

## ÁGUA NO SOLO: CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO

A água é um componente essencial para todos os seres vivos. Embora seja uma das mais simples substâncias químicas da natureza, possui propriedades únicas que promovem uma ampla variedade de processos físicos, químicos e biológicos. Estes processos influenciam consideravelmente quase todos os aspectos do desenvolvimento e comportamento do solo, desde o intemperismo dos minerais à decomposição da matéria orgânica e, do crescimento das plantas à contaminação do lençol freático.

A água é familiar a todos nós. Nós bebemos, lavamos, nadamos e irrigamos nossas culturas com ela. Mas a água que bebemos é completamente diferente da água no solo. No solo, a água está intimamente associada com partículas sólidas, particularmente àquelas de tamanho coloidal. A interação entre água e sólidos do solo altera o comportamento de ambos.

A água promove a expansão e contração das partículas do solo, a aderência e a formação estrutural dos agregados. A água participa de inúmeras reações químicas que liberam ou retêm nutrientes, criam acidez ou intemperizam minerais de modo que seus elementos constituintes eventualmente contribuem para a salinidade dos oceanos.

A atração às superfícies sólidas restringe o movimento livre das moléculas de água, proporcionando um comportamento menos líquido e mais sólido. No solo, a água pode movimentar-se tanto ascendente quanto descendente. As plantas podem murchar e morrer em um solo cujo perfil contenha um milhão de quilos de água por hectare. Uma camada de areia e cascalho no perfil do solo pode inibir a drenagem, tornando os horizontes superficiais saturados durante grande parte do ano. Estes e outros fenômenos da água no solo parecem contradizer nossos conhecimentos sobre o comportamento da água.

As interações solo - água influenciam muitas funções ecológicas e práticas de manejo do solo. Estas interações determinam quanto da água da chuva infiltra através do solo ou escorre sobre sua superfície. O controle desses processos determina o movimento de substâncias químicas para os lençóis subterrâneos e de substâncias químicas e partículas erodidas para rios e lagos. As interações afetam a taxa de água perdida através da lixiviação e evapotranspiração, o balanço entre ar e água nos poros do solo, a taxa de variação na temperatura do solo, a taxa e o tipo de metabolismo dos organismos do solo e a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água para as plantas.

Os princípios apresentados neste capítulo são fundamentais para um conhecimento do funcionamento do sistema solo.

### **2.1. Estrutura e Propriedades da Água**

A habilidade da água em influenciar diversos processos do solo é determinada principalmente pela sua estrutura molecular. Esta estrutura também é responsável pelo fato de que a água é um líquido, e não um gás em temperaturas encontradas na Terra. A água é, com exceção do mercúrio, a única substância inorgânica (sem carbono) líquida encontrada na Terra. A água é um composto simples, suas moléculas individuais contêm um átomo de oxigênio e dois átomos de hidrogênio muito menores. Os elementos são ligados covalentemente, cada átomo de hidrogênio compartilhando seu único elétron com o oxigênio.

#### ***Polaridade***

O arranjo dos três átomos na molécula de água não é simétrico. Ao invés dos átomos estarem alinhados linearmente (H-O-H), os átomos de hidrogênio são ligados ao oxigênio em um arranjo em

forma de V com um ângulo de apenas 105°. Como mostrado na Figura 2.1, isto resulta em uma molécula assimétrica com os pares de elétrons compartilhados passando mais tempo próximos ao oxigênio do que ao hidrogênio. Consequentemente, a molécula da água exibe polaridade, isto é, as cargas não são igualmente distribuídas. Pelo contrário, o lado no qual os átomos de hidrogênio estão localizados tende a ser eletropositivo e o lado oposto eletronegativo. O fato de que a água é constituída de moléculas polares é responsável por muitas propriedades que fazem com que ela desempenhe funções únicas no ambiente do solo.

A polaridade ajuda a explicar como moléculas de água interagem entre si. Cada molécula de água não atua independentemente, mas está ligada a outras duas moléculas vizinhas. O hidrogênio (positivo) na extremidade de uma molécula atrai o oxigênio (negativo) de outra, resultando em um agrupamento em cadeia (polímero). Devido a união de suas moléculas, a água tem um ponto de ebulição alto, quando comparado a outros líquidos de baixo peso molecular (por exemplo, álcool metílico).

A polaridade também explica porque moléculas de água são atraídas por íons carregados eletrostaticamente e à superfícies coloidais. Cátions tais como  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  e  $Ca^{2+}$  tornam-se hidratados devido a sua atração pelo oxigênio (negativo) na extremidade da molécula de água. Do mesmo modo, superfícies de argila carregadas negativamente atraem a água, através do hidrogênio (positivo) na extremidade da molécula. A polaridade também promove a dissolução de sais na água, pelo fato de que os componentes iônicos têm maior atração pelas moléculas de água do que entre si.

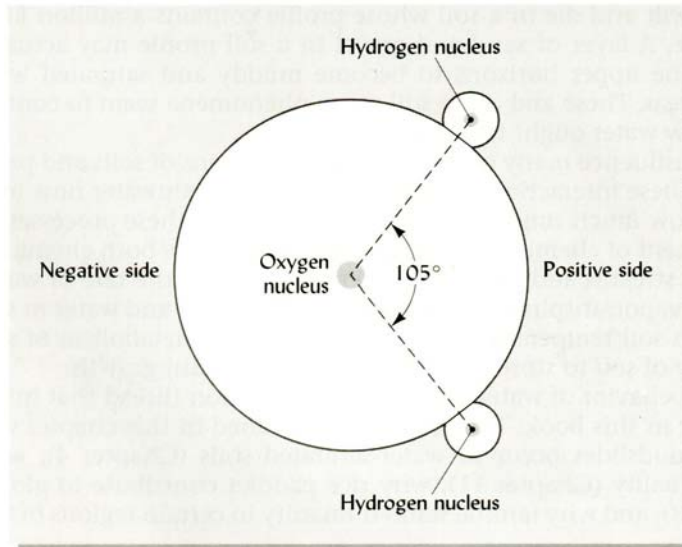
Quando moléculas de água são atraídas por íons carregados eletrostaticamente ou pelas superfícies das partículas de argila, elas se tornam mais próximas do que na água pura. Neste estado de arranjo seu movimento livre é restrito e seu estado de energia é menor do que na água pura. Assim, quando íons ou partículas de argila tornam-se hidratados, energia deve ser liberada. Esta liberação de energia é evidenciada como o calor de solução, quando íons são hidratados, ou como calor de umedecimento, quando as partículas de argila são umedecidas. Este último fenômeno pode ser demonstrado colocando-se um pouco de argila seca na palma da mão e adicionando algumas gotas de água, um pequeno aumento na temperatura pode ser sentido.

### ***Pontes de Hidrogênio***

Através das pontes de hidrogênio, um átomo de hidrogênio pode ser compartilhado entre dois átomos eletronegativos tais como O e N, formando uma ligação de relativamente baixa energia. Devido à sua alta eletronegatividade, um átomo de oxigênio em uma molécula de água exerce atração pelo átomo de hidrogênio na molécula vizinha. Este tipo de ligação é responsável pela polimerização da água. As pontes de hidrogênio também são responsáveis pelos altos, ponto de ebulição, calor específico e viscosidade da água, em comparação com as mesmas propriedades de outros compostos hidrogenados, tais como  $H_2S$ , que possui alto peso molecular mas não apresenta pontes de hidrogênio. Estas pontes também são responsáveis pela rigidez estrutural de alguns cristais de argila e pela estrutura de alguns compostos orgânicos, tais como proteínas.

### ***Coesão versus adesão***

As pontes de hidrogênio determinam as duas forças básicas responsáveis pela retenção e movimento da água no solo: a atração entre moléculas de água (coesão) e atração das moléculas de água pelas superfícies sólidas (adesão). Pela adesão (também chamada adsorção), algumas moléculas de água são firmemente retidas nas superfícies das partículas sólidas do solo. Por sua vez, estas moléculas de água retidas por adesão retêm por coesão outras moléculas de água mais distantes das superfícies sólidas (Figura 2.2). Juntas, as forças de adesão e coesão tornam possível que as partículas sólidas do solo retenham água, controlando seu movimento e uso. A adesão e coesão também tornam possível a plasticidade das argilas.



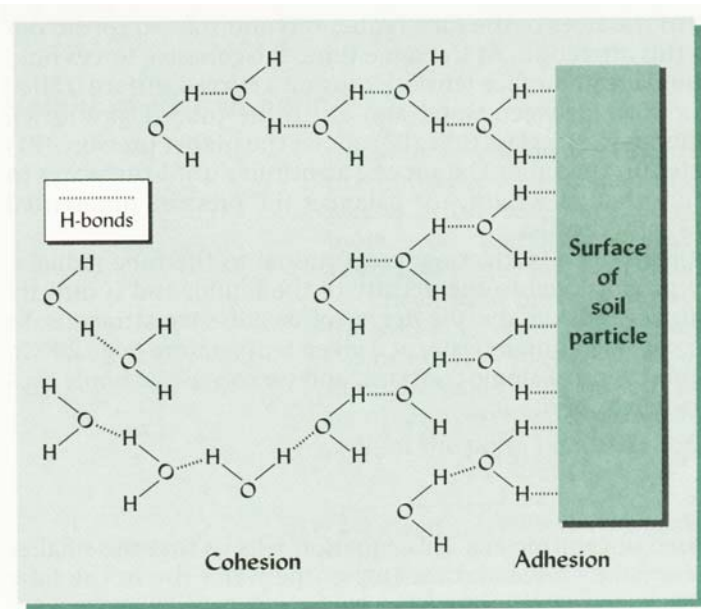
**FIGURA 2.1** Representação bidimensional de uma molécula de água mostrando um grande átomo de oxigênio e dois átomos de hidrogênio muito menores. O ângulo H-O-H de  $105^\circ$  resulta em um arranjo assimétrico. Um lado da molécula de água (com dois hidrogênios) é eletropositivo e o outro eletronegativo. Isto explica a polaridade da água.

### ***Tensão superficial***

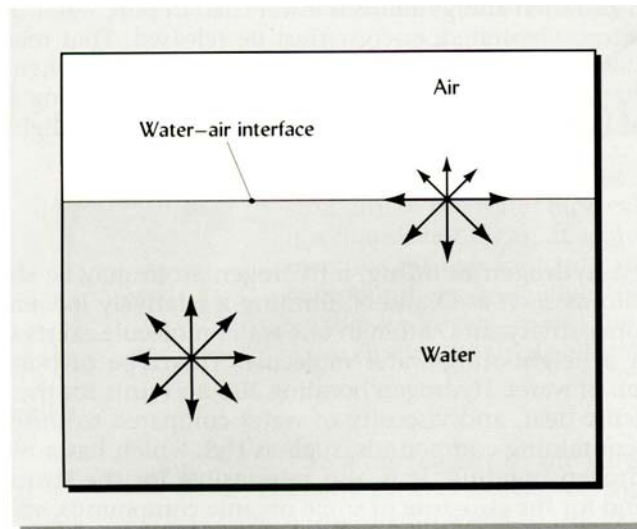
Outra importante propriedade da água, que influencia seu comportamento nos solos é a tensão superficial. Esta propriedade é normalmente evidenciada nas interfaces líquido - ar e resulta da maior atração das moléculas de água umas pelas outras (coesão) do que pelo ar (Figura 2.3). A tensão superficial é uma força que atua na superfície, em direção ao líquido, que faz com que a água se comporte como se sua superfície fosse coberta com uma membrana elástica, o que pode ser facilmente constatado observando-se insetos caminhando sobre a água em um lago (Figura 2.4). Devido a atração relativamente alta entre moléculas, a água apresenta uma alta tensão superficial ( $72,8 \text{ N/mm}$  a  $20^\circ\text{C}$ ) quando comparada com a maioria dos outros líquidos (por exemplo, álcool etílico,  $22,4 \text{ N/mm}$ ). Como veremos, a tensão superficial é um fator importante no fenômeno da capilaridade, o qual determina como a água se move e é retida no solo.

## **2.2 Fundamentos da Capilaridade e Água no Solo**

O movimento ascendente da água num tubo capilar representa o fenômeno da capilaridade. Duas forças são responsáveis pela capilaridade: (1) atração da água por superfícies sólidas (adesão ou adsorção) e (2) tensão superficial da água, que é em grande parte devida à atração entre as moléculas de água (coesão).



**FIGURA 2.2** As forças de coesão (entre moléculas de água) e adesão (entre água e superfícies sólidas) em um sistema solo - água. Essas forças são, em grande parte, resultado das pontes de hidrogênio representadas pelas linhas pontilhadas. A força de adesão ou adsorção diminui rapidamente com a distância da superfície sólida. A coesão entre moléculas de água resulta na formação de agrupamentos temporários que estão constantemente mudando de tamanho e forma, a medida que moléculas individuais de água são liberadas ou se unem à outras. A coesão entre moléculas de água também faz com que a fase sólida restrinja indiretamente a liberdade do movimento da água até determinada distância, além da interface sólido - líquido.



**FIGURA 2.3** Forças comparativas atuando nas moléculas de água na superfície e abaixo dela. As forças que atuam abaixo da superfície são iguais em todas as direções, pelo fato de que cada molécula de água é igualmente atraída por todas moléculas vizinhas. Entretanto, na superfície a atração do ar pelas moléculas de água é muito menor do que das moléculas de água entre si. Consequentemente, há uma força descendente nas moléculas superficiais que resulta em um efeito semelhante à um filme comprimido ou membrana contrátil. Este fenômeno é chamado *tensão superficial*.

## Mecanismo da Capilaridade

A capilaridade pode ser demonstrada colocando-se a extremidade de um tubo fino de vidro, limpo, na água. A água subirá no tubo; quanto menor o diâmetro do tubo maior a altura de ascensão. As moléculas de água são atraídas pelas paredes do tubo (adesão) e começam a se espalhar ao longo da superfície de vidro em resposta a esta atração. Ao mesmo tempo, as forças coesivas mantêm as moléculas de água unidas e criam uma tensão superficial, causando uma curvatura da superfície (menisco), na interface entre água e ar (Figura 2.5c). A menor pressão sob o menisco (P2) permite que a maior pressão (P1) sobre a água livre empurre a água através do tubo. O processo continua até que a água no tubo tenha se erguido o suficiente para que seu peso equilibre a diferença de pressão através do menisco (para maiores detalhes veja o Quadro 2.1).

A altura de ascensão em um tubo capilar é inversamente proporcional ao raio  $r$  do tubo. A ascensão capilar é também inversamente proporcional a densidade do líquido  $\rho$ , diretamente proporcional à tensão superficial do líquido  $\sigma$  e ao grau de atração adesiva à superfície sólida. Se considerarmos o líquido como sendo água, a 20°C, podemos usar uma equação simples para calcular a altura de ascensão capilar  $h$ :

$$h = \frac{0,15}{r}$$

Onde  $h$  e  $r$  são expressos em centímetros. Esta equação evidencia que quanto menor o diâmetro do tubo, maior a força capilar, e maior a ascensão da água no tubo (Figura 2.6a).

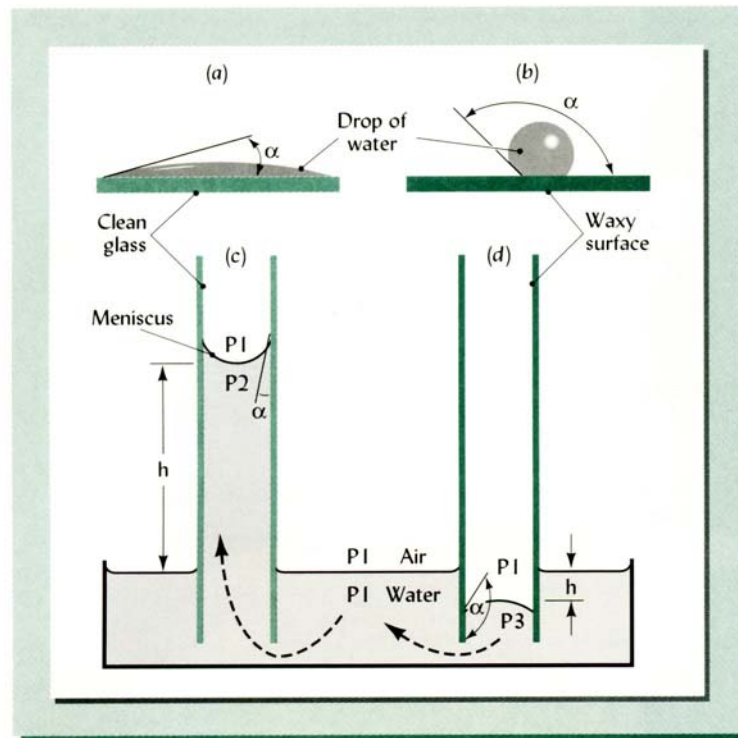


**FIGURA 2.4** Diariamente podem ser constadas evidências da tensão superficial da água (acima) como insetos deslocando-se sobre a água, e forças de coesão e adesão (abaixo) como uma gota de água mantida entre os dedos (cortesia de R. Weil).

## Ascensão capilar no solo

Forças capilares são atuantes em todos os solos úmidos. Entretanto, a taxa de movimento e a ascensão são menores do que se espera, considerando apenas o diâmetro dos poros do solo. Uma razão é que os poros do solo não são uniformes como tubos de vidro. Além disso, alguns poros contêm ar aprisionado diminuindo ou impedindo o movimento capilar da água (Figura 2.6b).

O movimento ascendente devido à capilaridade no solo é ilustrado na Figura 2.6c. Normalmente, a ascensão é resultante da capilaridade e é maior em solos com textura fina, mas a taxa de fluxo pode ser muito baixa, devido à força de atrito nos pequenos poros. Os poros maiores encontrados em solos arenosos apresentam pouca resistência por atrito ao rápido movimento capilar da água. Entretanto, como pode ser observado na discussão sobre a equação da capilaridade, o maior raio dos poros entre partículas de areia resulta numa pequena ascensão capilar<sup>1</sup>.



**FIGURA 2.5.** A interação da água com uma superfície hidrofílica (a,c) ou hidrofóbica (b,d) resulta em um *ângulo de contato* característico ( $\alpha$ ). Se a superfície sólida constitui-se de um tubo, forma-se uma interface água - ar curva, denominada menisco, devido às forças de adesão e coesão. Nesta interface, a pressão no lado convexo da curvatura é menor que no lado côncavo. (c) A ascensão capilar ocorre em um tubo hidrofílico fino (vidro) porque a pressão abaixo do menisco (P2) é menor que a pressão na água livre. (d) A depressão capilar ocorre se o tubo é hidrofóbico, e o menisco é invertido.

A capilaridade é tradicionalmente ilustrada como um fenômeno ascendente. Mas o movimento se dá em qualquer direção, devido ao fato de que a atração entre os poros do solo e água, é eficiente em formar meniscos tanto em poros no sentido horizontal como vertical (Figura 2.7). A importância da capilaridade no

<sup>1</sup> Por exemplo, se a ascensão por capilaridade é de 37 cm sobre o lençol freático em solo arenoso (como mostrado no exemplo da Figura 2.6c), então pode-se estimar (ajustando-se a equação da capilaridade para  $r = 0,15/h$ ) que o raio equivalente dos poros deve ser de 0,004 cm ( $0,15/37 = 0,004$ ).

controle do movimento da água em poros pequenos, se tornará evidente quando abordarmos os conceitos de energia da água no solo.

## **2.3 Conceitos da Energia da Água no Solo**

A retenção e o movimento da água no solo, sua absorção e translocação nas plantas, e sua perda para a atmosfera são fenômenos relacionados à energia. Diferentes tipos de energia estão envolvidos, incluindo energia potencial e cinética. A energia cinética é certamente um fator importante no movimento da água em um rio, mas o movimento da água nos solos é tão lento que o componente da energia cinética pode ser desprezado. A energia potencial é a mais importante na determinação do estado e movimento da água no solo. Por questão de simplicidade, usaremos neste texto o termo energia em referência à energia potencial.

Ao considerarmos a energia, devemos ter em mente que todas as substâncias, incluindo a água, tendem a se mover ou mudar de um estado de maior energia para um de menor. Portanto, se conhecermos os níveis de energia em diferentes pontos no solo, pode-se prever a direção do movimento. São as diferenças nos níveis de energia entre locais vizinhos que influenciam o movimento da água.

### ***Forças que afetam a energia potencial***

A discussão sobre estrutura e propriedades da água nas seções anteriores, sugere três importantes forças afetando o nível de energia da água no solo. Em primeiro lugar a adesão ou a atração da água pelos sólidos do solo (matriz), promovem uma força mátrica (responsável pela adsorção e capilaridade) que reduz consideravelmente o estado de energia da água próximo às superfícies das partículas. Em segundo lugar, a atração da água aos íons e outros solutos, resulta em forças osmóticas, que tendem a reduzir o estado de energia da água na solução do solo. O movimento osmótico da água pura através de uma membrana semi-permeável em direção a uma solução (osmose) é uma evidência do menor estado de energia da água na solução. A terceira principal força que atua sobre a água no solo é a gravidade, que sempre puxa a água para baixo. O nível de energia da água no solo a uma dada elevação no perfil é maior do que da água a um nível inferior. Essa diferença de energia faz com que a água flua descendentemente.

### ***Potencial da água no solo***

A diferença entre os níveis de energia de um local ou condição (por exemplo, solo úmido) para outro (por exemplo, solo seco) determina a direção e a taxa de movimento da água no solo e nas plantas. Em solo úmido, a maior parte da água é retida nos poros maiores ou como filmes espessos de água envolvendo as partículas. Assim, a maioria das moléculas de água em um solo úmido não estão muito próximas da superfície das partículas e, desse modo, não são fortemente retidas pelos sólidos do solo (matriz). Nessa condição, as moléculas de água possuem uma considerável liberdade de movimento, então seu nível de energia é próximo ao da água pura. Por outro lado, em um solo seco, a água remanescente é localizada nos poros menores e em finos filmes de água, sendo fortemente retida pelos sólidos do solo. Assim as moléculas de água em um solo seco possuem pouca liberdade de movimento, e o seu nível de energia é muito menor que o da água em solos úmidos. Se amostras de solo úmido e seco são colocadas em contato, a água se movimentará do solo úmido (maior estado de energia) para o solo seco (menor estado de energia).

A determinação do nível absoluto de energia da água no solo é uma tarefa difícil e muitas vezes, impossível. Felizmente, não é necessário conhecer o nível absoluto de energia da água para prever como será seu movimento no solo e no ambiente. O conhecimento dos valores relativos de energia da água no solo é suficiente. Normalmente, o estado de energia da água num determinado local do perfil é comparado ao da água pura a pressão e temperatura constantes, sem a influência do solo e localizada em uma altura de referência. A diferença entre os níveis de energia da água pura no estado de referência e a água no solo é chamada potencial da água no solo (Figura 2.8), o termo potencial, do mesmo modo que o termo pressão, implica em uma diferença no estado de energia.

Se todos os valores do potencial da água considerados têm um ponto de referência comum, (o estado de energia da água pura), as diferenças no potencial da água entre duas amostras de solo refletem a diferença em seus níveis absolutos de energia. Isso significa que a água se moverá de uma zona do solo possuindo um alto potencial para outra que tenha menor potencial. Este fato deve ser considerado sempre que se abordar o comportamento da água do solo.

## QUADRO 2.1 - O MECANISMO DA CAPILARIDADE

A ação da capilaridade é devida às forças combinadas de adesão e coesão, como verificado quando uma gota de água é colocada sobre uma superfície sólida. Substâncias sólidas que possuem uma superfície eletronegativa (devida por exemplo, aos átomos de oxigênio nos tetraedros de silício, presentes no quartzo ou vidro) atraem fortemente a extremidade eletropositiva do hidrogênio H na molécula de água. Essas substâncias são chamadas hidrofílicas (afinidade pela água), pois a atração das moléculas de água pelas superfícies sólidas (adesão) é maior que a atração entre as moléculas de água (coesão), a adesão fará com que uma gota de água colocada sobre uma superfície sólida hidrofílica, como vidro limpo, se espalhe ao longo desta superfície formando assim um ângulo agudo ( $< 90^\circ$ ) entre a interface água-ar e superfície sólida (Figura 2.5a). Esse ângulo de contato é específico para interações entre diferentes substâncias líquidas e sólidas (exemplo: água e vidro). Quanto maior a atração das moléculas de água pela superfície sólida, mais próximo de zero será o ângulo de contato.

Por outro lado, moléculas de água colocadas sobre uma superfície hidrofóbica (que repele a água) adquirem forma esférica. O ângulo de contato resultante é obtuso ( $> 90^\circ$ ), indicando que a adesão não é tão forte quanto a coesão (Figura 2.5b).

Se ao invés de uma superfície plana e uma gota d'água, considerarmos um tubo de diâmetro reduzido, de vidro limpo, colocado sobre a água, a adesão fará com que a água se espalhe sobre a superfície, formando o mesmo ângulo de contato  $\alpha$  com o vidro, como observado no caso da gota d'água. Ao mesmo tempo, a coesão entre as moléculas de água cria uma tensão superficial, que faz com que uma superfície curva (chamada menisco), se forme na interface entre água e ar no interior do tubo (Figura 2.5c). Se o ângulo de contato é próximo a zero, a curvatura do menisco será semelhante a um semi círculo.

A interface curva entre a água e ar faz com que a pressão seja menor no lado convexo (P2, Figura 2.5c) do que no lado côncavo do menisco. A pressão atmosférica (P1) atua sobre o menisco e a superfície livre da água no recipiente. Pelo fato da pressão no menisco P2 ser menor que a pressão na superfície livre da água, a água é empurrada no interior do tubo capilar. A ascensão da água no tubo se dará até que o menisco alcance uma altura h, no qual o peso da água no tubo equilibra a diferença de pressão P2-P1. Nesta condição, as forças empurrando a água no tubo estarão em equilíbrio com as forças puxando-a para baixo.

As forças ascendentes são determinadas pelo produto da tensão superficial (T), o comprimento da superfície de contato entre o tubo e o menisco (circunferência do tubo =  $2\pi r$ ) e o componente ascendente dessa força ( $\cos \alpha$ ).

As forças descendentes são determinadas pelo produto da densidade da água (d), o volume da água acima da superfície livre ( $h\pi r^2$ ) e a aceleração da gravidade g.

Deste modo, quando a ascensão capilar cessa, temos a seguinte igualdade:

$$\begin{aligned} \text{Forças ascendentes} &= \text{Forças descendentes} \\ T \times 2\pi r \times \cos \alpha &= d \times h \times \pi r^2 \times g \end{aligned}$$

Note que se o raio do tubo tivesse metade do diâmetro ( $0,5r$ ), a força de ascensão seria reduzida à metade, mas as forças descendentes seriam 0,25 vezes maiores ( $(0,5r)^2 = 0,5r \times 0,5r = 0,25r$ ) assim, a ascensão seria o dobro. Esta é a razão pela qual a ascensão capilar é maior em tubos de menor diâmetro. A equação de equilíbrio entre as forças ascendentes e descendentes pode ser matematicamente rearranjadas isolando-se a altura de ascensão capilar:

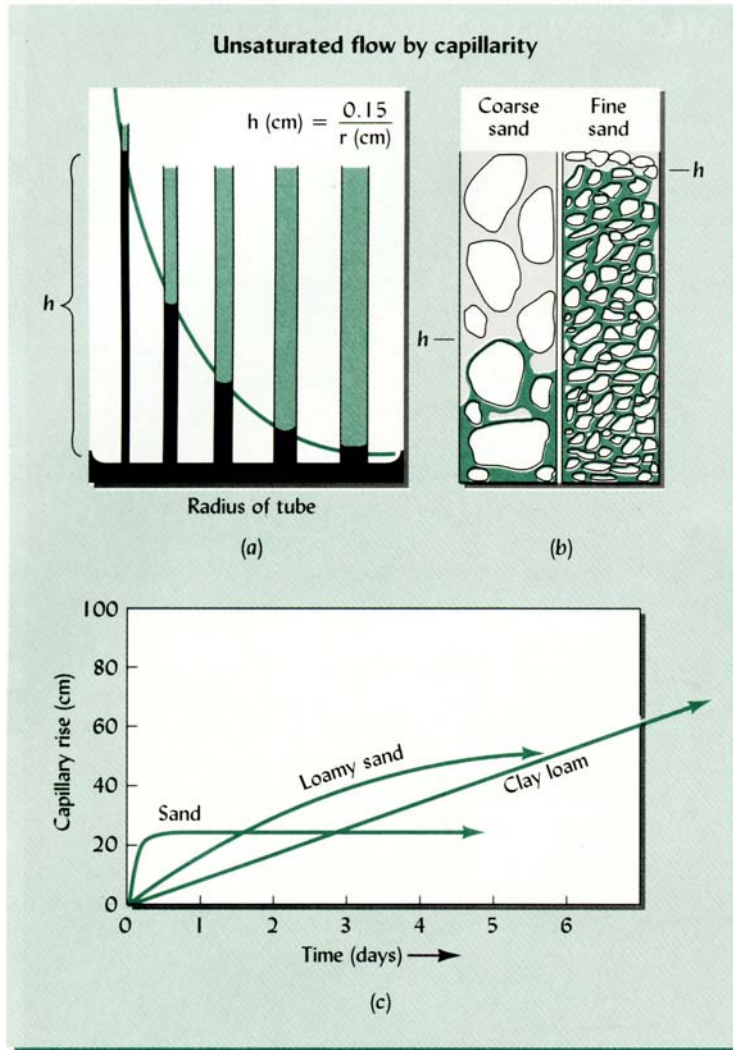
$$h = 2 T \cos \alpha / rdg$$

A maior parte das interações entre água e sólidos no solo é do tipo hidrofílica como mostrado na Figura 2.5a e c. A atração entre água e superfície das partículas do solo é normalmente tão forte, que o ângulo de contato é muito próximo a zero, fazendo com que o coseno seja aproximadamente igual a 1. O  $\cos \alpha$  pode então ser ignorado sob tais circunstâncias. Os outros três fatores que afetam a ascensão capilar (T, d e g) são constantes a uma dada temperatura e podem ser combinados em uma única constante. Assim, a equação simplificada da capilaridade, pode ser escrita da seguinte forma:

$$h \text{ (cm)} = 0,15 \text{ (cm}^2\text{)} / r \text{ (cm)}$$

Como esperado, a ascensão capilar só ocorrerá se o tubo for feito de material hidrofílico. Se um tubo hidrofóbico (por exemplo um tubo encerado) é colocado dentro de um recipiente com água, o menisco será convexo, ao invés de côncavo, e deste modo ocorrerá a depressão capilar (Figura 2.5d). Esta situação ocorre em certas camadas de solo que repelem a água.



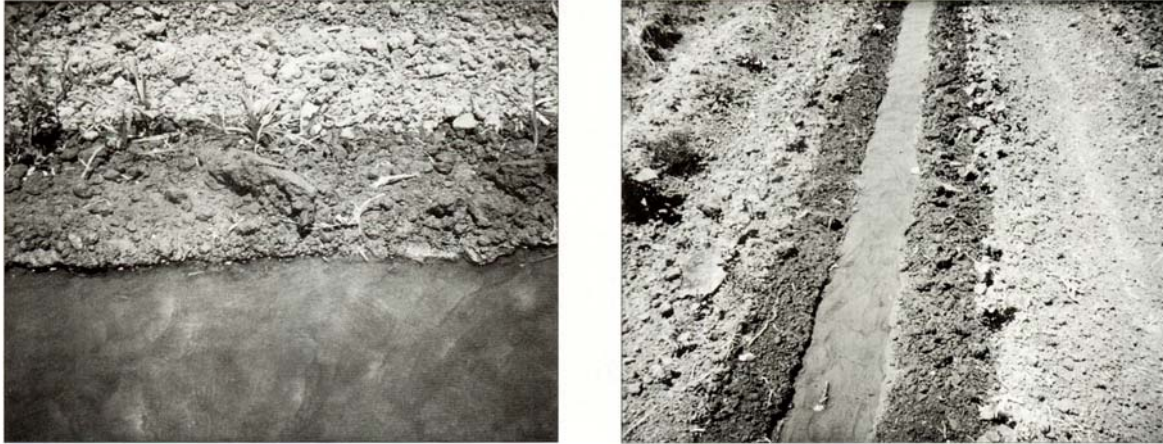


**FIGURA 2.6** Movimento capilar ascendente da água através de tubos de diferentes diâmetros e solos com diferentes tamanhos de poros. a) A equação da capilaridade pode ser esquematizada para mostrar que a altura de ascensão ( $h$ ) duplica quando o raio do tubo é reduzido à metade. A mesma relação pode ser demonstrada utilizando tubos de vidro de diferentes diâmetros. b) O mesmo princípio relaciona o tamanho dos poros no solo e a ascensão capilar, mas a ascensão da água no solo é irregular, devido a tortuosidade e variabilidade em tamanho dos poros (e também devido ao ar aprisionado nos poros). c) Quanto mais fina a textura do solo, menor o diâmetro médio de poros e, assim, maior a ascensão capilar acima do lençol freático. Entretanto, devido a maior intensidade das forças de atrito nos poros menores, a ascensão capilar é menor nos solos de textura fina do que nos solos arenosos.

O potencial da água no solo é devido à diversas forças, cada uma delas é um componente do potencial total da água no solo  $\Psi_t$ . Estes componentes são originados das diferenças nos níveis de energia resultantes das forças gravitacional, mátrica, pressão e osmótica, e são chamados de potencial gravitacional  $\Psi_g$ , potencial mátrico  $\Psi_m$ , potencial de pressão e potencial osmótico  $\Psi_o$ , respectivamente. Todos esses componentes agem simultaneamente influenciando o comportamento da água no solo. A relação geral entre o potencial da água no solo e os níveis de potenciais mostrados na Figura 2.8 pode ser expressa como:

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o + \dots$$

Onde as reticências (...) indicam a possível contribuição de outros potenciais não ainda mencionados.



**FIGURA 2.7** Como mostra a imagem à esquerda, a água move-se ascendentemente no sulco de irrigação por capilaridade. A foto à direita ilustra o movimento horizontal da água em ambos os lados do sulco de irrigação.

### **Potencial gravitacional**

A força gravitacional atua na água do solo do mesmo modo que em qualquer outro corpo, sendo a atração gravitacional em direção ao centro da Terra. O potencial gravitacional  $\Psi_g$  da água do solo pode ser expresso matematicamente como:

$$\Psi_g = gh$$

Onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $h$  é a altura da ascensão da água no solo acima do nível de referência. O nível de referência é normalmente escolhido dentro do perfil ou no seu limite inferior, para assegurar que o potencial gravitacional da água no solo, acima do ponto de referência, seja sempre positivo.

Após chuvas pesadas ou irrigação, a gravidade desempenha um papel importante na remoção do excesso de água dos horizontes superficiais e no reabastecimento do lençol freático abaixo do perfil de solo.

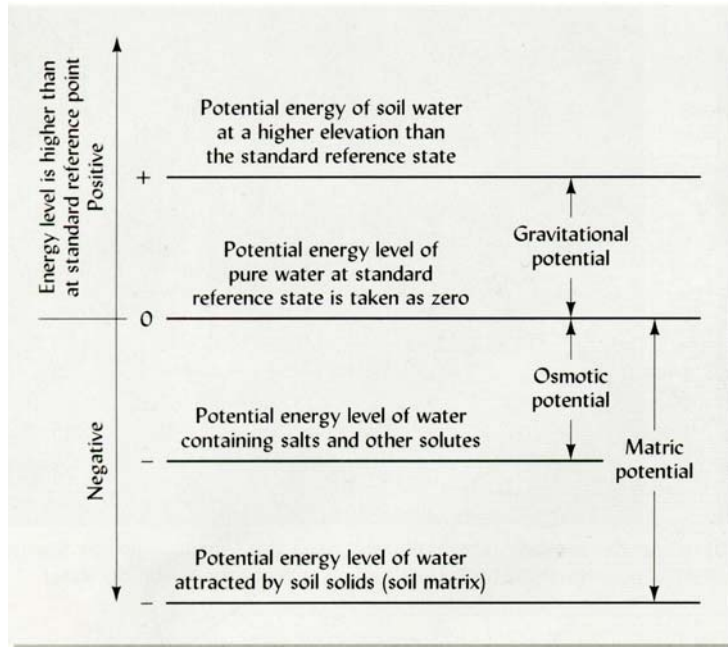
### **Potencial de Pressão e Mátrico**

Este componente considera os efeitos de todos os fatores com exceção da gravidade e concentração da solução. Incluindo (1) a pressão hidrostática positiva, ocasionada pelo peso da água em solos saturados e aquíferos e (2) a pressão negativa causada pelas forças de atração entre a água e os sólidos do solo ou a matriz do solo<sup>2</sup>.

A pressão hidrostática é responsável pelo que é chamado de potencial de pressão ( $\Psi_p$ ), um componente que só é considerado em áreas saturadas. Qualquer pessoa que tenha mergulhado até o fundo de uma piscina pode sentir a ação da pressão hidrostática nos ouvidos.

A atração da água pelas superfícies sólidas é responsável pelo que é chamado de potencial mátrico ( $\Psi_m$ ), o qual é sempre negativo, pois a água atraída à matriz do solo tem estado de energia menor que o da água pura. Estas pressões negativas são algumas vezes chamadas de sucção ou tensão. O potencial mátrico ocorre em condições não saturadas, acima do lençol freático, enquanto o potencial de pressão se aplica a condições saturadas ou abaixo do lençol freático (Figura 2.10).

<sup>2</sup> Além das forças mátricas e hidrostáticas em algumas situações o peso da sobrecarga e a pressão do ar também contribuem para o potencial total da água no solo.



**FIGURA 2.8** Relação entre energia potencial da água pura em um estado de referência padrão (pressão, temperatura e elevação) e da água no solo. Se a solução no solo contém sais e outros solutos, a atração mútua entre as moléculas de água e estas substâncias químicas reduz a energia potencial da água, o grau de redução é chamado de *potencial osmótico*. Do mesmo modo, a atração mútua entre os sólidos do solo e as moléculas de água no solo também reduz a energia potencial da água. Neste caso, a redução é chamada *potencial mátrico*. Como estas interações reduzem o nível de energia da água com relação ao da água pura, as mudanças no nível de energia (potencial osmótico e mátrico) são considerados em valores negativos. Por outro lado, mudanças no estado de energia devidas à ação da gravidade (potencial gravitacional) são sempre positivas. Isto ocorre porque o nível de referência da água pura é propositalmente estabelecido em um local no perfil do solo abaixo do ponto considerado. Uma raiz de planta ao absorver água do solo úmido deve superar as três forças simultaneamente.



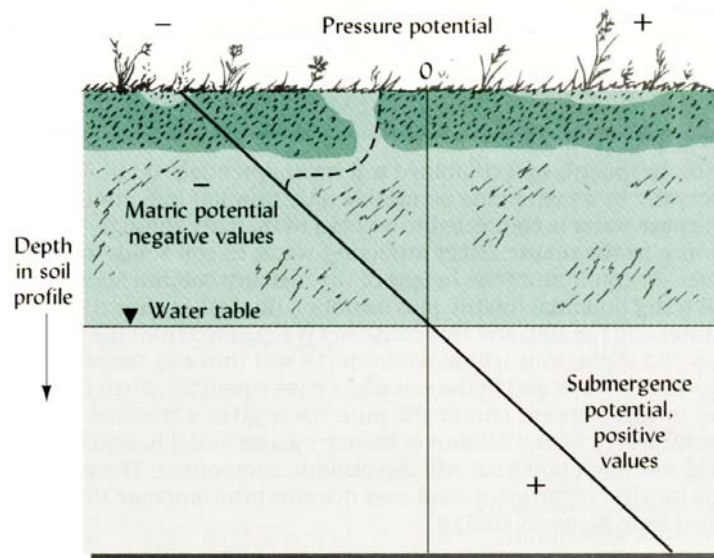
**FIGURA 2.9** Se considerarmos o potencial mátrico, osmótico ou gravitacional (como na figura) a água sempre se movimenta para onde o estado energético é menor. Neste caso a energia perdida pela água é usada para movimentar uma roda para moer farinha (Foto cortesia de R. Weil).

Enquanto cada uma destas pressões é significativa em situações específicas de campo, o potencial mátrico é importante em todas as condições de solos não saturados pois neste caso as interações entre os sólidos do solo e água estão sempre presentes. O movimento da água no solo, a disponibilidade de água às plantas, e as soluções para muitos problemas em engenharia civil são em grande parte determinados através do potencial mátrico. Consequentemente, o potencial mátrico receberá especial atenção neste texto, juntamente com os potenciais gravitacional e osmótico.

O potencial mátrico ( $\Psi_m$ ), que é resultado do fenômeno de adesão (ou adsorção) e da capilaridade, influencia a retenção e/ou movimento de água no solo. Diferenças de  $\Psi_m$  entre duas zonas adjacentes de um solo estimulam o movimento da água de zonas mais úmidas (alta estado de energia) para as zonas mais secas (baixa estado energia) ou de poros maiores para menores. Apesar deste movimento ser lento, ele é extremamente importante, especialmente no suprimento de água para as raízes das plantas.

### Potencial Osmótico

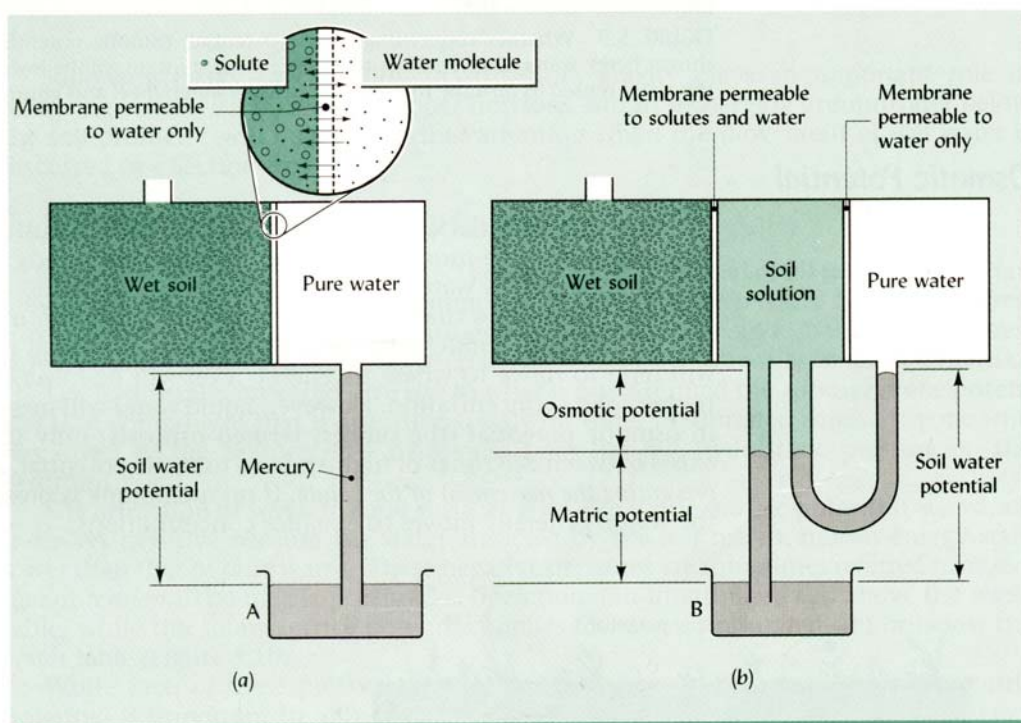
O potencial osmótico é atribuído à presença de solutos na solução de solo. Os solutos podem ser sais inorgânicos ou componentes orgânicos. Sua presença reduz a energia potencial de água, principalmente por reduzirem a liberdade de movimento das moléculas de água que se agrupam em torno de cada íon soluto ou molécula. Quanto maior a concentração de solutos, menor o potencial osmótico. Como sempre, a água tenderá a se mover de onde seu nível de energia for menor, neste caso a zona com maior concentração de solutos.



**FIGURA 2.10** O potencial mátrico é também um potencial de pressão. O potencial mátrico é sempre negativo e o potencial de pressão é sempre positivo. Quando água se encontra em solos não saturados acima do lençol freático (parte superior da zona saturada) está sujeita à influência do potencial mátrico. A água abaixo do lençol freático em solo saturado está sujeita ao potencial de pressão. No exemplo mostrado, o potencial mátrico decresce linearmente com a elevação acima do lençol freático, significando que a ascensão da água por atração capilar a partir do lençol freático é a única fonte de água neste perfil. Chuva ou irrigação (linha pontilhada) alterariam ou curvariam a linha reta, mas não mudariam a relação fundamental descrita.

Entretanto, a água se moverá em resposta à diferenças de potencial osmótico (osmose) somente na existência de uma membrana semi permeável entre as zonas de alto e baixo potencial osmótico, permitindo o fluxo da água, mas impedindo o movimento do soluto. Na ausência de membranas, ao invés da água, o soluto geralmente se move para equilibrar a concentração.

Pelo fato das zonas do solo não serem separadas por membranas, o potencial osmótico ( $\Psi_o$ ) tem pouco efeito sobre o movimento em massa da água no solo. Seu principal efeito se dá sobre a absorção de água pelas células das raízes das plantas, que estão isoladas da solução do solo pelas suas membranas celulares semi-permeáveis. Em solos com alta concentração de sais solúveis, o  $\Psi_o$  pode ser mais baixo (ter um alto valor negativo) na solução de solo do que nas raízes das plantas. Isto leva a restrições na absorção de água pelas plantas. Em solos muito salinos, o potencial osmótico da água no solo pode ser tão baixo que causará o colapso (plasmólise) das células em plântulas jovens, a medida que a água sai das células em direção a uma zona de menor potencial osmótico, no solo. O movimento aleatório das moléculas de água faz com que algumas delas escapem de um volume de água, entrem na atmosfera, e se tornem vapor d'água. Como a presença de solutos restringe o movimento das moléculas, algumas delas escapam com o aumento da concentração de solutos. Deste modo, a pressão de vapor da água é menor no ar sobre água salina do que no ar sobre água pura. Por afetar a pressão de vapor da água, o potencial osmótico afeta o movimento de vapor d'água nos solos. O processo de osmose e a relação entre os componentes mátrico e osmótico do potencial total de água no solo, são mostrados na Figura 2.11.



**FIGURA 2.11** Relações entre os potenciais: osmótico, mátrico, e a combinação de ambos. Assumindo um recipiente com solo separado da água pura por uma membrana permeável apenas à água (veja o detalhe mostrando a osmose através da membrana) (esquerda). A água pura é conectada a uma vasilha de mercúrio através de um tubo. A água se moverá para o solo em resposta às forças mátricas que a atraem aos sólidos do solo e as forças osmóticas que atraem a água aos solutos. No equilíbrio, a altura da coluna de mercúrio acima do nível da vasilha A é a medida dos potenciais da água no solo (mátrico mais osmótico). Assumindo um segundo recipiente colocado entre a água pura e o solo, separado do solo por uma fina tela permeável a solutos e água (direita). Os íons se moverão para o solo deste segundo recipiente até a que concentração de solutos na água e no solo tenha se equilibrado. Então a diferença entre as energias potenciais da solução e da água pura fornece uma medida do potencial osmótico. O *potencial mátrico*, como medido pela coluna de mercúrio acima da vasilha B, seria então a diferença entre os componentes do potencial de água no solo, combinados, e o potencial osmótico. O potencial gravitacional (não mostrado) é o mesmo para todos os recipientes e não afeta o movimento de água por este ser na direção horizontal. [Modificado de Richards (1965)]

## **Unidades dos níveis de Energia**

Diversas unidades podem ser usadas para expressar as diferenças nos níveis de energia da água no solo. Uma delas é a *altura de uma coluna de água* (normalmente em centímetros). Já abordamos esta forma de expressão desde que, o termo  $h$  da equação da capilaridade indica o potencial mátrico da água em um poro capilar. Uma segunda unidade é a pressão atmosférica padrão ao nível do mar, que é igual a 760 mm Hg ou 1020 cm de água. A unidade chamada bar é aproximada a pressão atmosférica padrão. A energia pode ser expressa por unidade de massa ( $\text{joules kg}^{-1}$ ) ou por unidade de volume ( $\text{newton m}^{-2}$ ). No sistema internacional de unidades (SI), 1 Pascal (Pa) equivale a 1 Newton (N) agindo sobre uma área de  $1 \text{ m}^2$ . Neste texto será adotada a unidade Pa ou quilopascal (kPa) para expressar o potencial da água no solo. Como em outras publicações podem ser adotadas outras unidades, a Tabela 2.1 mostra as transformações para outras unidades comumente utilizadas, que expressam o potencial da água no solo.

## **2.4 Conteúdo de Umidade e Potencial da Água no Solo**

A discussão prévia sugere uma relação inversa entre o conteúdo de água no solo e a energia com que a água é retida no solo. A água flui mais facilmente de um solo úmido para outro com menor umidade. Muitos fatores afetam a relação entre o potencial da água no solo ( $\Psi$ ) e o conteúdo de umidade ( $\theta$ ).

### **Umidade do Solo versus Potencial Mátrico**

A relação entre o potencial da água no solo ( $\Psi$ ) e conteúdo de água ( $\theta$ ) de três solos com diferentes texturas é mostrada na Figura 2.12. Tais curvas são também conhecidas como curva característica de retenção de água no solo ou simplesmente curva característica. A forma suavizada das curvas indica uma mudança gradual no potencial da água no solo, com o aumento do conteúdo de água e vice-versa. O solo argiloso retém muito mais água, a um determinado potencial, do que o solo franco ou o arenoso. Deste modo, a um dado conteúdo de água, ela é retida mais fortemente no solo argiloso do que nos outros dois, (note que o potencial da água no solo é plotado em escala logarítmica). A quantidade de argila no solo determina a proporção de microporos. Como veremos, quase metade da água retida por solos argilosos, está firmemente retida nos microporos e não está disponível para as plantas. A textura do solo exerce uma influência significativa sobre a retenção de umidade no solo.

A estrutura do solo também influencia a relação entre o conteúdo de água e energia. Um solo bem estruturado possui maior porosidade total e maior capacidade de retenção de água do que um mal estruturado ou que tenha sido compactado. Quanto maior a porosidade total maior a capacidade de retenção de água. Além disso, o aumento na porosidade de solos bem estruturados é resultado principalmente de uma maior quantidade de macroporos, nos quais a água é retida com pouca energia. Solos compactados retêm menor quantidade total de água, tendo maior proporção de poros pequenos e médios que retêm água com maior energia do que os poros maiores. Assim, a estrutura do solo influencia predominantemente o formato da curva característica, nos potenciais entre 0 e 100 kPa. O formato da porção restante da curva é geralmente influenciado pela textura do solo. As curvas características de água no solo (Figura 2.12) possuem significado prático para vários processos e medidas de campo. Estas curvas serão úteis quando considerarmos os aspectos aplicados do comportamento da água no solo, nas seções seguintes.

### **Histerese**

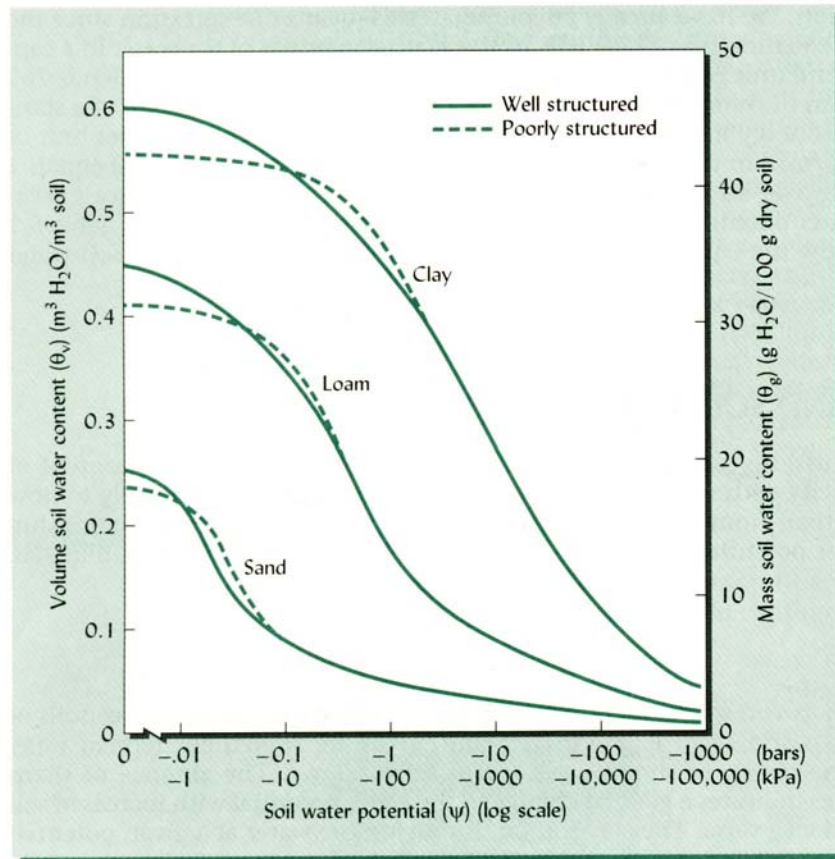
A relação entre conteúdo de água no solo e potencial, determinada à medida que o solo seca, será diferente da mesma relação determinada à medida que o solo é reumedecido. Esse fenômeno, conhecido como **histerese**, é ilustrado na Figura 2.13. A histerese é causada por vários fatores, incluindo a desuniformidade dos poros do solo. Quando o solo é umedecido, alguns dos poros de menor tamanho não são preenchidos, deixando ar aprisionado, o que impede a entrada da água. Alguns macroporos em um solo podem estar cercados apenas por microporos, criando um efeito gargalo de garrafa. Neste caso, o macroporo não será drenado até que o potencial mátrico seja baixo o suficiente para esvaziar os poros menores que o cercam (Figura 2.13). Também a expansão e contração de argilas, à medida que o solo seca e é reumedecido, provoca mudanças na estrutura do solo que afetam as relações entre solo e água. Devido ao fenômeno da histerese, é

importante saber se o solo está sendo seco ou umedecido, ao comparar suas propriedades com as de outro solo.

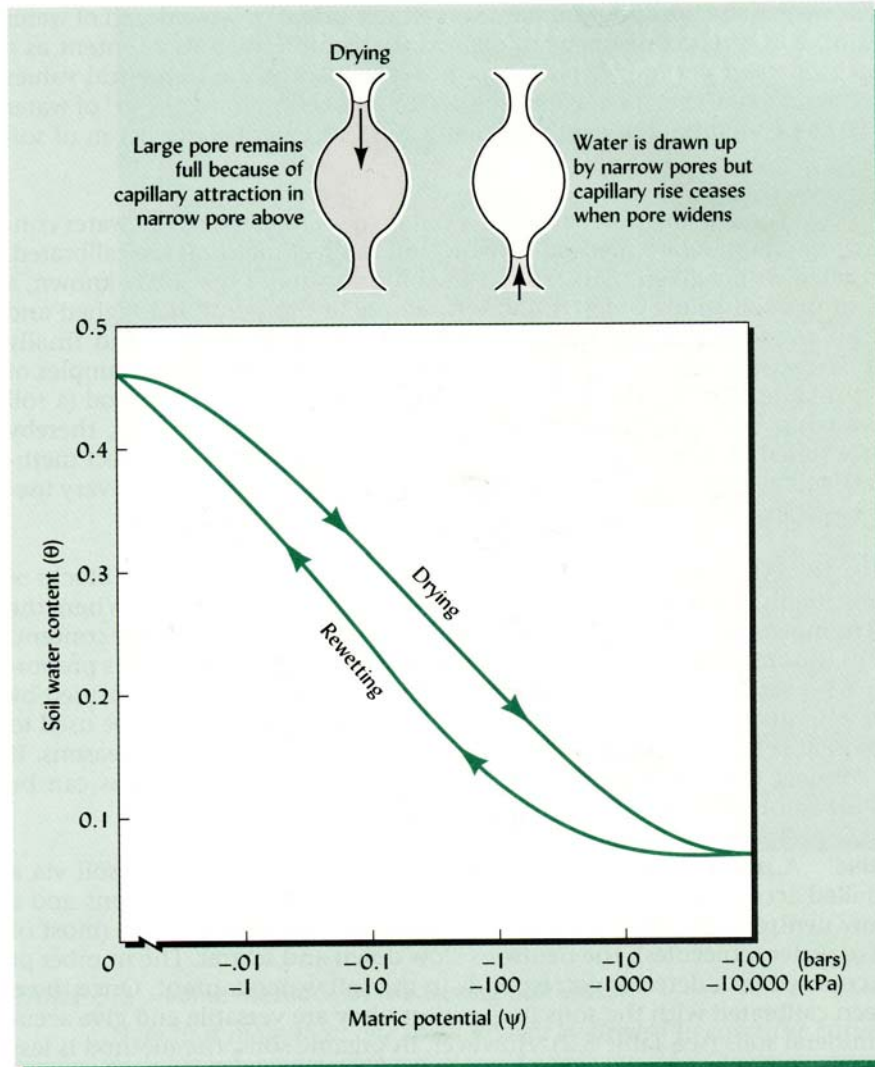
**Tabela 2.1 Unidades equivalentes do potencial da água no solo.**

Altura de coluna de água cm	Potencial da água no solo bar	Potencial da água no solo kPa <sup>1</sup>
0	0	0
10,2	-0,01	-1
102	-0,1	-10
306	-0,3	-30
1,020	-1,0	-100
15,300	-15	-1,500
31,700	-31	-3,100
102,000	-100	-10.000

<sup>1</sup> No Sistema Internacional (SI) a unidade kPa é equivalente a 0,01 bar.



**FIGURA 2.12** Curva de retenção de água no solo para três solos minerais representativos. As curvas mostram a relação obtida por uma drenagem lenta, a partir da condição de saturação. As linhas tracejadas mostram o efeito da compactação ou má estruturação. O potencial da água no solo (que é negativo) é expresso em bars (escala superior) e quilopascal (kPa) (escala inferior). Note que o potencial da água no solo é plotado em escala logarítmica.



**FIGURA 2.13** A relação entre conteúdo de água e potencial mátrico de um solo à medida que ele seca e é umedecido. O fenômeno, conhecido como *histerese*, é aparentemente devido a fatores como desuniformidade dos poros, ar aprisionado, expansão e contração que podem afetar a estrutura do solo. As ilustrações menores mostram o efeito da desuniformidade dos poros.

### **Medidas do Estado de Energia da Água no Solo**

A curva característica da água no solo, discutida anteriormente, evidencia a importância de duas medidas da água no solo: a *quantidade* de água presente (conteúdo de água) e o *estado de energia* da água (potencial da água no solo). Para entender ou manejar o suprimento e movimento da água no solo é essencial ter informações (diretas ou indiretas), de ambos os tipos de medidas. Por exemplo, o potencial da água no solo indicará se a água se moverá em direção ao lençol freático, mas, sem o conhecimento do conteúdo de água no solo, não poderíamos conhecer a contribuição deste movimento na alteração dos níveis do lençol freático.

Geralmente, o comportamento da água no solo é mais intimamente relacionado ao estado de energia da água, e não a sua quantidade. Assim, um solo argiloso e uma areia franca se encontrarão úmidos e facilmente fornecerão água às plantas a um  $\psi_m$  em torno de -10 kPa. Entretanto, a quantidade de água retida por um solo franco argiloso e o tempo que este é capaz de fornecer água às plantas seria muito maior a este potencial do que para a areia franca.



Consideraremos diferentes métodos para realização destes dois tipos de medida da água no solo. Pesquisadores, técnicos e engenheiros podem combinar estes métodos no estudo da armazenagem e movimento da água no solo, no manejo de sistemas de irrigação e para predizer o comportamento físico do solo.

### **Medida do conteúdo de água**

O **conteúdo volumétrico de água  $\theta$**  é definido como o volume de água presente em um dado volume de solo seco (normalmente 1 m<sup>3</sup>) (Figura 2.12). Uma expressão comparável é o **conteúdo gravimétrico de água  $\theta_m$** , ou a massa de água presente em uma dada massa de solo seco (normalmente 1 kg). Estas expressões têm vantagens em diferentes usos. Na maioria dos casos usaremos o conteúdo volumétrico de água  $\theta$ .

Devido ao fato de, no campo, considerarmos o sistema radicular das plantas explorando uma certa profundidade do solo e, por expressarmos a precipitação (e às vezes irrigação) como uma altura de água (mm de chuva), é conveniente expressar o conteúdo volumétrico de água no solo como uma razão entre altura de água por profundidade de solo. Convenientemente, os valores numéricos destas duas expressões são os mesmos. Por exemplo, para um solo contendo 0,1 m<sup>3</sup> de água por m<sup>3</sup> de solo (10 % do volume) esta razão é igual a 0,1 m de água por metro de profundidade de solo<sup>3</sup>.

**Método Gravimétrico** - O método gravimétrico é uma medição direta do conteúdo de umidade do solo e é o método padrão pelo qual todos os indiretos são calibrados. A água presente em uma dada massa (e, volume, se a densidade do solo é conhecida) de solo seco é determinada. Uma amostra de solo úmido é pesada e então seca em estufa à temperatura de 105 °C por aproximadamente 24 horas<sup>4</sup> e então pesada novamente. A massa perdida representa o conteúdo de água. O Quadro 2.2 fornece exemplos de como  $\theta$  e  $\theta_m$  podem ser calculados. O método gravimétrico é um método destrutivo (uma amostra de solo deve ser removida para cada medida) e não pode ser automatizado, tornando-o assim pouco adequado para monitorar mudanças na umidade do solo. Muitos outros métodos indiretos de medida do conteúdo de água não são destrutivos, são facilmente automatizados e muito úteis no campo (Tabela 2.2).

**Moderação de Nêutrons** – Uma sonda de nêutrons, colocada no solo através de um tubo de acesso previamente instalado (Figura 2.14), contém uma fonte de nêutrons rápidos e um detector de nêutrons lentos. Quando os nêutrons rápidos colidem com os átomos de hidrogênio (a maioria é parte das moléculas de água), eles reduzem sua velocidade e são dispersos. O número de nêutrons lentos medidos pelo detector corresponde ao conteúdo de água do solo. Uma vez que estes medidores tenham sido calibrados para o solo em questão, eles são versáteis e dão medidas precisas, em solos minerais (Tabela 2.2). Entretanto, em solos orgânicos, o método é menos preciso porque os nêutrons colidem com átomos de hidrogênio, combinados às substâncias orgânicas, ao invés da água.

**Método eletromagnético** - Uma técnica relativamente recente, conhecida como **reflectometria de microondas** (TDR – Time domain reflectometry) mede dois parâmetros; (1) o tempo necessário para que um impulso eletromagnético se propague através de duas barras de transmissão paralelas, de metal, enterradas no solo e (2) o grau de dissipação do impulso quando ele colide com o solo. O tempo de movimento está relacionado à constante dielétrica do solo, que é proporcional à quantidade de água. A dissipação do sinal está relacionada a concentração de sais na solução do solo. Assim, salinidade e conteúdo de umidade podem ser medidos utilizando o TDR.

---

<sup>3</sup> Quando se mede quantidade de água adicionada ao solo por irrigação, é comum utilizar unidades de volume como m<sup>3</sup> e hectare-metro (o volume de água que cobriria um hectare de terra na profundidade de 1 m). Geralmente os agricultores nas regiões irrigadas dos EUA utilizam as unidades inglesas pé<sup>3</sup> ou acre-pé (o volume de água necessário para cobrir um acre de terra a profundidade de 1 pé).

<sup>4</sup> Deve-se permitir tempo suficiente de secagem até que o solo pare de perder água e atinja uma massa constante. Para economizar tempo, pode ser utilizada uma estufa de microondas. Em torno de 12 pequenas amostras de solo (20 g cada) em beakers de vidro podem ser secas em uma mesa giratória em uma estufa de microondas de 1000 W, utilizando-se três ou mais períodos de 3 minutos com a potência ajustada para alta.

As barras metálicas do TDR podem ser portáteis (inseridas no solo para cada leitura) ou podem ser instaladas a várias profundidades e conectadas a um medidor ou coletor de dados computadorizado. O TDR pode ser ligado a componentes eletrônicos sofisticados e programas de software capazes de medir e interpretar mudanças de voltagem em minutos e em intervalos de tempo de picossegundos (Figura 2.15). Embora caro, o TDR pode ser utilizado na maioria dos solos para a obtenção de leituras precisas em uma ampla faixa de conteúdos de umidade.

#### QUADRO 2.2 DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO

Os procedimentos para determinação do conteúdo de água no solo pelo método gravimétrico são relativamente simples. Assumindo que se deseja determinar o conteúdo de água de uma amostra de 100 g de solo úmido. Deve-se secar a amostra em estufa, à temperatura constante de 105 °C e então pesá-la novamente. Considerando que a massa de solo seco é igual a 70 g, isto indica que 30 g de água foram removidas do solo úmido. Expressando em quilogramas, isto equivale a 30 kg de água em 70 kg de solo seco.

Como o conteúdo de água do solo em massa ( $\theta_m$ ) é geralmente expresso em termos de kg de água associados a 1 kg de solo seco (não 1 kg de solo úmido), podem ser realizados os seguintes cálculos:

$$\frac{30 \text{ kg de água}}{70 \text{ kg de solo seco}} = \frac{x \text{ kg de água}}{1 \text{ kg de solo seco}}$$

$$x = 30/70 = 0,428 \text{ kg de água/kg solo seco} = \theta_m$$

Para calcular o conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ), é necessário conhecer a densidade do solo seco, a qual neste caso será considerado como sendo 1,3 Mg m<sup>-3</sup>. Em outras palavras, um metro cúbico deste solo tem uma massa de 1300 kg. Dos cálculos acima sabemos que a massa de água associada com 1300 kg é igual a 0,428 x 1300 ou 556 kg.

Considerando que 1 m<sup>3</sup> de água tem massa de 1000 kg, os 556 kg de água ocuparão 556/1000 ou 0,556 m<sup>3</sup>. Assim, o conteúdo volumétrico de água é 0,556 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> de solo seco:

$$\frac{1300 \text{ kg de solo}}{\text{m}^3 \text{ de solo}} \times \frac{\text{m}^3 \text{ água}}{1000 \text{ kg de água}} \times \frac{0,428 \text{ kg de água}}{\text{kg de solo}} = \frac{0,556 \text{ m}^3 \text{ água}}{\text{m}^3 \text{ de solo}}$$

A relação entre o conteúdo gravimétrico e volumétrico de água no solo pode ser expressa como:

$$\theta = D_s \times \theta_m$$

### Medida dos Potenciais da Água no Solo

**Tensiômetros** - A tensão com que a água é retida é uma expressão do potencial da água do solo ( $\psi$ ). Tensiômetros de campo medem esta tensão. Tensiômetros de campo (Figura 2.16) medem sua atração ou tensão. O tensiômetro é basicamente um tubo preenchido com água fechado na sua extremidade inferior com uma placa porosa de cerâmica e com sua extremidade superior fechada hermeticamente. Uma vez instalado o tensiômetro no solo, a água contida em seu interior move-se através da placa porosa, em direção ao solo, até que o potencial no tensiômetro se iguale ao potencial mátrico da água no solo. A medida que a água sai do tensiômetro, desenvolve-se um vácuo na extremidade superior, o qual pode ser medido em um manômetro ou através de um dispositivo eletrônico. Se o solo for novamente umedecido por chuva ou irrigação, a água entrará no tensiômetro através da placa porosa, reduzindo o vácuo ou a tensão registrada pelo medidor. Tensiômetros são operantes entre potenciais de 0 a -85 kPa, esta faixa inclui mais da metade da água armazenada na maioria dos solos. Tensiômetros de laboratório, chamados mesas de tensão, operam em uma faixa similar de potenciais. Quando o solo seca além de -80 a -85 kPa, os tensiômetros falham, porque o ar passa através dos poros de cerâmica, reduzindo o vácuo. Um dispositivo eletrônico pode ser adaptado a um tensiômetro de campo, para controlar automaticamente um sistema de irrigação.

**Tabela 2.2 Métodos para medida da água no solo**

*Note que mais de um método pode ser necessário para abranger toda a amplitude de variação da umidade no solo.*

Método	Medidas de água no solo		Amplitude útil (kPa)	Utilização		Comentários
	Conteúdo	Potencial		Campo	Laboratório	
1. Gravimétrico	x		0 a <-10000		x	Amostragem destrutiva; lenta (1 a 2 dias) exceto com utilização de microondas. Método padrão para calibração.
2. Blocos de resistência elétrica	x		-100 a <-1500	x		Pode ser automatizado; não é sensível a conteúdos de umidade próximos ao ótimo para as plantas.
3. Moderação de nêutrons	x		0 a <-1500	x		Necessita licença para o uso (radiação); equipamento de alto custo; apresenta deficiências em solos com alto teor em matéria orgânica; requer tubo de acesso.
4. Reflectometria de microondas (TDR)	x		0 a <-10000	x	x	Pode ser automatizado; precisão de 1 kPa; requer guias de onda; instrumento de alto custo.
5. Tensiômetro		x	0 a -85	x		Precisão de 0,1 a 1 kPa; faixa limitada; barato; pode ser automatizado; necessita de manutenção periódica.
6. Psicrômetro		x	50 a <-10000	x	x	Razoavelmente caro; ampla faixa de leitura; precisão de $\pm 50$ kPa.
7. Câmara de pressão		x	50 a <-10000		x	Utilizado em conjunto com o método gravimétrico para construção da curva característica de água no solo.

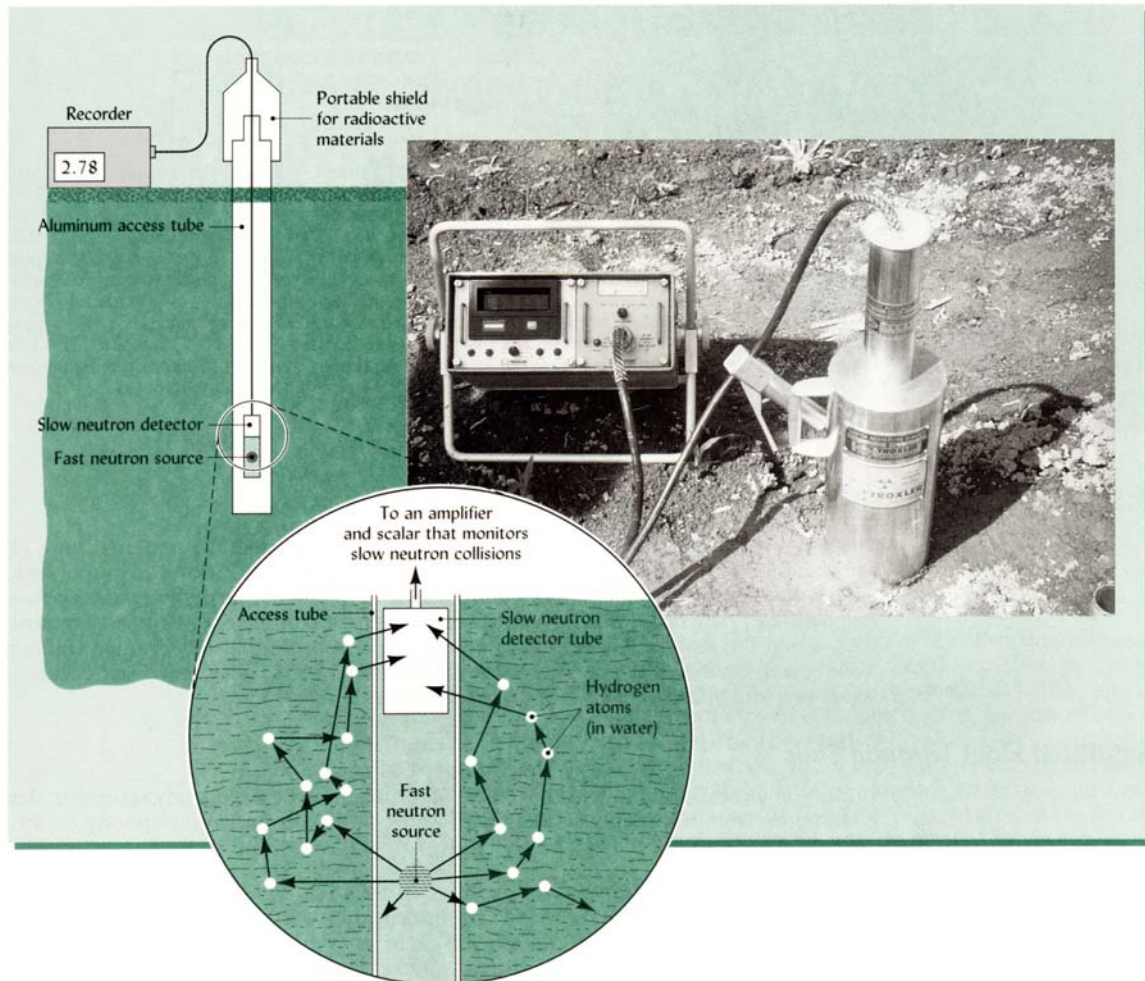
**Psicrômetro** – Como as plantas devem superar forças mátricas e osmóticas ao absorver água do solo, muitas vezes é necessário um instrumento que meça ambas as forças. A umidade relativa do ar do solo é afetada pelas forças mátricas e osmóticas, as quais restringem a saída de moléculas da água no estado líquido.

Em um psicrômetro, um par termo elétrico localizado em uma pequena (aproximadamente 5 mm) câmara porosa de cerâmica é resfriado o suficiente para provocar a condensação de uma gota de água do ar sobre este par. Quando a corrente é desligada, a gota de água evapora a uma taxa inversamente proporcional a umidade relativa do ar, a qual, por sua vez é relacionada ao potencial de umidade no solo. A voltagem gerada pela evaporação da gota de água é convertida em uma leitura de potencial de água no solo ( $\psi_m + \psi_o$ ). O psicrômetro é mais útil em solos relativamente secos, onde a imprecisão de  $\pm 50$  kPa envolve quantidades desprezíveis de água.

**Câmara de pressão** – Uma câmara de pressão (Figura 5.17) é utilizada para submeter o solo a potenciais mátricos tão baixos quanto  $-10.000$  kPa. Após a aplicação de um potencial mátrico específico a um conjunto de amostras de solo, seu conteúdo de água é determinado gravimetricamente. Esta importante ferramenta de laboratório torna possível medidas precisas do conteúdo de água, em uma ampla faixa de potenciais mátricos,

em um tempo relativamente curto. Ela é usada em conjunto com a mesa de tensão, na obtenção de dados para construir curvas características de água no solo como mostrado na Figura 2.12.

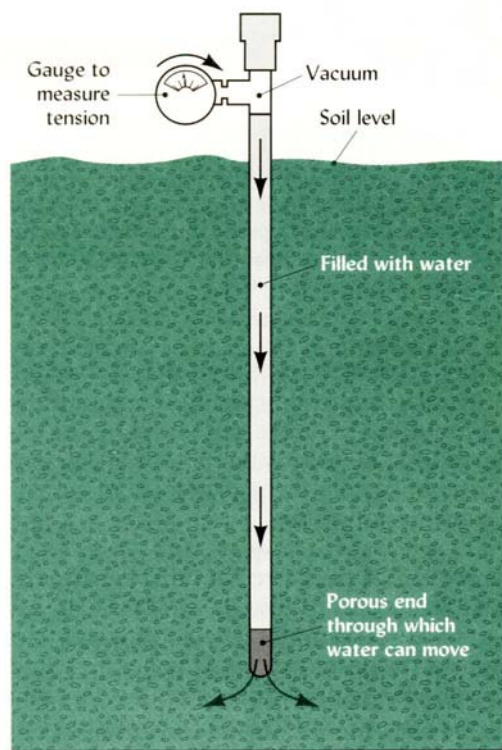
**Blocos de Resistência Elétrica** – Este método utiliza pequenos blocos de gesso poroso, nylon, ou fibra de vidro devidamente incrustadas com eletrodos. Quando os blocos são colocados em solos úmidos eles absorvem água numa quantidade proporcional ao conteúdo de umidade do solo. A resistência ao fluxo de elétrons entre os eletrodos decresce proporcionalmente (Figura 2.18). A precisão e a amplitude da leitura destes dispositivos é limitada (Tabela 2.2). Entretanto, eles são de baixo custo e podem ser utilizados para medidas aproximadas no conteúdo de umidade do solo, durante uma ou mais estações de cultivo. É possível conectá-los a aparelhos eletrônicos para que sistemas de irrigação possam ser ativados e desativados automaticamente a conteúdos de umidade pré estabelecidos.



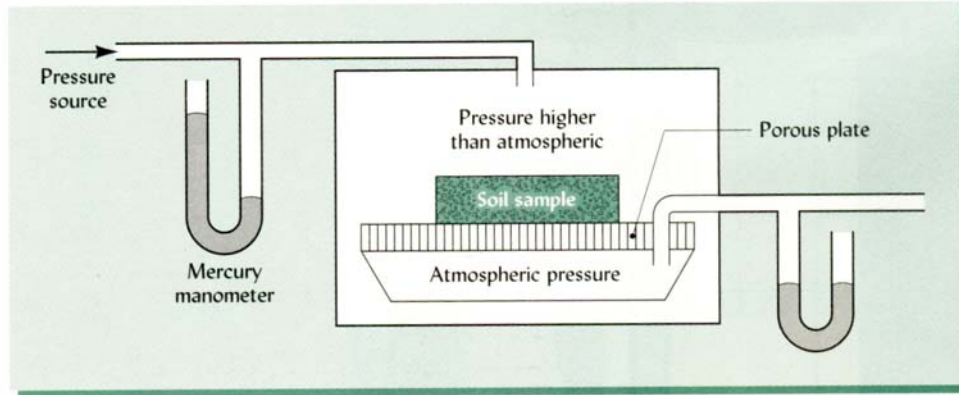
**FIGURA 2.14** Como uma sonda de nêutrons funciona. A sonda contendo uma fonte de nêutrons rápidos e um detector de nêutrons lentos é colocada no solo através de um tubo de acesso. Os nêutrons são emitidos pela fonte (rádio ou amerício-berílio) a uma velocidade muito alta (nêutrons rápidos). Quando estes nêutrons colidem com átomos menores, tais como hidrogênios contidos na molécula de água, a direção do movimento é alterada e eles perdem parte da sua energia. Estes nêutrons lentos são medidos por um tubo detector. A leitura é relacionada ao conteúdo de umidade do solo. A fotografia mostra uma sonda de nêutron no campo. Um cilindro confeccionado em metal pesado protege o operador da radiação. Este protetor é colocado sobre o tubo de acesso de alumínio (canto inferior direito) e a fonte de nêutron é colocada no interior do tubo para a leitura (foto cortesia de R. Weil).



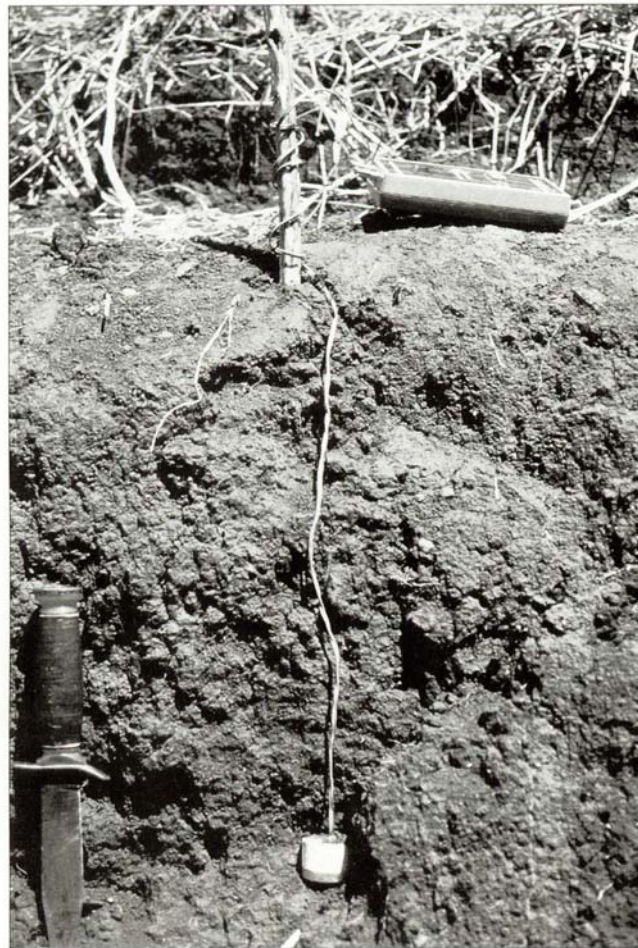
**FIGURE 2.15** Medida do conteúdo de água no solo utilizando TDR. O instrumento eletrônico envia um pulso eletromagnético de energia por duas barras paralelas de metal, que o operador está empurrando no interior do solo. O TDR faz leituras precisas, da ordem de picossegundos, na velocidade da qual os impulsos se deslocam nas barras, a qual é influenciada pela natureza do solo. Microprocessadores analisam os padrões de onda gerados e calculam a constante dielétrica do solo. Como a constante dielétrica do solo é influenciada principalmente pelo seu conteúdo de água, o instrumento pode precisamente converter estas medidas em conteúdo volumétrico de água no solo (foto cortesia de Soilmoisture Equipment Corporation, Goleta, Califórnia).



**FIGURA 2.16** O método do tensiômetro determina o potencial da água no campo. A foto acima mostra os componentes essenciais do tensiômetro. A água move-se através da extremidade porosa do instrumento em resposta ao potencial mátrico do solo. O vácuo criado é medido pelo medidor que ler a tensão em kPa (potencial da água – kPa).



**FIGURA 2.17** Câmara de pressão usada para determinar o conteúdo e o potencial mátrico do solo. Uma fonte exterior de gás cria uma pressão dentro da câmara. A água é forçada a sair do solo através de uma placa porosa colocada no interior da câmara na pressão atmosférica. A pressão aplicada quando o fluxo de água cessa dar uma medida do potencial da água no solo. Este equipamento mede valores de potencial muito mais baixos (solos secos) do que os tensiômetros e placas de tensão.



**FIGURA 2.18** Corte longitudinal de um solo, mostrando um bloco de resistência elétrica, confeccionado com gesso, localizado à aproximadamente 45 cm abaixo da superfície. Fios conectam os blocos a um medidor de resistência elétrica. Os blocos podem ser enterrados à diferentes profundidades na zona radicular das culturas (Foto cortesia de R. Weil).

## 2.5 Descrição Qualitativa da Umidade do Solo

O valor do potencial e o comportamento da água no solo são dependentes das moléculas mais distantes das superfícies das partículas e, portanto com maior potencial. À medida que a umidade é retirada, o solo e a água passam por uma série de mudanças graduais no comportamento físico e em suas relações com as plantas. Estas mudanças são devidas, principalmente, ao fato de que a água remanescente no solo seco está presente nos microporos, e em finos filmes onde o seu potencial é reduzido, principalmente pela ação das forças mátricas. Portanto, o potencial mátrico é responsável por uma proporção crescente do potencial total da água no solo, enquanto que a proporção atribuída ao potencial gravitacional decresce.

Para estudar estas mudanças e introduzir termos normalmente utilizados para descrever os diferentes graus de umedecimento do solo, observaremos o conteúdo de umidade e energia da água no solo durante e após uma chuva pesada ou irrigação. Os termos a serem introduzidos descrevem os diversos estágios de umedecimento do solo, e não devem ser interpretados como diferentes formas de água do solo. Devido ao fato destes termos serem basicamente qualitativos e não apresentarem bases científicas precisas, seu uso é motivo de controvérsia. Entretanto, seu uso para fins didáticos é bastante conveniente, pois eles são amplamente utilizados em fins práticos e ajudam no entendimento de importantes conceitos a respeito do comportamento da água no solo.

### **Capacidade Máxima de Retenção de Água**

Quando todos os poros do solo estão preenchidos com água da chuva ou irrigação, o solo encontra-se saturado (Figura 2.19) e, portanto na sua *capacidade máxima de retenção de água*. O potencial mátrico é próximo a zero, sendo basicamente o mesmo que da água pura. O conteúdo volumétrico de água é basicamente igual a porosidade total. O solo permanecerá na sua capacidade máxima de retenção enquanto ocorrer o processo de infiltração, a água nos macroporos (muitas vezes, chamada *água gravitacional*) percolará sob influência principalmente de forças gravitacionais (potenciais hidrostático e gravitacional). A velocidade de infiltração é reduzida nos macroporos, principalmente pelas forças de atrito associadas à viscosidade da água. Como a viscosidade da água decresce, com o aumento da temperatura, a drenagem será mais rápida em solos com maiores temperaturas. Dados sobre a capacidade máxima de retenção e profundidade média nos solos em uma bacia são úteis para predizer quanto da água da chuva pode ser temporariamente armazenada no perfil.

### **Capacidade de campo**

Uma vez que a chuva ou irrigação, tenha cessado, a drenagem nos macroporos ocorrerá rapidamente, em resposta ao gradiente hidráulico (principalmente pela ação gravidade). Após um período de um a três dias, este movimento descendente rápido se tornará desprezível, à medida que as forças mátricas se tornam o fator determinante no movimento da água remanescente (Figura 2.20). O solo é então dito estar na sua capacidade de campo. Nesta condição, toda a água foi drenada dos macroporos, tendo o ar ocupado estes espaços. Os microporos, ou poros capilares, ainda estarão preenchidos com água, podendo fornecer água às plantas. O potencial mátrico na capacidade de campo possui pequena variação entre solos, mas é geralmente da ordem de  $-10$  a  $-30$  kPa. O movimento de água continuará por fluxo insaturado, mas a taxa de movimento é muito lenta, devido principalmente às forças capilares, operantes somente nos microporos (Figura 2.19). Nesta situação, a água é encontrada em poros pequenos o suficiente para evitar que ela seja drenada por forças gravitacionais, mas grandes o suficiente para permitir o fluxo capilar em resposta ao gradiente de potencial mátrico, sendo algumas vezes chamada de água capilar.

Toda a água contida no solo é afetada pelas forças gravitacionais, no entanto, o termo água gravitacional refere-se a porção da água no solo que é prontamente drenada entre o estado de capacidade máxima de retenção e capacidade de campo. A maior parte da lixiviação ocorre à medida que a água gravitacional é drenada dos macroporos, antes que a capacidade de campo seja alcançada. Deste modo, a água gravitacional inclui grande parte da água que transporta substâncias químicas como íons, pesticidas e contaminantes orgânicos para o lençol freático e deste para lagos e rios.

A capacidade de campo é um termo muito útil, pois refere-se a um grau aproximado de umidade no solo, no qual diversas propriedades importantes estão em estado de transição:

- a) Na capacidade de campo, o solo retém a quantidade máxima de água útil para as plantas. Quantidades adicionais, apesar de retidas com menor energia, são de uso limitado às plantas, por serem retidas por um curto período de tempo, antes da drenagem, e por causarem restrições à aeração adequada. A drenagem da água gravitacional do solo é geralmente um requisito para o crescimento ótimo das plantas (com exceção de plantas hidrofílicas, como o arroz).
- b) Na capacidade de campo, o solo está próximo ao limite de plasticidade - isto é, o solo se comporta como um semi-sólido friável à conteúdos de umidade abaixo da capacidade de campo, e como um material plástico e moldável à conteúdos de água acima da capacidade de campo. Deste modo, a umidade do solo na capacidade de campo é próxima a umidade do solo ideal para cultivo ou escavação.
- c) Na capacidade de campo, a porosidade de aeração é adequada para a maioria dos microrganismos aeróbios e para o crescimento da maioria das plantas.

### **Ponto de murcha permanente**

Uma vez que um solo não vegetado tenha sido drenado até a capacidade de campo, o processo de secagem continua lentamente, especialmente se a superfície do solo é coberta para reduzir a evaporação. Entretanto, caso haja plantas crescendo no solo, elas removerão água da zona radicular e o solo continuará secando. Primeiramente, as raízes removerão a água dos macroporos, onde seu potencial é relativamente alto. À medida que esses poros são esvaziados, as raízes absorverão água de poros progressivamente menores e finos filmes de água nos quais o potencial mátrico é baixo e as forças de atração da água às superfícies sólidas são maiores. Assim, se tornará progressivamente mais difícil para as plantas remover água do solo a uma taxa suficiente para suprir suas necessidades.

Quando o solo seca, a taxa de absorção de água pelas plantas não será adequada para a manutenção de suas necessidades, e elas poderão murchar durante o dia para conservar sua umidade. Inicialmente, as plantas recuperarão sua turgescência à noite quando a água não está sendo perdida através das folhas e as raízes podem suprir a demanda hídrica das plantas. Posteriormente, a planta permanecerá murcha durante à noite e o dia, quando as raízes não puderem gerar potenciais baixos o suficiente para absorver a água do solo. Embora, ainda não estejam mortas, as plantas estarão permanentemente murchas e morrerão se não houver fornecimento de água.

Para a maioria das plantas, estas condições desenvolvem-se quando o potencial da água no solo apresenta um valor em torno de - 1500 kPa (-15 Bars). Algumas plantas, especialmente xerófitas (plantas típicas do deserto) podem continuar removendo água a potenciais de até mesmo -1800 a 2000 kPa, mas a quantidade de água disponível entre -1500 kPa e -2000 kPa é muito pequena (Figura 2.21).

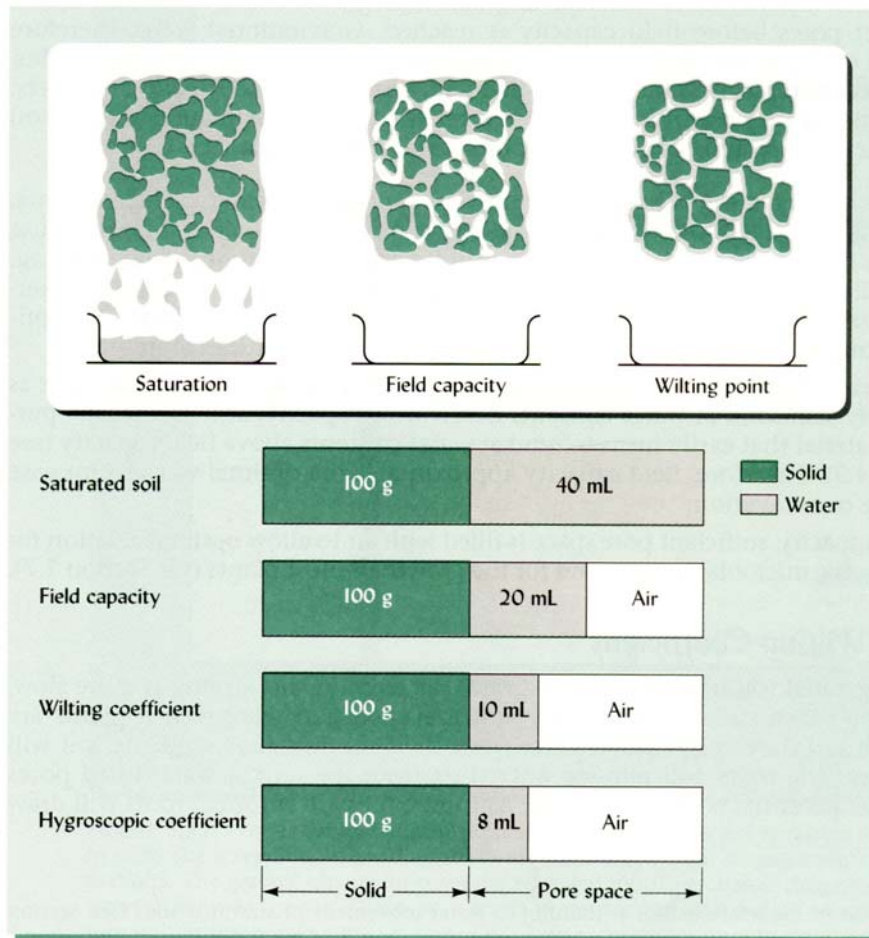
O conteúdo de água no solo neste estágio é chamado de ponto de murcha permanente e, por convenção assume-se que seja a quantidade de água retida pelo solo a um potencial de -1500 kPa. O solo terá uma aparência de pó seco, apesar de alguma quantidade de água estar retida nos menores microporos e em filmes muito finos (com espessura de aproximadamente 10 moléculas), ao redor das partículas individuais do solo (Figura 2.21). A água disponível à planta é considerada como a água retida no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (entre -10 a -30 kPa e -1500 kPa) (Figura 2.21). A quantidade de água capilar remanescente no solo, que não estar disponível as plantas podem ser considerável, especialmente, em solos de textura fina e ricos em matéria orgânica.

### **Coefficiente Higroscópico**

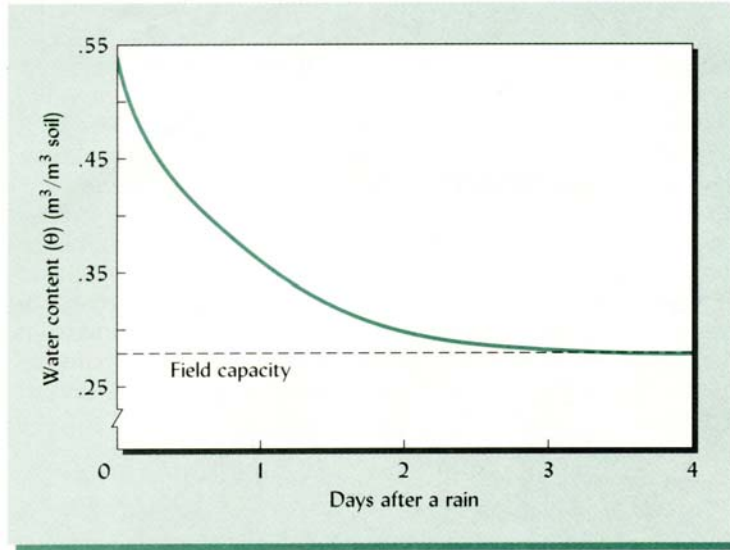
Apesar das raízes das plantas geralmente não absorverem água do solo além do ponto de murcha permanente, se o solo é exposto ao ar, a água continuará a ser perdida por evaporação. Quando o conteúdo de umidade do solo é reduzido abaixo do ponto de murcha permanente, as moléculas de água que permanecem são firmemente retidas, a maioria sendo adsorvidas às superfícies coloidais. Este estado é alcançado, quando a atmosfera acima de uma amostra de solo estiver essencialmente saturada com vapor d'água (98 % de umidade relativa) e o equilíbrio é estabelecido a um potencial de -3100 kPa. A água está teoricamente em filmes de apenas 4 a 5 moléculas de espessura e retida tão firmemente que a maior parte é considerada não líquida e pode mover-se apenas na fase de vapor. O conteúdo de umidade do solo neste ponto é chamado coeficiente higroscópico. Solos com alto conteúdo de materiais coloidais (argila e húmus) reterão mais água nestas condições do que solos arenosos, com baixo conteúdo de argila e húmus. (Tabela 2.3). A água do solo não



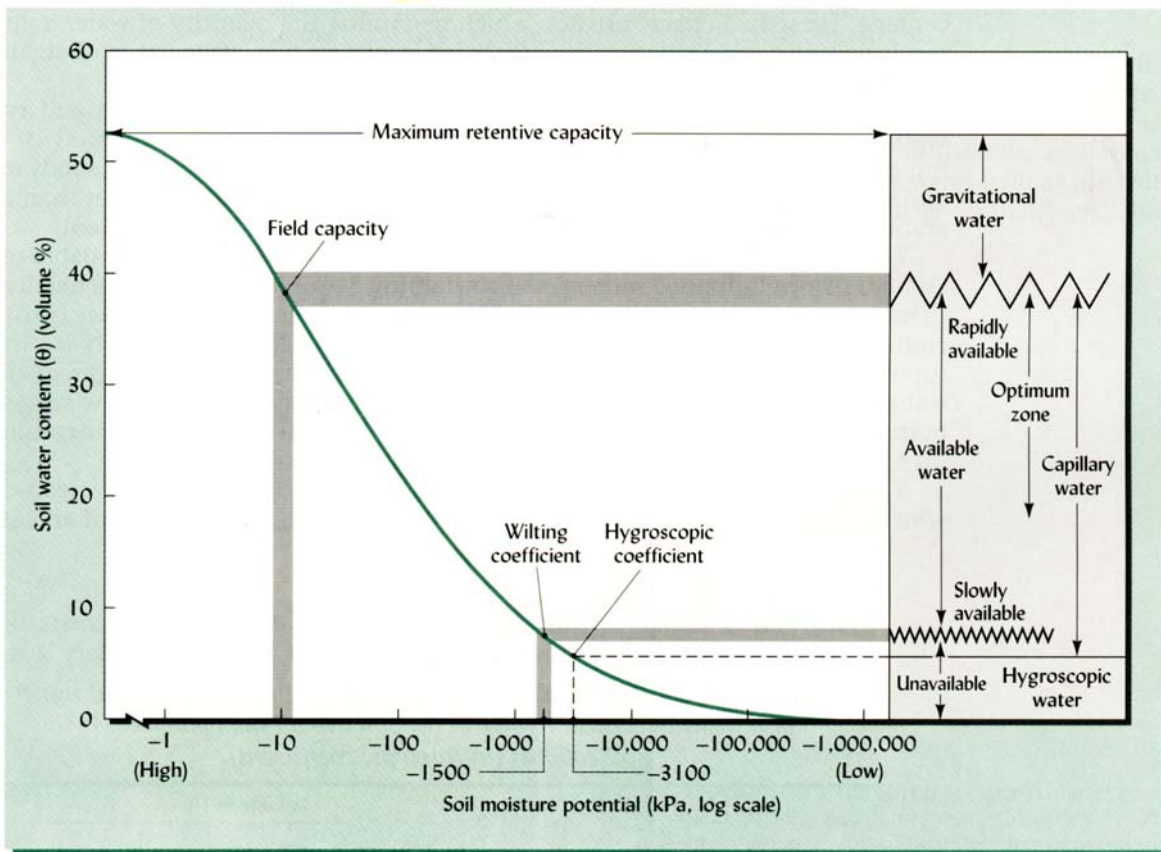
disponível às plantas inclui a água higroscópica e a porção da água capilar retida à potenciais abaixo de -1500 kPa (Figura 2.21).



**FIGURA 2.19** Volumes de água e ar associados a 100 g de um solo franco siltoso bem granulado em diferentes teores de umidade. A barra superior mostra a situação quando o solo está completamente saturado. Esta situação, normalmente ocorrerá por curtos períodos de tempo, durante uma chuva ou quando o solo está sendo irrigado. A água será drenada dos macroporos. O solo estará então na sua capacidade de campo. As plantas removerão água do solo rapidamente até que comecem a murchar. Quando murcharem permanentemente o solo estará no ponto de murcha permanente. Uma redução adicional no conteúdo de água até o coeficiente higroscópico é ilustrada na barra inferior. Neste ponto a água é retida firmemente, principalmente pelos colóides do solo.



**FIGURA 2.20** O conteúdo de água no solo diminui rapidamente através da drenagem após um período de chuva ou irrigação. Após dois ou três dias, a taxa de movimento de água é muito lenta e o solo está na capacidade de campo.



**FIGURA 2.21** Curva do conteúdo de água versus potencial mátrico de um solo franco relacionada aos diferentes termos utilizados para descrever a água no solo. As linhas irregulares no diagrama à direita sugerem que medidas tais como capacidade de campo são somente aproximações. A mudança gradual do

potencial com a umidade do solo indica que não existe diferentes formas de água no solo. Ao mesmo tempo, termos como gravitacional e disponível ajudam na descrição qualitativa da umidade no solo.

## 2.6 Fatores que Afetam a Quantidade de Água Disponível às Plantas

A quantidade de água disponível no solo para as plantas é determinada por um grande número de fatores, incluindo as relações entre conteúdo de água e potencial para cada horizonte do solo, resistência à penetração e efeitos da densidade sobre o crescimento radicular, profundidade do solo, profundidade do sistema radicular, e estratificação do perfil.

### Potencial Mátrico

O potencial mátrico  $\psi_m$  influencia a quantidade de água que as plantas podem absorver, através de seu efeito nas quantidades de água retidas na capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Estas duas características, que determinam a quantidade de água que um solo pode fornecer as plantas em crescimento, são influenciadas pela textura, estrutura e conteúdo de matéria orgânica no solo.

A influência da textura na capacidade de campo, ponto de murcha e água disponível é mostrada na Figura 2.22. Observe que a medida que a textura se torna mais fina, há um aumento na armazenagem de água disponível de solos arenosos para francos e franco siltosos. Solos argilosos, normalmente fornecem menos água disponível do que franco siltosos bem granulados, pelo fato de solos argilosos possuírem um elevados valores de ponto de murcha permanente.

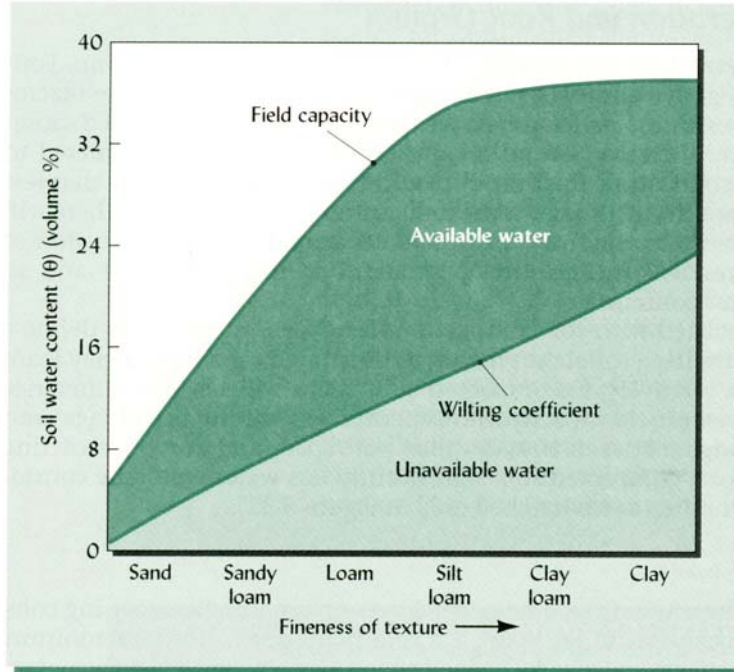
A influência da matéria orgânica merece atenção especial. O conteúdo de água disponível de um solo mineral bem drenado, contendo 5% de matéria orgânica, é geralmente maior do que quando comparado a um solo semelhante, contendo 3% de matéria orgânica. Há uma controvérsia, a respeito de até que ponto o efeito favorável é devido à capacidade de fornecimento de água da matéria orgânica, e quanto é devido aos efeitos indiretos da matéria orgânica sobre a estrutura e porosidade total do solo. Evidências sugerem que os fatores diretos e indiretos contribuem para os efeitos favoráveis da matéria orgânica sobre a disponibilidade de água no solo.

Os efeitos diretos são devido à alta capacidade de retenção de água da matéria orgânica, a qual é muito maior do que a de um igual volume de material mineral. Apesar do conteúdo de água retido pela matéria orgânica no ponto de murcha permanente ser consideravelmente maior que aquele retido pelo material mineral, a quantidade de água disponível para a absorção das plantas ainda é maior na fração orgânica. A Figura 2.23 apresenta os dados de uma série de experimentos que justificam esta conclusão. A matéria orgânica afeta indiretamente a quantidade de água disponível para as plantas, através de sua influência sobre a estrutura e espaço poroso total do solo. A matéria orgânica ajuda a estabilizar a estrutura, aumentando o volume total e tamanho de poros do solo. Isto resulta em um aumento da infiltração e capacidade de retenção de água, com aumento simultâneo da quantidade de água retida no ponto de murcha. O reconhecimento dos efeitos benéficos da matéria orgânica sobre disponibilidade de água às plantas é essencial para um correto manejo do solo.

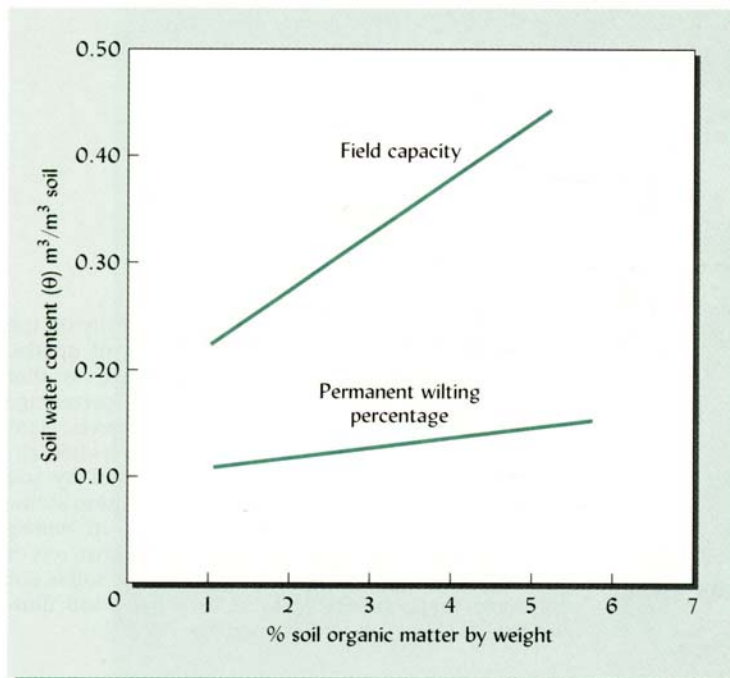
**TABELA 2.3 Conteúdo volumétrico de umidade ( $\theta$ ) à capacidade de campo, coeficiente higroscópico e conteúdo de água capilar para três solos representativos.**

*Observe que o solo argiloso retém mais água na capacidade de campo, mas grande parte desta água é retida firmemente no solo a um potencial -31 bars pelos colóides do solo (coeficiente higroscópico)*

Solo	Capacidade de Campo 10-30 kPa	$\theta$ , %	
		Coeficiente Higroscópico, -3100 kPa	Água Capilar, (coluna 1- coluna 2)
Franco arenoso	12	3	9
Franco siltoso	30	10	20
Argiloso	35	8	17



**FIGURA 2.22** Relação geral entre características da água e textura do solo. Note que o valor do ponto de murcha permanente aumenta à medida que a textura torna-se mais fina. A capacidade de campo aumenta até a textura franco silteosa, e após torna-se constante. Lembre-se que estas são curvas representativas, solos em particular podem apresentar valores diferentes destes mostrados.



**FIGURA 2.23** Efeitos do conteúdo de matéria orgânica sobre a capacidade de campo e ponto de murcha permanente em solos franco silteosos. A diferença entre as duas linhas mostradas é o conteúdo de umidade disponível, o qual foi obviamente mais alto em solos com maiores teores de matéria orgânica. [Redesenhado de Hudson (1994); usado com permissão da Soil & Water Conservation Society]

## ***Efeitos da Compactação sobre o Potencial Mátrico, Aeração e Crescimento Radicular***

A compactação do solo geralmente reduz a quantidade de água disponível para as plantas (Figura 2.24). Quatro fatores são responsáveis por este efeito. Primeiramente, a compactação reduz os macroporos e os microporos resultando em poros ainda menores. À medida que as partículas de argila são aproximadas, pelo processo de compactação, a resistência do solo pode tornar-se superior a 2000 kPa, o nível considerado limitante à penetração radicular. Em segundo lugar, a redução na macroporosidade geralmente significa que menos água é retida na capacidade de campo. Terceiro, com a redução da quantidade de macroporos, haverá menor porosidade de aeração, quando o solo estiver próximo da capacidade de campo. Quarto, o surgimento de microporos muito pequenos aumentará o valor do ponto de murcha permanente e também diminuirá a água disponível.

**Least Limiting Water Range (Intervalo Hídrico Ótimo).** Estes quatro fatores associados com a compactação do solo são integrados na Figura 2.24, que compara dois diferentes conceitos de água disponível para as raízes das plantas. A Figura 2.24 ilustra o efeito da compactação (densidade do solo) na variação do conteúdo de água definindo **a água disponível para as plantas** e o **intervalo hídrico ótimo**. A água disponível para as plantas é definida como o potencial mátrico entre a capacidade de campo (-10 a -30 kPa) e o ponto de murcha permanente (-1500 kPa). Então, a água disponível para as plantas é aquela que não é retida com força pelas raízes e nem pelo solo e drena facilmente de acordo com a gravidade. O intervalo hídrico ótimo muda o conteúdo de água de acordo com as condições do solo, de forma que não haja restrição severa ao crescimento das raízes.

**Suprimento de Oxigênio em Solos Úmidos.** De acordo com o conceito do Intervalo Hídrico Ótimo, os solos são demasiadamente úmidos para o crescimento normal das raízes, quando o seu espaço poroso é totalmente preenchido com água, e menos de 10% dos poros estão preenchidos com ar. Para este conteúdo de água, a falta de oxigênio dificulta a respiração e limita o crescimento das raízes. Em solos bem estruturados, este conteúdo de água corresponde à umidade próxima a capacidade de campo. Entretanto, em solos compactados com poucos poros grandes (ou largos) o suprimento de oxigênio pode se tornar limitante antes do conteúdo de água atingir a capacidade de campo (conteúdo de água mais baixo), devido alguns poros pequenos ser preenchidos com ar.

**Resistência do solo quando seco.** O conceito do intervalo hídrico ótimo diz que os solos são demasiadamente **secos** para o crescimento normal das raízes quando a resistência do solo (determinada pela pressão requerida para inserir uma haste pontuda no solo) excede, aproximadamente, 2000 kPa. Em solos bem estruturados este valor de resistência ocorre a conteúdos de água próximos ao ponto de murcha permanente, mas em solos compactados, a resistência atinge o valor de 2000 kPa em elevados conteúdos de água (Figura 2.24). Em resumo, o conceito do intervalo hídrico ótimo sugere que o crescimento das raízes é limitado pela ausência de oxigênio quando o solo está muito úmido e pela incapacidade das raízes em penetrar no solo quando o mesmo está seco.

### ***Potencial Osmótico***

A presença de sais solúveis, resultante da aplicação de fertilizantes ou de compostos que ocorrem naturalmente no solo pode influenciar a absorção de água pelas plantas. Para solos com altos teores de sais, o estresse hídrico será também causado pelo potencial osmótico  $\psi_o$ , além do potencial mátrico. O potencial osmótico tende a reduzir o conteúdo de água disponível nestes solos, pois mais água é retida no ponto de murcha permanente do que ocorreria apenas no caso do potencial mátrico. Na maioria dos solos das regiões úmidas, os efeitos do potencial osmótico são insignificantes, mas são de considerável importância para certos solos de regiões secas que acumulam sais solúveis provenientes da irrigação ou processos naturais.

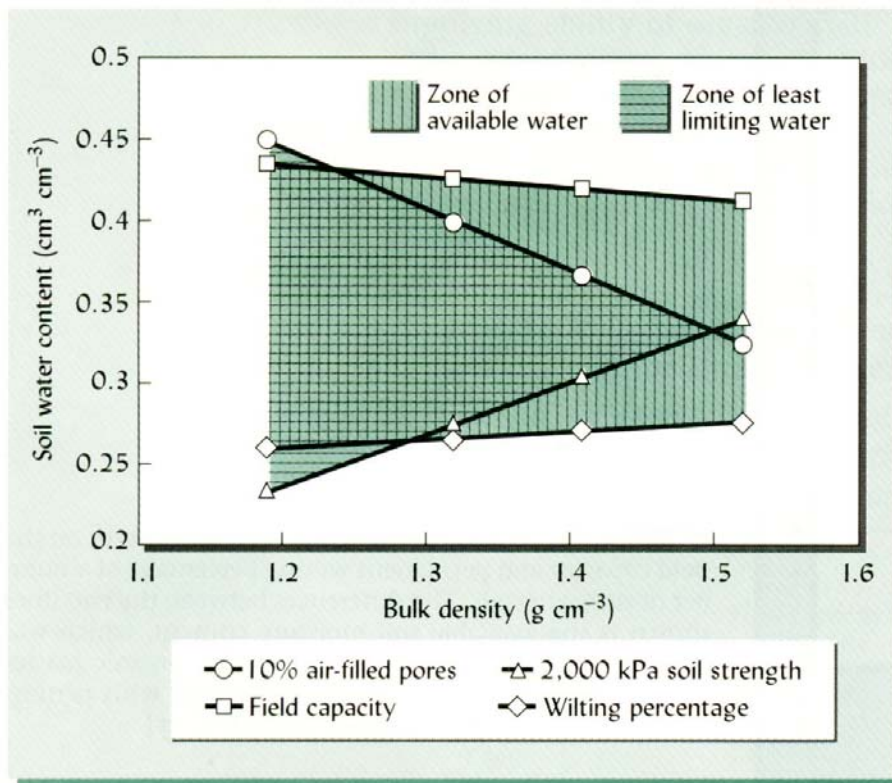
### ***Profundidade do solo e Desenvolvimento das raízes***

Até então, nos referimos à capacidade de retenção de água disponível como a porcentagem do volume de solo constituída de poros que podem reter água à potenciais entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. O volume total de água disponível dependerá do volume total do solo

explorado pelas raízes das plantas. Este volume pode ser definido pela profundidade total do solo acima de camadas de restrição ao crescimento radicular, pela profundidade do sistema radicular de uma espécie de planta em particular, ou mesmo pelo tamanho de um vaso escolhido para conter a planta. A profundidade do solo disponível para a exploração radicular é de particular importância para plantas com sistema radicular profundo, especialmente em regiões sub úmidas e áridas, onde a vegetação perene depende da água armazenada nos solos para a sobrevivência, durante os longos períodos de seca.

A estratificação do perfil pode influenciar a quantidade de água disponível e seu movimento no solo. Camadas impermeáveis reduzem drasticamente a taxa de movimento da água e a penetração das raízes das plantas, reduzindo assim a profundidade do solo da qual a umidade é retirada. Camadas arenosas também agem como barreiras ao movimento da água no solo, proveniente de camadas de textura fina situadas acima.

A capacidade dos solos em armazenar água determina em grande parte sua utilidade para o crescimento vegetal. A produtividade de sistemas florestais é normalmente relacionada com a capacidade de retenção de água do solo. Esta capacidade fornece um equilíbrio entre clima e produção vegetal. Em solos irrigados, ajuda a determinar a frequência na qual a água deve ser aplicada. A capacidade de retenção de água do solo se torna mais significativa à medida que o uso da água industrial e doméstico, ou mesmo para irrigação, começa exaurir o suprimento natural. Para estimar a capacidade de retenção de água de um solo, cada horizonte, no qual as raízes têm acesso, deve ser considerado separadamente e então somado aos demais para fornecer a capacidade de retenção de água total para o perfil (Quadro 2.3).



**FIGURA 2.24** Influência do aumento da densidade do solo sobre a faixa do conteúdo de água disponível para as plantas. Tradicionalmente, o conteúdo de água disponível é definido como aquele retido entre a capacidade de campo e ponto de murcha permanente (linha vertical). Se o solo é compactado, o uso de água pelas plantas pode ser restrito pela má aeração (< 10% de porosidade de aeração) a altos conteúdos de água e pela resistência do solo que restringe a penetração radicular à baixos conteúdos de água (>2000 kPa). Este critério define o *intervalo hídrico ótimo* mostrado pelas linhas horizontais. Os limites definidos pela água disponível e pelo conceito do intervalo hídrico ótimo apresentam resultados similares quando o solo não se encontra compactado (densidade em torno de 1,25 para o solo ilustrado). [Adaptado de Silva & Kay (1997)]

**QUADRO 2.3 CÁLCULO DA CAPACIDADE TOTAL DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE UM PERFIL DE SOLO**

A quantidade total de água disponível para o crescimento de plantas no campo é função da profundidade do sistema radicular, e do somatório da água retida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente em cada um dos horizontes explorado pelas raízes. Para cada horizonte, a capacidade de retenção de água disponível em massa é estimada pela diferença entre o conteúdo de água  $\theta_m$  (Mg de água por 100 Mg de solo) na capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Este valor pode ser convertido em conteúdo volumétrico de água  $\theta$ , multiplicando-o pela razão entre a densidade do solo e a densidade da água. Finalmente, este valor é multiplicado pela espessura do horizonte, fornecendo a quantidade total de água disponível retida neste horizonte, em centímetros. Para o primeiro horizonte descrito na Tabela 2.4, o cálculo é o seguinte:

$$\left( \frac{22 \text{ g}}{100 \text{ g}} - \frac{8 \text{ g}}{100 \text{ g}} \right) \times \frac{1,2 \text{ Mg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1 \text{ Mg}} \times 20 \text{ cm} = 3,36 \text{ cm}$$

Note que todas as unidades se cancelam com exceção do cm, resultando em uma altura de água disponível (cm) retida no horizonte. Na Tabela 2.4, a capacidade de retenção de água disponível de todos os horizontes dentro da zona radicular é somada para fornecer a capacidade de retenção de água disponível total para o sistema solo-planta. Como nenhuma raiz penetrou no último horizonte (1,0 a 1,25 m), este não foi incluído no cálculo. Podemos concluir que para o sistema solo-planta ilustrado, 14,13 cm de água poderiam ser armazenados para o uso das plantas. A uma taxa de consumo de 0,5 cm de água por dia, este solo poderia manter um fornecimento de em torno de 4 semanas.

**TABELA 2.4 Cálculo da capacidade de retenção de água disponível estimada para um perfil de solo**

Profundidade do solo, cm	Comprimento radicular relativo	Ds Mg m <sup>-3</sup>	CC g 100g <sup>-1</sup>	PMP	Capacidade de retenção de água disponível cm
0-20	xxxxxxxxx	1,2	22	8	$20 \times 1,2 \times \left( \frac{22}{100} - \frac{8}{100} \right) = 3,36 \text{ cm}$
20-40	xxxx	1,4	16	7	$20 \times 1,4 \times \left( \frac{16}{100} - \frac{7}{100} \right) = 2,52 \text{ cm}$
40-75	xx	1,5	20	10	$35 \times 1,5 \times \left( \frac{20}{100} - \frac{10}{100} \right) = 5,25 \text{ cm}$
75-100	xx	1,5	18	10	$25 \times 1,5 \times \left( \frac{18}{100} - \frac{10}{100} \right) = 3,00 \text{ cm}$
100-125	-	1,6	15	11	Sem raízes
Total					$3,36 + 2,52 + 5,25 + 3,00 = 14,13 \text{ cm}$

Ds = densidade do solo; CC = capacidade de campo; PMP = ponto de murcha permanente.

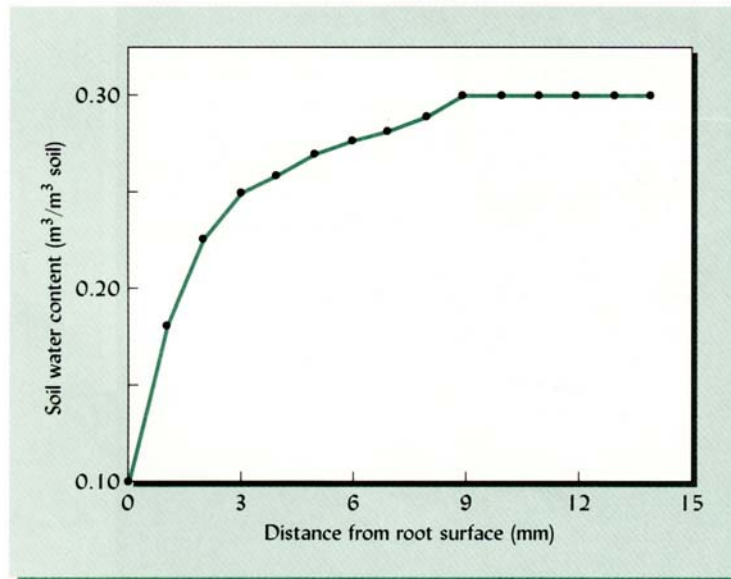
## 2.7 Mecanismos de Fornecimento de Água às Plantas

Somente uma pequena proporção da água no solo está próxima às superfícies de absorção das raízes das plantas. Como as raízes têm acesso às grandes quantidades de água usadas no crescimento das plantas? Dois fenômenos parecem ser responsáveis por este acesso: o movimento capilar da água no solo para as raízes das plantas e o crescimento das raízes no solo úmido.

### *Taxa de Movimento Capilar*

Quando as raízes das plantas absorvem água, elas reduzem o conteúdo de água, reduzindo assim, o potencial da água no solo, imediatamente ao seu redor (Figura 2.25). Em resposta a essa redução no potencial, a água tende a se mover em direção às raízes das plantas. A taxa de movimento depende da intensidade do gradiente de potencial desenvolvido e da condutividade dos poros do solo. Em alguns solos arenosos, o ajuste pode ser comparativamente rápido e o fluxo considerável, se o solo estiver próximo da capacidade de campo. Em solos de textura fina e argilas mal estruturadas, o movimento será lento e somente uma pequena quantidade de água será fornecida. Entretanto, como indicado pelas mudanças relativas na condutividade hidráulica, em condições mais secas com a água retida à potenciais mais baixos, solos argilosos terão capacidade de fornecer mais água por capilaridade do que solos arenosos, devido ao fato de que solos arenosos terão poucos poros ainda preenchidos por água, nesta condição.

A distância total do fluxo diário por capilaridade, pode ser de apenas alguns centímetros (Figura 2.26). Isto pode sugerir que o movimento capilar não é significativo no fornecimento de água às plantas. Entretanto, caso as raízes tenham penetrado em grande parte do volume do solo, de tal forma que a distância entre as raízes individuais seja de apenas alguns centímetros, o movimento de água, a grandes distâncias pode não ser necessário. Mesmo durante períodos quentes e secos, quando as demandas evapotranspiratórias são altas, o movimento capilar pode ser um importante meio de fornecimento de água às plantas. O movimento capilar é especialmente importante durante períodos de umidade reduzida quando a extensão radicular é pequena.



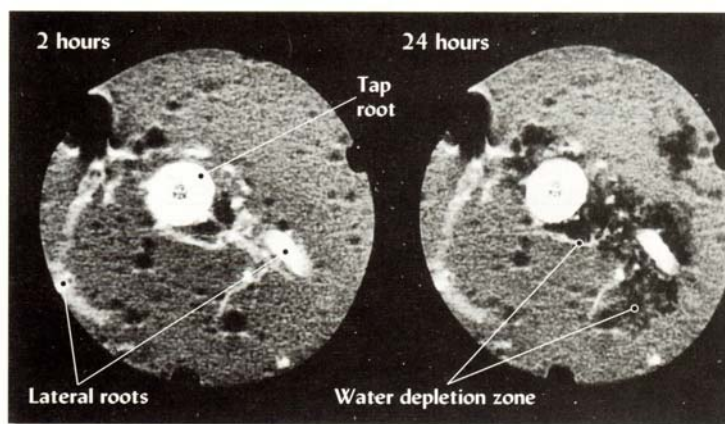
**FIGURA 2.25** Ilustração dos níveis de água no solo ao redor de raízes de rabanete, após apenas duas horas de transpiração. A água se moveu por capilaridade de uma distância de até pelo menos 9 mm da superfície da raiz. [Modificado de Hamza & Aylmore (1992); usado com permissão de Kluwer Academic Publishers, Holanda]



### ***Taxa de Crescimento Radicular***

O movimento capilar da água é complementado pelas rápidas taxas de crescimento radicular, às quais asseguram que o contato solo - raiz está sendo constantemente estabelecido. A penetração radicular deve ser rápida o suficiente para atender as necessidades de uma planta crescendo em um solo com um conteúdo de umidade ótimo. O emaranhado de raízes, radículas, e pêlos radiculares, sob florestas ou pastagens naturais demonstram o sucesso da adaptação das plantas terrestres para explorar a armazenagem de água no solo.

A principal limitação do crescimento radicular é a pequena proporção de solo com a qual as raízes têm contato. Embora, a superfície radicular seja considerável, o contato solo - raiz, normalmente se dá em menos de 1 % do volume do solo. Isto sugere que a maior parte da água deve mover-se no solo em direção as raízes mesmo que a distância de movimento seja de apenas alguns milímetros. Isto também sugere um efeito complementar da capilaridade e do crescimento radicular, como meio de fornecimento de água às plantas.



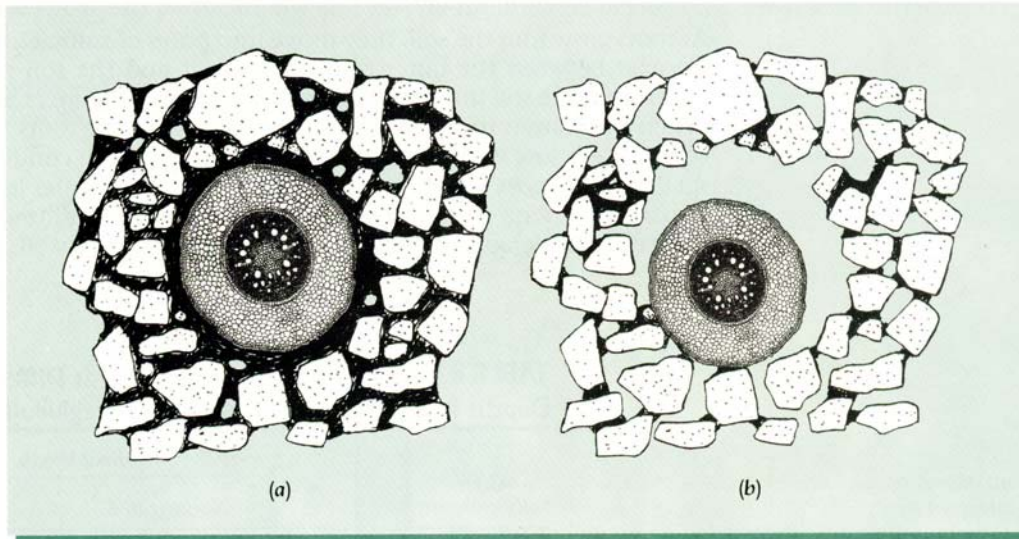
**FIGURA 2.26** O contato íntimo entre solo e raiz e a rápida depleção da água próximo às raízes é ilustrada nestas duas imagens de ressonância magnética, de uma fatia de 2 mm por 25 mm de seção transversal de um solo arenoso úmido ao redor de raízes de plântulas de pinus. (Esquerda) Imagem de uma raiz principal (grande círculo branco) e duas raízes laterais (área alongada à direita e área em formato de L à esquerda), apenas duas horas após o suprimento de água. Note a depleção na área imediatamente ao redor da raiz principal (área escura à direita da raiz). (Direita) Após 24 horas, a zona de depleção de água (área escura ao redor da raiz) se expandiu ao redor da raiz principal e das raízes laterais à direita. O movimento de água para as raízes é óbvio.

### ***Distribuição Radicular***

A distribuição das raízes no perfil do solo determina, até certo ponto, a habilidade das plantas em absorver água. A maioria das plantas, anuais e perenes, possui predominância de raízes nos primeiros 25 - 30 cm do perfil de solo. Plantas perenes como alfafa e árvores possuem algumas raízes profundas (> 3 m) e são capazes de absorver uma considerável quantidade de água de camadas do subsolo. Entretanto, mesmo nestes casos, é provável que a maior parte da absorção ocorra nas camadas superiores do solo, desde que estas sejam bem supridas com água. Por outro lado, se as camadas superiores são deficientes em umidade, mesmo plantas anuais, como milho e soja, absorverão a maior parte da água dos horizontes inferiores, a menos que condições físicas ou químicas adversas inibam a exploração destes horizontes mais profundos.

### **Contato Solo-Raiz**

Conforme as raízes crescem no perfil, elas movem-se através dos poros de tamanho suficiente para acomodá-las. O contato entre as células das raízes e o solo permite o movimento imediato da água do solo para as plantas, em resposta à diferença nos níveis de energia (Figura 2.27). Entretanto, quando a planta está sobre estresse hídrico, a raiz tende a se contrair, à medida que as células corticais perdem água em resposta a este estresse. Tais condições ocorrem durante períodos quentes e secos e são mais severas durante o dia, quando a perda de água através das folhas é máxima. O diâmetro das raízes, sob estas condições, pode reduzir-se em até 30 %. Isto diminui consideravelmente o contato direto entre o solo-raiz, bem como o movimento de água e nutrientes para as plantas. Apesar do vapor de água ainda poder ser absorvido pelas plantas, a taxa de absorção é muito baixa para manter a maioria das plantas, com exceção de plantas tolerantes à seca.



**FIGURA 2.27** Seção transversal de uma raiz rodeada por solo. (a) Durante períodos de umidade adequada e baixo estresse hídrico a raiz preenche completamente os poros do solo e está em contato íntimo com filmes de água no solo. (b) Quando as plantas estão sob estresse hídrico severo, como em períodos quentes e secos, a raiz se contrai (principalmente nas células corticais), reduzindo significativamente o contato solo - raiz. Esta contração da raiz pode ocorrer durante dias quentes, mesmo quando o conteúdo de água no solo é adequado.

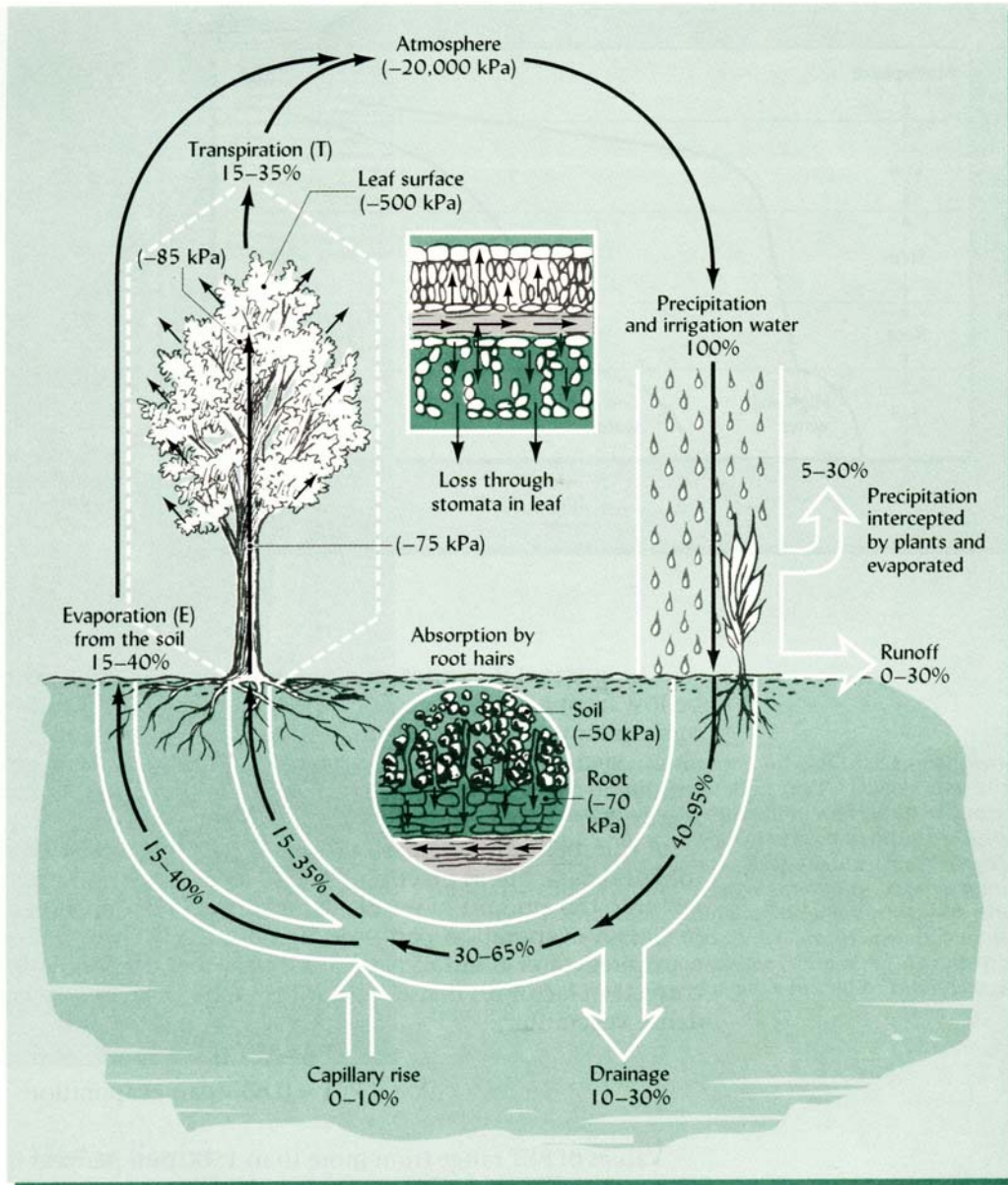
## **2.8 O Sistema Contínuo Solo- Planta - Atmosfera**

O fluxo de água através do sistema contínuo solo - planta - atmosfera é um componente principal do ciclo hidrológico. A Figura 2.28 relaciona os processos: interceptação, escoamento superficial, percolação, drenagem, evaporação, absorção da água pela planta, movimento de água para as folhas e transpiração da água das folhas para a atmosfera.

Estudando o sistema contínuo solo - planta - atmosfera, pesquisadores descobriram que os mesmos princípios básicos governam a retenção e o movimento da água, quer seja no solo, na planta ou na atmosfera. Anteriormente, demonstrou-se que a energia potencial é o principal fator que determina o movimento da água no solo. O mesmo pode ser dito para o movimento da água entre o solo e as raízes das plantas e entre as plantas e a atmosfera (Figura 2.28).

Para que a planta absorva água do solo, o potencial da água deve ser mais baixo na raiz da planta do que no solo adjacente à raiz. Do mesmo modo, o movimento ascendente no caule para as células da folha se dá em resposta a diferenças no potencial da água, sendo que o mesmo fenômeno ocorre no movimento da superfície da folha para a atmosfera. Para ilustrar que o movimento da água ocorre em direção a locais com

potenciais gradualmente mais baixos, a Figura 2.28 mostra que o potencial da água varia de  $-50$  kPa no solo, a  $-70$  kPa na raiz, a  $-500$  kPa a superfície da folha, e, finalmente, a  $-20.000$  kPa na atmosfera.



**FIGURA 2.28** Sistema contínuo solo-planta-atmosfera mostrando o movimento da água do solo para a planta e da planta para a atmosfera, e o retorno desta água da atmosfera para o solo, em uma região úmida. O comportamento da água através deste sistema contínuo está sujeito às mesmas relações de energia relacionadas à água no solo. Note que o potencial da água no solo é  $-50$  kPa, decrescendo para  $-70$  kPa na raiz, diminuindo ainda mais, a medida que se move através do caule da planta em direção as folhas, sendo ainda mais baixo ( $-500$  kPa) na interface folha - atmosfera, de onde a água se move em direção a atmosfera, onde seu potencial é de  $-20.000$  kPa. A água move-se de um potencial mais alto para um potencial mais baixo. Note as taxas de divisão da água em precipitação e irrigação sugeridas na Figura para este sistema contínuo.

## QUESTÕES

1. Qual é o papel do *estado de referência da água* em definir o potencial da água no solo? Descreva as propriedades do estado de referência da água.
2. Imagine uma raiz de planta de algodão crescendo no horizonte superficial de um solo irrigado. Como a raiz tenta extrair as moléculas de água deste solo, quais forças (potencial) ela deve superar? Se este solo for compactado por um veículo pesado, qual dessas forças será mais afetada? Explique.
3. Usando o termo *adesão, coesão, menisco, tensão superficial, pressão atmosférica e superfície hidrofílica*, escreva um breve ensaio para explicar porque água eleva-se acima do lençol freático em um solo mineral.
4. Suponha que você fosse contratado para projetar um sistema de irrigação automático para o jardim de um cliente rico. Você determina que os canteiros de flores devem ser mantidos em um potencial de água acima de -60 kPa, mas, não mais úmidos que -10 kPa, devido as flores anuais serem sensíveis à seca e à ausência de uma boa aeração. Algumas áreas do gramado, entretanto, podem ficar bem se o solo secar próximo a -300 kPa. Seu orçamento permite que um tensiômetro ou um bloco de resistência elétrica seja utilizado. Que instrumentos você usaria e onde? Explique.
5. Suponha que o cliente referido na questão 4 aumentou o seu orçamento e o pediu para usar o método do TDR para medir o conteúdo de água no solo. Que informações adicionais sobre o solo, não necessárias para o uso do tensiômetro, você deverá obter para usar o instrumento de TDR? Explique.
6. Um operador de estufa estava desenvolvendo plantas ornamentais arbustivas em recipientes plásticos com de 15 cm de altura preenchidos com um solo de textura areia franca. Ele molhava os recipientes diariamente com um de sistema de irrigação. Seu primeiro grupo de 1000 plantas amarelaram e morreram pelo excesso de água e falta de aeração. Como um empregado da estufa, você sugere que ele use pots com de 30 cm de altura para o próximo grupo de plantas. Explique seu raciocínio.

7. Suponha que você mediu os seguintes dados para um solo.

Horizonte	Densidade do solo	Potencial mátrico para diferentes tensões de água		
		-10 kPa	-100 kPa	-1500 kPa
cm	Mg m <sup>-3</sup>	kg de água/ kg de solo seco		
A (0 - 30)	1,28	28	20	8
Bx (30 - 70)	1,40	30	25	15
C (70 - 120)	1,95	20	15	5

Estime a quantidade de água disponível em kg de água / kg de solo seco.

8. Um engenheiro florestal obteve um anel cilíndrico ( $h = 15$  cm,  $r = 3,25$  cm) de um determinado solo. Ele colocou todo o solo em uma lata de metal e fechou com uma tampa. A lata vazia pesou 300 g e quando preenchida com o solo úmido pesou 972 g. Depois no laboratório, ela colocou a lata do solo, sem a tampa, em uma estufa por vários dias até que o seu peso se tornasse constante. O peso da lata mais o solo seco (incluindo a tampa) foi de 870 g. Calcule a umidade gravimétrica e a umidade volumétrica.
9. Dê quatro razões porque a compactação do solo reduz a quantidade de água disponível ao crescimento das plantas.
10. As finas ramificações das raízes, com crescimento rápido e uniforme, raramente mantêm um contato com a superfície das partículas do solo em torno de 1 a 2%, como é que as raízes podem utilizar mais do que 1 ou 2% da água retida nessas superfícies?
11. O que você entende por Intervalo Hídrico Ótimo?
12. Qual a diferença entre o Intervalo hídrico ótimo e a água disponível?