



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA

® **M** Plataforma Moretti

Disciplina: Fundamentos de Hidrologia, Irrigação e Drenagem

# UNIDADE 8 – Movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera

**Prof. Jorge Luiz Moretti de Souza**

E-mail: [jmoretti@ufpr.br](mailto:jmoretti@ufpr.br)

<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/index.htm>

## **Objetivo da Unidade didática**

Identificar e caracterizar as principais variáveis, propriedades e atributos necessários ao entendimento de como ocorre o **movimento** da água no sistema solo-planta-atmosfera.

# 1 CONSIDERAÇÕES

- Qualquer matéria no Universo move-se em direção à redução de sua energia potencial total;
- A água flui do solo à atmosfera sempre que houver decréscimo de potencial total no percurso solo-atmosfera;

## 1.1 Movimento da água no solo

- Unidades 4 tratou do equilíbrio da água no solo;
- Unidade 5 tratou da água em movimento da água no solo;
- $\psi = \psi_T + \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_{os}$
- Variação dos potenciais:
  - $\psi_g$ : 0 a -10 kPa (0 a -1 m)
  - $\psi_p$ : 0 e 10 kPa (0 a 1 m)
  - $\psi_m$ : 0 a -2000 kPa (-200 m).

## 1.2 Movimento da água na planta

- Para  $\psi$  igual em todos os pontos no solo, tem-se:

$$\psi_A = \psi_B = \psi_C = \dots$$

- Havendo  $\Delta\psi$  a água se movimenta conforme lei de Darcy:

$$q = -K \cdot \frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial\psi}{\partial x}$$

Sendo:  $q$  – densidade de fluxo de água na planta ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $K$  – condutividade hidráulica ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $\partial\psi / \partial x$  – gradiente de potencial ou diferencial parcial do potencial total em relação a  $x$  (adimensional);  $r$  – resistividade hidráulica ( $\text{dia mm}^{-1}$ ).

- Devido à dificuldade de medir o gradiente de potencial total ( $\text{grad } \psi$ ) dentro da planta, os fisiologistas vegetais utilizam equações diferentes:

$$q = -K \cdot \frac{\Delta\psi}{\Delta x} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\Delta\psi}{\Delta x}$$

$$\text{Considerando: } R = r \cdot \Delta x$$

$$q = -\frac{\Delta\psi}{R}$$

Sendo:  $\Delta x$  – caminho percorrido pela água dentro da planta, que é tortuoso e difícil de ser medido;  $R$  – resistência a passagem da água ( $\text{s m}^{-1} \cdot \text{m} = \text{s}$ ).

## 1.3 Movimento da água na atmosfera

- O fluxo de vapor na atmosfera também é descrito com equação semelhante à de Darcy:

$$q = -K_m \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

Sendo:  $K_m$  – coeficiente empírico que inclui todos os processos de transferência do vapor.

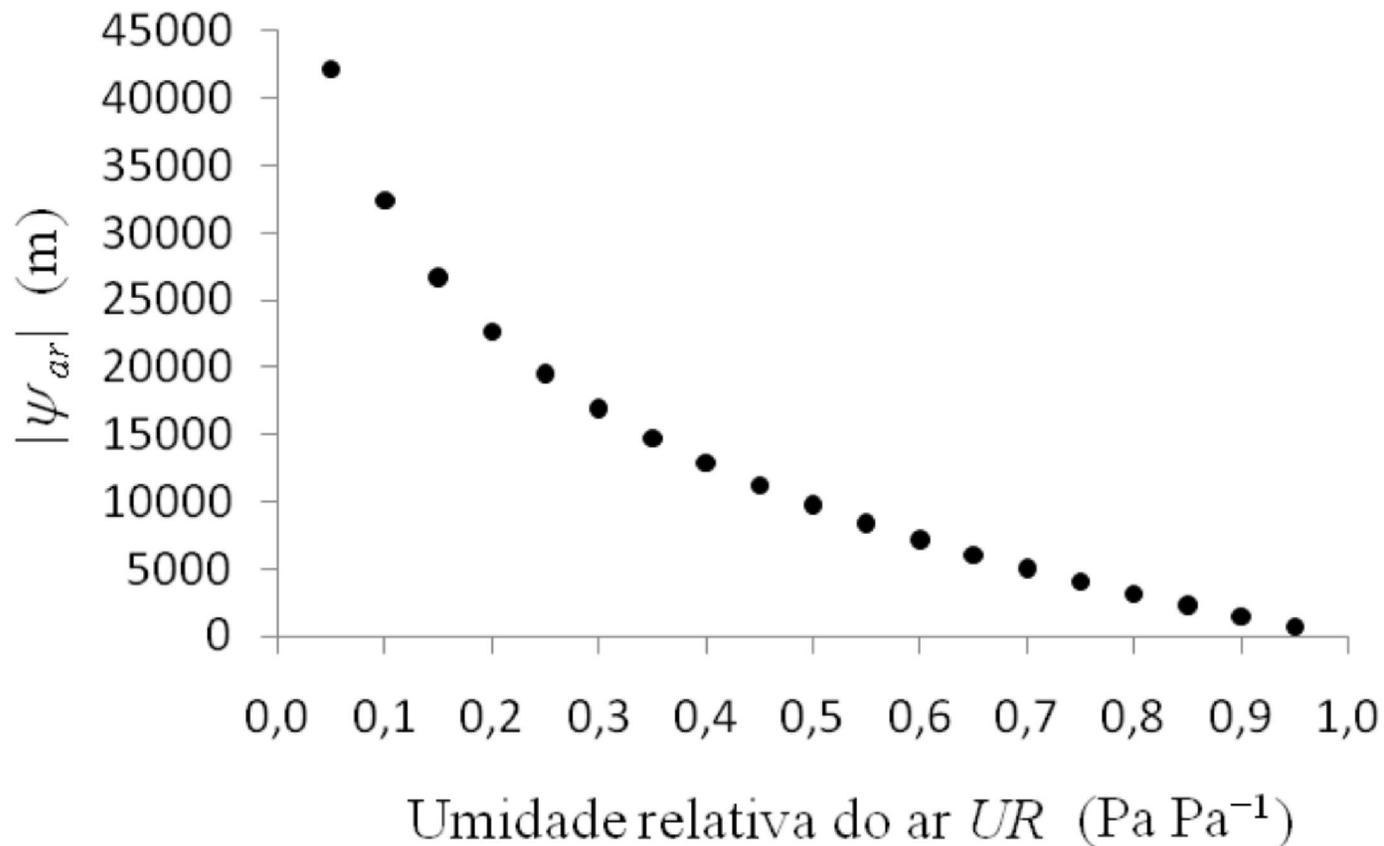
- Fenômeno é mais complicado, pois o vapor move-se em função do gradiente de potencial (grad.  $\psi$ ) e ventos;
- O estudo da transferência de vapor de água na atmosfera é complexo e não será visto na presente disciplina;
- A fundamentação teórica e dedução do potencial hídrico atmosférico ( $\psi_{ar}$ ) não é tão complicada, podendo ser calculado com a equação:

$$\psi_{ar} = \frac{R \cdot T}{\rho_a \cdot g \cdot v_a} \cdot \ln UR = \frac{8,314 \cdot T}{1000 \cdot 9,81 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} \cdot \ln UR = 47,1 \cdot T \cdot \ln UR$$

Sendo:  $\psi_{ar}$  – potencial hídrico atmosférico (m);  $R$  – constante universal dos gases ideais ( $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $T$  – temperatura absoluta (K);  $\rho_a$  – massa específica da água líquida ( $\rho_a = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ );  $g$  – aceleração da gravidade ( $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ );  $v_a$  – volume molar da água líquida ( $v_a = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ );  $UR$  – umidade relativa (Pa Pa<sup>-1</sup> ou adimensional).

**Exemplo 8.1** – Faça uma análise de sensibilidade, verificando a tendência do potencial hídrico atmosférico ( $\psi_{ar}$ ), quando a temperatura permanecer constante em 298 K e a umidade relativa ( $UR$ ) variar entre zero e 100%

Ex.:  $\psi_{ar} = 47,1 \cdot 298 \cdot \ln 0,5 = -9728,9 \text{ m}$  ou  $-97289 \text{ kPa}$  ou  $-972,9 \text{ atm}$



**Figura 8.1** – Análise de sensibilidade do potencial hídrico atmosférico ( $\psi_{ar}$ ) versus umidade relativa ( $UR$ ) à temperatura de 298 K.

## 2 MOVIMENTO DA ÁGUA NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA

- Reconhecimento do sistema solo-planta-atmosfera como um todo (década de 60): [Gardner \(1960\)](#), [Cowan \(1965\)](#) e [Philip \(1966\)](#);
- Dificuldade de diálogo entre as áreas: engenharia, fisiologia, etc;
- O fluxo da água pode ser descrito no sistema solo-planta-atmosfera com a equação:

$$q = - \frac{1}{r} \cdot \frac{\Delta\psi}{\Delta x}$$

$$q = - \frac{\Delta\psi}{R}$$

Sendo:  $q$  – densidade de fluxo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $\Delta\psi$  – variação do potencial total, incluindo as componentes que cabem para cada parte do sistema entre dois pontos (m);  $\Delta x$  – variação da distância de separação entre dois pontos (m);  $r$  – resistividade da água no meio, igual ao inverso da condutividade hidráulica  $1 / K$  ( $\text{s m}^{-1}$ );  $R$  – resistência do sistema solo-planta-atmosfera ao fluxo de água.

- Considerações sobre a Equação:
  - O fluxo, em qualquer ponto em um sistema, é inversamente proporcional a uma resistência;
  - Idêntica à Primeira Lei de Ohm, que se aplica à eletricidade.

Exemplo 8.2 – Na Figura 8.2 encontra-se esquematizado o sistema solo-planta-atmosfera, indicando as resistências da mesma forma com se faz em circuitos elétricos.

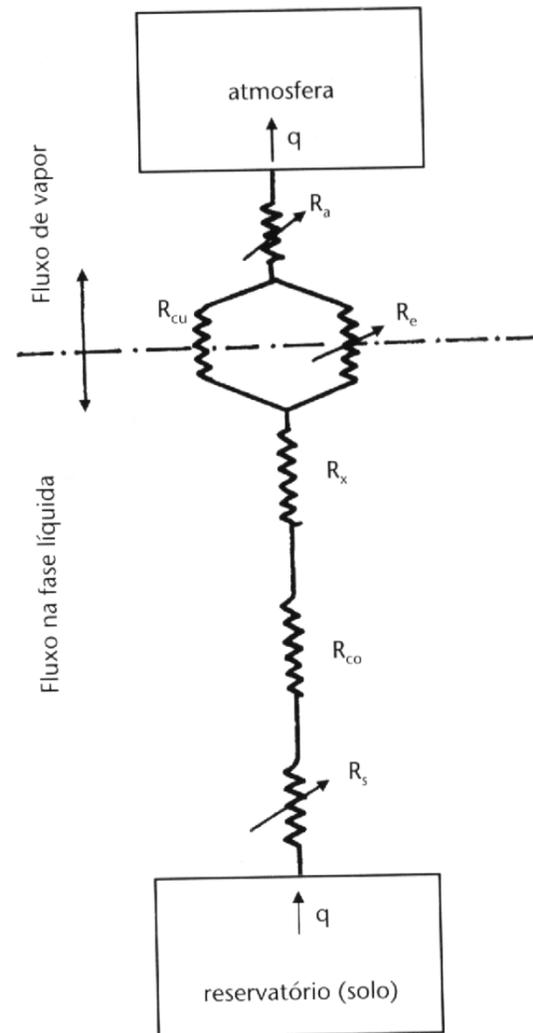


Figura 8.2 – Resistências ao fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera.

- Como o fluxo é considerado em equilíbrio dinâmico (*steady-state*),  $q$  deve ser constante em qualquer ponto:

$$q = \frac{\Delta\psi_s}{R_s} = \frac{\Delta\psi_{co}}{R_{co}} = \frac{\Delta\psi_x}{R_x} = \frac{\Delta\psi_f}{R_f} = \frac{\Delta\psi_a}{R_a}$$

Sendo:  $q$  – fluxo da água no sistema solo-planta-atmosfera;  $\Delta\psi_s$ ,  $\Delta\psi_{co}$ ,  $\Delta\psi_x$ ,  $\Delta\psi_f$ ,  $\Delta\psi_a$  – diferenças de potencial no solo, córtex, xilema, folha e ar, respectivamente;  $R_s$ ,  $R_{co}$ ,  $R_x$ ,  $R_f$ ,  $R_a$  – resistências no solo, córtex, xilema, folha e ar, respectivamente.

$$\frac{1}{R_f} = \frac{1}{R_{cu}} + \frac{1}{R_e}$$

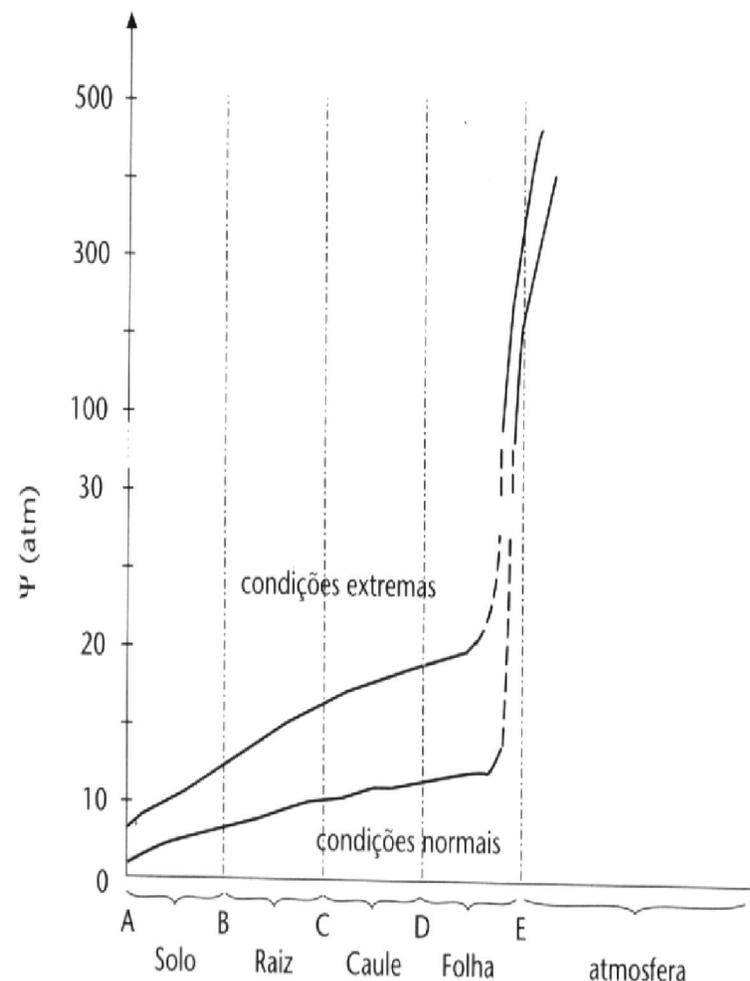


Figura 8.3 – Distribuição aproximada dos potenciais no sistema solo-planta-atmosfera.

- Condição em que a taxa de transpiração  $q$  é igual ao fluxo na planta e igual à absorção pelas raízes:

$$q = \frac{\Delta\psi_{solo}}{R_{solo}} = \frac{\Delta\psi_{planta}}{R_{planta}} = \frac{\Delta\psi_{atmosfera}}{R_{atmosfera}}$$

- Ordem de grandeza das variações de potenciais em condições normais

$\Delta\psi_{solo} = -100 \text{ kPa a } -300 \text{ kPa } (-10 \text{ a } -30 \text{ m ou } -1 \text{ a } -3 \text{ atm});$

$\Delta\psi_{planta} = -100 \text{ kPa a } -1000 \text{ kPa } (-10 \text{ a } -100 \text{ m ou } -1 \text{ a } -10 \text{ atm});$  e,

$\Delta\psi_{atmosfera} = -2000 \text{ kPa a } -50000 \text{ kPa } (-200 \text{ a } -5000 \text{ m ou } -20 \text{ a } -500 \text{ atm}).$

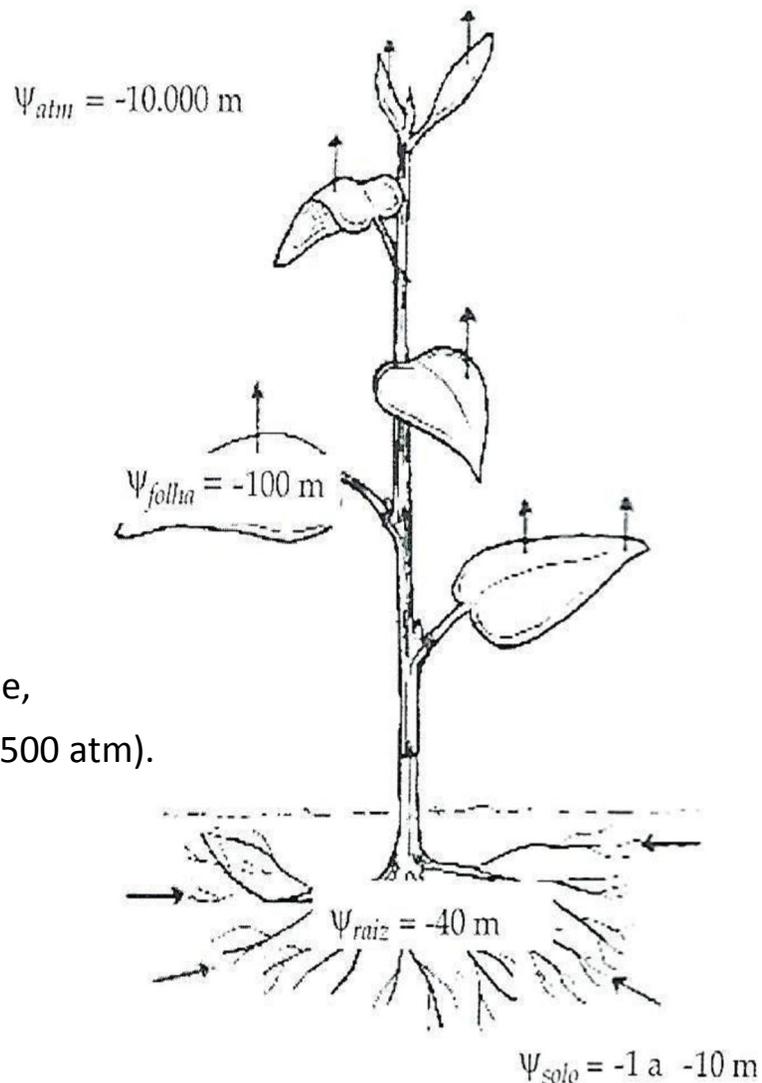
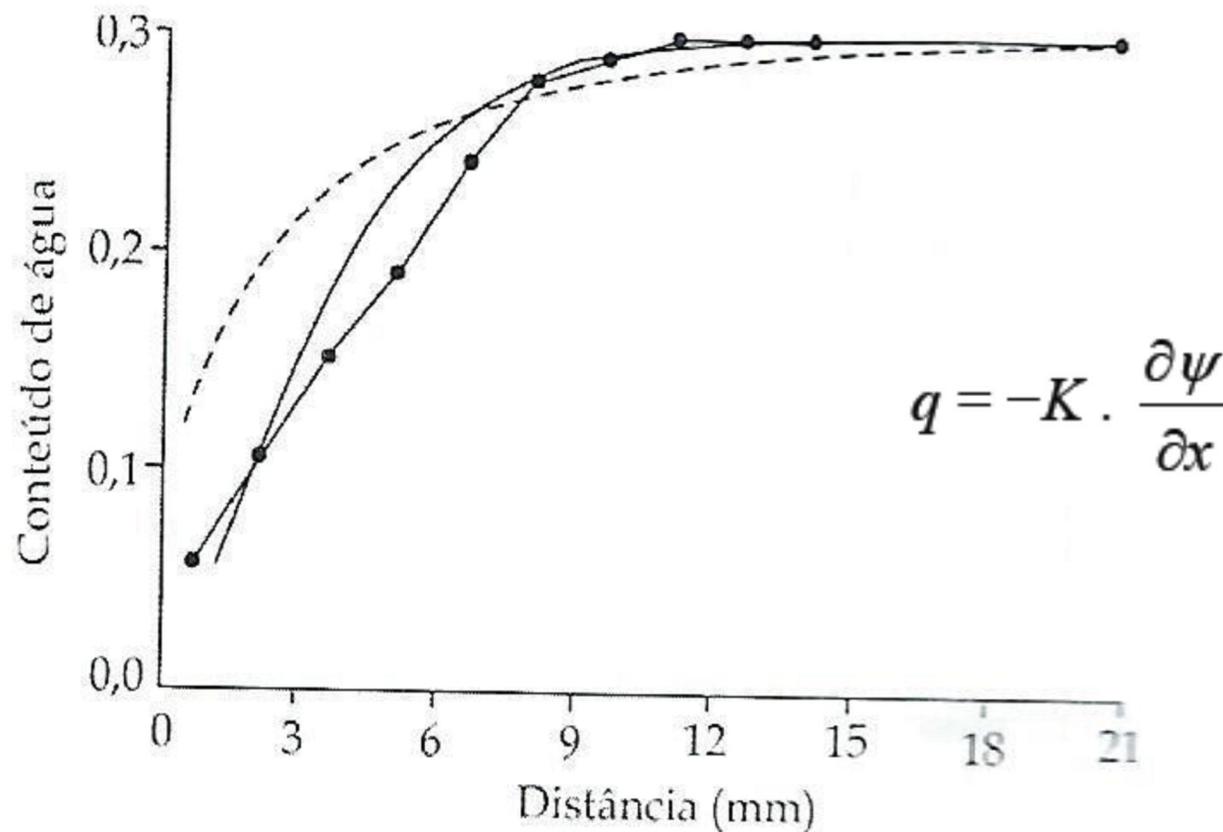


Figura 8.4 – Ordem de grandeza dos potenciais da água no sistema solo-raiz-folha-atmosfera.

## 2.1 Interação solo e raiz

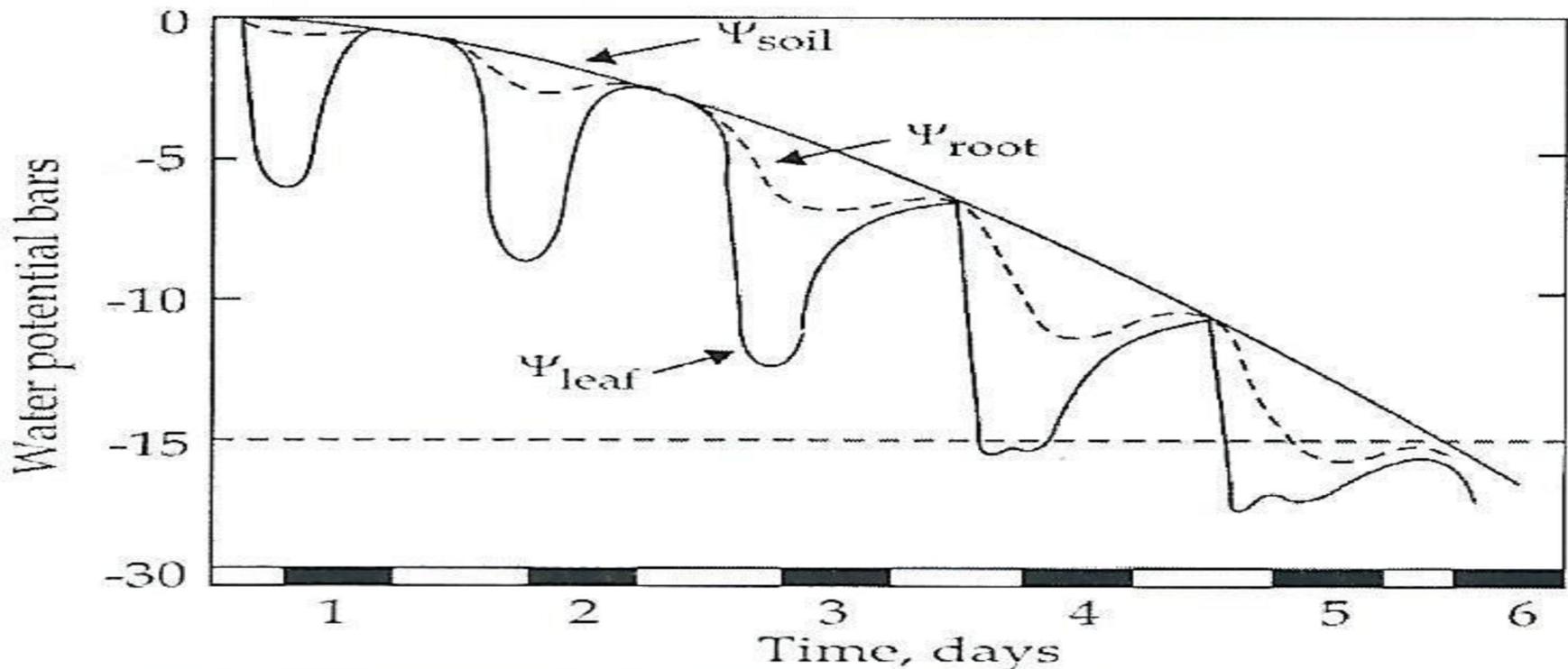
**Exemplo 8.3** – Na Figura 8.5 encontram-se valores de umidade volumétrica na proximidade da raiz singular de rabanete. As medidas foram realizadas com o auxílio da técnica de tomografia computadorizada com raios-X, sendo possível observar que:



**Figura 8.5** – Conteúdo de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) versus distância (mm) da raiz de rabanete (*Raphanus sativus*), para as condições: dados experimentais (linha contínua com ponto); e, dados resultantes de simulação com modelos (linha contínua sem ponto e tracejada).

## 2.2 Interação solo, raiz e folha

**Exemplo 8.4** – Para ilustrar e exemplificar a tendência da demanda por água ao longo do dia e entre os dias, desde as condições iniciais úmidas até condições finais secas, serão apresentadas as considerações dispostas no trabalho de [Slatyer \(1967\)](#) ([Figura 8.6](#)), referentes às relações potencial da água vs tempo para a água no solo ( $\psi_{solo}$ ), raiz ( $\psi_{raiz}$ ) e folha ( $\psi_{folha}$ ). As barras brancas e pretas na abscissa indicam períodos diurnos e noturnos, respectivamente, ao longo de seis dias.



**Figura 8.6** – Potencial da água (bar) versus tempo (dia) para a água no solo ( $\psi_{soil}$ ), raiz ( $\psi_{raiz}$ ) e na folha ( $\psi_{folha}$ ), desde as condições iniciais úmidas até condições finais secas ([Slatyer, 1967](#)).

### **3 REFERÊNCIAS**

**KIRKHAM, M. B. Principles of soil and plant water relations.** California: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2005. 484p.

**REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1986. 188p.

**REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** Barueri: Manole, 2012. 500 p.

**SLATYER, R. O. Plant-water relationships.** London: Academic Press, 1967. 298p.

**VAN LIER, Q. J. (ed.) Física do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298p.

**FIM**