



Escola Politécnica

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental



Universidade de São Paulo

**PHA3307 –  
Hidrologia Aplicada**

**Infiltração**

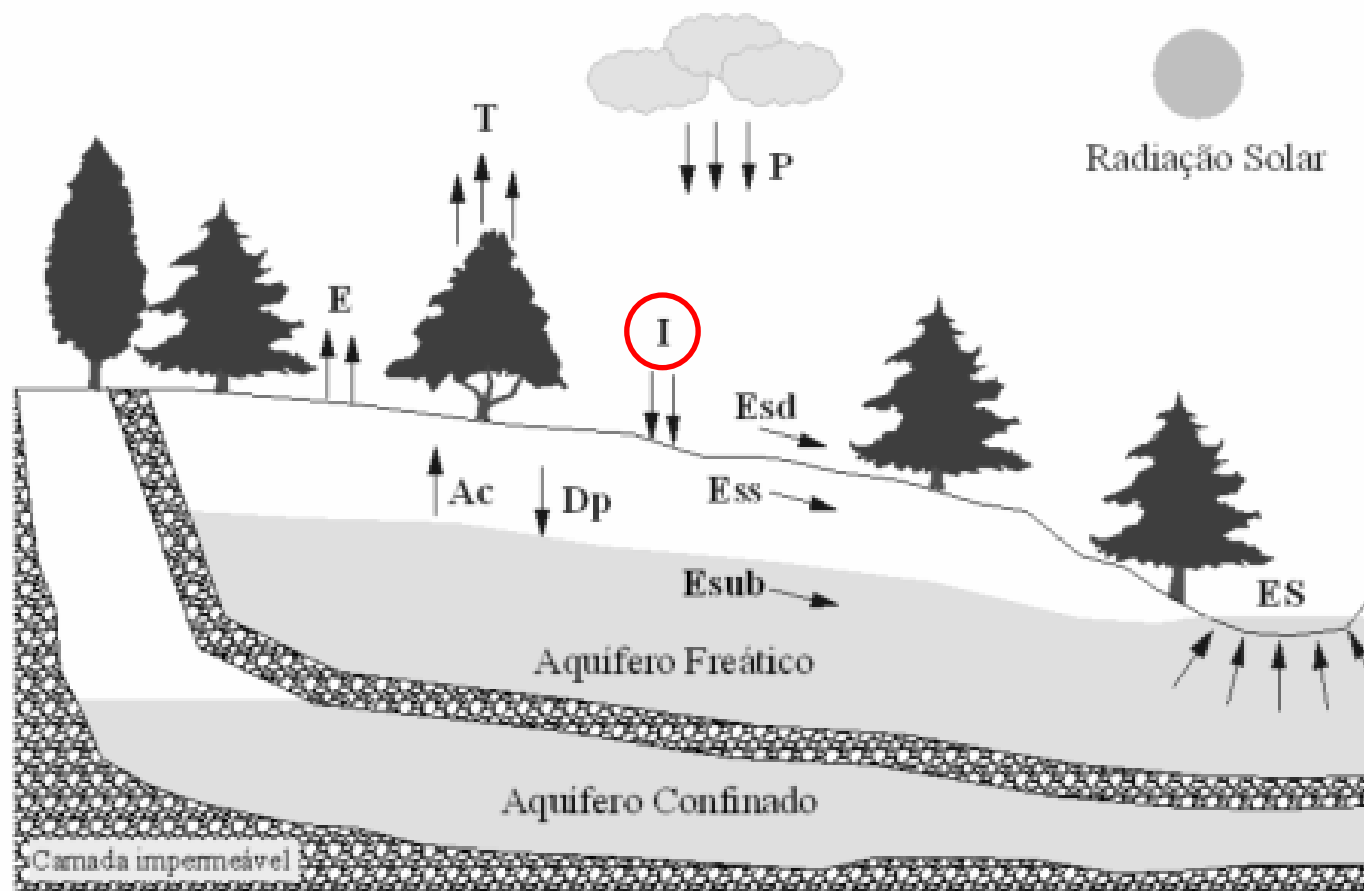
**Aula 11**

Prof. Dr. Arisvaldo Mélo  
Prof. Dr. Joaquin Bonnacarrere

**LabSid**

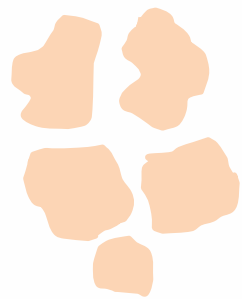
Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões  
Recursos Hídricos e Meio Ambiente

1. Conhecer o processo de infiltração no solo.
2. Conhecer os métodos de medição de infiltração no solo.
3. Conhecer fórmulas de cálculo de infiltração no solo.
4. Aplicar o método do NRCS.

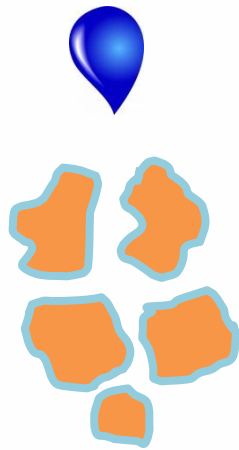


VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. 2011. 287 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011

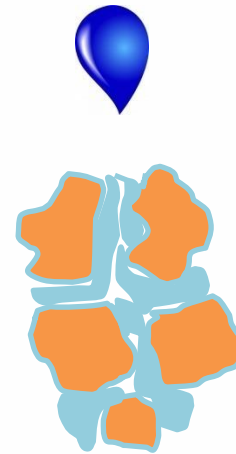




Solo seco



Água adsorvida



Água capilar  
(meniscos na interface)



Água gravitacional



- **Definição:** parcela da água precipitada que infiltra no solo
- Parte da água que infiltra permanecerá na camada superficial do solo, onde se movimentará de forma gradual na vertical e na horizontal, através do solo
- Eventualmente, poderá voltar a um rio, através da sua margem. Parte da água poderá infiltrar mais profundamente, recarregando o aquífero subterrâneo
- A água pode percorrer longas distâncias ou permanecer no armazenamento subterrâneo por longos períodos antes de retornar à superfície, aos rios ou oceanos

- **Crescimento da vegetação**
- **Dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação**
- **Recarga dos aquíferos subterrâneos**
- **Manutenção da vazão nos rios durante as estiagens**
- **Redução do escoamento superficial direto (cheias, erosão, etc.)**



# Irrigação

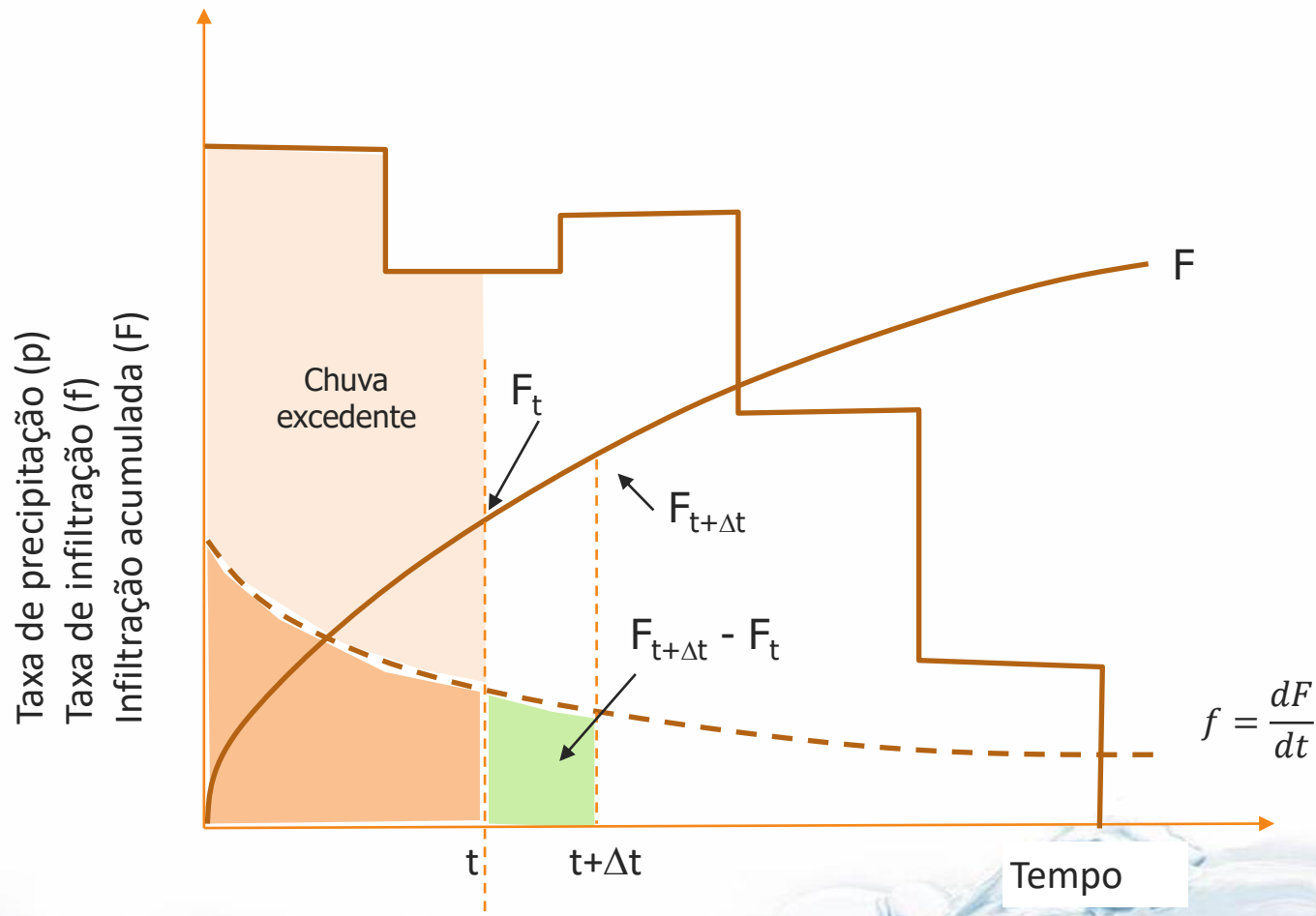
Projeto Jaíba e outros CODEVASF...



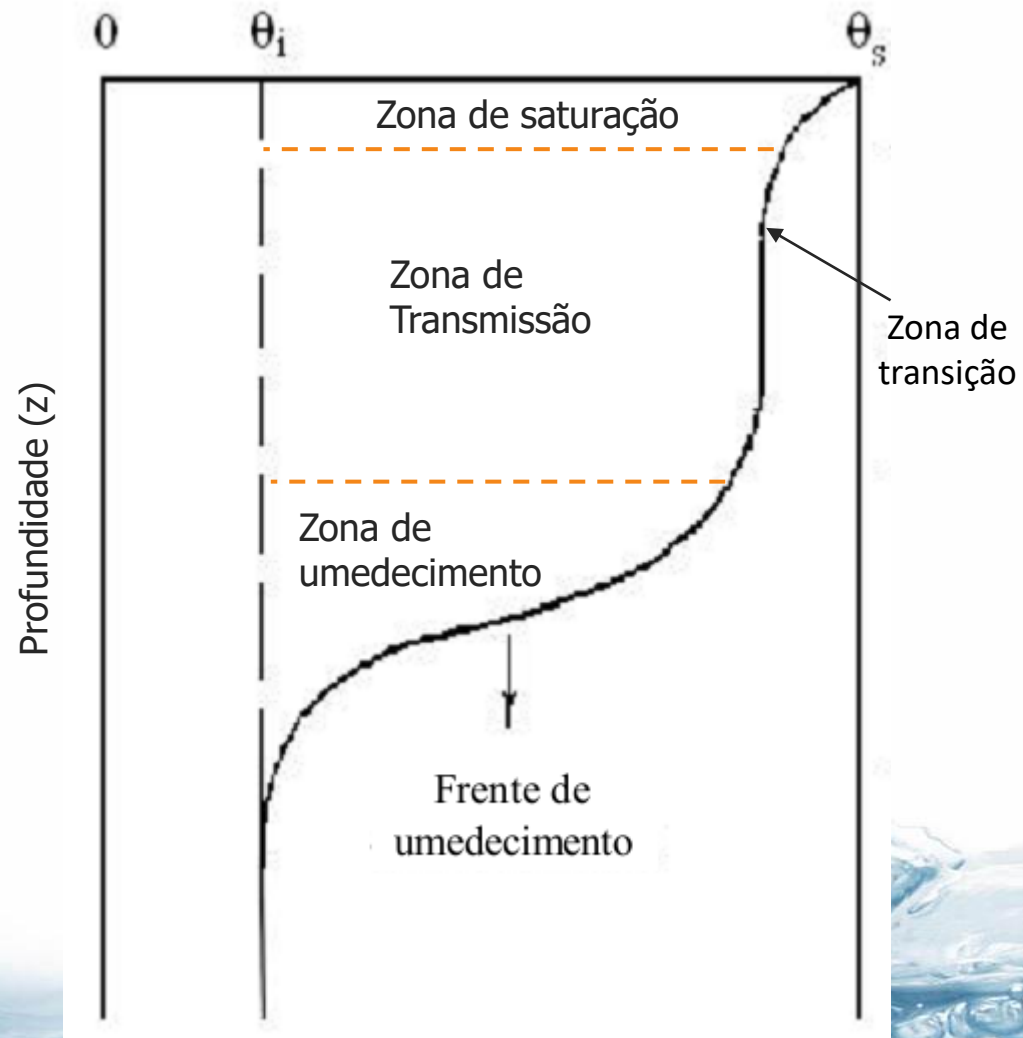




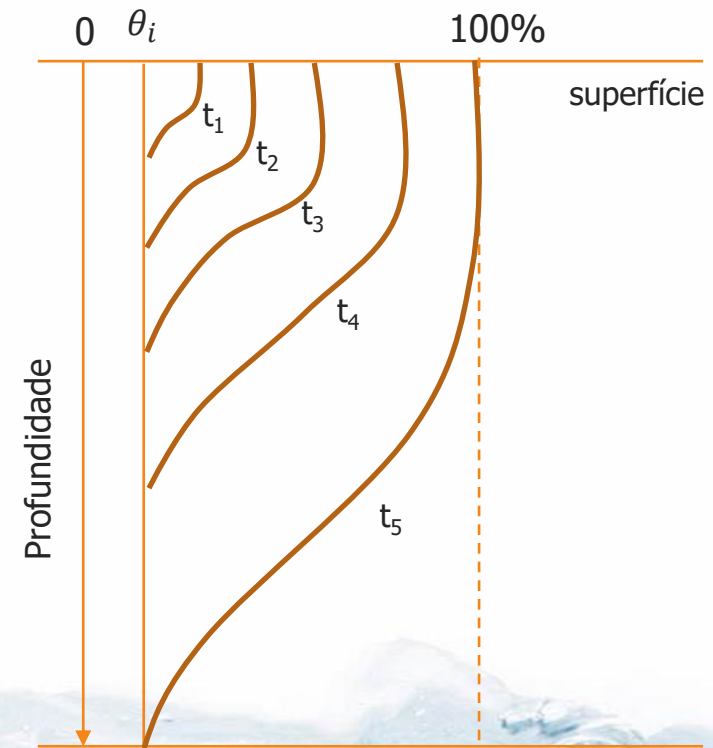




- Taxa de Infiltração: é a velocidade ou intensidade da penetração da água no solo (mm/hora, mm/dia, etc)
- Se a intensidade da chuva é maior do que a taxa de infiltração, a água será acumulada na superfície e começará o escoamento superficial direto
- Infiltração acumulada: é a quantidade de água total infiltrada após um determinado tempo (mm)



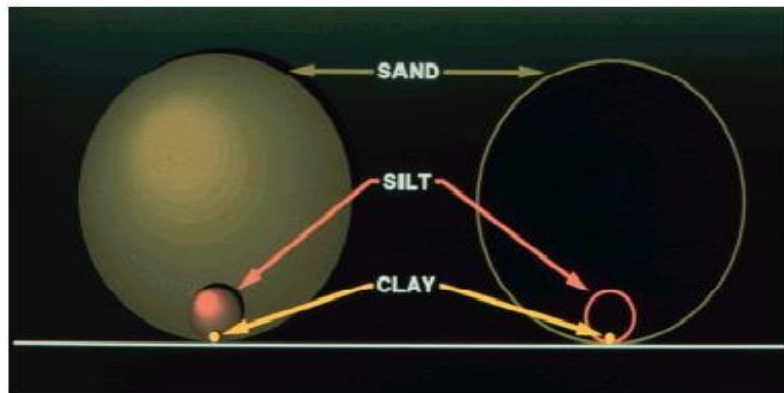
Mudança do perfil de umidade com o tempo





- A taxa de infiltração, normalmente, decai rapidamente durante a parte inicial de uma chuva intensa e atinge um valor constante depois de algumas horas de chuva
- Os fatores responsáveis por este fenômeno incluem
  - O enchimento dos poros finos do solo com água reduz as forças capilares.
  - À medida que o solo umedece, as partículas de argila colmatam e reduzem o tamanho dos poros.
  - O impacto das gotas de chuva no solo faz com que o material da superfície do solo seja dissolvido e preencha os poros do solo.

- Umidade do solo
- Precipitação: quantidade, intensidade e duração
- Geologia, tipo do solo (a argila absorve menos água e a uma taxa mais lenta do que os solos arenosos)
- Granulometria e arranjo das partículas
- Cobertura do Solo (ocupação)
- Topografia (declividades, depressões)
- Evapotranspiração

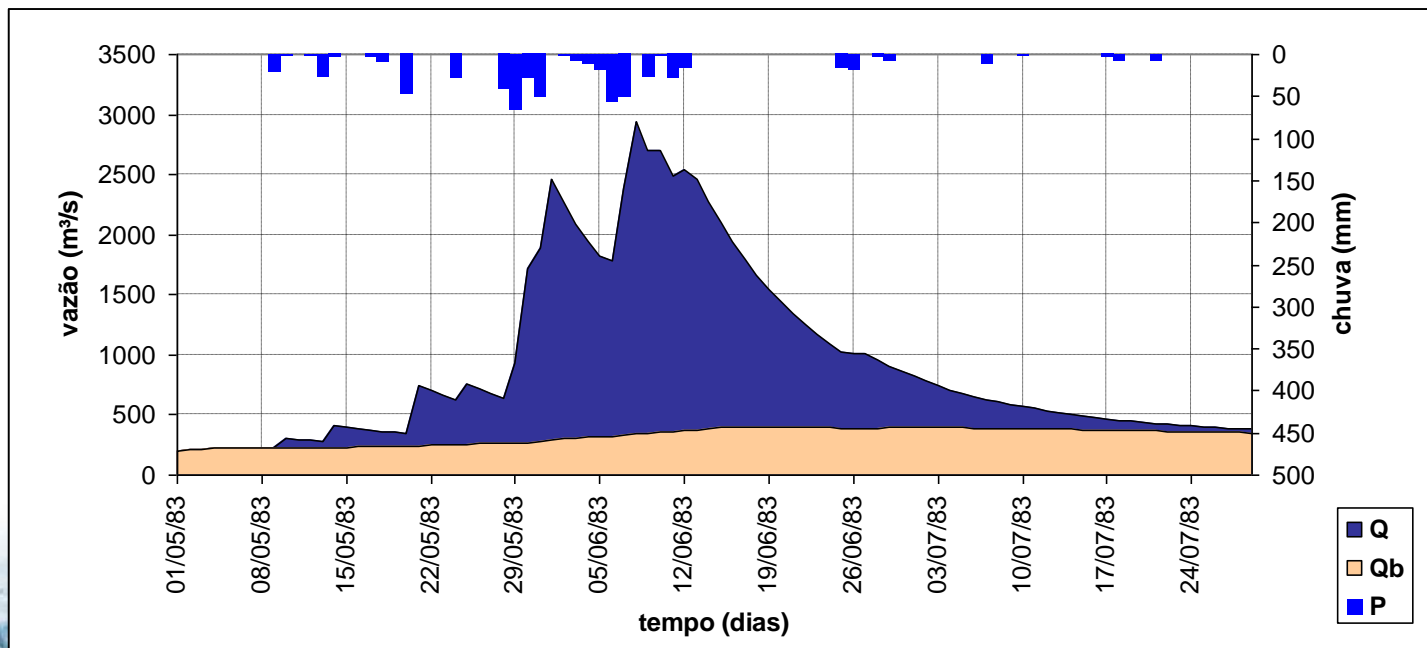
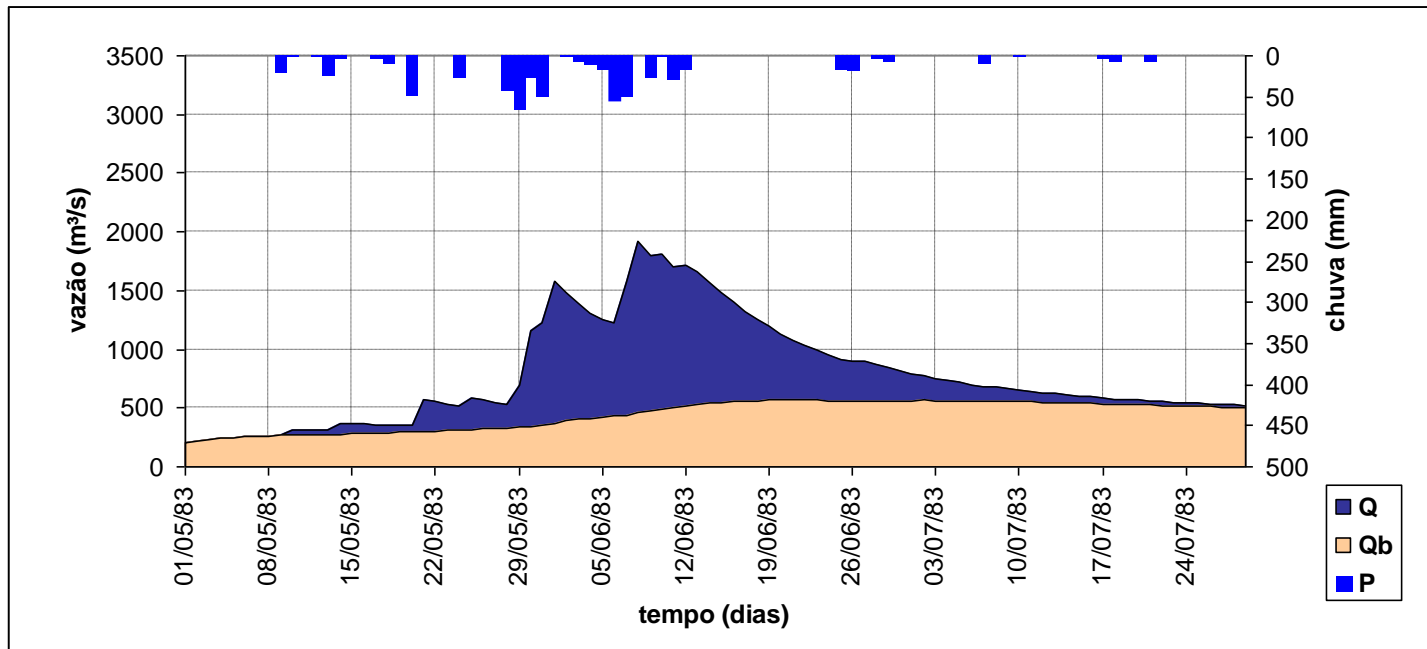


Relative sizes of sand, silt, and clay.



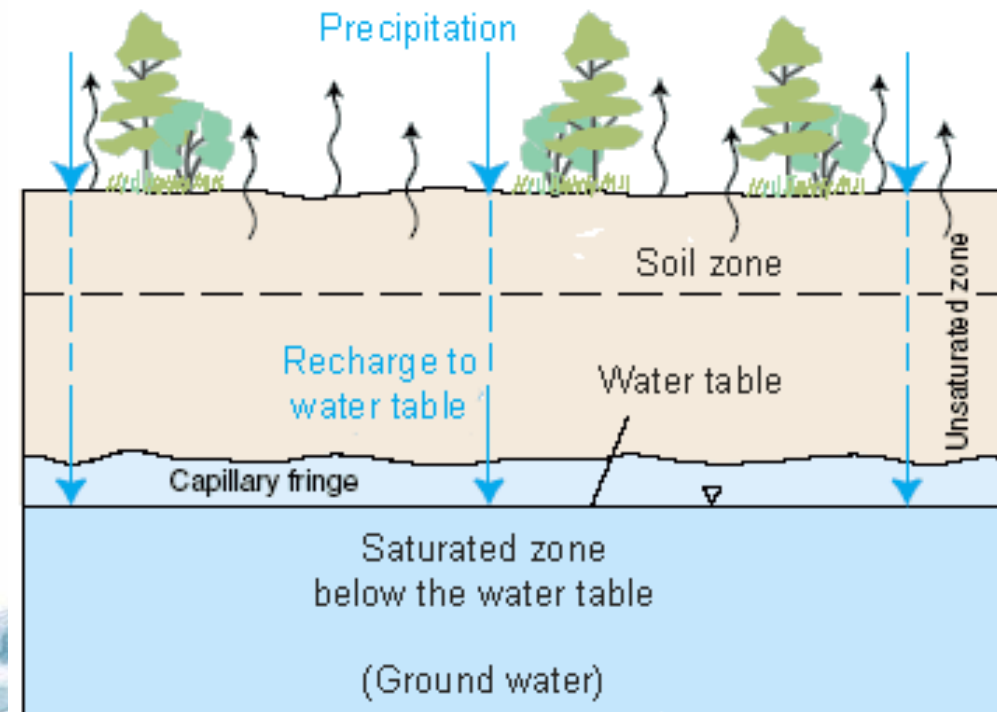


mesma chuva,  
 mesma bacia quando  
 se alterar a  
 capacidade de  
 infiltração ...



- A água infiltrada na parte subsuperficial do solo forma uma zona não saturada (onde os espaços vazios entre as partículas de solo contêm água e ar) e uma zona saturada (onde todos os vazios só contêm água)

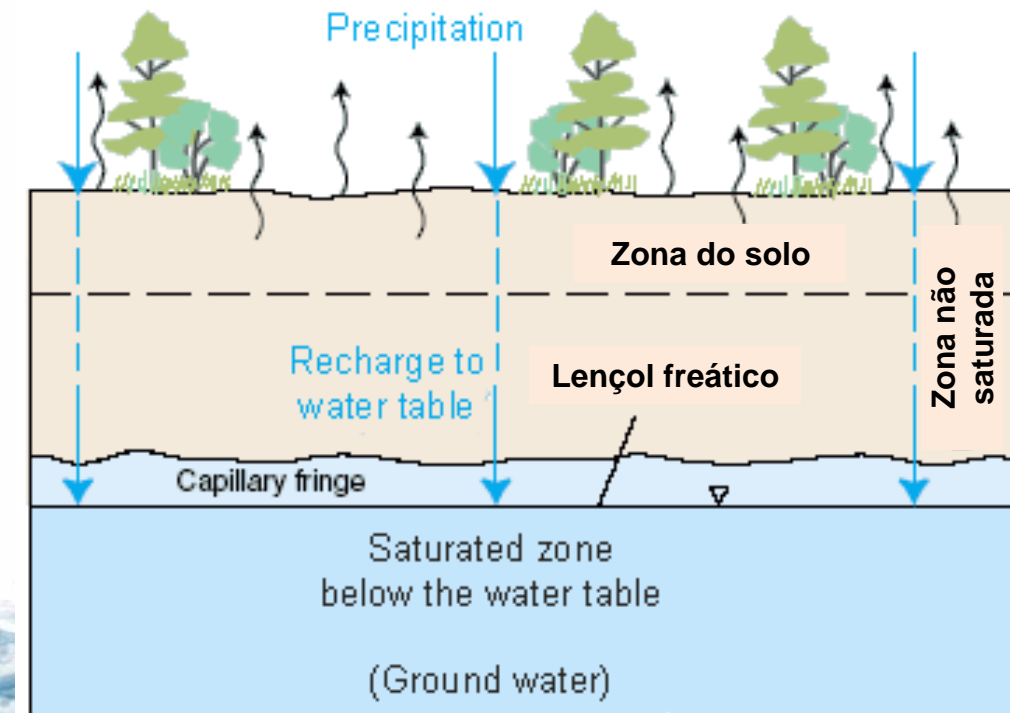
- Embora exista uma quantidade grande de água na zona não saturada, a **água não pode ser bombeada**, porque fica muito presa **pelas forças capilares**





- A parte superior da zona não saturada é a zona de água do solo. Esta zona é cortada por raízes, aberturas deixadas por raízes mortas e esqueletos de animais, que permitem a infiltração nesta zona

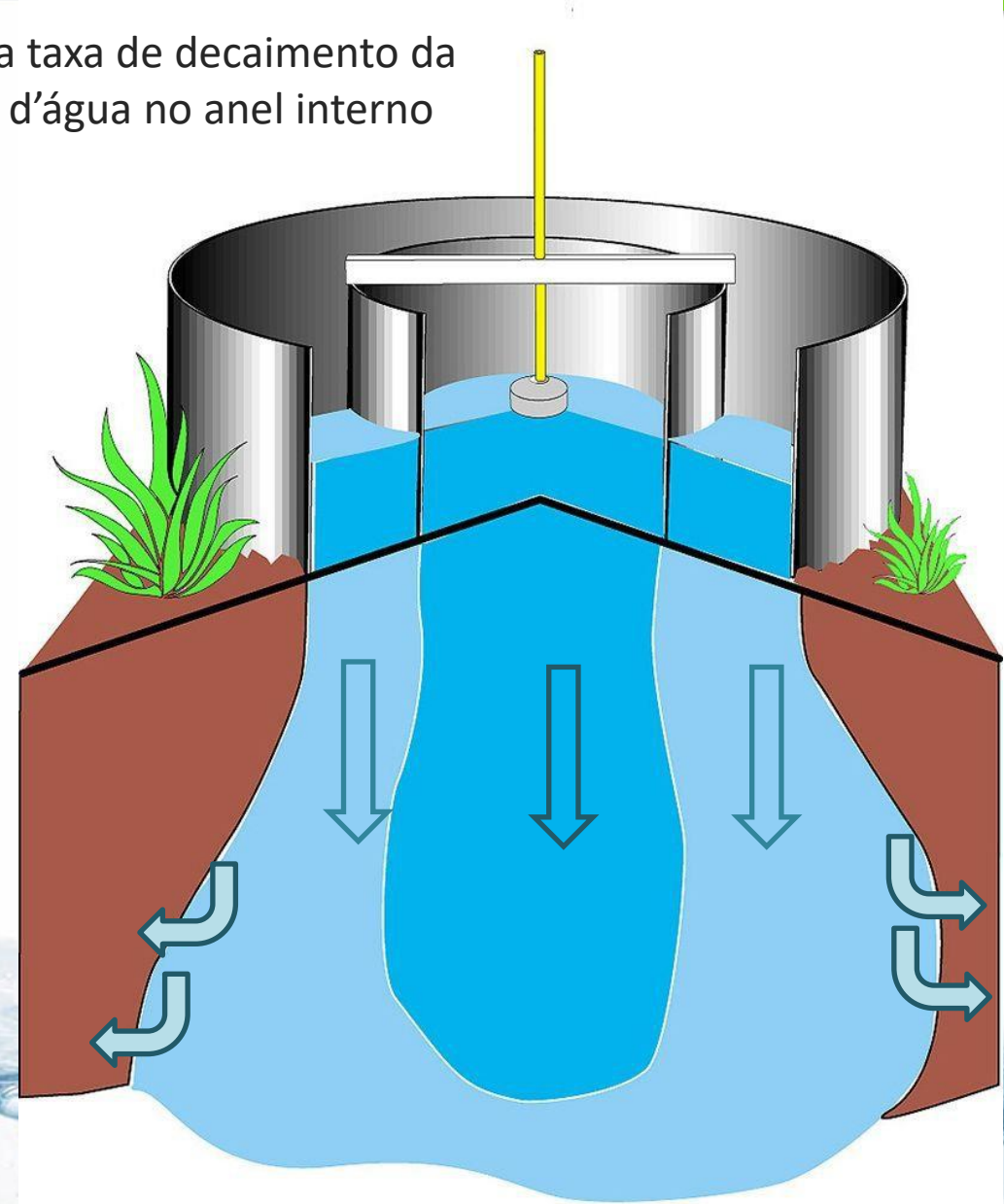
- A água nesta zona é utilizada pelas plantas, mas pode evaporar diretamente para a atmosfera



# Medição: Infiltrômetro de Duplo Anel

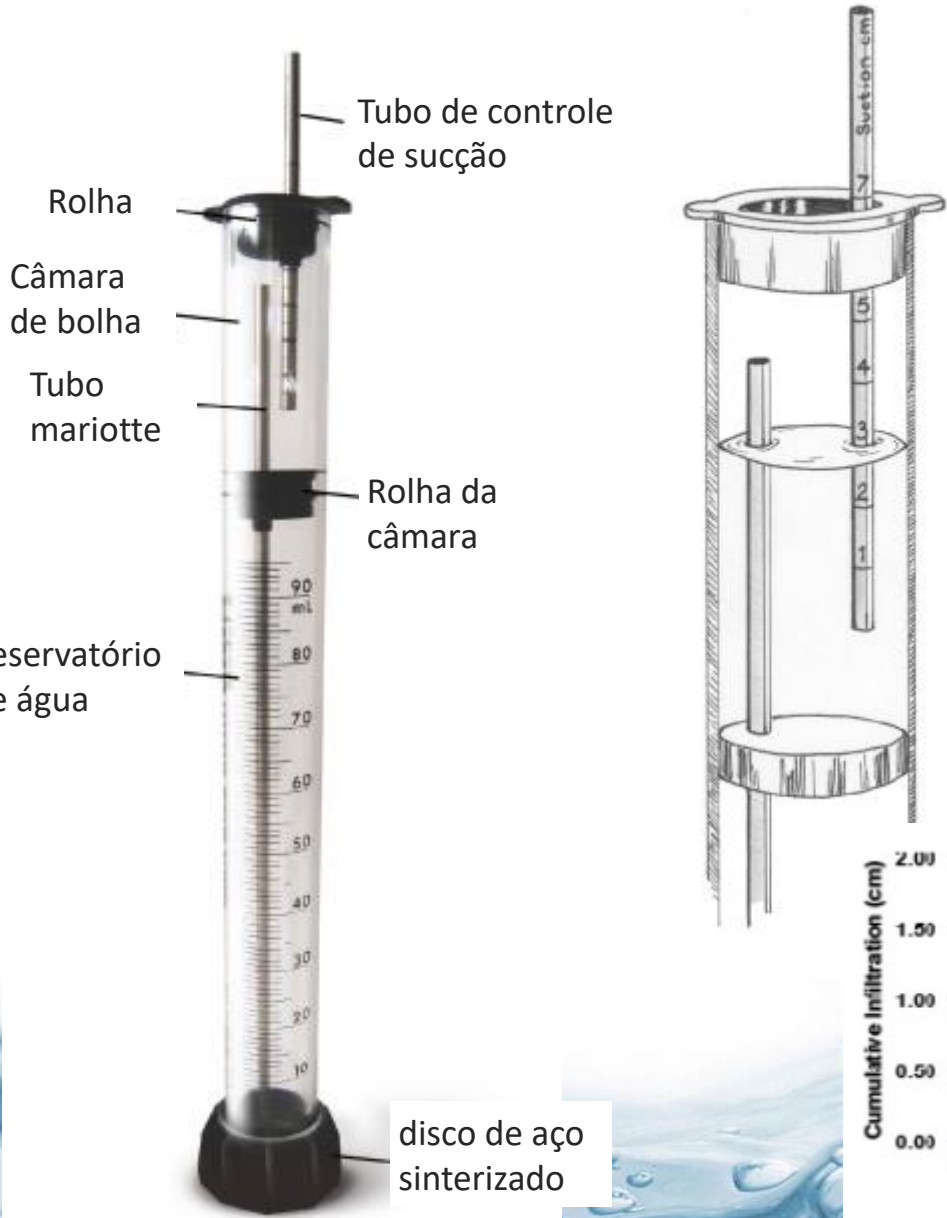


Mede a taxa de decaimento da coluna d'água no anel interno

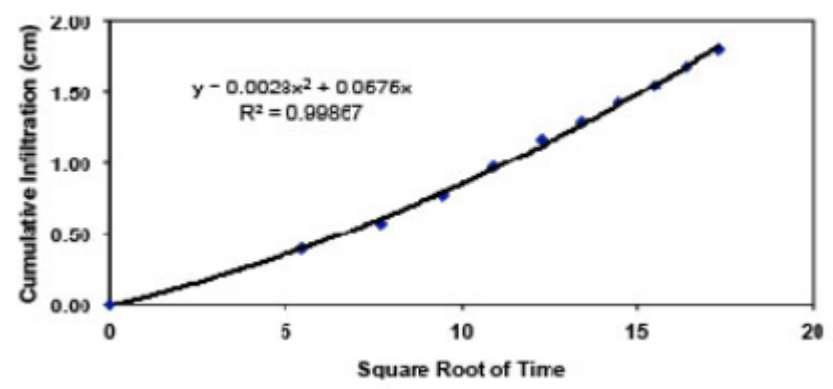
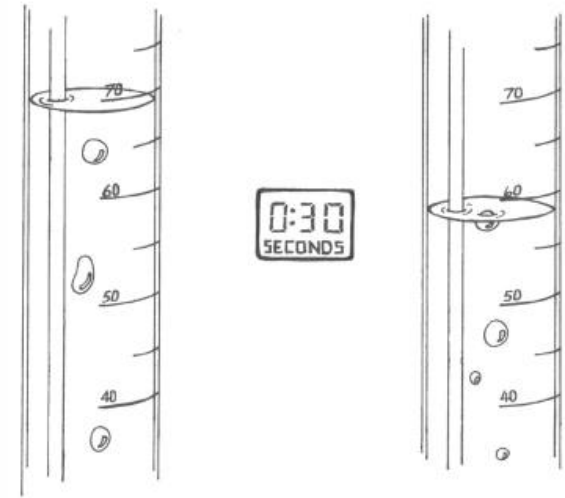




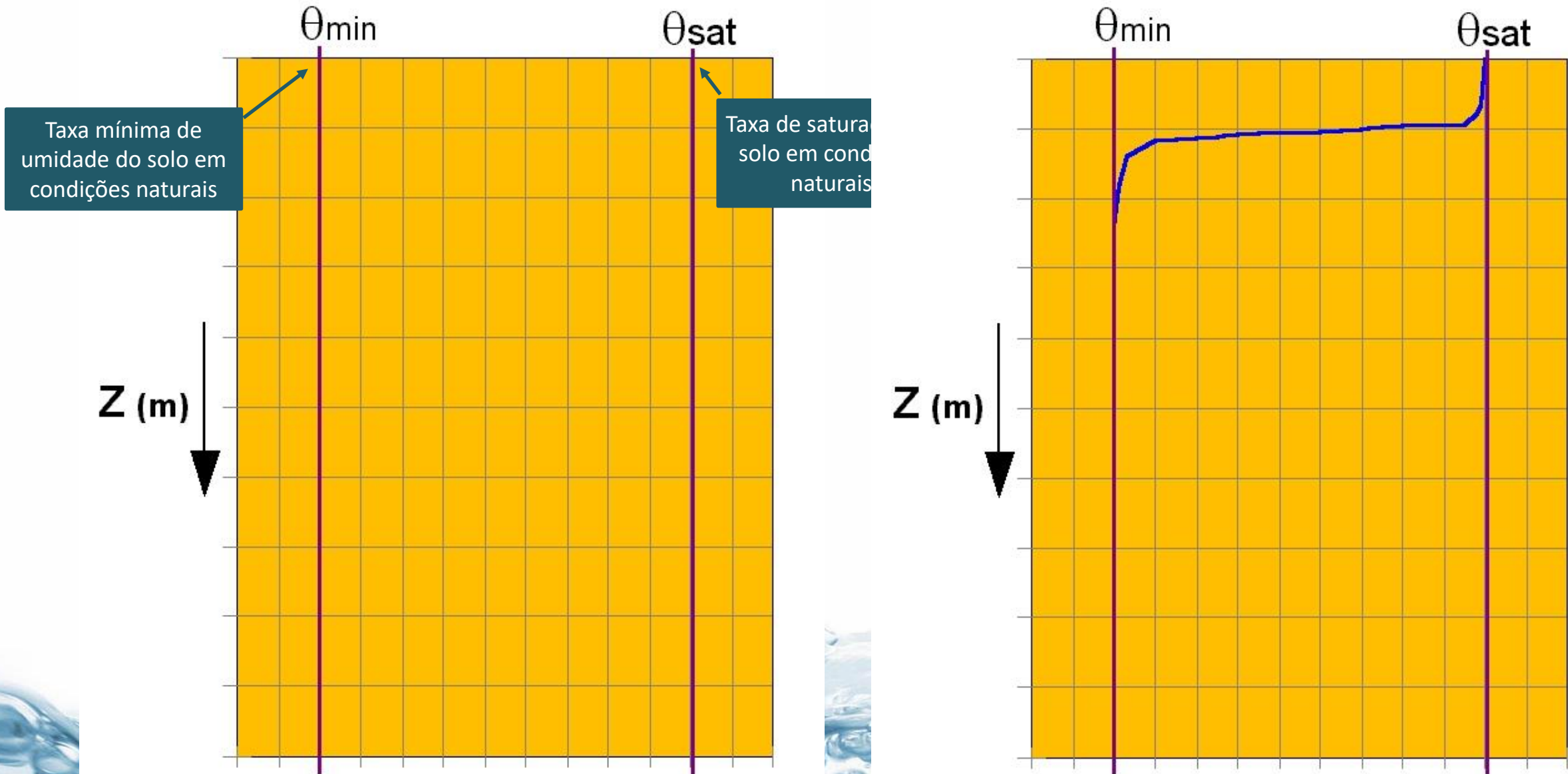
# Medição: Infiltrômetro de disco



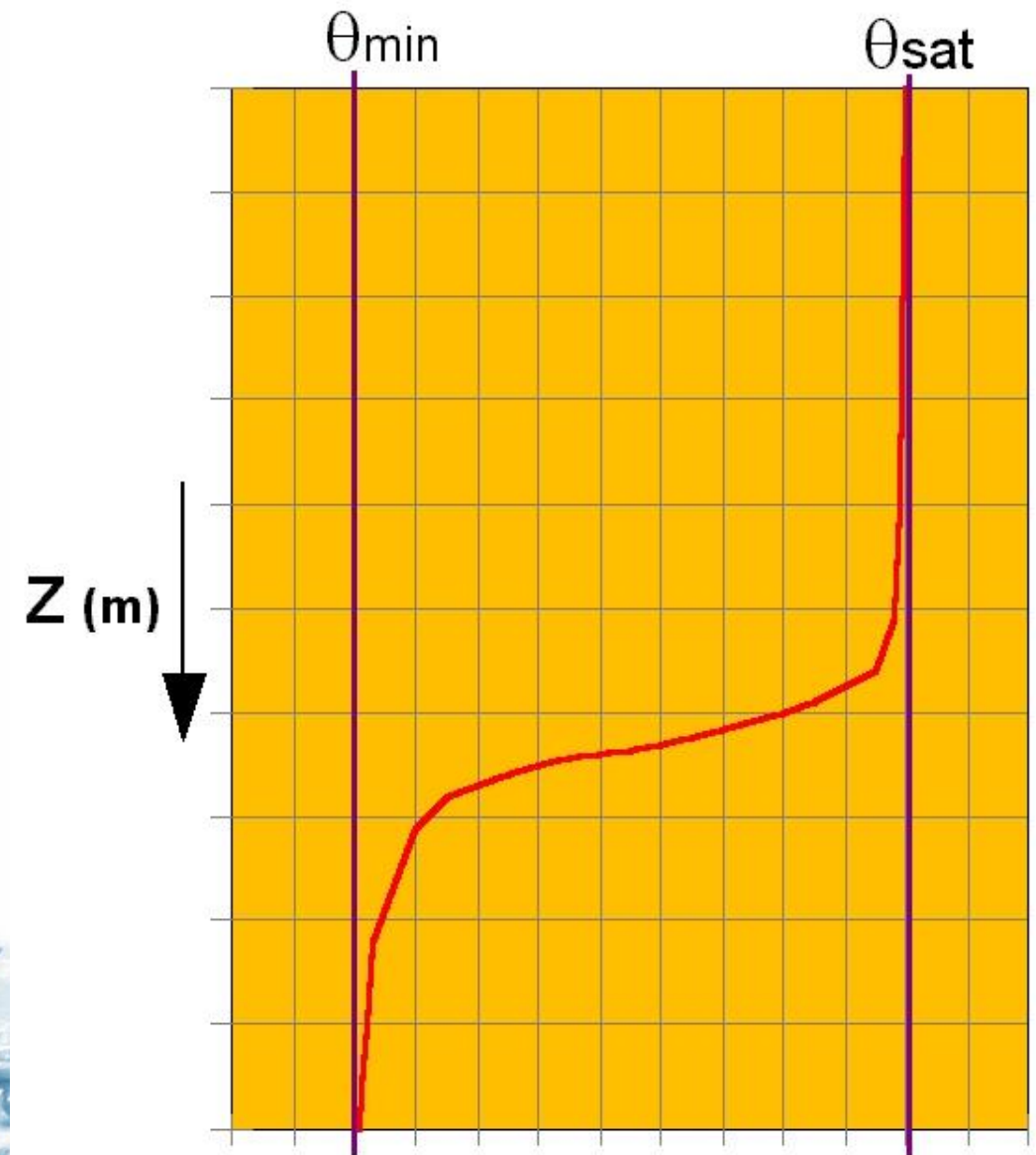
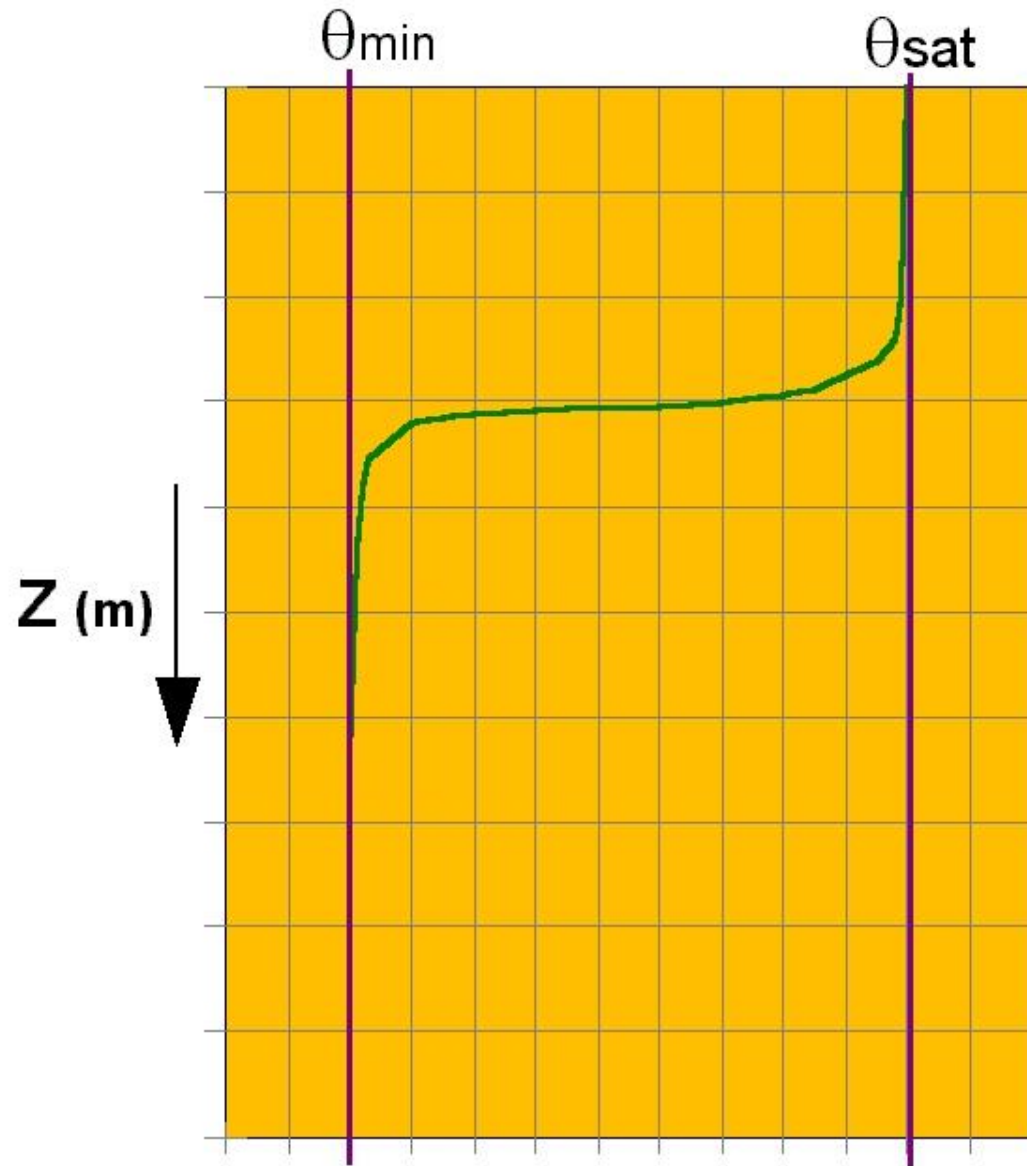
Taxa de sucção deve ser ajustada:  
Arenoso: 6 cm  
Média: 2 cm  
Baixa infiltração: 0,5 cm

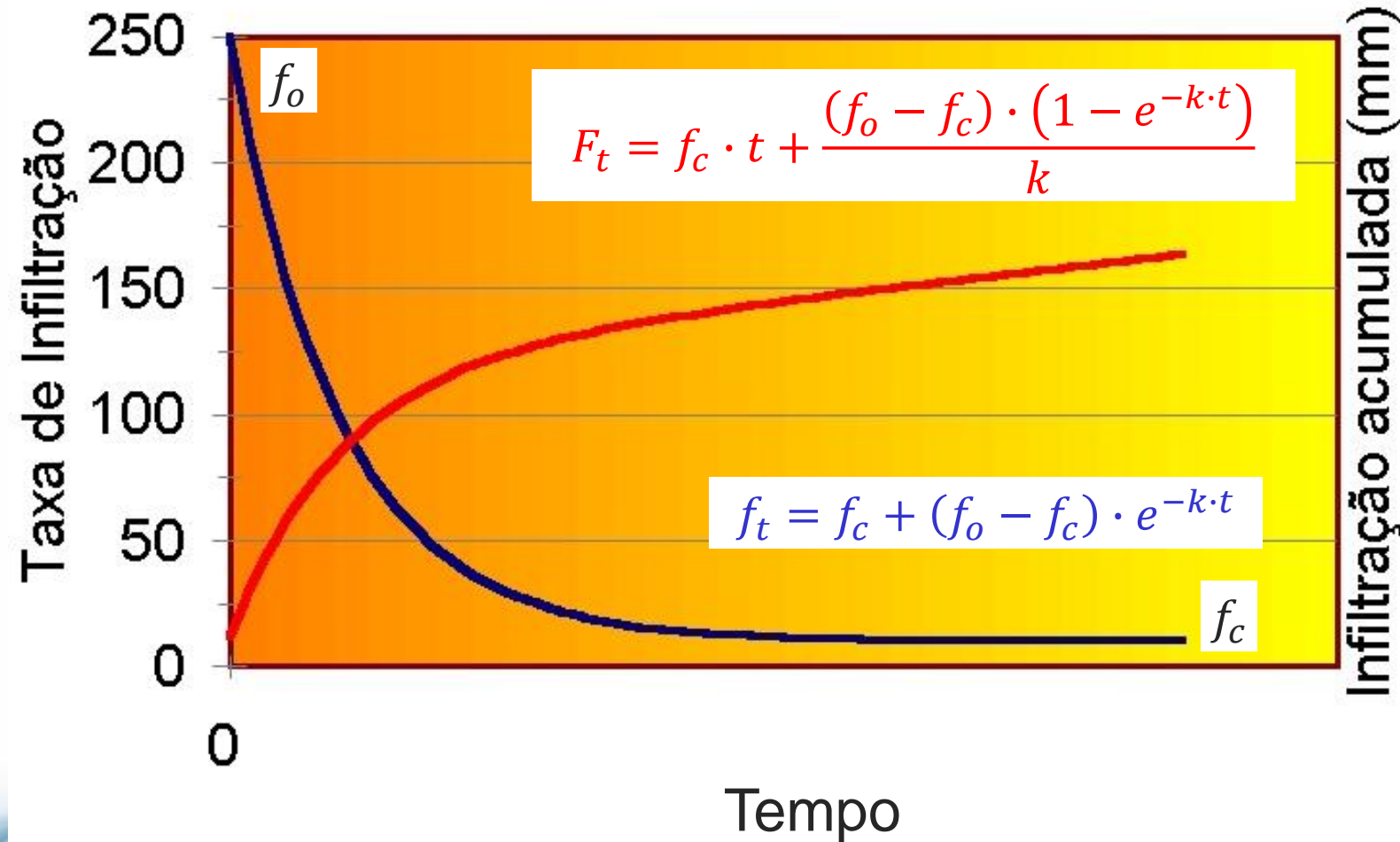


# Processo de Infiltração – zona não saturada



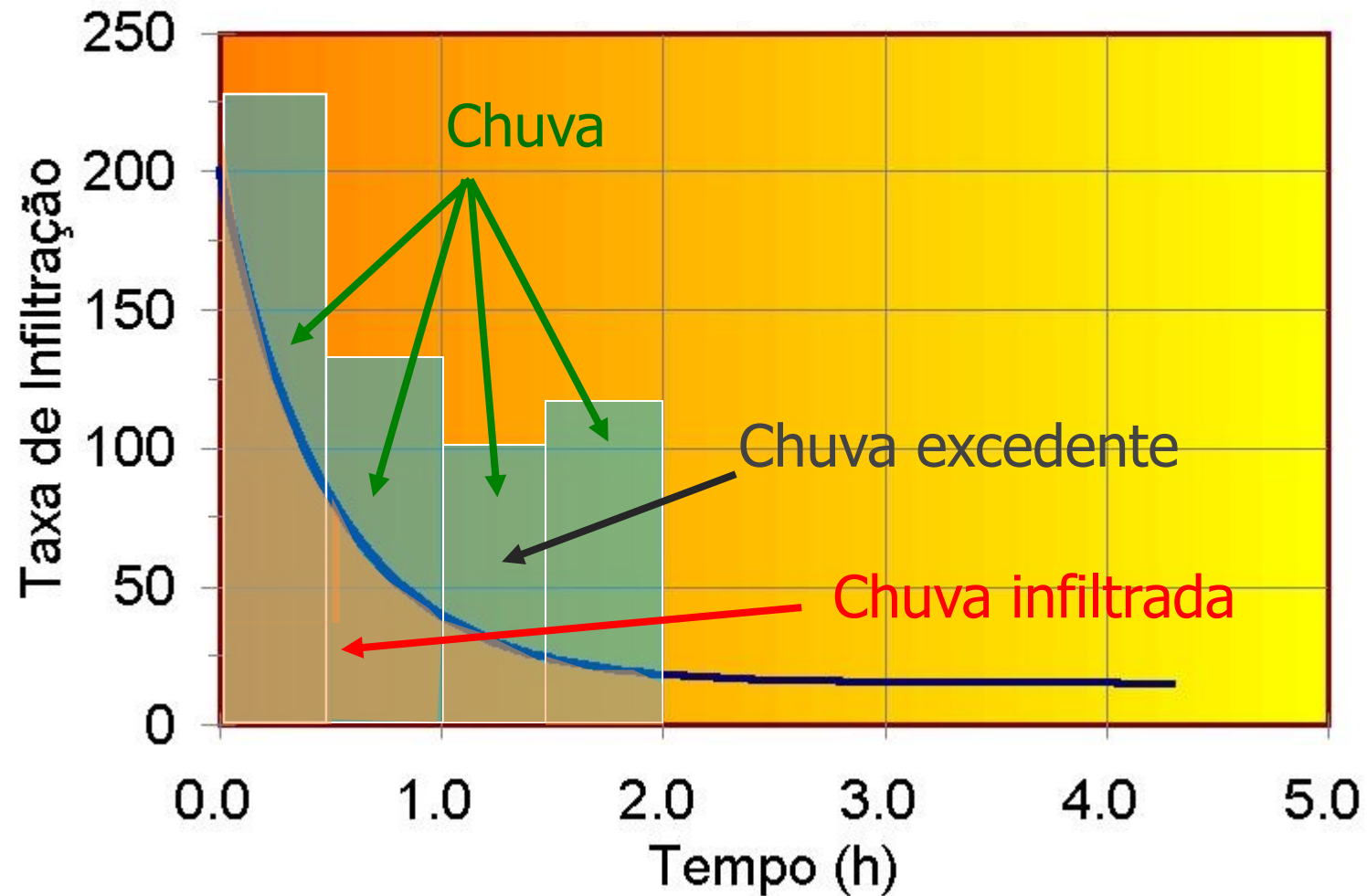






Robert Elmer Horton (1875-1945)  
Horton, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14: 446-447, 1933.

$$f_t = f_c + (f_o - f_c) \cdot e^{-k \cdot t}$$





$$f_t = f_c + (f_o - f_c) \cdot e^{-k \cdot t}$$

f - taxa de infiltração (mm/hora)

$f_c$  - taxa de infiltração em condição de saturação (mm/hora)

$f_o$  - taxa de infiltração inicial (mm/hora)

t - tempo (horas)

k - constante, depende do tipo de solo ( $\text{hora}^{-1}$ )

$$t = 0 \quad \Rightarrow \quad f = f_o$$

$$t = \text{"infinito"} \quad \Rightarrow \quad f = f_c$$

Valores típicos dos parâmetros para diferentes classes de solo e cobertura

Tipo de solo	Cobertura	$f_o$ (mm h <sup>-1</sup> )	$f_c$ (mm h <sup>-1</sup> )	k (min <sup>-1</sup> )
Agricultura padrão	nú	280	6 - 220	1,6
	Matéria orgânica	900	20 - 290	0,8
Orgânico		325	2 - 20	1,8
Argilo arenoso fino	nú	210	2 - 20	2,0
	Matéria orgânica	670	10 - 30	1,4

Wilson, E.M. **Engineering hydrology**. Macmillan Press, London, 1974.

## SCS (Soil Conservation Service)

Método empírico desenvolvido pelo SCS, com base na hipótese:

$$\frac{\textit{Chuva Excedente Real}}{\textit{Chuva Excedente Potencial}} = \frac{\textit{Infiltração Real}}{\textit{Infiltração Potencial}}$$

- **A chuva excedente real** ( $P_{exc}$ , em mm) é a parcela da chuva que se transforma em escoamento superficial direto.
- **A chuva excedente potencial** seria igual à chuva total do evento ( $P$  em mm), retirada a parcela de perdas por interceptação e detenção em depressões do solo.
- As perdas iniciais ( $A_i$ , em mm) são resultados da interceptação e da detenção em depressões do terreno. São estimadas como sendo 20% da capacidade de absorção do solo.
- **A infiltração real** é a diferença entre a Chuva total (menos as perdas iniciais) e a Chuva Excedente.
- **Infiltração potencial** seria a altura infiltrada máxima igual à capacidade de absorção de água pelo solo ( $S$  em mm)

## SCS (Soil Conservation Service)

$$\frac{\text{Chuva Excedente Real}}{\text{Chuva Excedente Potencial}} = \frac{\text{Infiltração Real}}{\text{Infiltração Potencial}}$$

$$\frac{P_{exc}}{P - 0,2S} = \frac{P - 0,2S - P_{exc}}{S}$$

$$P_{exc} = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{(P + 0,8 \cdot S)} \quad \text{para } P > 0,2 \cdot S$$

P (mm) – Chuva total de um evento

S (mm) – Capacidade potencial de absorção de água no solo

P<sub>exc</sub> (mm) – Chuva excedente total do evento

A<sub>i</sub> (mm) – Abstrações iniciais da chuva (interceptação, detenção nas depressões do terreno) = 0,2.S



O SCS relacionou o valor de S em função do tipo de solo, do uso do solo e da condição de umidade inicial do solo.

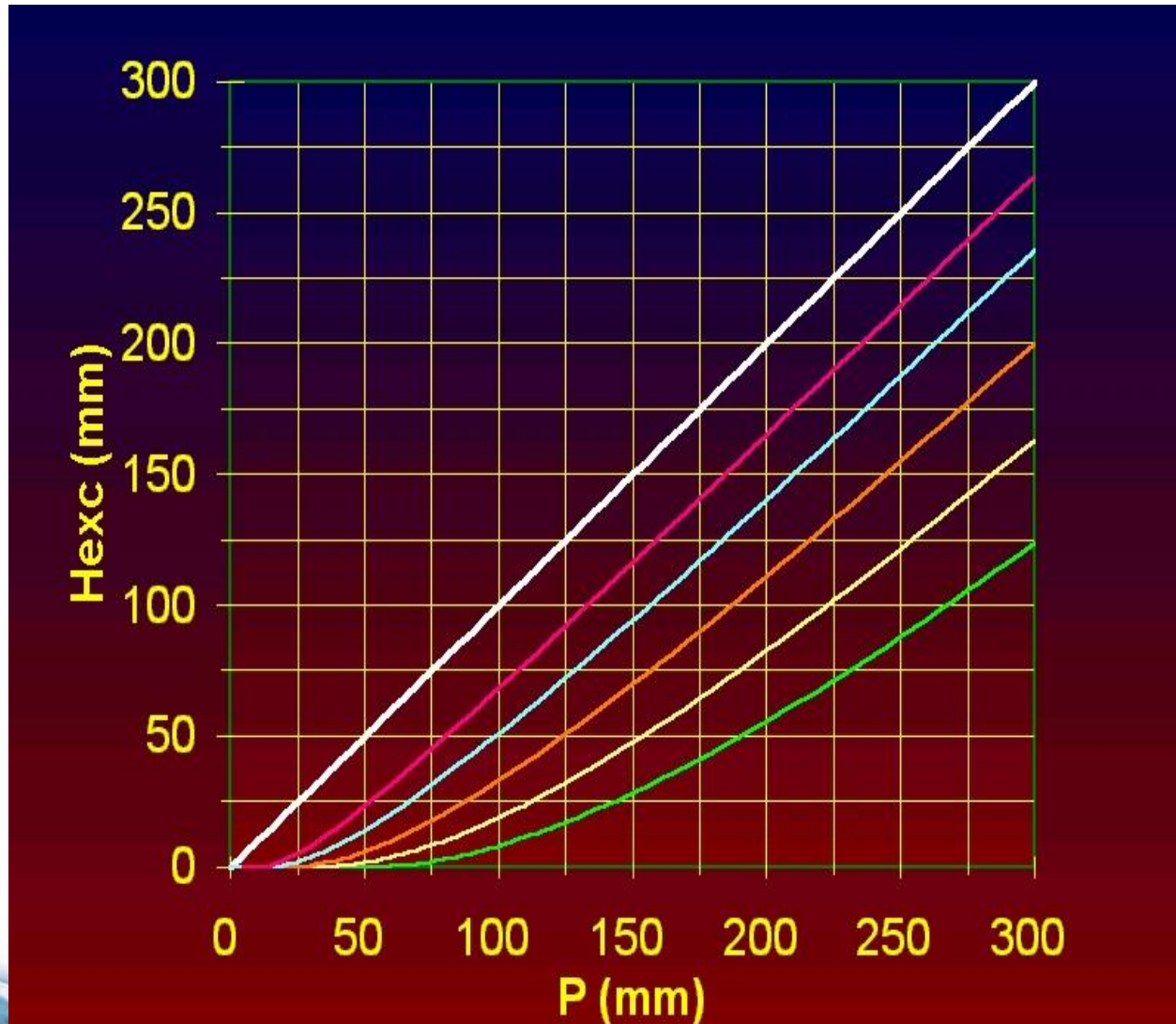
Para facilitar o método de aplicação, criou uma variável auxiliar, denominada CN (curve number), que está relacionada com o CN pela expressão:

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}}$$

ou

$$S = \frac{(1000 - 10 \cdot CN) \cdot 25,4}{CN}$$

Os valores de CN são obtidos de tabelas que relacionam as propriedades do solo com o valor de CN



$$P_{exc} = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{(P + 0,8 \cdot S)} \quad \text{Para } P > 0,2 \cdot S$$

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}}$$

# Método do NRCS (Natural Resources Conservation Service)

## Exemplo de uma tabela parcial de CN – áreas urbanas

Tipo de uso do solo/ Tratamento/ Condições hidrológicas	Grupo Hidrológico			
	A	B	C	D
<b>Uso Residencial</b>				
Tamanho médio do lote    % Impermeável				
até 500 m <sup>2</sup> 65	77	85	90	92
1000 m <sup>2</sup> 38	61	75	83	87
1500 m <sup>2</sup> 30	57	72	81	86
<b>Estacionamentos pavimentados, telhados</b>	98	98	98	98
<b>Ruas e estradas:</b>				
pavimentadas, com guias e drenagem	98	98	98	98
com cascalho	76	85	89	91
de terra	72	82	87	89
<b>Áreas comerciais (85% de impermeabilização)</b>	89	92	94	95
<b>Distritos industriais (72% impermeável)</b>	81	88	91	93
<b>Espaços abertos, parques, jardins:</b>				
boas condições, cobertura de grama > 75%	39	61	74	80
condições médias, cobertura de grama > 50%	49	69	79	84
<b>Terreno preparado para plantio, descoberto</b>	77	86	91	94
<b>Plantio em linha reta</b>				



## Grupos Hidrológicos de Solos

### Grupo A

Solos arenosos, com baixo teor de argila, inferior a uns 8%, não há rochas nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.

### Grupo B

Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, este limite pode subir a 20%, graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente a 1,2% e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.

### Grupo C

Solos barrentos, com teor de argila total de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas ou pedras até a profundidade de 1,2 m. No caso de terras roxas esses limites podem ser 40% e 1,5m. Nota-se a 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

### Grupo D

Solos argilosos (30% a 40% de argila total) com camada densificada a 50 cm de profundidade; ou solos arenosos com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

## Condições Típicas de Umidade do Solo

**Condição II** - situação média na época das cheias, as chuvas nos últimos 5 dias totalizam entre 15 e 40 mm.

**Condição I** - solos secos, as chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm.

$$CN_I = \frac{4,2 \cdot CN_{II}}{10 - 0,058 \cdot CN_{II}}$$

**Condição III** - solos úmidos (próximos da saturação), as chuvas nos últimos 5 dias foram superiores a 40 mm e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

$$CN_{III} = \frac{23 \cdot CN_{II}}{10 + 0,13 \cdot CN_{II}}$$



## Aplicação

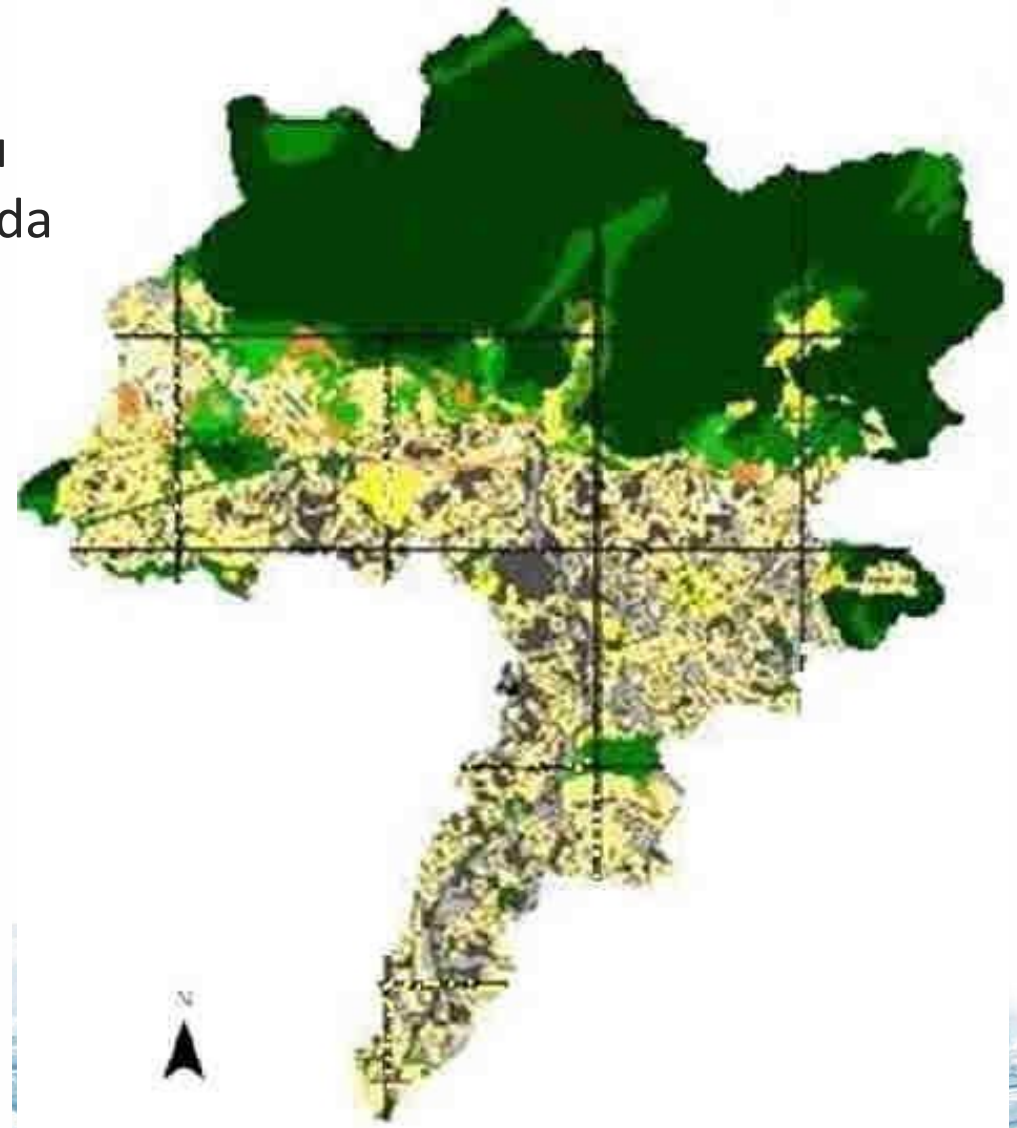
- Classificar o tipo de solo existente na bacia
- Determinar a ocupação predominante
- Com a tabela do SCS para a Condição de Umidade II determinar o valor de CN
- Corrigir o CN para a condição de umidade desejada
- No caso de existirem na bacia diversos tipos de solo e ocupações, determinar o CN pela média ponderada.

# Método do NRCS (Natural Resources Conservation Service)









## Exemplo de uma tabela parcial de CN – áreas urbanas

Tipo de uso do solo/ Tratamento/ Condições hidrológicas	Grupo Hidrológico			
	A	B	C	D
<b>Uso Residencial</b>				
Tamanho médio do lote    % Impermeável				
até 500 m <sup>2</sup> 65	77	85	90	92
1000 m <sup>2</sup> 38	61	75	83	87
1500 m <sup>2</sup> 30	57	72	81	86
<b>Estacionamentos pavimentados, telhados</b>	98	98	98	98
<b>Ruas e estradas:</b>				
pavimentadas, com guias e drenagem	98	98	98	98
com cascalho	76	85	89	91
de terra	72	82	87	89
<b>Áreas comerciais (85% de impermeabilização)</b>	89	92	94	94
<b>Distritos industriais (72% impermeável)</b>	81	88	91	91
<b>Espaços abertos, parques, jardins:</b>				
boas condições, cobertura de grama > 75%	39	61	71	80
condições médias, cobertura de grama > 50%	49	69	79	84
<b>Terreno preparado para plantio, descoberto</b>	77	86	91	94
<b>Plantio em linha reta</b>				

Exemplo: Variação do CN ao longo da bacia do Cabuçu de Baixo (resultado da sobreposição das informações da geologia e do uso e cobertura do solo)

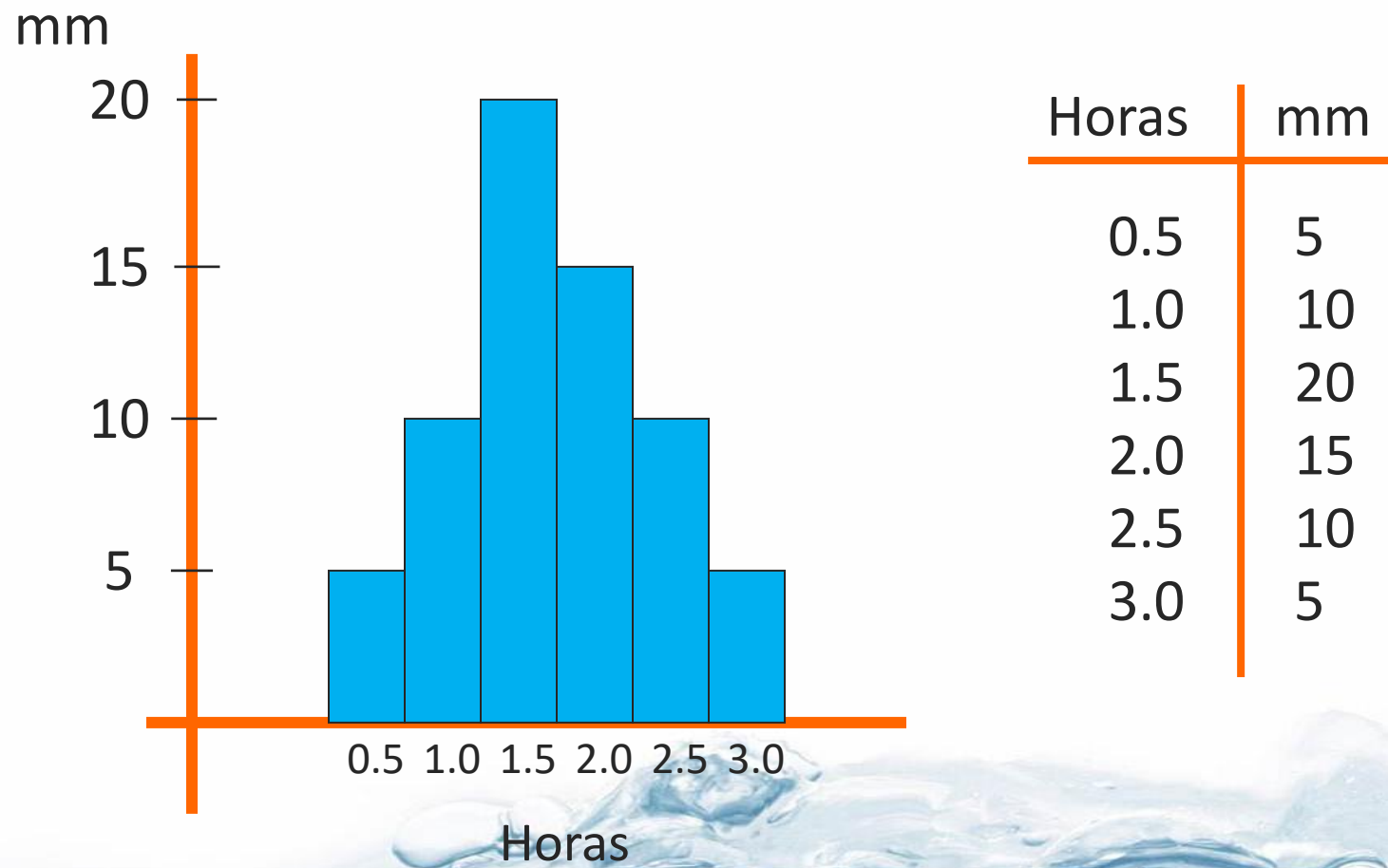


Legenda – Valor do Curve Number

	Até 60		De 65 até menos que 70
	De 60 até menos que 65		De 75 até menos que 80
	De 70 até menos que 75		De 85 até menos que 90
	De 80 até menos que 85		
	Mais de 90		



## Conhecido o hietograma de projeto



Conhecido o valor de CN (p.ex., CN= 80), deve-se aplicar a fórmula do NRCS da seguinte maneira:

1. Acumular as precipitações do hietograma
2. Aplicar a fórmula às precipitações acumuladas
3. Diferenciar para obter o hietograma excedente

Horas	Chuva	Ch. Acum.	Ch. Exc. Acum.	Hietogr. Exc.
0.5	5	5	0.0	0.0
1.0	10	15	0.08	0.08
1.5	20	35	5.80	5.72
2.0	15	50	13.81	8.01
2.5	10	60	20.20	6.39
3.0	5	65	23.63	3.43

Conhecido o valor de CN (p.ex., CN= 80), deve-se aplicar a fórmula do NRCS da seguinte maneira:

1. Acumular as precipitações do hietograma
2. Aplicar a fórmula às precipitações acumuladas
3. Diferenciar para obter o hietograma excedente

$$S = \frac{25400}{80} - 254 = 63,5$$
$$0,2S = 0,2 \cdot 63,5 = 12,7 \text{ mm}$$
$$H_{exc} = \frac{(15 - 12,7)^2}{15 + 50,8} = 0,08 \text{ mm}$$

Horas	Chuva	Ch. Acum.	Ch. Exc. Acum.	Hietogr. Exc.
0.5	5	5	0.0	0.0
1.0	10	15	0.08	0.08
1.5	20	35	5.80	5.72
2.0	15	50	13.81	8.01
2.5	10	60	20.20	6.39
3.0	5	65	23.63	3.43

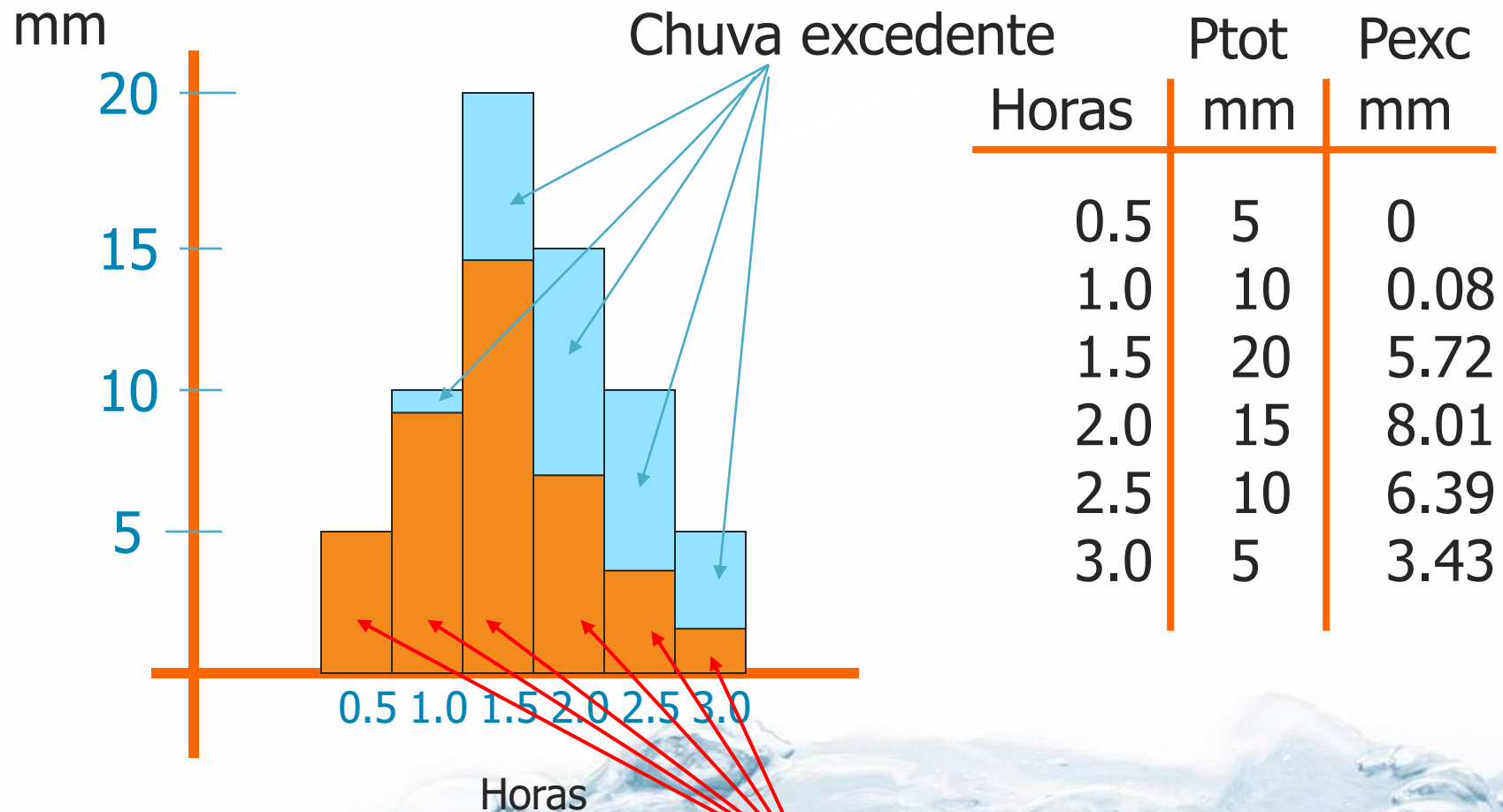


Conhecido o valor de CN (p.ex., CN= 80), deve-se aplicar a fórmula do NRCS da seguinte maneira:

1. Acumular as precipitações do hietograma
2. Aplicar a fórmula às precipitações acumuladas
3. Diferenciar para obter o hietograma excedente

Horas	Chuva	Ch. Acum.	Ch. Exc. Acum.	Hietogr. Exc.
0.5	5	5	0.0	0.0
1.0	10	15	0.08	0.08
1.5	20	35	5.80	5.72
2.0	15	50	13.81	8.01
2.5	10	60	20.20	6.39
3.0	5	65	23.63	3.43

## Hietograma excedente



Chuva infiltrada

- A chuva excedente total não depende da distribuição temporal da chuva
- O valor chuva excedente total é muito sensível à variação de CN
- Justificativa frágil para o valor 0,2 S
- A fórmula do NRCS é inconsistente se vista como uma fórmula de capacidade de infiltração



## Infiltração

- Data máxima para entrega: 15/04/2011

- Numero de Tentativas com Respostas Incorretas:

1. Deseja-se estudar o escoamento superficial direto em uma bacia de 400 km<sup>2</sup> na região de São Carlos (SP), para uma chuva de 7 horas e período de retorno de 50 anos.
2. A precipitação deve ser calculada pelo método dos blocos alternados com discretização horária utilizando-se a equação de chuvas intensas abaixo:

$$i = 25.32 \times T^{0.236} / (t + 16)^{0.935}$$

Fonte: Ademir Barbassa

i = intensidade média da chuva, em mm/min

t = duração da chuva, em min

T = período de retorno, em anos

3. A bacia em questão é dividida como mostra o quadro abaixo em três sub-áreas com diferentes características quanto à capacidade de infiltração:

Porção	Zona	Área (km <sup>2</sup> )	Uso do solo	Superfície	Grupo hidrológico do solo	Clique aqui para obter a tabela de CN (CN II - Condição Média)
A1	rural	120	cultura de grãos	curvas de nível, condições boas	B	
A2	rural	80	floresta	normais	B	
A3	rural	200	floresta	normais	A	

- Condição de umidade antecedente do solo em toda a bacia: situação média na época das cheias

4. Calcule o valor do CN (verifique o condição do solo do enunciado e faça a conversão do CN, se necessário) para cada uma das áreas e calcule o valor da precipitação total na bacia

**Porção CN**

A1:

A2:

A3:

Chuva Total sobre a Bacia (mm):

5. Calcule o valor da precipitação excedente nas sete horas do ietograma e o volume de água que seria represado, caso houvesse uma barragem na saída da bacia utilizando-se o método do Soil Conservation Service, departamento de agricultura dos EUA.

**Hora Intervalo (min) Hietograma Excedente (mm)**

1 0-60

2 60-120

3 120-180

4 180-240

5 240-300

6 300-360

7 360-420

Volume Represado (hm<sub>3</sub>):

- Para converter os valores de CN, utilize as seguintes expressões e arredonde para número inteiro:

$$CN1 = 4,2 * CN2 / (10 - 0,058 * CN2)$$

$$CN3 = 23 * CN2 / (10 + 0,13 * CN2)$$

[Responder](#)



Fim



LabSid