt : intervalo de tempo dos dados.

- 4) Determinar o coeficiente de escoamento

$$C = \frac{V_e}{V_{tot}}$$

onde: V_e é o volume escoado superficialmente; V_{tot} : volume total precipitado sobre a bacia hidrográfica.

5) Determinar a chuva efetiva, multiplicando-se a chuva total pelo coeficiente de escoamento

$$P_{ef} = C \cdot P_{tot}$$

onde: P_{ef} é a chuva efetiva; C é o coeficiente de escoamento e P_{tot} é a precipitação total.

6) Determinar as ordenadas do HU

$$Q_u = \frac{P_u}{P_{ef}} \times Q_e$$

onde: Q_u é a ordenada do hidrograma unitário; P_u é a chuva unitária (10 mm, 1 mm); P_{ef} é a precipitação efetiva; Q_e é a ordenada do hidrograma de escoamento superficial.

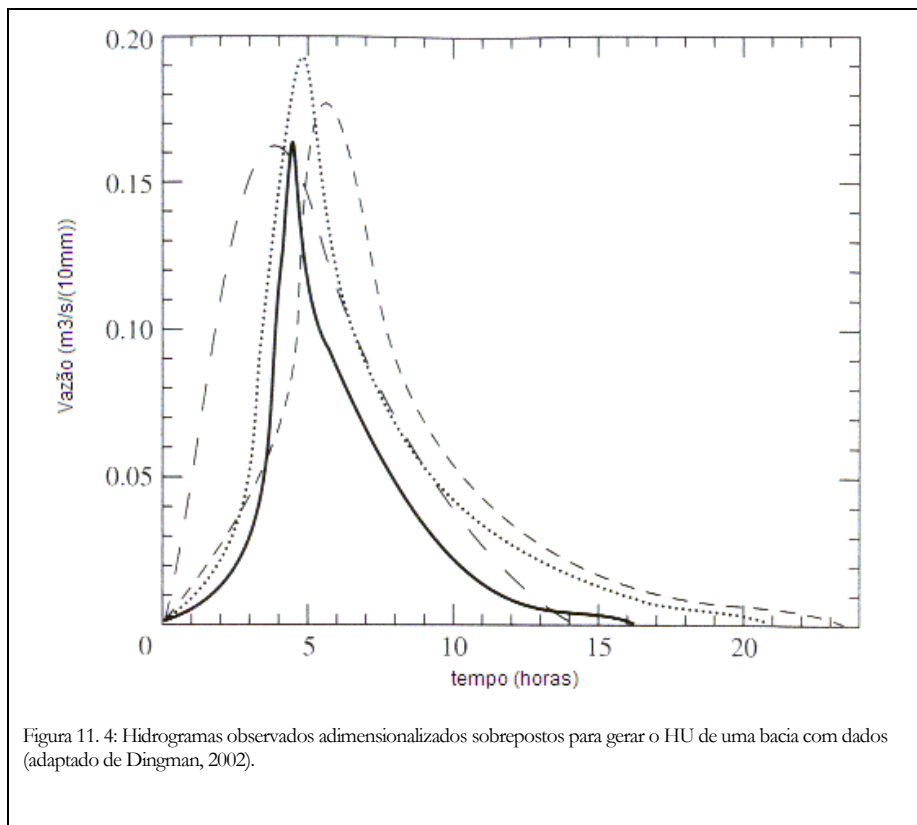


Figura 11. 4: Hidrogramas observados adimensionalizados sobrepostos para gerar o HU de uma bacia com dados (adaptado de Dingman, 2002).

Analisando graficamente vários hidrogramas de eventos de chuvas intensas e de duração curta, todos eles apresentando mais ou menos a mesma duração de chuva, é possível identificar as características do hidrograma unitário da bacia para esta duração, como mostra a Figura 11. 4. Neste caso estão apresentados 4 hidrogramas resultantes de chuvas de curta duração em uma mesma bacia. Embora a intensidade das chuvas tenha sido diferente em cada um dos eventos, e as vazões máximas tenham sido diferentes em cada caso, os hidrogramas foram adimensionalizados pelo total de chuva efetiva, conforme descrito antes, e apresentam

mais ou menos a mesma vazão de pico e o mesmo volume.

Outro método para obter o hidrograma unitário em uma bacia com dados de chuva e vazão é baseado na deconvolução, ou a convolução inversa. Neste caso repete-se o procedimento descrito no exemplo de aplicação da convolução, porém considerando como incógnitas as ordenadas do hidrograma unitário, e como conhecidas as vazões de saída do hidrograma em cada intervalo de tempo.

Os valores das ordenadas do hidrograma unitário podem ser obtidos por otimização, minimizando as diferenças entre as vazões finais calculadas e observadas. Para eventos relativamente simples é possível utilizar a ferramenta Solver da planilha Excel para resolver este problema. Neste caso o objetivo da otimização pode ser minimizar a soma das diferenças entre as vazões calculadas e observadas elevadas ao quadrado. Uma planilha Excel disponível na página Web da disciplina ilustra este procedimento.

Existem muitas dificuldades para a obtenção do hidrograma unitário a partir dos dados de chuva e vazão observados na bacia. Em primeiro lugar, os dados são de chuva observada não de chuva efetiva. É necessário estimar a chuva efetiva em cada intervalo de tempo. Em segundo lugar, a vazão observada inclui parte de escoamento subsuperficial ou subterrâneo (escoamento de base), e por isso o HU obtido vai depender das hipóteses feitas na separação de escoamento.

Hidrograma Unitário sintético

A situação mais freqüente, na prática, é o da inexistência de dados históricos. Neste caso é necessário utilizar um hidrograma unitário sintético, ou um hidrograma unitário

obtido a partir da análise do relevo, denominado hidrograma unitário geomorfológico.

Os hidrogramas unitários sintéticos foram estabelecidos com base em dados de algumas bacias e são utilizados quando não existem dados que permitam estabelecer o HU, conforme apresentado no item a seguir. Os métodos de determinação do HU baseiam-se na determinação do valor de algumas características do hidrograma, como o tempo de concentração, o tempo de pico, o tempo de base e a vazão de pico.

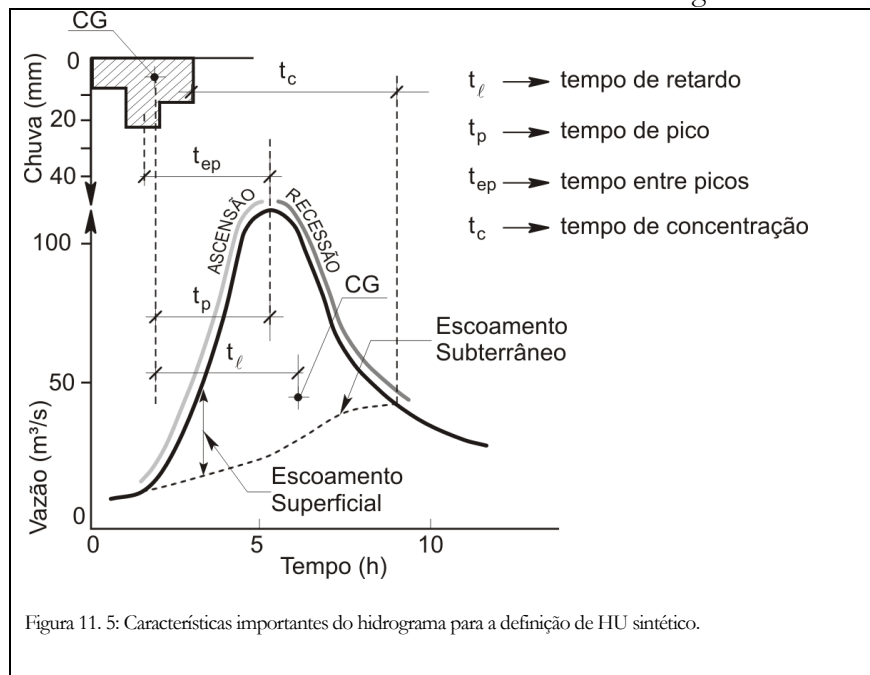


Figura 11. 5: Características importantes do hidrograma para a definição de HU sintético.

hidrograma resultante da ocorrência de uma chuva, em que se conhece o valor da chuva efetiva em três intervalos de tempo.

O tempo de concentração é definido como o intervalo de tempo entre o final da ocorrência de chuva efetiva e o final do escoamento superficial, conforme mostrado na figura.

O tempo entre picos é definido como o intervalo entre o pico da chuva efetiva e o pico da vazão superficial.

O tempo de retardo é definido como o intervalo de tempo entre os centros de gravidade do hietograma (chuva efetiva) e do hidrograma superficial.

O tempo de pico é definido como o tempo entre o centro de gravidade do hietograma (chuva efetiva) e o pico do hidrograma.

Com base nestas definições é que pode-se caracterizar o Hidrograma Unitário Sintético adimensional do SCS.

Hidrograma Unitário Sintético triangular do SCS

A partir de um estudo com um grande número de bacias e de hidrogramas unitários nos EUA, técnicos do Departamento de Conservação de Solo (Soil Conservation

Service – atualmente Natural Resources Conservation Service) verificaram que os hidrogramas unitários podem ser aproximados por relações de tempo e vazão estimadas com base no tempo de concentração e na área das bacias.

Para simplificar ainda mais, o hidrograma unitário pode ser aproximado por um triângulo, definido pela vazão de pico e pelo tempo de pico e pelo tempo de base, conforme a Figura 11. 6.

As relações identificadas, que permitem calcular o hidrograma triangular são descritas abaixo, de acordo com o texto de Chow et al. (1988).

O tempo de pico t_p do hidrograma pode ser estimado como 60% do tempo de concentração:

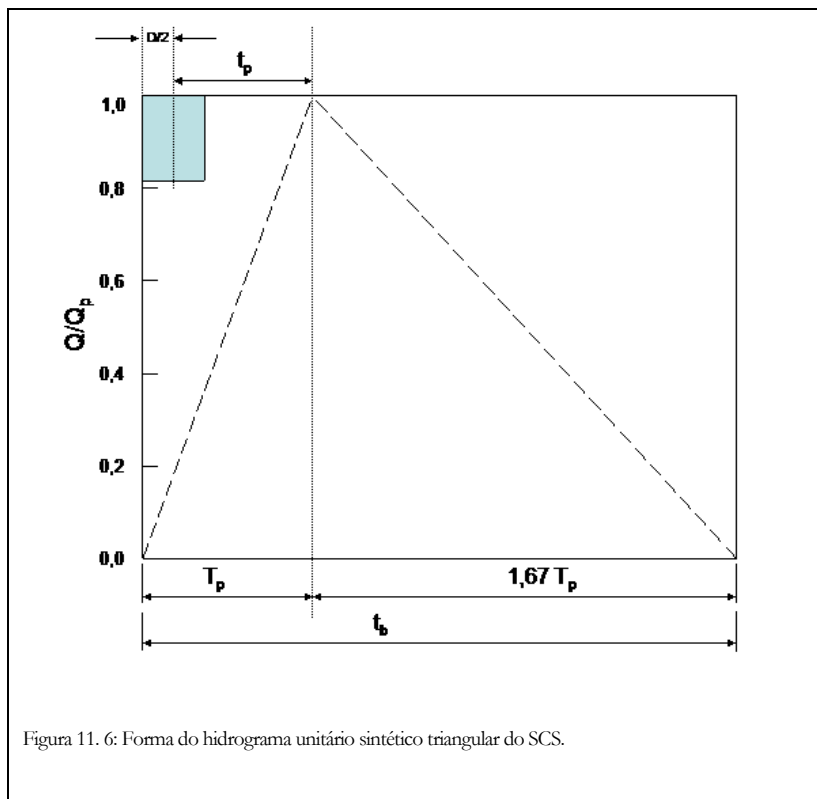


Figura 11. 6: Forma do hidrograma unitário sintético triangular do SCS.

$$t_p = 0,6 \cdot t_c$$

onde t_p é o tempo de pico (veja Figura 11. 6) e t_c é o tempo de concentração da bacia, que pode ser estimado por uma das equações apresentadas no capítulo 3.

O tempo de subida do hidrograma T_p pode ser estimado como o tempo de pico t_p mais a metade da duração da chuva D , assim:

$$T_p = t_p + \frac{D}{2}$$

O tempo de base do hidrograma (t_b) é aproximado por:

$$t_b = T_p + 1,67 \cdot T_p$$

o que significa que o tempo de recessão do hidrograma triangular, a partir do pico até retornar a zero, é 67% maior do que o tempo de subida.

A vazão de pico do hidrograma unitário triangular é estimada por:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot A}{T_p}$$

onde T_p é dado em horas, a área da bacia (A) é dada em Km^2 , e o resultado q_p é a vazão de pico por mm de chuva efetiva.

EXEMPLO

- 2) Construa um hidrograma unitário para a chuva de duração de 10 minutos em uma bacia de $3,0 \text{ Km}^2$ de área de drenagem, comprimento do talvegue de 3100 m, ao longo do qual existe uma diferença de altitude de 93 m.

A primeira etapa é calcular o tempo de concentração da bacia. Utilizando a equação de Watt e Chow (ver capítulo 3) temos:

$$t_c = 7,68 \cdot \left(\frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,79} = 7,68 \cdot \left(\frac{3,1}{\left(\frac{93}{3100} \right)^{0,5}} \right)^{0,79} = 1,25 \text{ horas}$$

A duração da chuva D é de 10 minutos, conforme definido no enunciado do problema. O tempo de subida do hidrograma T_p , pode ser calculado a partir da duração da chuva e do tempo de pico. Na elaboração do HUT do SCS admite-se que o tempo de pico é igual a 60% do tempo de concentração.

$$t_p = 0,6 \cdot t_c = 0,75 \text{ horas}$$

e o tempo de subida do hidrograma é:

$$T_p = t_p + \frac{D}{2} = 0,75 + \frac{10}{60 \cdot 2} = 0,833 \text{ horas}$$

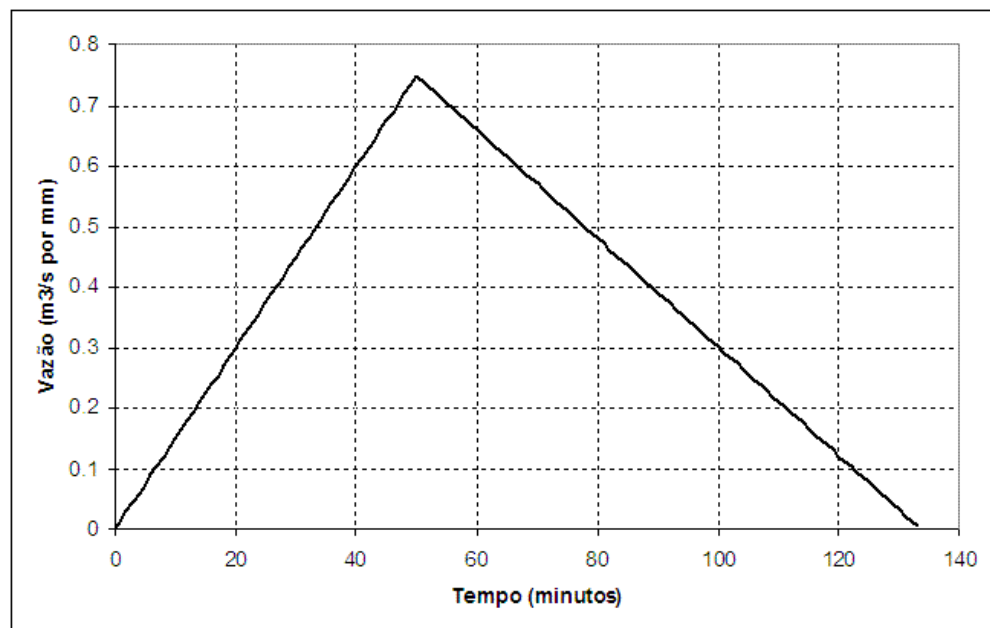
O tempo de base do hidrograma (t_b) é aproximado por:

$$t_b = T_p + 1,67 \cdot T_p = 2,67 \cdot T_p = 2,22 \text{ horas}$$

A vazão de pico do hidrograma unitário triangular é:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot A}{T_p} = \frac{0,208 \cdot 3,0}{0,833} = 0,749 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

A figura e a tabela a seguir mostram o hidrograma unitário triangular resultante.



<i>Tempo (minutos)</i>	<i>Vazão (m³/s por mm)</i>
0	0.00
10	0.15
20	0.30
30	0.45
40	0.60
50	0.75
60	0.66
70	0.57
80	0.48
90	0.39
100	0.30
110	0.21
120	0.12
130	0.03

Hidrograma Unitário Sintético adimensional do SCS

O hidrograma unitário sintético adimensional do SCS é semelhante em alguns aspectos com o hidrograma unitário triangular, porém apresenta uma forma mais suave, definida pelos valores da Tabela 11. 1 e pela Figura 11. 7.

O HU sintético adimensional é mais realista do que o hidrograma triangular, porque aproxima a resposta como uma curva suavizada, mas o HU triangular é muito popular, porque é simples.

Tabela 11. 1: Hidrograma unitário sintético adimensional do SCS.

t/T_p	q/q_p	t/T_p	q/q_p	t/T_p	q/q_p
0	0,000	1,1	0,990	2,4	0,147
0,1	0,030	1,2	0,930	2,6	0,107
0,2	0,100	1,3	0,860	2,8	0,077
0,3	0,190	1,4	0,780	3,0	0,055
0,4	0,310	1,5	0,680	3,2	0,040
0,5	0,470	1,6	0,560	3,4	0,029
0,6	0,660	1,7	0,460	3,6	0,021
0,7	0,820	1,8	0,390	3,8	0,015
0,8	0,930	1,9	0,330	4,0	0,011
0,9	0,990	2,0	0,280	4,5	0,005
1,0	1,000	2,2	0,207	5,0	0,000

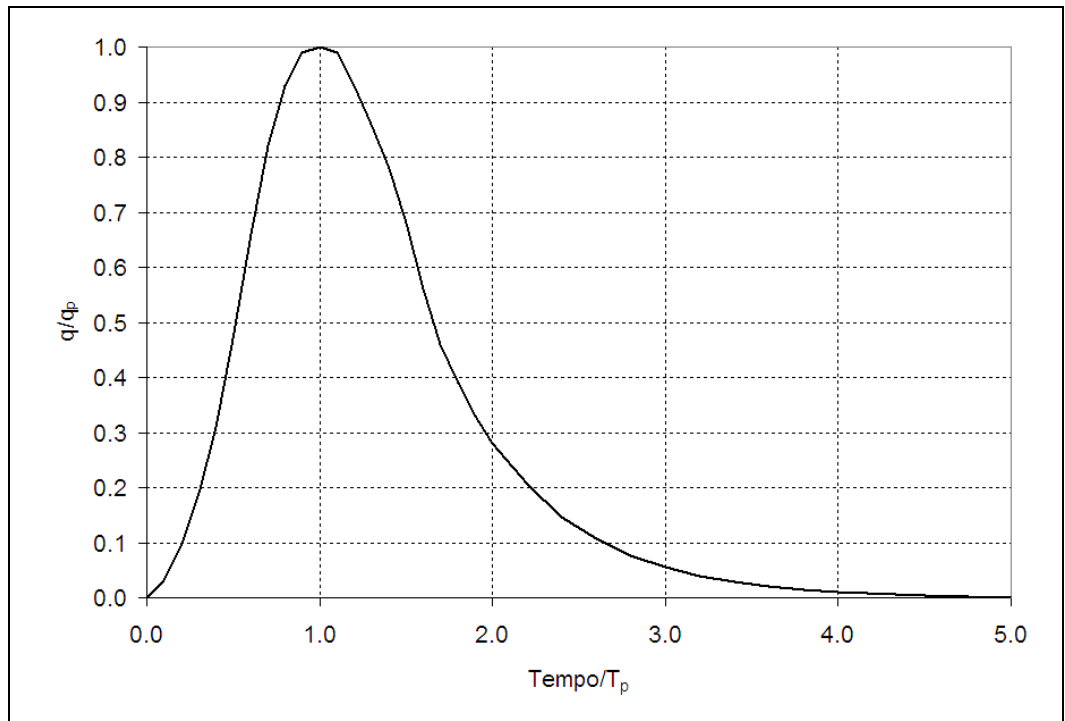


Figura 11. 7: Hidrograma unitário sintético adimensional do SCS.

Histograma Tempo-Área

Uma forma de estimar a resposta de uma bacia hidrográfica às chuvas é o Histograma Tempo-Área. Neste método procura-se definir os tempos de deslocamento do escoamento superficial desde o local de origem até o exutório da bacia. Como cada porção da bacia tem um tempo de deslocamento diferente, em função da distância e da declividade, a resposta da bacia pode ser analisada na forma de um histograma.

O Histograma Tempo-Área (HTA) pode ser obtido identificando linhas isócronas sobre a bacia e medindo a área entre cada par de isócronas, ou analisando uma bacia através do modelo digital de elevação. As isócronas são as linhas que definem um mesmo tempo de deslocamento até o exutório da bacia.

É possível construir um Hidrograma Unitário a partir do Histograma Tempo-Área, porém o HU resultante pode ter uma resposta muito rápida e resultar em superestimativas da vazão máxima. Isto ocorre porque o HTA representa o processo de translação da água na bacia, mas subestima o armazenamento ao longo dos cursos d'água.

Uma forma de corrigir os problemas do HU obtido a partir do HTA é combinar o HTA com um reservatório linear simples. Este procedimento é conhecido como Hidrograma Unitário de Clark.

Hidrograma Unitário e a vazão de base

O HU é aplicado para representar a resposta da bacia à entrada de chuva efetiva. A vazão calculada pelo HU refere-se somente ao escoamento superficial. Normalmente, a bacia também apresenta uma vazão de base, cuja origem é o escoamento subterrâneo, que não é levada em conta nos cálculos com o HU.

Para considerar a vazão de base é necessário somar a resposta da bacia, calculada usando o HU, aos valores da vazão de base.

Em muitos casos a vazão de base representa apenas uma pequena fração da vazão total durante um evento de chuva mais intenso. Assim, quando o objetivo do cálculo é estimar a vazão máxima em uma pequena bacia, a vazão de base pode até mesmo ser desprezada, especialmente se a bacia for fortemente urbanizada.

EXEMPLO

- 3) Uma bacia tem um HU para o evento de 10 mm de chuva efetiva e meia hora de duração dado na tabela A. Calcule qual é a resposta da bacia ao evento de chuva definido pela tabela B. Considere uma vazão de base constante e igual a $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tabela A: Hidrograma unitário

Intervalo de tempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tempo (horas)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
H ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}/10\text{mm}$)	0,5	2,0	4,0	7,0	5,0	3,0	1,8	1,5	1,0

Tabela B: Evento de chuva

Intervalo de Tempo	Tempo (horas)	Chuva efetiva (mm)
1	0,5	20
2	1,0	25
3	1,5	10

A resposta da bacia é calculada por convolução da função P_{ef} que é a chuva efetiva e da função H que é a função que descreve o hidrograma unitário, como no exemplo 1, e ao final é acrescido o valor da vazão de base.

	$P_{efet.}$	$P_{efet.}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
t	mm	(mult. 10 mm)	0.5	2.0	4.0	7.0	5.0	3.0	1.8	1.5	1.0	Q_{sup}	Q_{base}	Q_{total}
1	20	2.0	1.0									1.0	2.0	3.0
2	25	2.5	1.3	4.0								5.3	2.0	7.3
3	10	1.0	0.5	5.0	8.0							13.5	2.0	15.5
4				2.0	10.0	14.0						26.0	2.0	28.0
5					4.0	17.5	10.0					31.5	2.0	33.5
6						7.0	12.5	6.0				25.5	2.0	27.5
7							5.0	7.5	3.6			16.1	2.0	18.1
8								3.0	4.5	3.0		10.5	2.0	12.5
9									1.8	3.8	2.0	7.6	2.0	9.6
10										1.5	2.5	4.0	2.0	6.0
11											1.0	1.0	2.0	3.0

Hidrograma Unitário para chuvas de diferentes durações

O HU depende da duração da chuva. Uma bacia pode ter um HU para o evento de chuva de 1 hora de duração e outro, ligeiramente diferente, para o evento de chuva de 2 horas de duração.

Quando o HU para uma determinada duração de chuva é conhecido, é possível calcular o HU para outra duração qualquer. Se a duração desconhecida for um múltiplo da duração conhecida basta aplicar os princípios da superposição e proporcionalidade.

Se existe um HU de 1 hora (entende-se causado por uma chuva de 1 hora de duração), é possível achar o HU resultante de uma chuva unitária de 2 h, plotando dois HUs de 1 hora, deslocados de 1 hora e extraindo a média aritmética das ordenadas.

Nos casos gerais o HU para uma duração de chuva qualquer pode ser obtido através da curva S. A curva S é o HU de resposta de uma bacia a uma precipitação unitária de duração infinita. A curva S pode ser obtida a partir de um HU conhecido, acumulando progressivamente as ordenadas do HU original.

A grande utilidade da curva S é que ela permite o cálculo de HUs de qualquer duração; para isso se desloca a curva S um intervalo de tempo D_2 , igual à duração do HU

desejado. As ordenadas desse HU procurado são calculadas pela diferença entre as duas curvas S, corrigidas pela relação $D1/D2$ (onde $D1$ é a duração da chuva que originou a curva S e $D2$ é a duração da chuva do novo HU).

EXEMPLO

- 4) Use o HU obtido para a chuva de 1 hora de duração para estimar o HU correspondente à chuva de 1 ½ hora de duração no mesmo local.

Tabela A: Hidrograma unitário

Intervalo de tempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tempo (horas)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
H ($m^3.s^{-1}/10mm$)	0,5	2,0	4,0	7,0	5,0	3,0	1,8	1,5	1,0



Limitações do Hidrograma Unitário

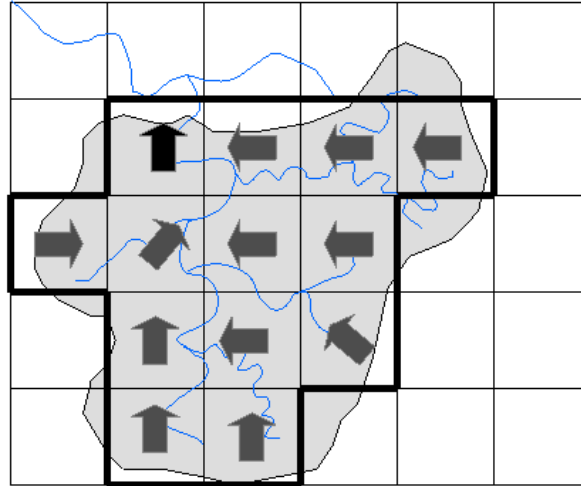
A idéia do Hidrograma Unitário é muito útil para representar o comportamento de uma bacia no que se refere à geração de escoamento. Hidrogramas Unitários sintéticos formam a base de muitos modelos hidrológicos amplamente utilizados para calcular vazões máximas de projeto, e tem funcionado relativamente bem. Entretanto, boa parte das premissas utilizadas não são inteiramente corretas: tempo de base igual; chuva efetiva gerada uniformemente na bacia; chuva efetiva gerada de forma idêntica em todos os eventos; lineariedade (podemos somar efeitos).

O escoamento não é gerado de forma uniforme em toda a bacia. As áreas preferenciais de geração de escoamento são as áreas impermeabilizadas por ação do homem ou as áreas com solos saturados ou próximos da saturação, localizadas na região próxima à rede de drenagem.

O escoamento ocorre mais rapidamente para eventos maiores do que para eventos menores. Assim a lineariedade não se mantém.

Exercícios

- 1) Elabore o Histograma Temp-Área para a bacia da figura abaixo, considerando que o escoamento de cada célula segue a direção das setas e que o tempo de passagem através de cada célula é de 20 minutos, independentemente da direção do escoamento. O exutório está identificado pela seta mais escura.



- 2) Utilize o Excel para calcular o hidrograma de resposta de uma bacia com HU conhecido (tabela A), considerando conhecida a chuva total (não efetiva) sobre a bacia (tabela B). Considere que o valor do coeficiente CN é 80.

Tabela A: Hidrograma unitário

Intervalo de tempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tempo (horas)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
H ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / 10\text{mm}$)	0,5	2,0	4,0	7,0	5,0	3,0	1,8	1,5	1,0

Tabela B: Chuva total ocorrida na bacia.

Tempo (min)	Precipitação (mm)
30	9
60	18
90	24
120	16
150	9

- 3) Construa um hidrograma unitário para a chuva de duração de 15 minutos em uma bacia de $7,0 \text{ Km}^2$ de área de drenagem, comprimento do talvegue de 10 Km, ao longo do qual existe uma diferença de altitude de 200 m.
- 4) Calcule a resposta da bacia do problema anterior à chuva total dada na tabela abaixo. Considere que o valor do coeficiente CN é 75.

Tabela C: Chuva total ocorrida na bacia.

Tempo (min)	Precipitação (mm)
15	29
30	28
45	4
60	26