



## REGA E DRENAGEM

### 2. 1 NECESSIDADES DE ÁGUA PARA REGA

#### 2.1.2. RELAÇÕES SOLO/ÁGUA

---

- Conceitos de base relativos à água no solo
- RU, RFU, LRFU, MAD

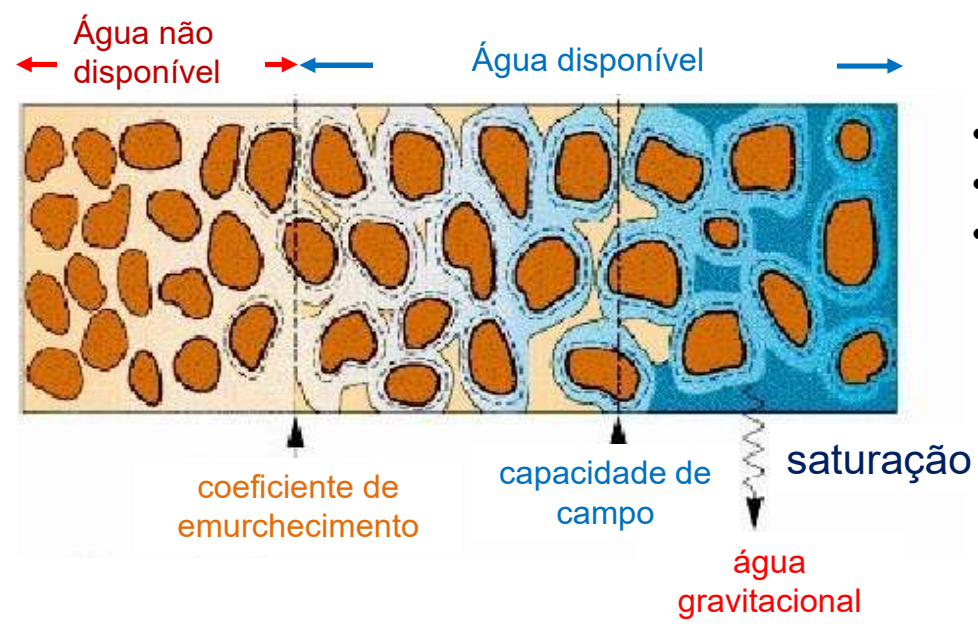
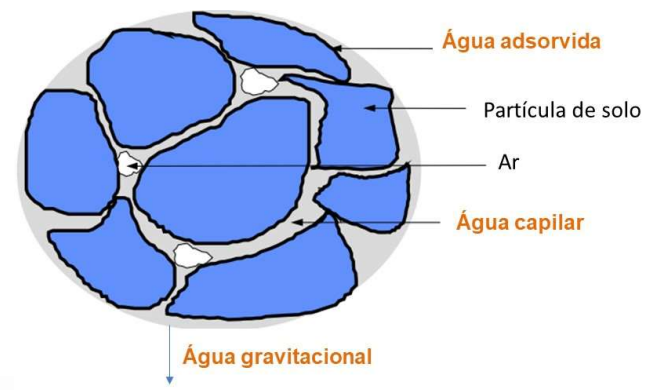
#### 2.1.3. DOTAÇÃO TOTAL DE REGA

---

- Balanço hídrico do solo com/sem stress hídrico

# 1. CONCEITOS

A água do solo pode encontrar-se em três formas

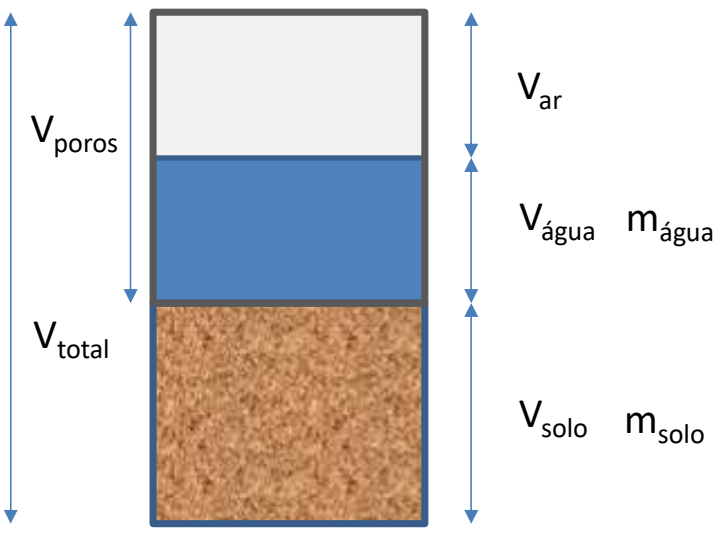


- Água gravitacional      0 → -33 kPa      (pF 0 a 2.5)
- Água capilar            -33 kPa → -3100 kPa      (pF 2.5 a 4.5)
- Água adsorvida ou higroscópica      < -3100 kPa      (pF > 4.5)

$$pF = \log |p/\gamma|, \text{ com } p/\gamma \text{ em cm}$$

$$0.8 \text{ atm} \approx pF 3$$

## Principais grandezas



$\rho_{\text{quartzo}} = 2650 \text{ kg/m}^3$   
 $d_{\text{ap}} = 1.2 - 1.6$

Grandeza	Eq definição	Unidades
Massa volúmica aparente do solo	$\rho = \frac{m_{\text{solo}}}{V_{\text{total}}}$	kg/m <sup>3</sup>
Massa volúmica (real) do solo	$\rho_r = \frac{m_{\text{solo}}}{V_{\text{solo}}}$	kg/m <sup>3</sup>
Densidade aparente	$d_{\text{ap}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}}$	—
Porosidade do solo	$\phi = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{total}}} = 1 - \frac{\rho}{\rho_r}$	— (%)
Grau de saturação	$s = \frac{V_{\text{água}}}{V_{\text{poros}}}$	
Teor de água ponderal / mássico	$\theta_p = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{solo}}}$	kg / kg
Teor de água volúmico	$\theta = \frac{V_{\text{água}}}{V_{\text{total}}} = d_{\text{ap}} \times \theta_p = s \phi$	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>

## Exercícios

A massa volúmica aparente de um solo seco é  $1750 \text{ kg/m}^3$  e a massa volúmica dos sólidos é  $2500 \text{ kg/m}^3$ . Determine a porosidade do solo.

(R: 0.3)

---

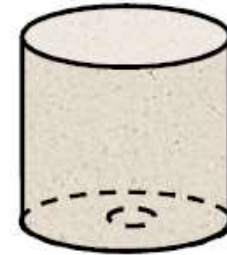
Um vaso, munido de um orifício no fundo, contém 5 l de um solo com um teor volúmico de humidade de 0.15. Sabendo que a capacidade de campo do solo é 0.28, calcule a quantidade de água que sairá pelo orifício quando se deitar no vaso 1 l de água.

(R: 0.35 l)

---

Num terreno com 1 ha encontra-se instalada uma cultura agrícola com a profundidade radicular de 0.5 m. Sabendo que o solo tem uma capacidade de campo de 0.45 e que o mínimo teor volúmico de humidade admissível para produção é 0.24, estime o volume de água de rega para passar desse mínimo à capacidade de campo.

(R:  $1050 \text{ m}^3$  )



## Armazenamento total de água

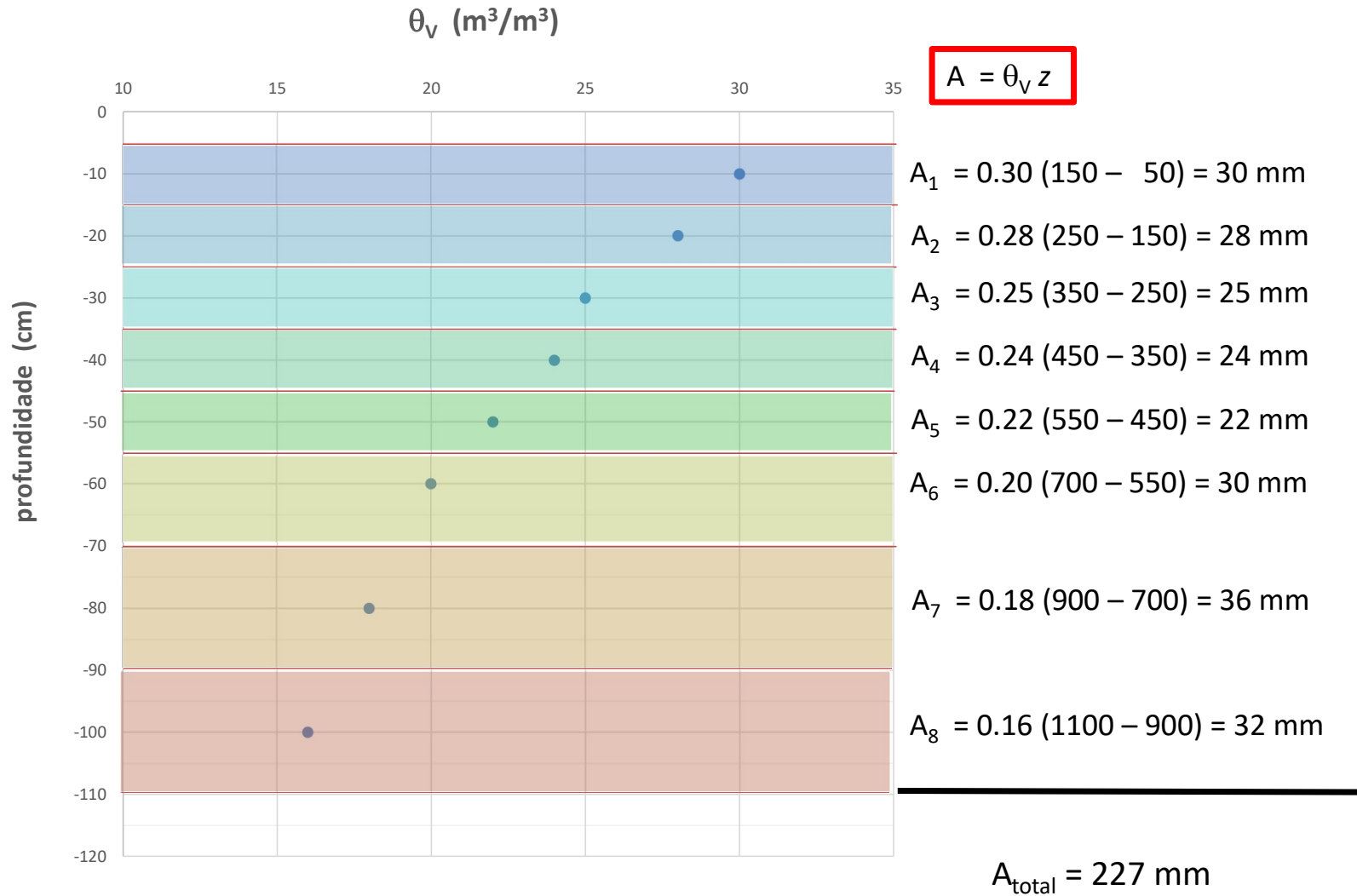
$$V_{\text{água}} = \theta V_{\text{total}} = \theta A_{\text{sup}} z$$

$$\frac{V_{\text{água}}}{A_{\text{sup}}} = A = \theta z$$

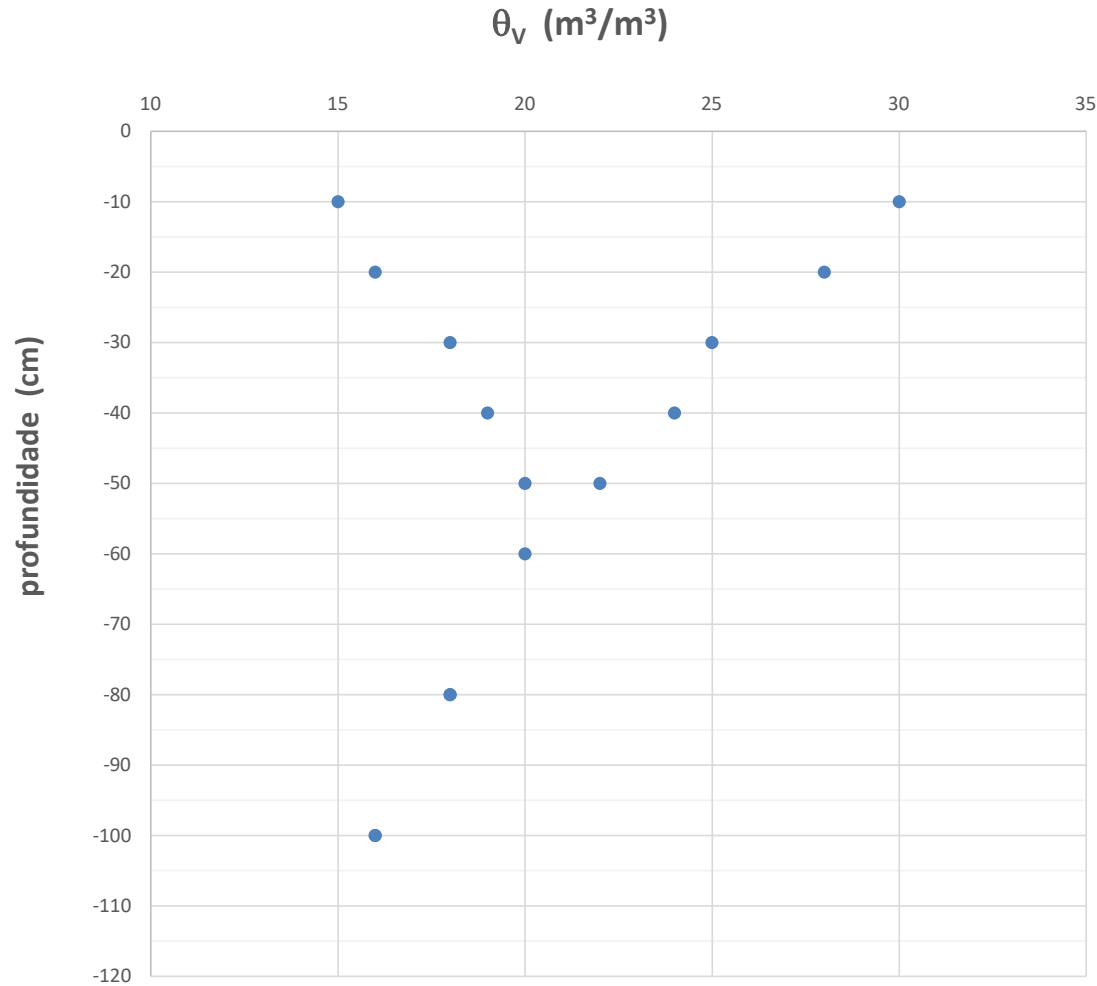
A = armazenamento (total) [L]

↓  
mm = L/m<sup>2</sup>

## Armazenamento total de água num perfil de solo



## Variação do armazenamento total de água entre duas medições



$$A_1 = 30 \text{ mm}$$

$$A_2 = 28 \text{ mm}$$

$$A_3 = 25 \text{ mm}$$

$$A_4 = 24 \text{ mm}$$

$$A_5 = 22 \text{ mm}$$

$$A_6 = 30 \text{ mm}$$

$$A_7 = 36 \text{ mm}$$

$$A_8 = 32 \text{ mm}$$

$$A_{1f} = 15 \text{ mm}$$

$$A_{2f} = 16 \text{ mm}$$

$$A_{3f} = 18 \text{ mm}$$

$$A_{4f} = 19 \text{ mm}$$

$$A_{5f} = 20 \text{ mm}$$

$$A_{6f} = 30 \text{ mm}$$

$$A_{7f} = 36 \text{ mm}$$

$$A_{8f} = 32 \text{ mm}$$

$$\Delta A_1 = -15 \text{ mm}$$

$$\Delta A_2 = -12 \text{ mm}$$

$$\Delta A_3 = -7 \text{ mm}$$

$$\Delta A_4 = -5 \text{ mm}$$

$$\Delta A_5 = -2 \text{ mm}$$

$$\Delta A_6 = 0 \text{ mm}$$

$$\Delta A_7 = 0 \text{ mm}$$

$$\Delta A_8 = 0 \text{ mm}$$

---


$$A_{\text{total}} = 227 \text{ mm}$$

$$A_{\text{total}} = 186 \text{ mm}$$

$$\Delta A_{\text{total}} = -41 \text{ mm}$$

## Maneiras de exprimir a água no solo

- Teor de água (ponderal, volumétrico)
- (Energia) potencial

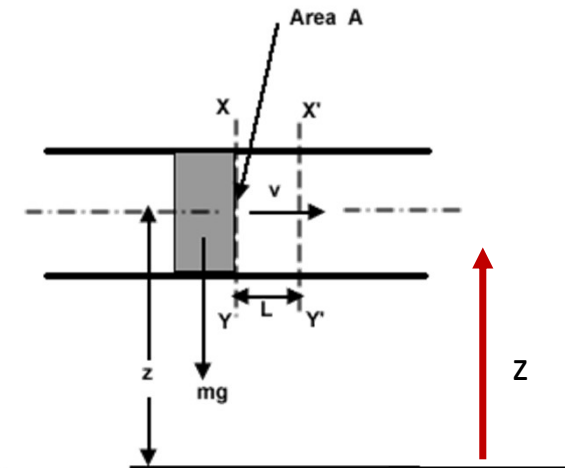
Formas de energia:

- Energia potencial =  $mgz$
- Energia cinética =  $\frac{1}{2} mv^2$
- Energia devida à pressão =  $p m / \rho$

$$[ E=W = F d = pAL= pV = p m/\rho ]$$

Energia total = energia potencial + energia cinética + energia de pressão

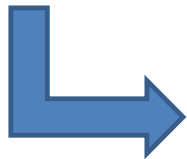
desprezam-se as variações de temperatura (energia interna)





		Energia potencial	Energia cinética	Energia da pressão	Unidade
$\phi$ :	Energia por unidade de massa	$g z$	$\frac{1}{2} v^2$	$p/\rho$	$m^2 s^{-2}$
$\psi$	Energia por unidade de volume	$\rho g z$	$\frac{1}{2} \rho v^2$	$p$	Pa
$H$	Energia por unidade de peso	$z$	$\frac{1}{2} v^2/g$	$p/\gamma$	m

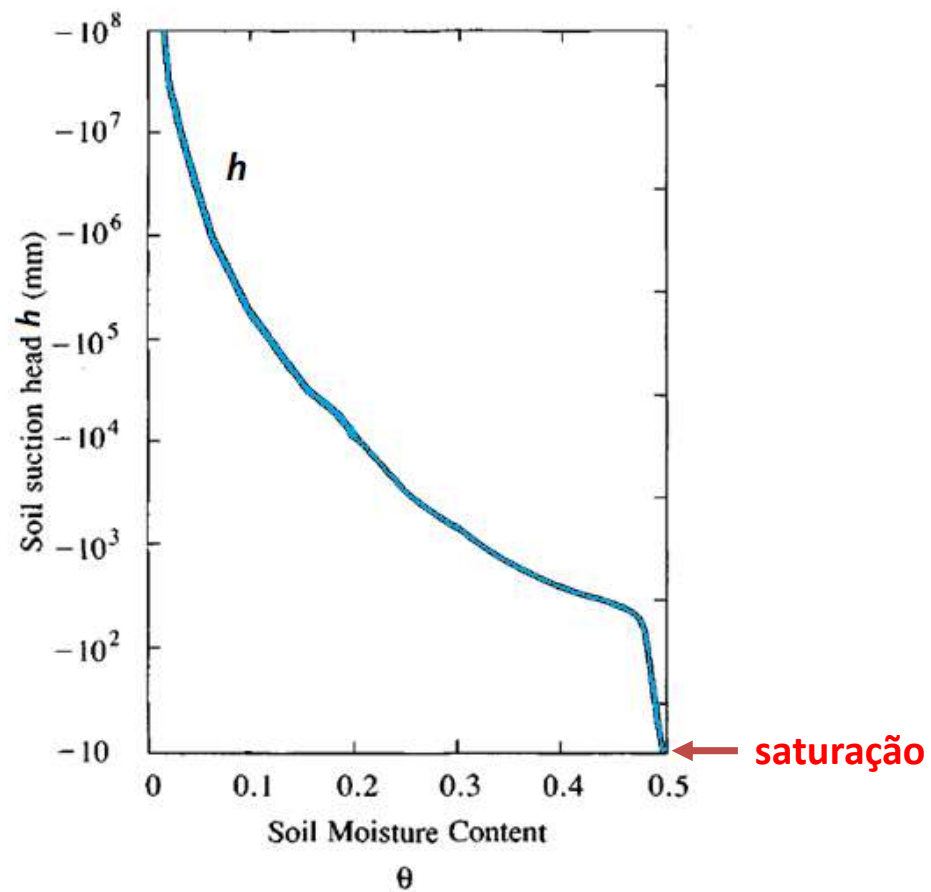
alturas



**Carga hidráulica**

$$H = z + h \left( + \cancel{v^2/2g} \right) \quad \text{despreza-se}$$

**Curva característica** – relaciona o teor de água com o potencial hídrico

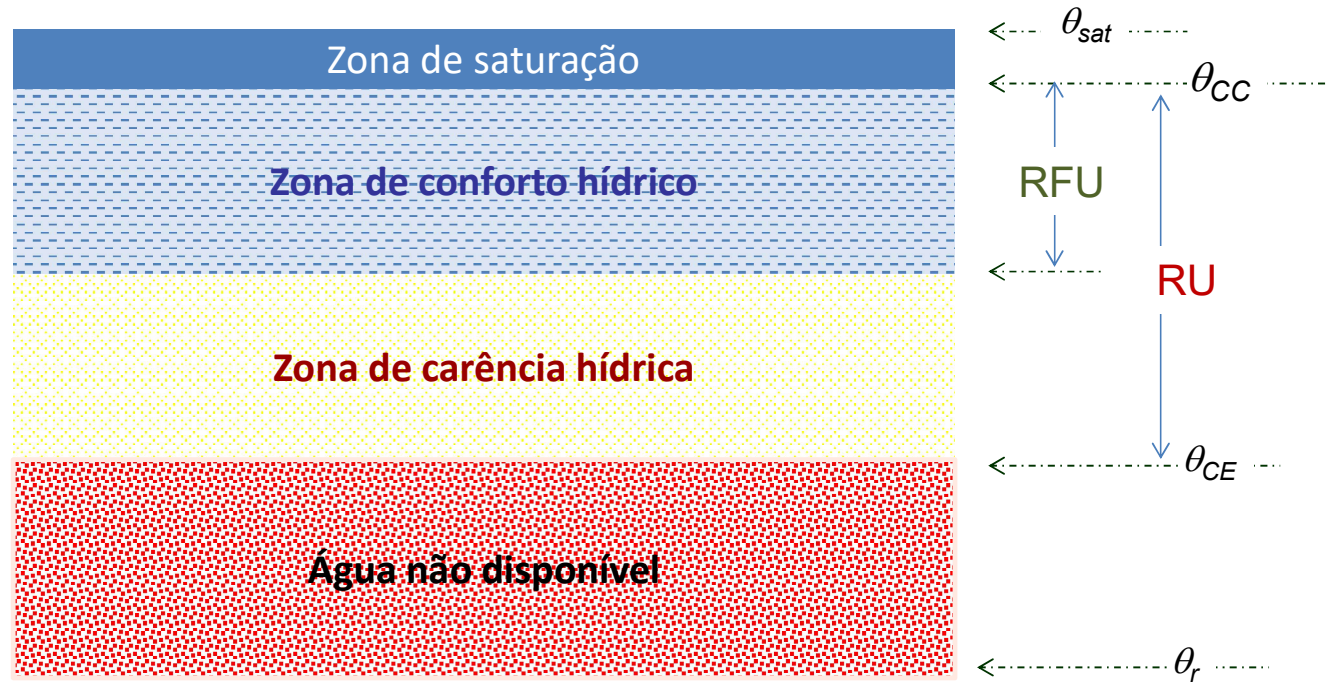


**Limite da reserva facilmente utilizável (LRFU):** valor mínimo da água no solo abaixo do qual a planta entra em situação de carência hídrica

LRFU →

$$\text{LRFU} = \text{RU} - \text{RFU} = \text{RU}(1 - p)$$

### Água no solo



➤ **Reserva utilizável (RU, mm)**

$$\text{RU} = (\text{CC} - \text{CE}) \times 1000 \times z$$

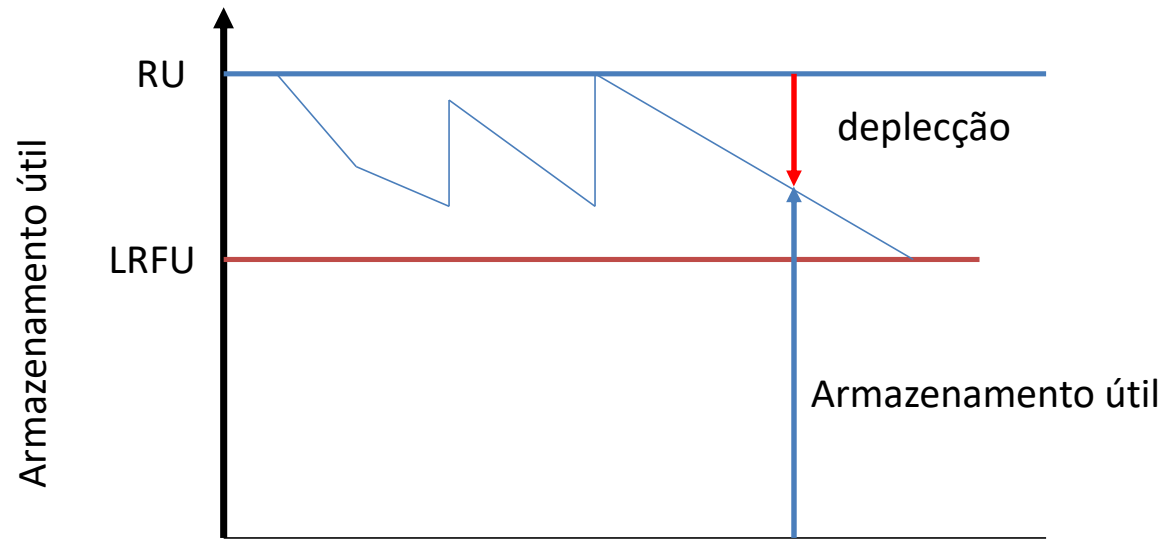
CC e CE em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  e z em m

➤ **Reserva facilmente utilizável (RFU, mm)**

parte da RU utilizada em situação de conforto hídrico das culturas

$$\text{RFU} = \text{RU} \times p$$

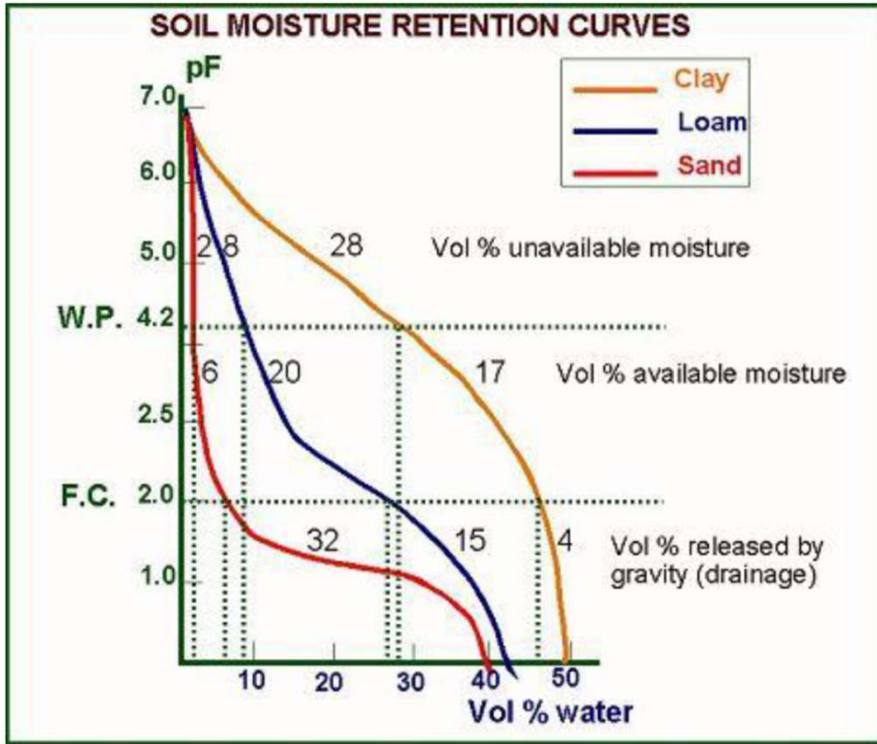
p é a fracção facilmente utilizável (adim)



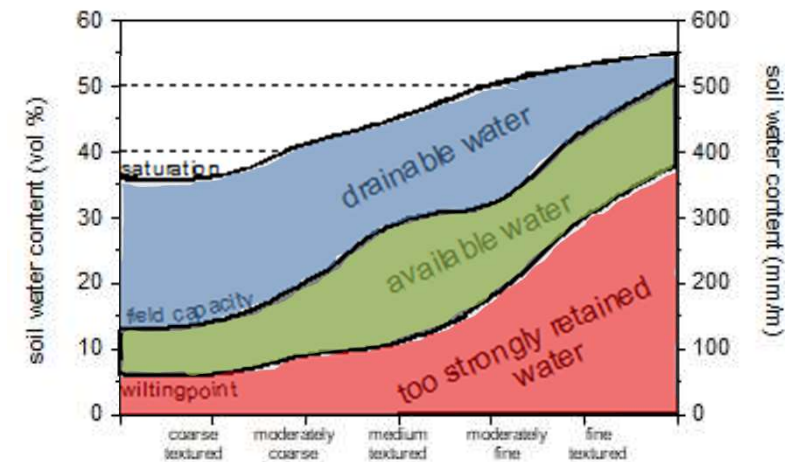
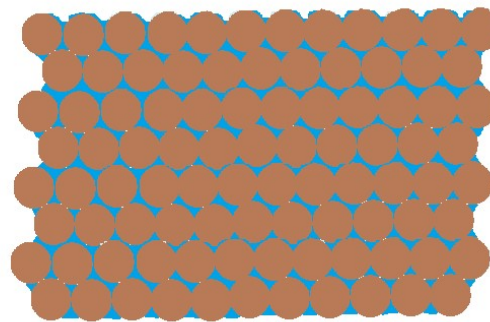
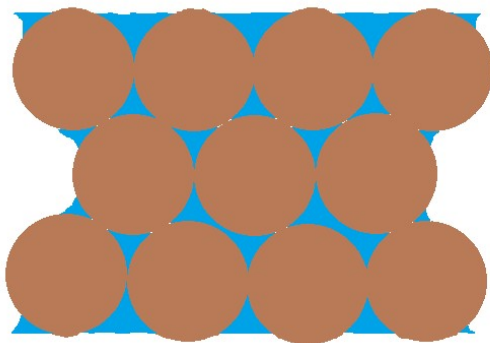
Armazenamento útil + deplecção = reserva utilizável

RU = TAW (*total available water*)  
RFU = RAW (*readily available water*)

Allen et al. (1998)

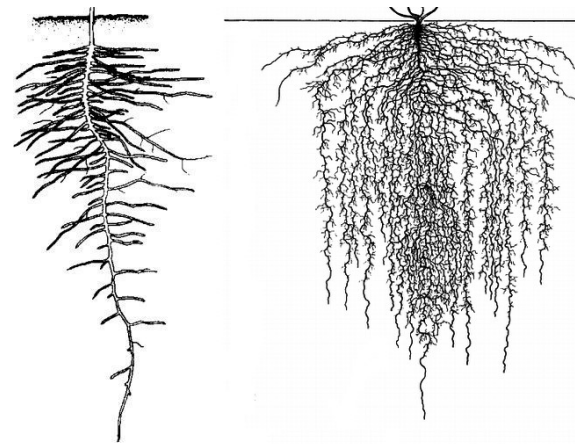


	$\theta_{CC}$	$\theta_{CE}$	$(\theta_{CC} - \theta_{CE})$
	$m^3/m^3$	$m^3/m^3$	$m^3/m^3$
Sand	0.07 - 0.17	0.02 - 0.07	0.05 - 0.11
Loamy sand	0.11 - 0.19	0.03 - 0.10	0.06 - 0.12
Sandy loam	0.18 - 0.28	0.06 - 0.16	0.11 - 0.15
Loam	0.20 - 0.30	0.07 - 0.17	0.13 - 0.18
Silt loam	0.22 - 0.36	0.09 - 0.21	0.13 - 0.19
Silt	0.28 - 0.36	0.12 - 0.22	0.16 - 0.20
Silt clay loam	0.30 - 0.37	0.17 - 0.24	0.13 - 0.18
Silty clay	0.30 - 0.42	0.17 - 0.29	0.13 - 0.19
Clay	0.32 - 0.40	0.20 - 0.24	0.12 - 0.20



A fracção facilmente utilizável ( $p$ ) varia com:

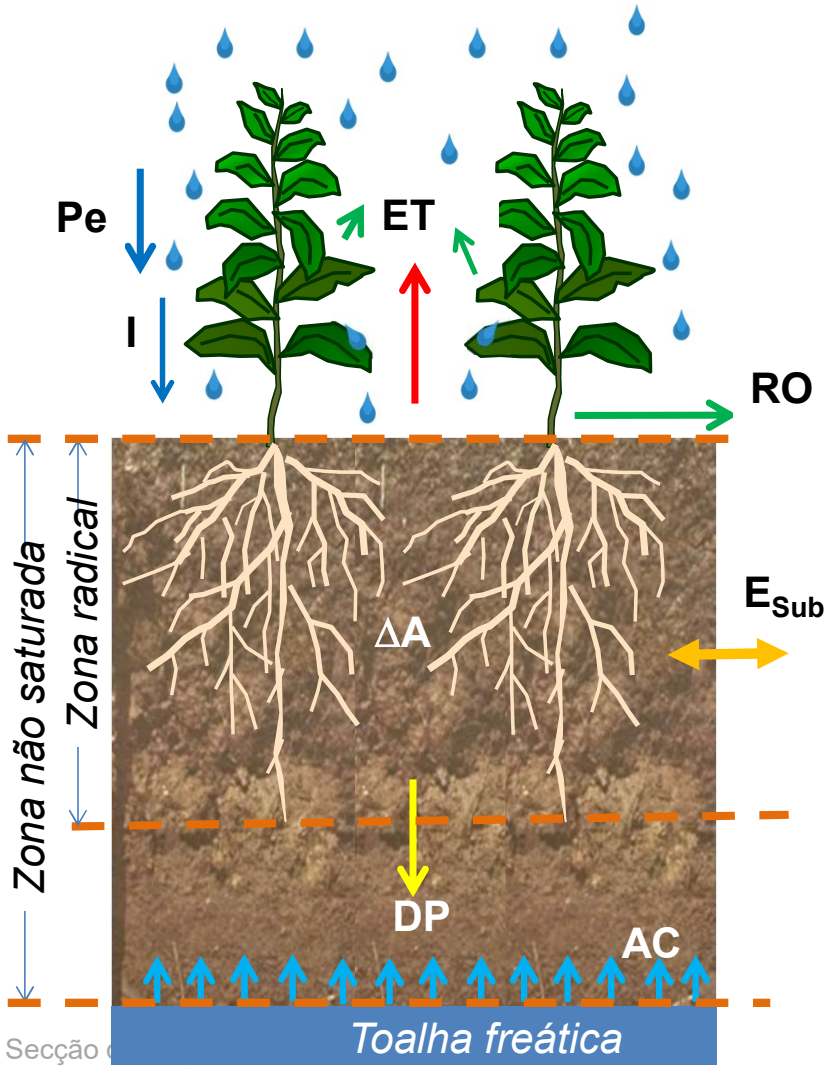
- Tipo de solo  $p$  pode ser diminuído 5-10% em solos argilosos e aumentado em solos arenosos
- Tipo de cultura
- Desenvolvimento radicular
- $ET_c$   $p = p_{\text{tabela}} + 0.04 (5 - ET_c)$





## Balanço hídrico na zona explorada pelas raízes

### Componentes do balanço hídrico na zona explorada pelas raízes



Variação do armazenamento = entradas – saídas

#### Entradas:

- $Pe$  – precipitação efectiva
- $I$  – rega
- $AC$  – ascensão capilar

#### Saídas:

- $RO$  – Escoamento superficial
- $DP$  – Percolação ou drenagem profunda
- $ETc$  – Evapotranspiração cultural       $ETc = Kc ETo$

$\Delta A$  – variação do armazenamento

$$\Delta A = A(t_2) - A(t_1)$$

$$A = \theta \times z$$

Todos os termos em mm

$$\Delta A = [Pe + I + AC - (RO + DP + ET)]_{1 \rightarrow 2}$$

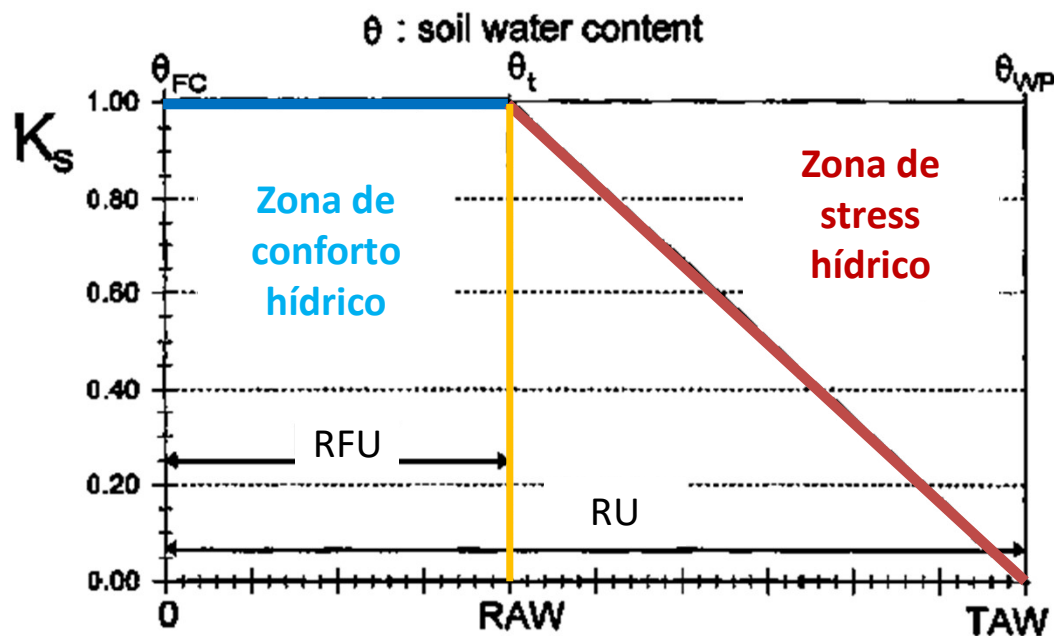
$$\text{Se } A_2 > A_{cc} \quad DP = A_2 - A_{cc}$$

➤ Quando **Dep < RFU**  
**A > LRFU**

$$K_s = 1$$

➤ Quando **Dep > RFU**  
**A < LRFU**

$$K_s = \frac{RU - D_p}{RU - RFU} = \frac{RU - D_p}{(1 - p) RU} = \frac{A}{LRFU}$$



$$ET_{adj} = K_s K_c ET_o = K_s ET_c$$

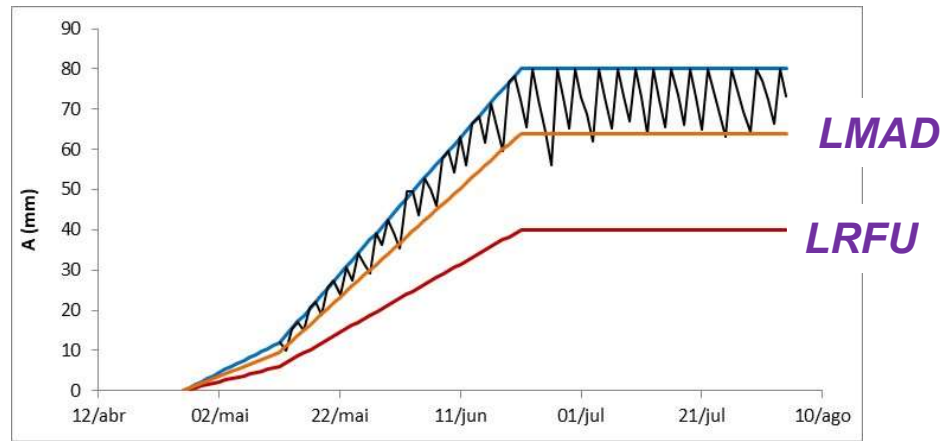
$$ET_{adj} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o$$



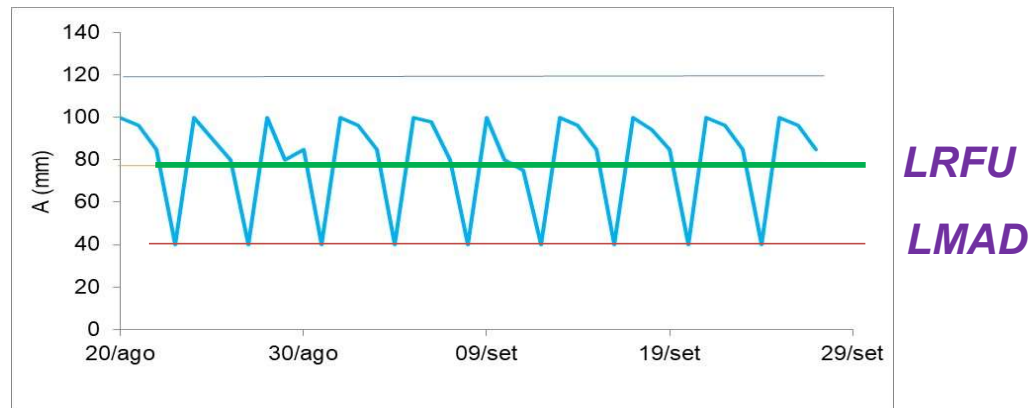
**MAD** (maximum allowed depletion)– depleção de gestão admitida

**MAD < RFU** - a cultura é mantida em conforto hídrico

Ex: condução da rega gota-a-gota com alta frequência e pequenas dotações; culturas muito sensíveis ao stress



**MAD > RFU** - a cultura é sujeita intencionalmente a stress hídrico



## Exercício

Estime para cada dia do período de 10 dias apresentado o armazenamento e a depleção de água no solo, considerando que no início, devido às precipitações, o solo estava à CC e que no fim do 8º dia é efectuada uma rega de 27 mm. Considere os seguintes dados adicionais:

$$\theta_{CC} = 0.21 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad \theta_{CE} = 0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad z_r = 0.4 \text{ m} \quad p = 0.3$$

Nota: ajuste o  $p$  de acordo com a  $ET_c$  do dia

Dia	$ET_c$ mm	P-RO mm	I mm	DP mm	$p$ -	RFU mm	A mm	Dep mm	$K_s$ -	$ET_{c,adj}$ mm
0	-	-	-	-	-	-				
1	5.3	0	0							
2	5.0	15	0							
3	5.3	0	0							
4	5.5	0	0							
5	5.4	0	0							
6	5.6	0	0							
7	5.8	0	0							
8	6.3	0	27							
9	5.7	0	0							
10	5.5	0	0							

## Resolução

$$\theta_{CC} = 0.21 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad \theta_{CE} = 0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad z_r = 0.4 \text{ m} \quad p = 0.3$$

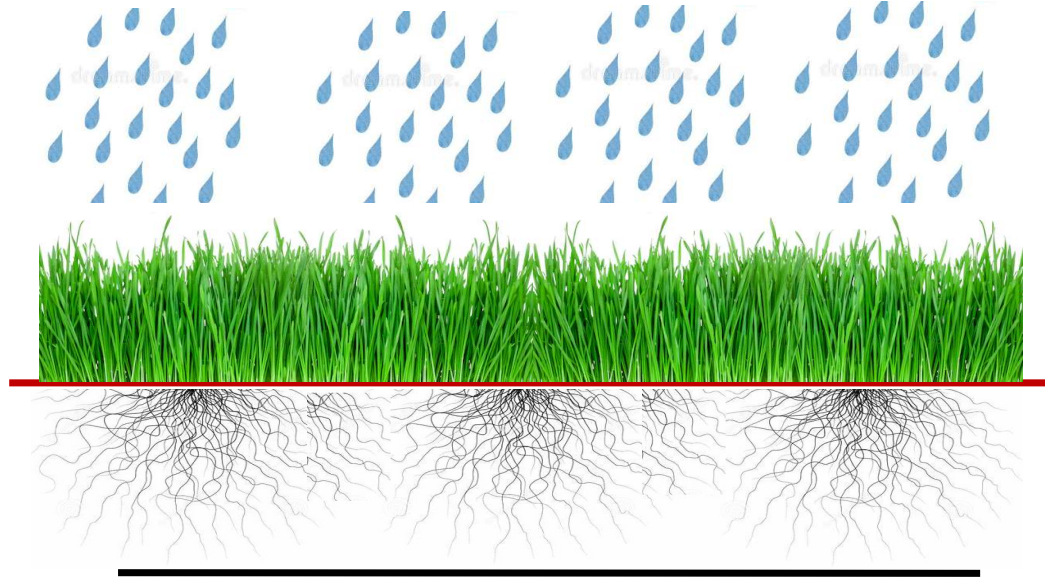
$$RU = (0.21 - 0.08) \times 400 = 52 \text{ mm}$$

Dia	ET <sub>c</sub> mm	P-RO mm	I mm	DP mm	p -	RFU mm	A(*) mm	Dep mm	K <sub>s</sub> -	ET <sub>c,adj</sub> mm
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	5.3	0	0		0.29	15.1	52.0	0.0	1.00	5.3
2	5.0	15	0	4.7	0.30	15.5	46.7	5.3	1.00	5.0
3	5.3	0	0		0.29	15.1	52.0	0.0	1.00	5.3
4	5.5	0	0		0.28	14.6	46.7	5.3	1.00	5.5
5	5.4	0	0		0.29	14.9	41.2	10.8	1.00	5.4
6	5.6	0	0		0.28	14.4	35.8	16.2	0.95	5.3
7	5.8	0	0		0.27	14.0	30.5	21.5	0.80	4.7
8	6.3	0	27		0.25	12.9	25.8	26.2	0.66	4.2
9	5.7	0	0		0.27	14.2	48.6	3.4	1.00	5.7
10	5.5	0	0		0.28	14.6	42.9	9.1	1.00	5.5

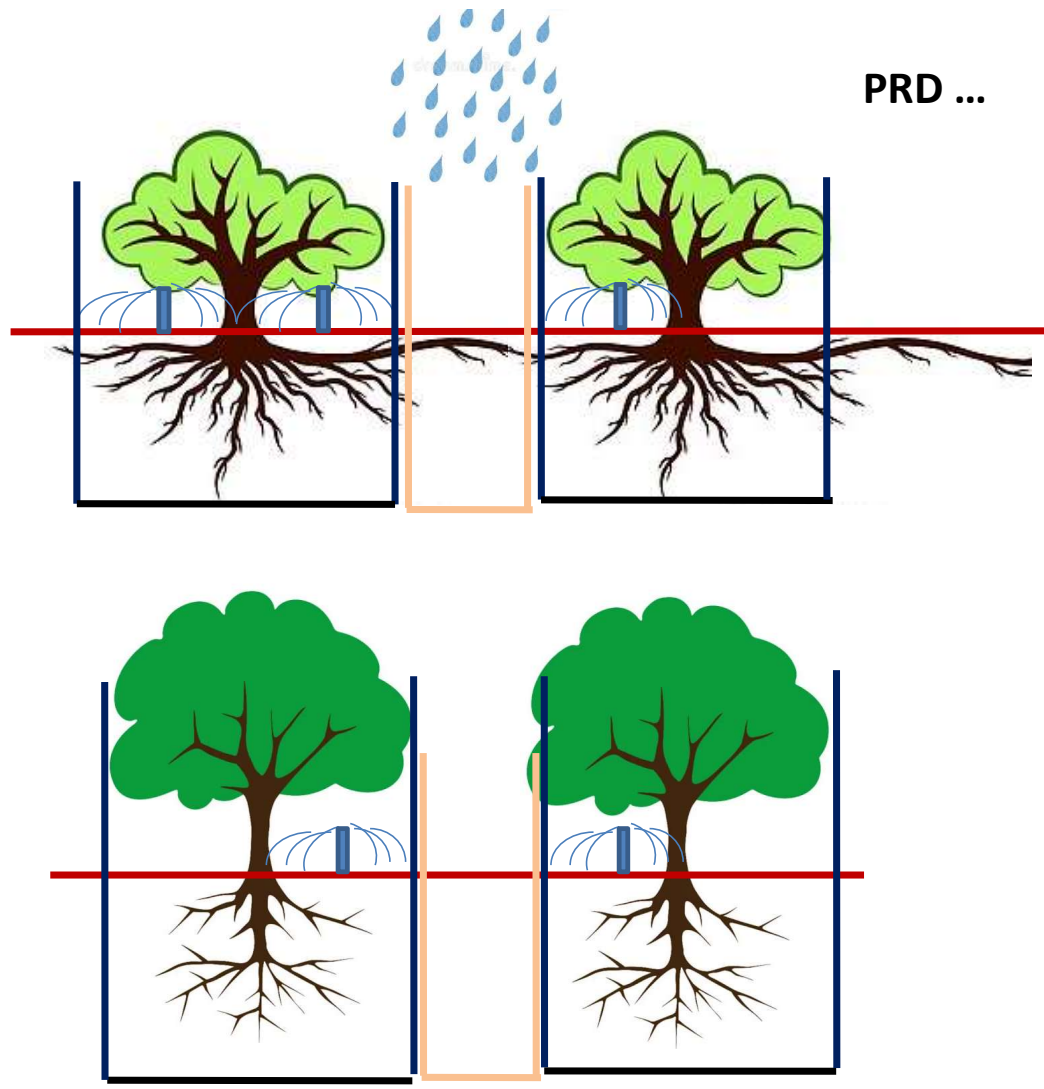
(\*) A no início do dia = A no final do dia anterior

# Balanço hídrico na zona explorada pelas raízes

- Precipitação
- Rega por aspersão



- Rega localizada



Na fase de desenvolvimento vegetativo, o sistema radicular também vai desenvolver-se em profundidade e a equação do balanço hídrico deve ser ajustada de forma a considerar o aumento do armazenamento devido ao aumento do volume de solo explorado

$$\Delta A = Pe + I + AC - (RO + DP + ET) + A_{\Delta z}$$

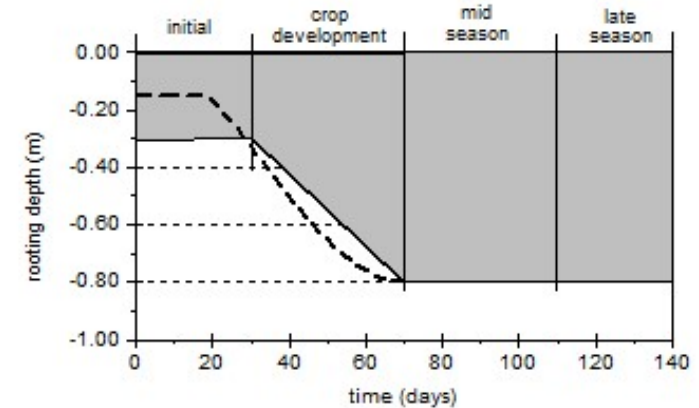
$$A_{\Delta z} = A_{SNE} * \Delta z_r$$

$A_{\Delta z}$  – aumento do armazenamento de água no solo devido à expansão das raízes (mm)

$A_{SNE}$  – armazenamento de água no solo ainda não explorado pelas raízes (mm/m) ( $= \theta - \theta_{CE} \times 1000$ )

$\Delta z_r$  – aumento da profundidade radicular durante o  $\Delta t$  considerado (m)

O teor de água no solo ainda não explorado pelas raízes pode ser obtido fazendo um balanço hídrico independente, mas muitas vezes encontra-se à CC.



Normalmente assume-se que a expansão do sistema radicular ocorre linearmente durante a fase de desenvolvimento

$$\Delta z_r = \frac{z_r \text{ máx} - z_r \text{ ini}}{L_{dev}} \Delta t$$

$z_r \text{ máx}$  – profundidade radicular máxima (no fim do período de desenvolvimento (m)

$z_r \text{ ini}$  – profundidade radicular no início do período de desenvolvimento (m)

$L_{dev}$  – duração do período de desenvolvimento (dias)

$\Delta t$  – passo de cálculo (dias)



## Necessidades de rega líquidas para o ciclo completo

$$\text{NRL} = \text{ET} - \text{Pe} + \text{RO} + \text{DP} - \text{AC} - \Delta\text{A}$$

**ET** – evapotranspiração da cultura na totalidade do ciclo

**Pe** – precipitação efectiva

**RO** – escoamento superficial

**DP** – drenagem

**AC** – ascensão capilar

**ΔA** – variação do armazenamento do solo entre o início e o final do ciclo

- Dimensionamento de reservatórios
- Programação da rega

## Exercício

Com base nos dados fornecidos (Dados\_BH\_ciclo.xls):

1. Calcular as necessidades de rega úteis anuais , com:

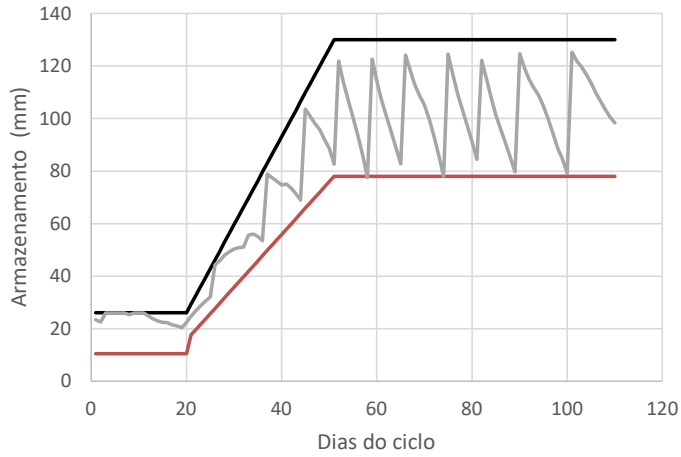
- $\theta_{CC} = 28\% \text{ (V/V)}$  ;  $\theta_{CE} = 15\% \text{ (V/V)}$  ;  $z_{r\ ini} = 20 \text{ cm}$   $z_{r\ máx} = 1 \text{ m}$
- à sementeira o armazenamento está a 90% da Reserva Utilizável do solo
- $p_{ini} = 0.6$  resto do ciclo  $p = 0.4$
- não se rega no mês de Setembro

2. Determine a relação  $ET_{adj} / ET_c$  obtida com a adopção de uma estratégia de rega em que apenas se fornece uma dotação correspondente a 70% de  $ET_c$  e:

- a) as regas são efectuadas nas mesmas datas em que seriam efectuadas para ausência de stress hídrico
- b) as regas são diárias

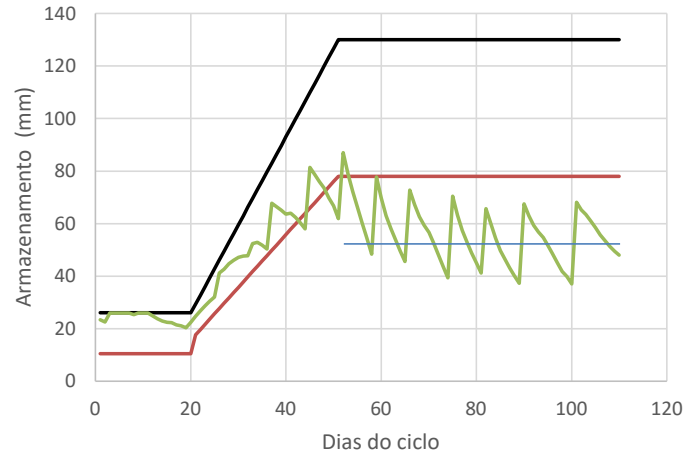


**Rega para 100% ET**



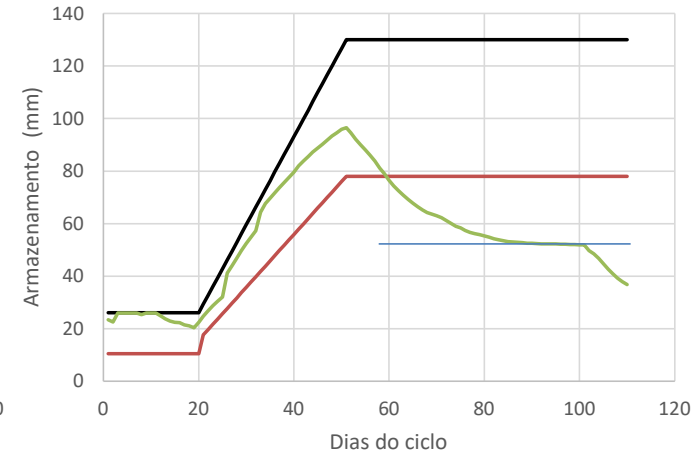
ET	472.7
P	60.5
DP	28.8
ΔA	20.7
Rega	420.3

**Rega 70% nas mesmas datas**



ET	400.8	<b>85%</b>
P	60.5	
DP	28.8	
ΔA	70.2	
Rega	298.9	<b>71%</b>

**Rega 70% todos os dias**



ET	414.7	<b>88%</b>
P	60.5	
DP	28.8	
ΔA	79.7	
Rega	303.4	<b>72%</b>

$$NRL = ET - (P_e - R_O) + DP - AC - \Delta A$$