Capítulo 4

Dinâmica da água na planta

Frederico Ozanan Machado Durães
Paulo César Magalhães

Introdução

A água é um insumo fundamental para a produção vegetal por participar dos processos vitais da planta. Neste capítulo, descrevem-se o movimento de água e de solutos por meios do sistema-sol-planta-atmosfera, e, depois, o movimento de solutos e da água dos locais de fotossíntese às partes não assimiladoras da planta. Descreve-se ainda toda a estrutura hidrológica de plantas vasculares envolvidas na transferência de água do solo para a atmosfera, especialmente para o processo da transpiração, que é o principal fator determinante do movimento da água através da planta.

O conteúdo abordado permite uma extensa compreensão e análise da água de passagem no sistema solo-planta-atmosfera e dos diversos fatores envolvidos nesse transporte.

Água no sistema solo-planta-atmosfera

A água atinge o solo principalmente como chuva. Uma parte é armazenada no próprio solo, outra parte é drenada através de seu perfil para as camadas mais profundas e, uma vez estando o solo já saturado, outra parte pode fluir através da superfície para drenos e cursos d'água. Da água contida no solo, uma porção evapora através de sua superfície e outra é absorvida pelas raízes das plantas e transpirada para a atmosfera através de suas folhas. Essa circulação da água da atmosfera para o solo e seu retorno à atmosfera compreende o ciclo hidrológico.

As diversas formas de fornecimento de água para as plantas são derivadas principalmente da precipitação, do lençol freático ou do movimento de água para cima ou lateralmente dentro do solo. A água suplementar para irrigação pode ser obtida de cursos d'água, lagos, poços comuns ou poços artesianos.

Apenas parte da água que um solo pode reter fica disponível para as plantas. Essa parte é comumente aceita como sendo a água retida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. É fundamental, entretanto, que se compreendam as forças responsáveis pelo movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera, que são os gradientes de potenciais gravitacional, matricial, de pressão e osmótico, sendo o movimento da água um processo espontâneo à procura de um potencial (ou estado de energia) mais baixo.

Em plantas que se encontram transpirando água em taxas médias e altas, o potencial muito negativo da água da atmosfera é o responsável pela grande perda de água pelas folhas, e, em consequência, a água líquida nos terminais do xilema na folha assume potenciais bem negativos. Essa grande diferença de potencial de água entre as folhas e o solo é que causa o grande fluxo de água na planta, isto é, da absorção de água. Essa absorção é geralmente denominada absorção passiva.

Em plantas que se encontram baixas taxas de transpiração, o que acontece em casos de: a) atmosfera saturada (ou perto da saturação); b) pouca energia disponível para o processo de evaporação; c) plantas em dormência (sem ou quase sem folhas), a principal força responsável pelo fluxo de água é o gradiente de potencial osmótico. A água na planta assume pressão positiva (pressão de raiz, por exemplo, gutação

nas bordas das folhas, que acontece pela madrugada, quando praticamente não há transpiração, e o caso da seiva que escorre de plantas dormentes recém-podadas). Essa absorção é denominada absorção ativa.

A estrutura de partes das plantas vasculares envolvidas na transferência de água do solo para a atmosfera, i.e., o sistema radicular, tem tecidos capazes de absorver água líquida e transferi-la para os vasos do xilema e para as células das folhas, que recebem a água das extremidades superiores dos vasos do xilema e a evaporam através de suas superfícies, para os espaços intercelulares, de onde ela retorna à atmosfera principalmente através dos estômatos (Taiz; Zeiger, 2004).

A maior ênfase neste capítulo é dada para os processos de absorção e transporte de água em plantas vasculares; transpiração e medição do status de água na planta.

Movimento de água

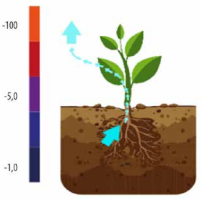
A energia potencial total da água é a soma de todas as energias. Por simplicidade, ela é chamada de potencial total, e o símbolo mais frequente é ψ. Cada uma de suas partes é uma componente, e assim temos:

$$\psi = \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_{OS} + ... \quad (1)$$

em que ψ_g é o componente gravitacional; ψ_p é o componente de pressão; ψ_m é o componente matricial; ψ_{OS} é o componente osmótica; e as reticências (...) indicam que podem existir outras formas de energia, mas em geral elas são desprezíveis.

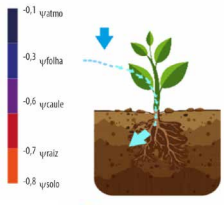
Portanto, para calcular o estado de energia da água, em dado ponto no solo, é necessário calcular cada componente e fazer a soma.

Diferenças de potencial são um indicativo da tendência de movimento da água. Toda vez que no sistema em consideração houver diferenças de potencial total ψ, pode haver movimento de água, uma vez que a diferença de potencial cria um gradiente de potencial, e, como este é uma força, então a água pode se mover. Ao contrário, quando o ψ não varia entre os pontos de um sistema, gradiente ($grad$) $\psi = 0$, a água encontra-se em equilíbrio (Resende et al., 2003).



Por exemplo, em uma cultura agrícola, em pleno desenvolvimento, se o potencial da água no solo é da ordem de -1 atm (-0,1 MPa), na planta da ordem de -5 atm (-0,5 MPa) e na atmosfera da ordem de -100 atm (-10 MPa), a tendência natural da água é passar do solo para a planta e da planta para a atmosfera. Desse movimento resulta o fluxo de evapotranspiração.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.



Assim, se as camadas superficiais do solo estiverem mais úmidas que as camadas mais profundas, Ψ é maior que nas primeiras, e a água tende a drenar dentro do perfil do solo. Isso é comum logo após uma chuva não muito intensa.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

No caso de uma chuva prolongada e intensa, o perfil fica úmido até grandes profundidades, e Ψ_m é praticamente nulo. Nessas condições, Ψ_g é importante, e grad Ψ é praticamente igual a grad Ψ_g, e a água drena dentro do perfil (drenagem interna).

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Quando a superfície do solo se seca por causa do processo de evaporação, o potencial total ψ das camadas superficiais fica mais negativo que o das camadas mais profundas. Como resultado, aparece um movimento ascendente de água no perfil do solo. Assim, vê-se que a água pode mover-se em qualquer sentido e direção, de cima para baixo, de baixo para cima, lateralmente, etc., mas sempre de acordo com a distribuição do potencial total ψ.

Além do potencial total da água ψ, uma característica do solo, denominada condutividade hidráulica, afeta o movimento da água. A condutividade hidráulica é um parâmetro que mede a facilidade com a qual o solo transmite água. Portanto, quanto maior a condutividade hidráulica, tanto maior a facilidade com que a água se move em um solo.

A condutividade hidráulica do solo K é medida em volume de água Q (cm^3) que passa pela unidade de área A (cm^2) na unidade de tempo t (s). Assim:

$$K = Q/A \times t = cm^3/cm^2 \times s = cm/s \quad (2)$$

resultando uma altura de água por unidade de tempo. Na prática, como a água do solo se move relativamente devagar, são comuns as unidades cm min^{-1}; cm h^{-1}; cm dia^{-1}; mm min^{-1}; mm h^{-1} e mm dia^{-1}.

Para um dado solo, K é tanto maior quanto maior sua umidade θ. O valor máximo de K é quando o solo se encontra saturado ($\theta = \theta_s$) e é denominado de condutividade hidráulica saturada K_0 (infiltração básica). Com o secamento do solo, i.e., com o decréscimo de θ, a condutividade hidráulica diminui drasticamente até que seu valor chega a ser praticamente zero para um solo seco. Isso significa que um solo molhado tem a capacidade de conduzir mais água que um solo seco.

Um fluxo de água no solo q, dado em mm dia^{-1}, integrado sobre um período de n dias, resulta em um total de água dado em mm. O fluxo de água é descrito pela equação de Darcy (que quantifica o movimento de água no solo):

$$q = -K \times grad\ \Psi \quad (3)$$

em que o fluxo de água q é igual ao produto da condutividade hidráulica K pelo gradiente de potencial total Ψ. O sinal menos aparece apenas porque a força F que move a água é igual a $-grad\ \Psi$.

O fluxo de água q tem a mesma dimensão da condutividade hidráulica K, i.e., cm min^{-1}, cm h^{-1}, pois se trata também de uma quantidade de água que passa por uma dada área em dado tempo. Assim, se tivermos um fluxo de água de 0,5 cm h^{-1}, isso significa que 5 L de água passam por uma área de 1 m de solo em 1 hora.

A Equação de Darcy nos mostra que o movimento de água no solo, medido por meio de um fluxo, é o produto de K por $grad\ \Psi$. Portanto, o produto dos dois fatores é que determina o fluxo.

Isso é importante de ser notado, pois se a condutividade hidráulica do solo for grande, isso não implica necessariamente um fluxo grande. Se o gradiente de Ψ for muito pequeno, não haverá fluxo grande, mesmo se a condutividade hidráulica for grande.

O fluxo de água na planta e na atmosfera obedece a leis semelhantes, sendo que a condutividade hidráulica desses sistemas é sempre bem grande, não havendo limitação para o fluxo. Na maioria dos casos, quem determina o fluxo de água é o $grad\ \Psi$.

A fim de exemplificar melhor o que foi visto, faremos a análise do movimento de água em um sistema constituído de uma cultura qualquer

Assim, em um solo seco, mesmo na preença de um gradiente de potencial relativamente grande, o fluxo de água é praticamente nulo. Pode, portanto, haver uma variedade grande de combinações de K e de $grad\ \Psi$, cada uma determinando um fluxo q de água.

(por exemplo, milho) em pleno desenvolvimento. A Figura 1 mostra esquematicamente uma cultura de milho, indicando um ponto genérico A no solo, outro B na raiz da planta, outro C na folha e outro D na atmosfera. Durante um dia normal, ensolarado, o potencial total de água no solo Ψ_A gira em torno de -0,1 atm a -2 atm (-0,01 MPa a -0,02 MPa), na raiz Ψ_B em torno de -1 atm a -5 atm (-0,1 MPa a -0,5 MPa), na folha Ψ_C em torno de -3 atm a -10 atm (-0,3 MPa a -1 MPa) e na atmosfera Ψ_D em torno de -50 atm a -200 atm (-5 kPa a -20 kPa). Como:

$$\Psi_{A\ (solo)} > \Psi_{B\ (raiz)} > \Psi_{C\ (folha)} > \Psi_{D\ (atmosfera)}$$

O movimento da água dá-se de A para B, para C e, finalmente, para D, i.e., do solo para a planta e desta para a atmosfera. Esse movimento dá-se espontaneamente, uma vez que a água move-se sempre para um estado de energia mais baixo, que no caso está na atmosfera; daí a demanda atmosférica. É, portanto, errado dizer que a planta retira água do solo. A água vai espontaneamente do solo para a planta e, para o observador, tudo se passa como se a planta succionasse a água do solo. As plantas não consomem energia nesse processo. É, porém, comum falar-se em absorção de água pelas plantas.

Na Figura 1, o movimento de água de A para B é o movimento no solo. Ele é regido pela Equação de Darcy ($q = -K \times grad\ \Psi$) e é, portanto, proporcional ao $grad\ \Psi$ entre A e B e à condutividade hidráulica do solo K entre A e B. Enquanto esse fluxo de água $q = -K\ grad\ \Psi$ atender à demanda atmosférica, o que significa que toda água perdida por transpiração nas folhas é reposta pelo solo, a planta se desenvolve adequadamente, permanece túrgida, sem entrar em murcha. Quando o fluxo de água q no solo não atender à demanda evaporativa da atmosfera, a plan-

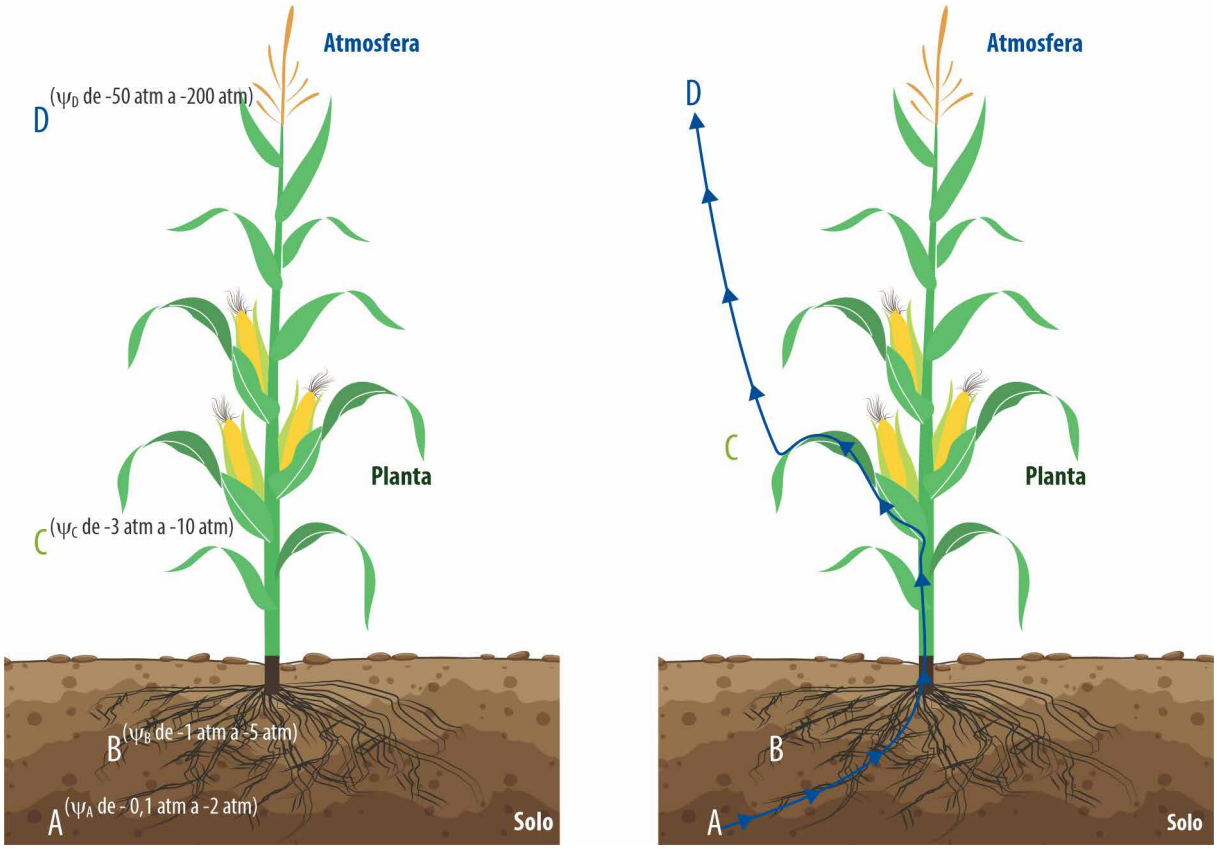


Figura 1. Esquema do movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

ta passa a perder sua própria água e entra em murcha. Uma pequena murcha nas horas mais quentes do dia é comum e tolerável, não afetando sensivelmente a produtividade agrícola. Quanto maior a perda de água e mais longo o período de murcha, tanto mais irreversível o processo, ficando a produtividade ameaçada e, em casos extremos, a planta morre. Em razão disso, deve-se procurar saber quais os níveis de água no solo, nos quais a água é disponível às plantas, não havendo falta nem excesso.

O movimento de água na planta, de B para C, dá-se através do sistema condutor de água da planta, denominado de xilema. Trata-se de feixes de células de forma tubular, próprios para a condução de água. Uma equação do mesmo tipo $q = -K\ grad\ \Psi$ rege o movimento, sendo que a condutividade K do xilema é alta em comparação à do solo, e seu valor é praticamente constante. Apenas em casos extremos de murcha severa a continuidade dos feixes de tubos do xilema é quebrada, e a condutividade da planta assume valores mínimos, não permitindo mais o fluxo. Também em condições patológicas, fungos e/ou bactérias podem afetar o xilema e, assim, a condutividade. Porém, em condições normais, K na planta é constante e o fluxo q fica uma função apenas de $grad\ \Psi$ entre os pontos B e C.

O movimento de água de A até C dá-se na fase líquida, e em C a água passa para a fase de vapor, saindo da folha e passando para a atmosfera. Para a passagem da fase líquida para a gasosa, é necessária energia (583 cal ou 2.436 J a 20 °C), e esta vem do sol. Por isso, o processo de transpiração é tanto maior quanto mais quente o dia.

A passagem da água do estado líquido para gasoso dá-se dentro da folha em câmaras subestomatais, nas quais termina o xilema. Essas câmaras têm contato com a atmosfera através dos estômatos que são pequenas aberturas constituídas de células de forma especial. Quando a planta está túrgida, a forma das células do estômato é tal que a abertura do orifício é máxima (da ordem de 2 a 10 mícrons), e, com a perda de turgor, as paredes vão ficando flácidas, fechando quase completamente o orifício (Figura 2). Dessa forma, a planta tem algum controle sobre o fluxo de água q, podendo evitar perdas por transpiração. Porém, o controle não é total, primeiro porque os estômatos nunca se fecham totalmente, e, segundo, porque a planta também perde água através da cutícula de sua epiderme. Essa cutícula que cobre a planta toda é resistente à perda de água, mas uma parte da água da planta sempre é perdida através dela (Resende et al., 2003).

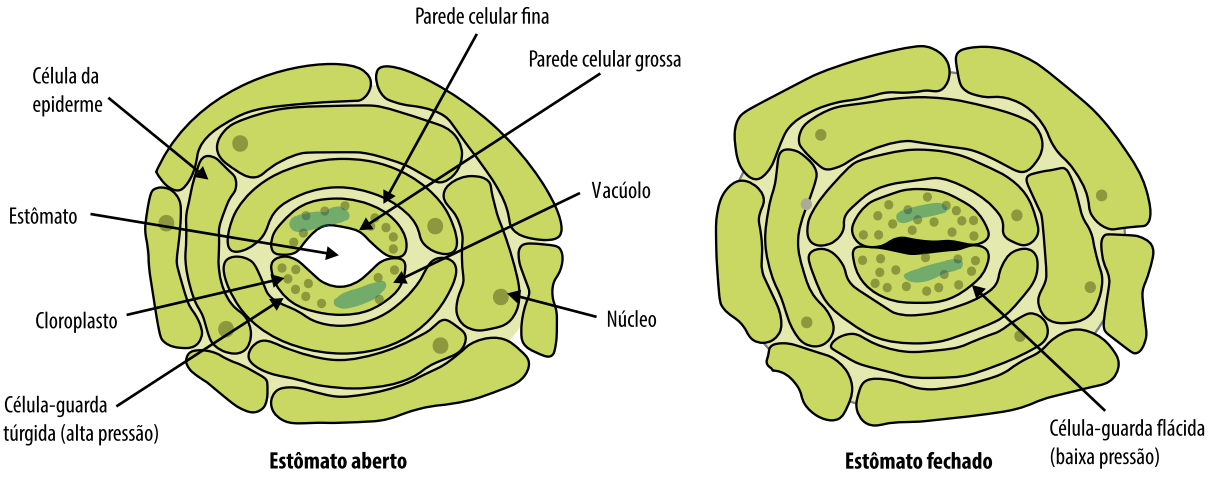


Figura 2. Representação do estômato aberto e fechado.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

O problema do fechamento dos estômatos também está ligado à fotossíntese. É através dos estômatos que entra o CO_2 necessário para a fotossíntese dentro da folha, e, por isso, longos períodos de estômato fechado vão afetar a fotossíntese e, consequentemente, a produtividade. Assim, o ideal é a condição de água suficiente no solo para que a planta não precise fechar os estômatos. Nessas condições, a fotossíntese é máxima, a absorção de nutrientes (que são arrastados pela água) é máxima, e a produtividade também o é (Taiz; Zeiger, 2004).

O movimento de água de C para D, que se dá na fase gasosa, é também regido por uma equação do tipo $q = -K\ grad\ \Psi$. Pelo fato de se tratar de movimento gasoso, i.e., movimento de vapor d'água em ar, geralmente não se fala em condutividade hidráulica K, mas sim em difusividade D do vapor em ar. Mas o fenômeno é semelhante. Fica apenas complicado, por causa de variações da umidade do ar que afetam a difusividade D e do vento que introduz o fenômeno de turbulência. De qualquer forma, o fator $grad\ \Psi$ é importantíssimo, uma vez que Ψ na atmosfera assume quase sempre valores bem negativos, da ordem de -100 atm a -500 atm (-10 MPa a 50 MPa).

Vemos, assim, que o movimento de água do ponto A para o ponto D, esquematizado na Figura 1, é afetado por fatores de solo, de planta e de atmosfera. Fatores importantes do solo são: umidade (θ), relação entre θ e Ψ_m (curva característica de água) e condutividade hidráulica, os quais são afetados pela textura, estrutura, densidade global, etc. Fatores importantes da planta são: atividade radicular, distribuição radicular, principalmente em profundidade, condição de sanidade do xilema, área foliar, arquitetura foliar, etc. Na atmosfera, os fatores mais importantes são: a radiação solar, o vento e a umidade relativa do ar. Vê-se que a perda de água pelas plantas é um processo complexo, e sempre é necessário analisar o conjunto: solo-planta-atmosfera.

Água disponível no solo

O movimento de água do ponto A ao ponto D, esquematizado na Figura 1, mostra que o solo ocupa uma posição muito importante. Se houver água disponível no solo, o movimento de água prossegue da planta para a atmosfera. Não havendo água disponível, o movimento cessa. Quais serão, então, os níveis ótimos de água no solo? A procura desses níveis é que levou ao conceito de água disponível (AD).

É grande a complexidade do processo pelo qual a água sai do solo, passa pela planta indo finalmente para a atmosfera, e também são inúmeros os fatores que afetam o processo. Assim, qualquer tentativa de quantificar a água disponível no solo, baseando-se apenas em parâmetros do solo, não pode dar resultados universais. Existe, no entanto, a necessidade da definição da água disponível para a possibilidade de um manejo agrícola racional. Definiu-se, então, uma quantidade de água disponível baseada em parâmetros do solo, de grande utilidade desde que se reconheçam suas limitações.

Vasos condutores de água

São construídos de sequências de células mortas, grandes e alongadas, cujas paredes laterais, por diferentes processos, se tornaram espessas e impermeáveis à água e com padrões distintos de poros sobre elas distribuídos. As paredes transversais das células se desintegraram de tal forma que o resultado é uma série de tubos que comunicam diretamente a fonte de água nas raízes com seu destino final, a atmosfera que envolve a folhagem. Os vasos terminam fechados em suas extremidades inferiores entre as células absorventes das raízes, e, em suas extremidades superiores, eles terminam entre as células fotossintéticas das folhas (Taiz; Zeiger, 2004).

Vasos condutores de água

Entre os vasos do xilema existem fibras mais curtas quase sólidas, que têm aparentemente função

puramente mecânica e células de parênquima vivo que envolvem os raios medulares, que, por sua vez, comunicam os vasos com tecidos de partes externas do caule, incluindo-se o floema de onde se extraem materiais para armazenamento temporário.

Sistema radicular

A arquitetura (aparência e conformação) do sistema radicular depende das condições externas. É proposto que culturas estabelecidas com suprimento adequado de água tendem a produzir um sistema radicular confinado à superfície do solo, ao passo que culturas submetidas a indiferentes suprimentos de água têm desenvolvimento radicular mais profundo. Alguma evidência dessa sugestão foi encontrada, mas frequentemente existe uma variação maior entre sistemas radiculares submetidos a dado regime de água, do que entre profundidade radicular média de plantas de regimes de água contrastantes.

O comprimento total e a taxa de crescimento das raízes fornecem parâmetros convenientes para comparar o comportamento de plantas sob diferentes tratamentos.

A rizosfera é confinada principalmente a um volume de solo úmido suficiente para suprir a demanda evaporativa da parte aérea; enquanto a água é extraída do solo, as raízes tendem a se expandir ao longo de gradientes de água, mas permanece a possibilidade de absorção de água de qualquer parte do solo previamente esgotada, caso esta seja remolhada.

Os órgãos extremos das raízes que entram em contato com o solo são os pelos absorventes; cada um é uma protuberância de uma única célula da epiderme. Os pelos absorventes têm vida curta e desaparecem depois de alguns dias para serem repostos por novos, formados imediatamente após a zona de alongamento, na zona pilífera.

Cada raiz termina em um ponto de crescimento sobreposto por uma coifa razoavelmente distinta, que é uma proteção de células mucilaginosas, cuja finalidade é dita como auxiliar ao avanço da extremidade em crescimento, lubrificando os agregados do solo.

Caules e folhas

Os caules sustentam os órgãos fotossintéticos e reprodutivos no meio ambiente apropriado para suas funções e também contêm os sistemas de transporte que os comunicam com as raízes. A parte aérea consiste normalmente em caules e folhas verdes. A estrutura da folha reflete sua tão importante função fotossintética. Na superfície superior, imediatamente abaixo da epiderme, está o parênquima paliçádico, constituindo-se de células em contato estreito, providas de cloroplastos. Entre este e a epiderme inferior está uma zona de células livremente dispostas em espaços vazios entre elas, chamado parênquima lacunoso ou esponjoso, também fotossintético. O contato entre os espaços vazios do parênquima esponjoso e a atmosfera externa é feita pelos poros estomatais.

Estômatos

Cada estômato consiste num par de células-guarda alongadas, ocasionalmente sendo suplementadas com células subsidiárias, como acontece nas gramíneas. Ao contrário do restante das células epidermais, as células-guarda contêm cloroplastos. A forma das células-guarda é tal que, quando túrgidas, suas paredes adjacentes se separam para formar um poro. A forma e largura do poro determinam sua habilidade em permitir a passagem de vapor e gases. A abertura do poro diminui proporcionalmente à redução de pressão de turgor nas células-guarda; quando elas estão flácidas, o estômato está completamente fechado. Os estômatos, em grande número por cm^2, estão geralmente dispostos na face inferior das folhas, mas em algumas espécies eles também poder estar presentes na face superior, mas em menor número. Estômatos podem ser encontrados em alguns caules, mas nunca em raízes.

Sistema condutor

Consiste em grupos superiores e inferiores de células vivas de paredes finas, em íntimo contato com os terminais de tubos mortos de paredes espessas que contêm poros no sentido lateral, o que permite comunicação entre eles e os outros tecidos nos caules. Na extremidade inferior do sistema, as células de paredes finas mais externas estão em contato com as camadas de água que envolvem as partículas do solo, enquanto na extremidade superior as células de paredes finas formam os limites de cavidades de ar dentro das folhas; essas cavidades comunicam-se com a atmosfera externa através de poros, que se podem fechar ao receber estímulo apropriado. Assim, existe uma coluna contínua de água ligando a água do solo à atmosfera, tendo mecanismos de regulagem em ambas as extremidades (células vivas nas quais a passagem de água depende do potencial osmótico, de seu conteúdo e do potencial da água da atmosfera ou do solo), e um mecanismo secundário de regulagem (os estômatos) colocado entre o ar contido dentro da folha e o ar da atmosfera externa. A Figura 3 mostra uma representação esquemática do sistema de condução.

Absorção e transporte de água em plantas vasculares, transpiração e medição do status de água na planta

Entrada de água na planta

O movimento de água no ciclo hidrológico toma lugar em resposta a uma série de gradientes de potencial. Obviamente, em certo ponto do ciclo, uma quantidade substancial de energia deve ser injetada, e ela vem do sol e é usada quase totalmente na conversão de água

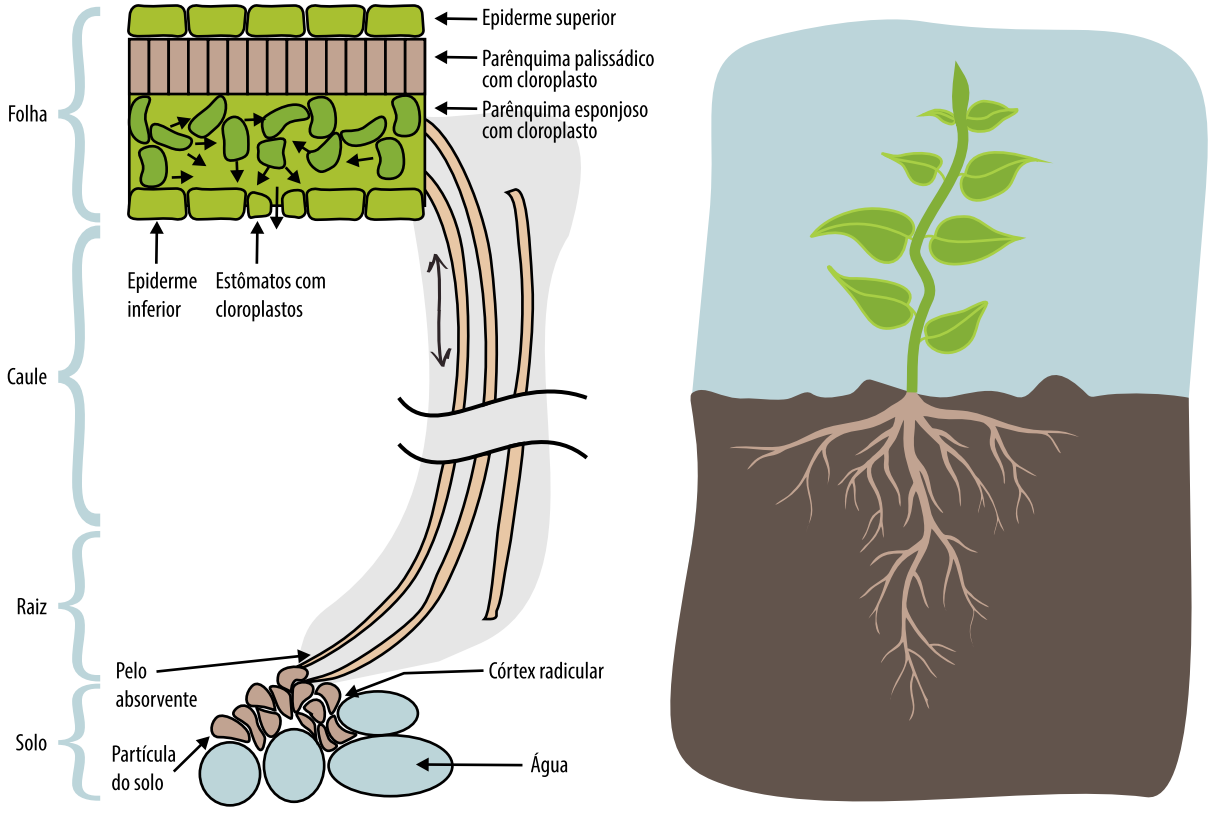


Figura 3. Representação esquemática do sistema vascular da planta.

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

líquida em vapor nas superfícies de evaporação e transpiração da planta e do solo. Todo o resto dos movimentos ocorre porque o potencial no final de cada estágio é menor que no estágio inicial, e, assim, a água se move. Seu movimento dentro da planta depende das propriedades de coesão da água para permanecer em colunas intactas, mesmo quando sujeita à tensão, por causa da perda (evaporação) de água por suas partes superiores. Esse conceito é, por isso, conhecido como teoria da coesão-tensão.

A água se move na direção do sistema radicular em resposta a gradientes de potencial de água que se iniciam com a evaporação da água nas células úmidas das superfícies internas das folhas. A osmose toma apenas parte limitada na absorção de água (Resende et al., 2003).

Entrada de água na raiz

Qualquer parte do sistema radicular absorve água em resposta a seu ambiente local; se existir um gradiente de potencial de água localizado do solo para dentro da raiz, a água entra na raiz independentemente das condições reinantes nas demais partes do sistema radicular. Assim, em um sistema radicular disperso no solo úmido, a água entra uniformemente por todas as raízes, criando um deficit de água uniforme que prevalece em toda a rizosfera. Quando ocorre chuva ou irrigação e sua quantidade excede o deficit, a rizosfera inteira é reumedecida, e o sistema radicular continua a absorver água uniformemente. Se, como acontece mais frequentemente, a precipitação é menor que o deficit de água, apenas uma porção do solo, a partir de sua superfície, é levada à capacidade de campo. A profundidade assim umedecida é proporcional à quantidade de chuva, e o solo abaixo dessa camada permanece ressequido.

Embora a absorção mais rápida se dê nas proximidades dos ápices radiculares, essa região corresponde a uma pequena fração da superfície absorvente do sistema radicular, e a maior parte da satisfação da necessidade de água da planta é obtida por absorção através das raízes mais velhas, parcialmente suberizadas.

A resistência ao movimento de água na direção das raízes aumenta bruscamente com a diminuição da umidade do solo. A maior resistência ao movimento de água no sistema solo-planta é provavelmente o ponto de passagem entre o solo e o córtex radicular.

Hidrotropia e geotropia são demonstráveis, mas a resposta das raízes a eles não é inflexível. As raízes se proliferam em regiões de solo úmido, crescendo para cima; raízes crescem horizontalmente em meios não úmidos.

A absorção da água pelo sistema radicular é preferencial em regiões mais úmidas, e, assim, a rizosfera é autoequilibrante com respeito à umidade do solo. A capacidade de água disponível descreve a quantidade de água que um solo pode reter depois de precipitação excessiva; a água disponível pode ser explorada em sua totalidade apenas quando o sistema radicular se ramifica pelo perfil todo.

Não existe diferença entre raízes que absorvem água e raízes que absorvem nutrientes; a maioria das raízes pode executar ambas as funções virtualmente de maneira independente. A falha do crescimento de raízes em solo seco está mais associada à impedância mecânica do que à falta d'água.

Murchamento temporário (deficit do meio-dia) é o resultado de uma taxa de transpiração que excede a máxima capacidade de absorção do sistema radicular. Ele não pode ser amenizado pela adição de água ao solo, mas, sim, pela redução da taxa de transpiração.

Medida da entrada de água na planta

A medida direta da entrada da água em raízes não é possível por métodos simples; é usual inferir a entrada de água no sistema radicular pelo estudo das variações do status de água nas diferentes zonas do solo. Isso pode ser feito quantitativamente por meio de medidas repe-

tidas de umidade do solo, mas a amostragem destrói raízes e deixa canais artificiais para a distribuição da água. Como uma alternativa, tensiômetros podem ser instalados permanentemente a várias profundidades e distâncias da planta, ou tubos de acesso para sonda de nêutrons podem também ser instalados.

Água dentro da planta

A água dentro da planta forma um contínuo, i.e., existe um contato contínuo entre a água presente nas superfícies das células dos espaços intercelulares da folha (virtualmente a atmosfera), as contínuas colunas de água dentro dos vasos do xilema e as células do córtex radicular e pelos absorventes (Figura 4). As paredes das células externas das raízes estão em contato com a água que envolve as partículas de solo. Consequentemente, a retirada da água por evaporação (transpiração) das células da folha estabelece um gradiente de potencial que é transmitido para baixo através da planta e para o solo; a água do solo tende, por isso, a se mover no sentido ascendente ao longo desse gradiente.

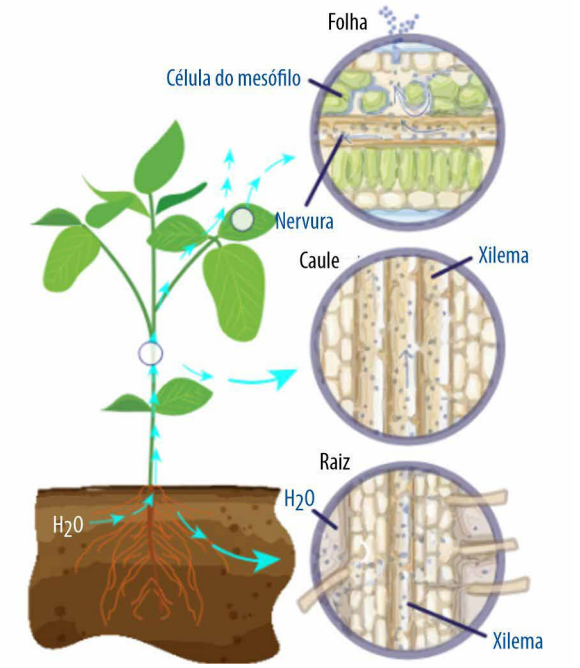


Figura 4. Representação da passagem da água pela planta, colunas de água dentro dos vasos do xilema e das células do córtex radicular e pelos absorventes.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

O potencial de água de um tecido ou de um material, como o solo, expressa sua habilidade em permitir a passagem da água a outro tecido ou material a um potencial mais baixo ou estresse de água mais baixo. A redução do potencial de água da planta tende a reduzir a abertura dos estômatos, o que interfere com o fluxo de CO_2 e, consequentemente, com o crescimento.

Transpiração

Transpiração é a perda de água das plantas na forma de vapor. Embora basicamente um processo de evaporação, ele é afetado pela estrutura da folha e abertura estomática tanto quanto por fatores ambientais. A perda de água é um processo de difusão e ocorre via duas rotas em paralelo: a estomática e a cuticular. A estomática é quantitativamente a mais importante. Transpiração é um processo dominante nas relações solo-planta porque ela produz o gradiente necessário que causa o movimento de água dentro e através das plantas.

Nos vegetais, o intercâmbio de gás carbônico e de oxigênio é diretamente proporcional ao do vapor d'água. Logo, as plantas com altas taxas de absorção de CO_2 apresentam altas perdas por transpiração, o que torna implícito que elevados consumos de água aumentam a produtividade.

A fotossíntese e a respiração envolvem processos químicos complexos, sensíveis a muitas variáveis, diferentemente da transpiração, que é mais simples, controlada principalmente por variáveis físicas ligadas à difusão dos gases. Pode-se considerar a transpiração como o fluxo de água proveniente de um reservatório de capacidade limitada, sendo a força impulsora o gradiente de potencial de água.

A água é o constituinte mais abundante dos tecidos das plantas. Porém, a planta retém uma pequena parte daquela absorvida. Grandes quantidades de água são continuamente absorvidas do solo, translocadas através da planta e passadas para a atmosfera sem estar envolvida em ne-

nhuma função aparente. Uma das curiosidades da natureza é a terrível ineficiência da economia de água pelas plantas. Embora plantas necessitem de água em quantidade relativamente grande para sobreviver, a estrutura anatômica foliar é tal que grandes quantidades de água são continuamente perdidas. Apenas uma pequena fração, geralmente menos de 1% da água absorvida, é usada nas reações metabólicas.

Taxas de transpiração

O fluxo potencial máximo de água pela planta (taxa de transpiração potencial) é determinado primariamente pela diferença entre o potencial da água nas superfícies radiculares e aquele nos pontos de evaporação dentro das folhas; a taxa atual é reduzida em proporção às resistências dentro das raízes, caules e folhas. Medidas dessas resistências individuais são difíceis, mas o valor da resistência da folha é provavelmente da mesma ordem de grandeza da resistência do caule e bem menor que a resistência radicular.

Durante a noite, o potencial de água das superfícies das paredes celulares em contato com o ar nos espaços intercelulares é igual àquele dentro das células porque, praticamente, nenhuma evaporação toma lugar – a planta não está transpirando. Nessas condições, não há movimento ascendente de água no xilema, e existe então uma tensão descendente, resultante de atração gravitacional atuando sobre as colunas estacionárias de água. Durante o dia, a evaporação das paredes celulares se inicia, um gradiente de potencial é estabelecido entre a parte externa das paredes e o conteúdo celular que implica perda inicial de água dos próprios tecidos (Figura 5). Pelo fato de as paredes celulares serem elásticas, ocorre uma variação inicial em seu tamanho, mas, eventualmente, se estabelece uma diferença de potencial entre os interiores das células e as extremidades superiores dos vasos do xilema. Isso estabelece uma diferença semelhante entre as extremidades inferiores e superiores dos vasos e um movimento geral, ascendente, de água, se iniciа. Existe agora diferença de potencial entre as extremidades inferiores dos vasos e as células das raízes que então perdem água; a parte de suas paredes, inclusive os pelos absorventes, em contato com a água do solo, estará a um potencial menor do que a água do solo, e a água move-se para dentro da planta.

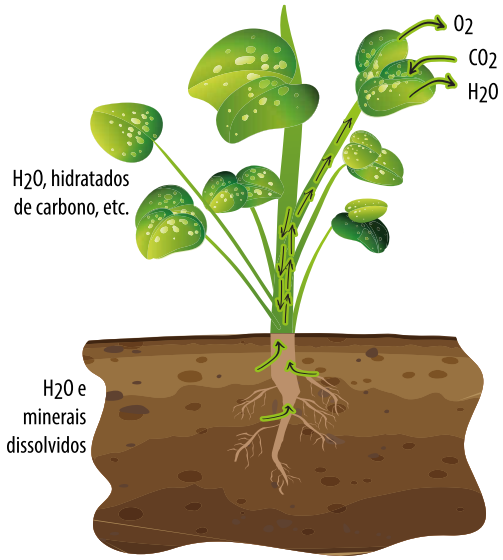


Figura 5. Fluxo de passagem da água e gases pela planta.
Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

A taxa de transpiração atual varia irregularmente como um resultado de mudanças transitórias no ambiente. Há também variações diárias regulares no conteúdo de água das plantas, que atinge um mínimo à tarde e um máximo durante a noite; são essas pelo menos parcialmente relacionadas com as mudanças na taxa de transpiração. Variações cíclicas na taxa de transpiração, de periodicidade muito mais curta do que variações diurnas, foram observadas em girassol, acompanhadas por variações de temperatura de folha e abertura de estômatos. Essas relações poderiam ser explicadas por um mecanismo de cadeia; se as condições atmosféricas fossem tais que a taxa de transpiração potencial excedesse à capacidade da planta de atendê-la, estômatos tenderiam a se fechar; as taxas de transpiração e esfriamento por evaporação também tenderiam a cair, e, portanto, a temperatura da folha tenderia a subir. A redu-

ção da taxa de transpiração aumentaria o potencial da água na folha, estômatos se abririam, e assim a série cíclica de eventos recomeçaria.

Transpiração potencial e real

Estimado ou medido, o resultado aparece como a evaporação de uma superfície aberta de água ou diretamente como transpiração potencial. A evaporação de uma superfície aberta de água é geralmente maior do que a transpiração de uma cultura submetida a condições semelhantes de exposição, por causa da intervenção de resistências ao movimento de vapor, como aquelas impostas por abertura de estômatos e permeabilidade baixa da cutícula da folha. Em alguns casos foi medida uma transpiração em excesso à evaporação de superfície aberta de água. Isso deve ser em razão parcialmente do movimento horizontal do ar sobre a vegetação, o que pode ter introduzido e provocado a utilização de energia advectiva que não seria interceptada pela superfície de água e, parcialmente, por causa da eficiência do sistema evaporante das plantas, altamente dividido e disperso em contraste com a superfície plana e horizontal de água.

A relação entre a transpiração atual e potencial pode ser medida experimentalmente, por exemplo, utilizando-se lisímetros de balança para medir a taxa atual de perda d'água de um sistema confinado planta-solo para comparação com a estimativa e utilizando-se perdas medidas por evaporímetros. Entretanto, as condições em todos os lisímetros são inerentemente artificiais pelo fato de o sistema radicular estar confinado e não estar livre para absorção de água. Além do mais, o solo é isolado do subsolo e, assim, não está sujeito às mesmas tensões e aos fenômenos de drenagem como no solo não confinado. A fim de contornar essas dificuldades, lisímetros têm sido equipados com instrumentos de sucção para tornar o potencial da água dentro igual ao de fora.

A maioria dos métodos descritos, inclusive o de Penman-Monteith, fornece estimativas da transpiração de uma cultura verde, cobrindo uniforme e inteiramente o solo, com suprimento não limitado de água. Na prática, a cultura nem sempre cobre totalmente o solo; existe solo nu entre as linhas de culturas anuais durante 80% do seu ciclo de cultivo. Além disso, a redução do potencial d'água ocorre normalmente em condições de campo.

Transpiração relativa

Transpiração relativa é a relação entre a transpiração real e a transpiração potencial. A planta como o solo são condutores hidráulicos nos quais a taxa de fluxo é proporcional à força e à condutibilidade. Se essa condutibilidade se mantiver constante, a variação na taxa de fluxo provém da força impulsora que é, principalmente, a transpiração. No entanto, a condutibilidade não parece ser constante, sendo o seu decréscimo acompanhado por uma progressiva redução nos potenciais de água da folha e do fechamento dos estômatos. Os principais fatores, atuando na transpiração real, são o potencial de água no solo (ψ_s), a condutibilidade hidráulica do solo (K), o volume e a densidade das raízes, a resistência interna da planta, o potencial crítico de fechamento dos estômatos e a transpiração potencial.

Importância da transpiração

A transpiração é um processo passivo que ocorre como um resultado da incidência diária da radiação de onda curta sobre uma estrutura constituída principalmente de água e que possui uma superfície mais ou menos permeável; a perda de água na extremidade superior dessa estrutura cheia de água estabelece um gradiente de potencial que induz um movimento ascendente de água e, consequentemente, uma redução no potencial da extremidade inferior em relação àquele no solo. Assim a água entra na planta e caminha

na forma de fluxo de transpiração, no sentido ascendente, durante todas as horas de brilho solar. O fluxo de transpiração tem uma função de transporte, que poderia sem dúvida alguma ser satisfeita pelo movimento de um volume bem menor de água, pois a quantidade de água armazenada nos tecidos é relativamente pequena e desprezível. O fluxo de transpiração é a fonte de água que mantém a turgescência e a postura, mas esse fato implica uma entrada de água não maior do que o volume dos tecidos que devem permanecer túrgidos. A evaporação da água das superfícies expostas as mantém frescas, utilizando e, assim, neutralizando a radiação incidente que aqueceria os tecidos. O fluxo de transpiração é a fonte dessa água de refrigeração, mas, mesmo sendo esse efeito significante, ele não deve ser superestimado, pois plantas adaptadas para climas áridos sobrevivem sem um superaquecimento, mesmo possuindo uma taxa de transpiração muito pequena. O fato de que tais cactáceas e suculentas crescem muito devagar, contrabalançando a exposição a generosas quantidades de radiação que poderiam ser utilizadas pela fotossíntese, indica a função mais importante da transpiração que, em efeito, é quase acidental. A alta turgescência mantém os estômatos abertos, permitindo não apenas uma saída máxima de vapor, mas também de ingresso máximo de dióxido de carbono para fotossíntese.

É necessário se perder tanta água por transpiração para se chegar ao final do ciclo de uma cultura como o milho, por exemplo, porque, provavelmente, uma parte essencial daquelas sementes de milho e de todas as outras partes da planta são átomos de carbono que formam os esqueletos das moléculas orgânicas, as quais vão compor partes das plantas, e virtualmente todo esse carbono tem que vir da atmosfera. Ele entra na planta como CO_2 através dos poros estomáticos, na maioria das superfícies foliares, e através dessas mesmas aberturas a água se difundirá para a atmosfera.

Medição da transpiração

Vários métodos têm sido empregados para medir transpiração. Esses métodos geralmente envolvem ou uma medida da água absorvida ou uma medida do vapor d'água transpirada por uma planta. Dentre os métodos destacam-se:

- Métodos gravimétricos (pesagens).
- Potômetro.
- Medições gasométricas rápidas.
- Coleta e pesagem do vapor d'água.
- Medição por absorção de radiação infravermelha.
- Método do cloreto de cobalto.
- Medição por psicrometria.
- Higrômetros de resistência.

A medida direta do fluxo de vapor que abandona a planta, apesar de possível, requer equipamento sofisticado. Entretanto, métodos de inferência que dependem da variação de peso da unidade total planta-solo ou planta-água não requerem nada mais do que uma balança sensível; esses métodos justificavelmente atestam que a variação de peso em razão da fotossíntese é desprezível em comparação com a variação de peso por causa da transpiração. Máquinas capazes de pesar com precisão volumes extensos de solo são caras; consequentemente, existe a corrida para o desenvolvimento de novos sistemas de pesagem para lisímetros. Para o caso de casa de vegetação ou culturas de laboratório em pequenos vasos, balanças convencionais são adequadas, mas a grande repetição necessária para atender à variabilidade do material vegetal estimulou o interesse por sistemas de pesagem de baixo custo, tal como a balança eletromagnética de registro de transpiração.

Caminhamento do vapor d'água

As perdas de água por transpiração ocorrem em qualquer parte da planta exposta à atmosfera

externa, ressaltando-se os estômatos, seguidos, em pequena escala, da cutícula das folhas. O conjunto solo-planta-atmosfera, em termos práticos, é uma série de condutores, por onde flui a água com resistências variáveis. A abertura dos estômatos varia com a turgescência das células-guarda, de modo que quanto mais túrgidas, maior a abertura e menor a resistência; esta depende ainda da frequência dos estômatos e da posição deles na folha. Assim, os estômatos podem se localizar nas duas faces (abaxial e adaxial) da folha, (anfiestomática, por exemplo, milho); nesse caso, o número de estômatos nas duas faces é semelhante; somente na face abaxial (hipoestomática, por exemplo, aquáticas); e por último quando os estômatos se encontram nas duas faces, porém com predominância de maior número para a face abaxial (anisoestomática, por exemplo, feijão).

A água que evapora das paredes das células do mesófilo foliar difunde-se pelos espaços intercelulares até os estômatos e daí ao exterior. A Figura 6 indica as resistências encontradas ao fluxo da água. Observam-se as resistências do solo, da raiz, do xilema, do mesófilo, dos espaços intercelulares, dos estômatos, da camada limite e resistência da cutícula. As resistências dos espaços intercelulares (r_i) e dos estômatos (r_s) ocorrem em série, sendo uma simples soma de resistências ($r_i + r_s$), que está em paralelo com a resistência cuticular (r_c). O fluxo do vapor d'água pode ser visto em analogia ao circuito elétrico.

Resistência ao fluxo e assimilação de CO_2

O caminhamento do CO_2 é um pouco mais complicado que o do vapor d'água, pois o CO_2 vindo do ar atmosférico deve ultrapassar a camada limite adjacente à folha, aos estômatos, aos espaços intercelulares até as células do mesófilo e eventualmente adentrar os cloroplastos (Figura 7). Logo, o CO_2 deve ultrapassar a parede celular de uma célula do mesófilo, a plasmalema, parte do citoplasma, as membranas envolvendo o cloroplasto e outra do estroma do cloroplasto.

Estado de água dos tecidos vegetais

Pelo fato de existir um gradiente de potencial do solo à atmosfera, através da planta, a água dentro da planta está sempre sob alguma tensão ou estresse, que se origina de duas maneiras distintas: a) estresse osmótico relacionado com a concentração salina no solo; b) simples deficit de água resultante da falta de água no solo ou da alta condição evaporativa da atmosfera.

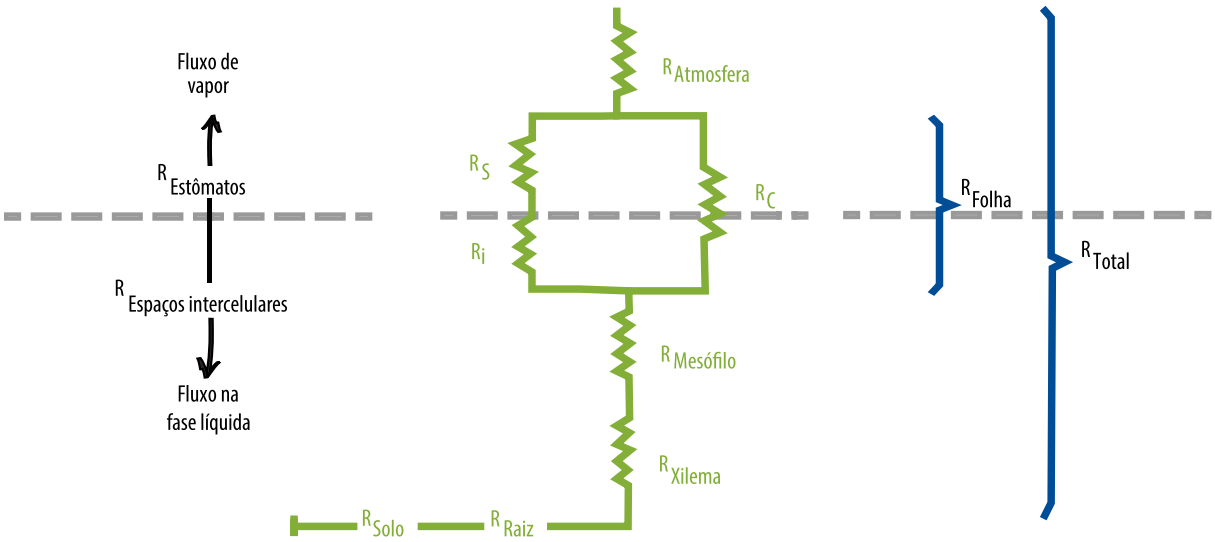


Figura 6. Resistências aos fluxos de água.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

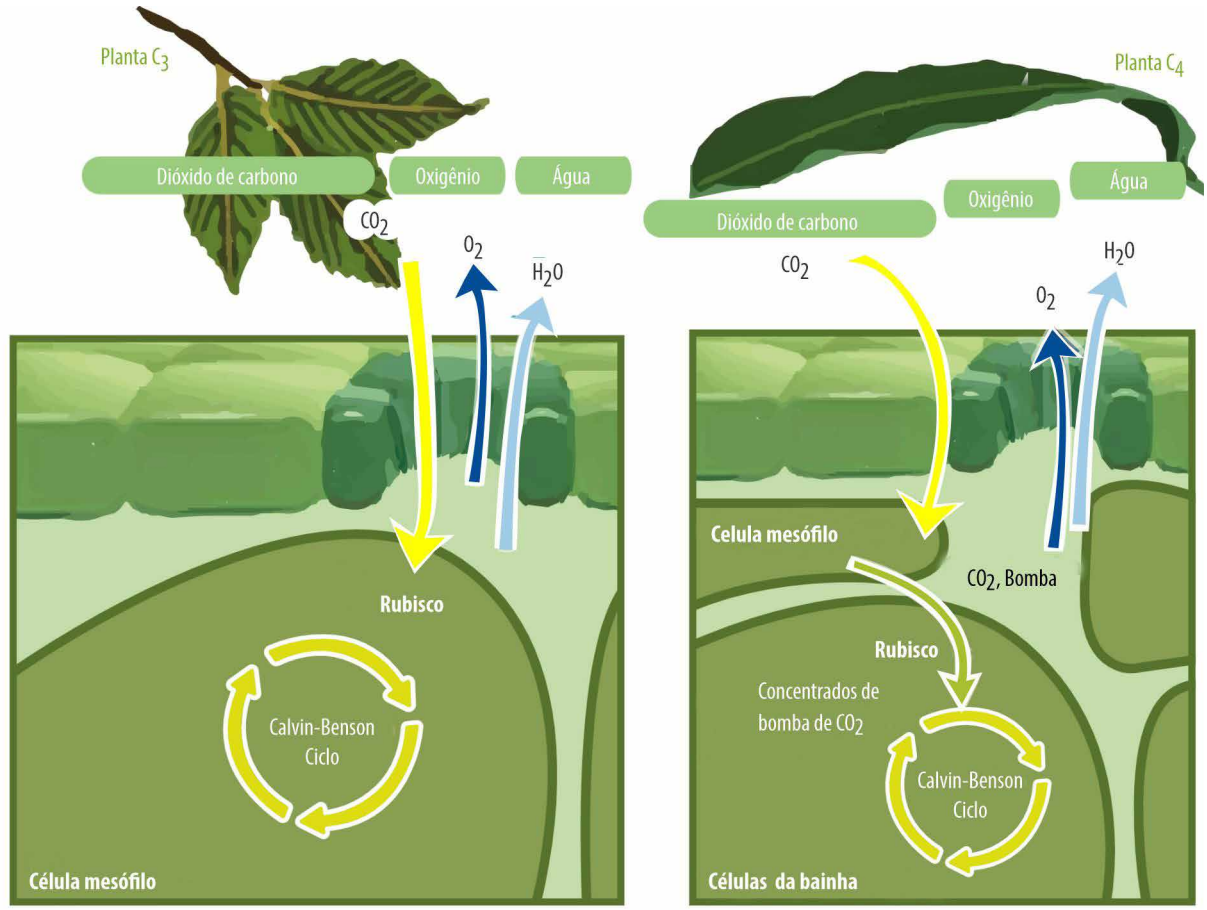


Figura 7. Caminhamento do CO_2 na planta.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Os sintomas de estresse interno de água produzidos por essas duas fontes diferem pelo fato de o estresse induzido por salinidade se manifestar por um engrossamento e escurecimento de tecidos verdes, às vezes sem murchamento, enquanto o deficit de água pura resulta em murchamento temporário ou permanente, redução na taxa de crescimento, escurecimento da cor da folhagem e eventualmente a intensificação de um florescimento ceroso sobre as superfícies das folhas.

Medida de água na planta

A natureza do potencial de água é compreendida de forma mais adequada a partir dos métodos comumente utilizados para medi-lo. O potencial da água pode ser medido em termos do conteúdo total da água dos tecidos ou do estado de energia da água. Não é suficiente designar apenas a porcentagem do conteúdo de água da amostra; o conteúdo de água deve ser relacionado com um padrão tal como o conteúdo da amostra quando inteiramente túrgida, armazenada a máxima quantidade possível de água. Esse parâmetro pode ser obtido, pesando-se discos de folha imediatamente após retirados da folha e tornando a pesá-los após permanecerem flutuando sobre água até turgescência completa, e depois ainda determinando seu peso seco. O potencial de água ou deficit de água ou deficit de saturação do tecido original pode depois ser calculado em relação à quantidade de água no tecido completamente túrgido. O termo turgescência relativa tem sido utilizado para a relação entre a turgescência atual do tecido e a turgescência máxima dos discos flutuantes na água.

Uma alternativa baseia-se no fato de que, quando um tecido não está totalmente túrgido, isto é, quando seu potencial de água não é máximo, suas células absorverão água de qualquer solução de potencial mais alto e assim aumentarão de tamanho (Figura 8). Amostras de tecidos são colocadas em uma série de soluções de conteúdo crescente em sal (e, portanto, crescentes em pressão osmótica). A solução na qual não existe variação nas dimensões, volume ou peso da amostra tem o mesmo potencial de água. Pode-se também observar qual das soluções não sofreu mudança em densidade depois da amostra de tecido ter permanecido dentro dela.

O potencial da água ou deficit interno de água na planta pode também ser determinado a partir de mudanças associadas em algumas propriedades físicas do tecido, de fácil medida, como o diâmetro do caule, a espessura da folha ou o tamanho da fruta.

O potencial total geral de um ramo intacto, resultante da soma dos potenciais dos tecidos componentes, pode ser medido colocando-se o ramo inteiro em uma câmara, com a extremidade cortada para fora. A pressão do gás dentro da câmara é aumentada até que a água é forçada de volta no sentido descendente do caule, aparecendo como exsudado no corte externo. A pressão do gás, atuando nas partes externas das células, contrabalança seu potencial de água e reverte o fluxo de transpiração. A força necessária para fazer isso é evidentemente igual ao potencial da água. Ele pode ser descrito como a pressão hidrostática negativa da seiva do xilema, que pode ser da ordem de 20 bars a 30 bars (2 MN m^{-2} a 3 MN m^{-2}); o aparelho precisa ser suficientemente resistente para suportar pressões muito mais altas do que esta, de até 50 bars. Pressão da seiva em plantas vasculares, vide Scholander et al. (1965).

Resultados da redução no potencial da água na planta

Efeitos nos estômatos

É bem conhecido o fato de que os estômatos das plantas tendem a se fechar quando existe carência de água e que existe evidência substancial de que isso constitui o principal mecanismo de regulagem contra a perda excessiva de água. O funcionamento mecânico dos estômatos é bem conhecido; a estrutura do par de células-guarda é tal que mudanças em seu turgor mudam sua forma e assim o tamanho do poro entre elas. A variação do turgor é acompanhada por variação na concentração de grânulos de amido dentro delas. O amido não está em solução e, por isso, não contribui para a pressão osmótica; existe uma variação recíproca na concentração de açúcar do suco celular e, portanto, do potencial da água. A luz solar causa a conversão de amido em açúcar e assim abre os estômatos. Uma teoria para explicar isso postula que a luz favorece a utilização do CO_2

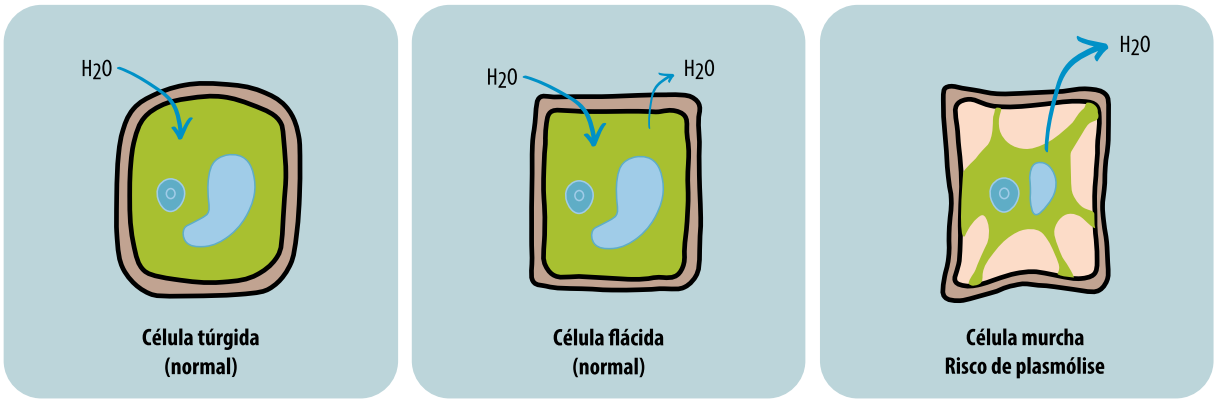


Figura 8. Representação da turgescência da célula vegetal em condições normais e de estresse hídrico.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

na formação do açúcar; a remoção do CO_2 torna as condições menos ácidas e isso, por sua vez, favorece a transformação de amido em açúcar pela enzima fosforilase. Experimentos, nos quais a concentração de CO_2 dentro da folha foi artificialmente modificada, confirmaram que alta concentração de CO_2 causa o fechamento dos estômatos, enquanto concentrações baixas (menos ácidas) causam abertura.

Gases podem mover-se por diminutos poros por difusão; a difusão, que toma lugar em razão do movimento casual das moléculas do gás, pode ser um processo muito mais rápido através de poros pequenos, do que fluxo de massa. Se os poros em uma membrana estão suficientemente próximos uns aos outros, a difusão se processa quase tão rapidamente como se não existisse membrana. A distância entre estômatos na superfície foliar é muitas vezes igual a dez vezes seu diâmetro, e, nesse espaçamento, quando completamente abertos, a resistência foliar à difusão é desprezível.

Toda a água perdida por uma planta para a atmosfera passa na forma de vapor pela cutícula ou estômatos ou, como em algumas poucas plantas, por hidatódios na forma líquida. A comparação entre perdas cuticulares e estomatais é obviamente muito difícil tecnicamente; foram feitas comparações entre perdas de água por folhas intactas, folhas cuja cutícula foi retirada e folhas sob luz solar e sob escuridão quando os estômatos estão mais ou menos fechados. Desses experimentos, estimou-se que a transpiração através de estômatos é de 3 a 150 vezes maior que a transpiração cuticular. Independentemente do valor exato, é sabido que a maior parte da água passa pelos estômatos e que estes, portanto, representam um meio de controle da transpiração; eles se constituem de hidrostatos efetivos no controle do estado interno da água da folha, mesmo havendo perda substancial de água pela cutícula, quando os estômatos estão bem fechados.

Muitas espécies têm adaptações como coberturas com substâncias cerosas, folhas enroladas ou dobradas, que reduzem a transpiração cuticular. Em Glycine, estimou-se que os pelos reduzem a transpiração de 40% em condições de vento moderado. De maneira similar, foi calculado que estômatos localizados dentro de cavidades, como em Agave, perdem água em uma taxa cinco vezes menor do que se estivessem situados sob superfície plana, mesmo quando totalmente abertos.

Efeitos fisiológicos

O fechamento dos estômatos não reduz apenas a saída da água, mas também a entrada de dióxido de carbono, e isso reduz a taxa de fotossíntese. O ganho em peso como um resultado da assimilação de carbono é menor em tecido murcho do que em tecido túrgido. A redução da taxa de síntese de proteínas também tem sido associada à diminuição do teor de água dos tecidos; na verdade o metabolismo completo da planta parece diminuir com a redução do potencial de água. Por meio, entretanto, do decréscimo de crescimento resultante, são facilmente demonstradas as razões por que não se sabe como o baixo potencial interfere nos muitos processos que contribuem para o crescimento vegetal.

A relação entre a abertura dos estômatos, perda de água e fotossíntese é muito bem ilustrada pelo comportamento peculiar da cultivar de batata Droopy que é geneticamente incapaz de fechar estômatos. Consequentemente, ela continua a perder água e murcha prematuramente sob condições nas quais outras cultivares se mantêm túrgidas por fechamento de estômatos. As folhas perdem a postura correta para interceptar a radiação solar, e assim a fotossíntese e o crescimento são reduzidos mesmo com os estômatos abertos.

Efeitos no crescimento e desenvolvimento

Um abaixamento do potencial da água na planta afeta diferentes órgãos de diferentes formas. O efeito mais comum do estresse de umidade é uma redução na taxa de crescimento e desen-

volvimento da folhagem, e, de maneira inversa, uma diminuição no estresse causa um aumento na produção de folhagem. Em beterraba e gramíneas, uma redução no estresse induz uma taxa maior de crescimento geral do que em plantas que nunca estiveram sujeitas a estresse; mas a produção final das plantas, nas quais o estresse foi diminuído, nunca chega a superar a produção daquelas que nunca estiveram sujeitas a estresse.

O abaixamento do potencial da água em certos estágios de crescimento tem efeitos específicos; um exemplo óbvio é a falha das sementes de germinar ou de *seedlings* se desenvolverem, mas a falta de água na floração de muitas espécies contrastantes, incluindo-se ervilhas, cereais e café, influencia a produtividade de sementes. Com ervilhas, o estresse de água durante a queda das pétalas e intumescência das vagens afeta, de maneira ainda não compreendida, a eficiência de fertilização e subsequente crescimento, de tal forma que um número reduzido de sementes menores é produzido.

Um fenômeno mais importante é que os tecidos apicais e as folhas muito novas parecem ter maior facilidade em suportar efeitos adversos de potencial temporariamente baixo, do que tecidos mais velhos. Em plantas que estiveram sujeitas à seca severa e depois foram molhadas, as folhas velhas caem e são repostas pela rápida expansão das folhas mais jovens e pelo desenvolvimento de mais folhas no ápice da planta. Quando as raízes de plantas transplantadas são danificadas por técnicas ruins de transplante e, por causa disso, são sujeitas a estresse de água temporário, as folhas velhas são as que morrem e as mais novas sobrevivem e eventualmente substituem as primeiras.

Transporte

Uma função do fluxo de transpiração é trazer nutrientes inorgânicos dissolvidos, das raízes para os locais de atividade metabólica; esse processo cessa à noite, quando existe pouca ou nenhuma transpiração. A distribuição de material elaborado e dos produtos da fotossíntese na direção oposta toma lugar principalmente pelos vasos do floema, mas a reutilização desses materiais armazenados, em tecidos de armazenamento, ocorre em ambos, xilema e floema. O baixo potencial interfere em ambos os processos.

Medidas de fatores associados com o movimento de água dentro da planta

Absorção de água pela parte aérea da planta

A absorção de água e, portanto, a transpiração de um ramo cortado podem ser demonstradas fixando-se a parte cortada a um potômetro de bolha, que se constitui de um tubo capilar horizontal cheio de água (Figura 9). A velocidade do movimento da bolha introduzida indica a taxa de absorção de água. O corte e a adaptação do tubo ao corte devem ser executados debaixo d'água, para prevenir a entrada de ar no xilema. A medida precisa do potencial da água da parte aérea da planta e pode-se fazer pelo uso da bomba de pressão (Scholander et al., 1965).

Potencial da água de tecidos

Existe uma série de métodos isopiésticos o que significa que a pressão é a mesma em todos os pontos do sistema; consequentemente, métodos isopiésticos para medir o potencial da água na folha dependem de igualar a pressão osmótica entre amostras e padrões. Um simples e efetivo método é preparar um número de pares de tubos contendo uma série de concentrações de um soluto não penetrante, como manitol ou carbowax, em água. Amostras de discos de folha de tamanho conveniente são embebidas, por algumas horas, em um de cada par de tubos; uma gota de corante é então adicionada ao outro tubo de cada par. Usando uma pipeta fina, um pouco da solução colorida é introduzido abaixo da superfície de

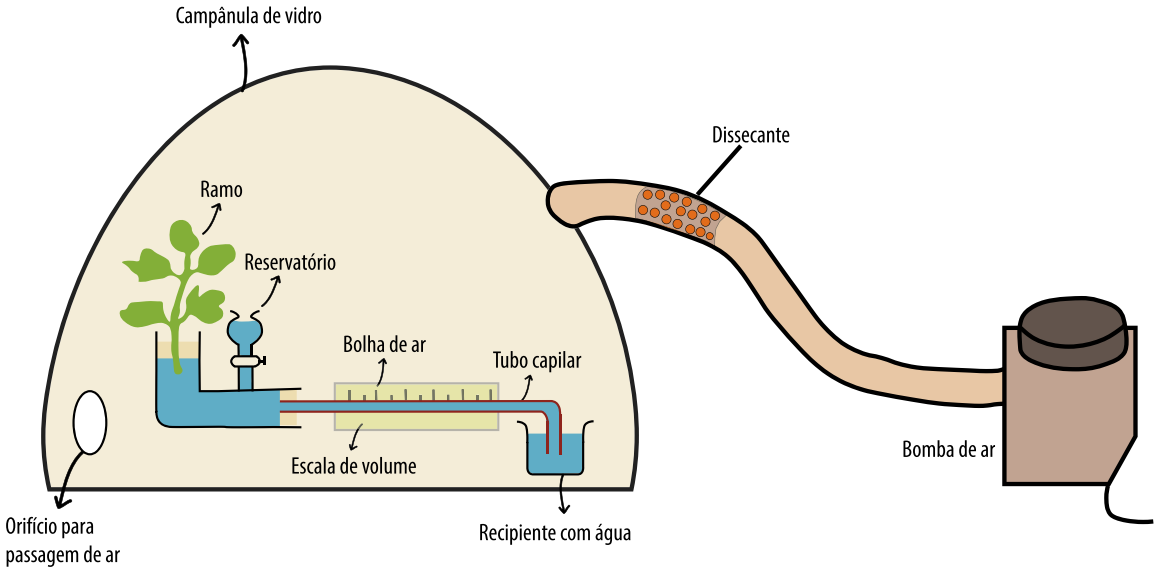


Figura 9. Representação de um potômetro de bolha.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

seu par no qual a amostra foi embebida. Se a solução colorida sobe, a amostra absorveu água e reduziu a densidade da solução original; seu potencial de água é por isso maior do que aquele da solução. Se a solução colorida afundar, o potencial da água é menor. Achar soluções de concentração adequada para um experimento em particular pode consumir muito tempo.

No método de radiação beta, uma folha é interposta entre uma fonte de radiação beta e um detector; a atenuação dos raios beta é proporcional à massa da folha e é detectada como uma redução na taxa de contagem. Mudanças em massa em curtos períodos de tempo são apenas em razão da variação na umidade da folha; o método não danifica tecidos e pode ser usado em plantas intactas no campo.

O potencial da água de qualquer solução está relacionado com a pressão de vapor da atmosfera em contato com ela. Esse fenômeno é explorado em muitos métodos de medida do potencial de água. Uma amostra é deixada entrar em equilíbrio com o vapor do ar de uma câmara fechada; a pressão de vapor desse ar é depois medida, por exemplo, observando-se qual solução de uma série de soluções de pressões osmóticas diferentes, também fechadas na cápsula, não sofre variação em volume. As soluções são convenientemente sustentadas em curtos tubos capilares. Outra forma é o uso do psicrômetro de par termelétrico, para medir a pressão de vapor do ar da câmara.

No método da gota suspensa, uma pilha de anéis de tecido foliar é colocada em uma pequena câmara fechada imersa em banho de temperatura constante. Uma pipeta capilar é selada dentro da tampa da cápsula. Depois de equilibrar por aproximadamente 3 horas, uma gota de água é parcialmente exsudada de tal forma que fique pendurada na extremidade da pipeta; a gota é depois retirada e seu menisco superior no capilar é alinhado com um ponto de referência. A posição do menisco inferior (e, portanto, o volume da gota) é anotada. A gota é agora novamente exsudada por um período de tempo exatamente medido, depois do qual seu volume é novamente medido. A perda de água por evaporação está relacionada com o potencial da água dos discos dentro da câmara. O aparelho é calibrado, expondo-se a gota a soluções salinas de potencial conhecido.

Relação solo-planta (absorção e transporte de água em plantas vasculares)

A água dentro da planta forma um contínuo, i.e., existe um contato contínuo entre a água presente nas superfícies das células dos espaços intercelulares das folhas (virtualmente a atmosfera), as contínuas colunas de água dentro dos vasos do xilema e as células do córtex radicular e pelos absorventes. As paredes das células externas das raízes estão em contato com a água que envolve as partículas do solo (Figura 10). Consequentemente, a retirada da água por evaporação (transpiração) das células da folha estabelece um gradiente de potencial que é transmitido para baixo através da planta e para o solo; a água do solo tende, por isso, a se mover no sentido ascendente ao longo desse gradiente.

O potencial de água de um tecido ou de um material, como o solo, expressa sua habilidade em permitir a passagem da água a outro tecido ou material a um potencial mais baixo ou estresse de água mais baixo.

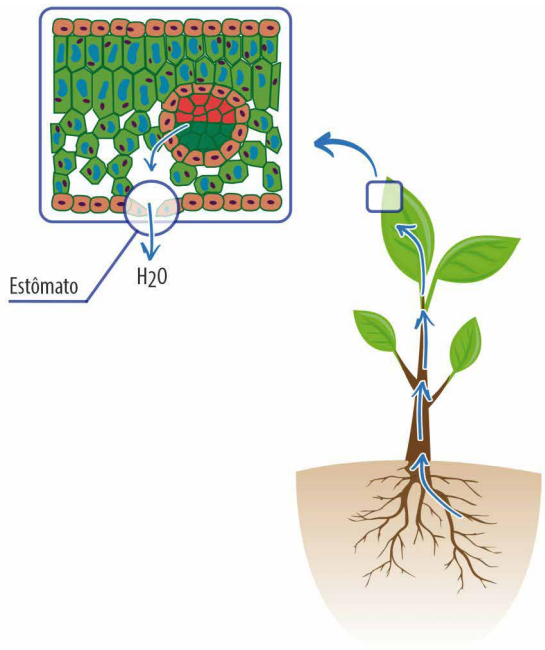


Figura 10. Contato contínuo entre a água presente nas superfícies das células dos espaços intercelulares das folhas, as contínuas colunas de água dentro dos vasos do xilema e as células do córtex radicular e pelos absorventes.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

A redução do potencial da água da planta tende a fechar os estômatos, o que interfere com o fluxo de dióxido de carbono e, consequentemente, com o crescimento.

Movimento da água para fora do sistema solo-planta

A água se move em torno do ciclo hidrológico em resposta à energia fornecida principalmente no ponto, no qual a água no estado líquido passa para vapor, dentro da parte aérea da planta ou na superfície do solo. A maior parte dessa energia entra na forma de radiação de onda curta do sol. Uma componente comparativamente pequena entra como energia advectiva, i.e., energia proveniente das variações de temperatura do ar quando este passa sobre superfícies evaporantes ou transpirantes.

A evaporação pode ser medida, em vez de estimada, por meio de lisímetros e evaporímetros, mas a exposição adequada desses instrumentos é difícil; estimativas da evaporação a partir de dados meteorológicos são comumente consideradas mais corretas do que medidas diretas.

Camada-limite

A camada-limite é a camada da atmosfera, adjacente à superfície do solo, dentro da qual parâmetros como vapor e fluxo de calor variam com a altura, regularmente e de forma previsível. É dentro dessa camada-limite que estimativas precisas de evaporação podem ser feitas. A camada-limite é perturbada por descontinuidades em vegetação ou topografia, e isso implica o fato de que o ponto de medida ou estimativa deve estar dentro de uma área uniforme. Para uma camada-limite de 0,5 m de altura, é necessário que exista um contorno uniforme de vegetação ou solo de aproximadamente 70 m de diâmetro; uma camada-limite de 2 m exige, teoricamente,

um contorno de 400 m de raio. Essas condições raramente ocorrem na prática, o que nos leva a concluir que lisímetros realmente não satisfazem essas exigências, de tal forma que seus resultados devem ser suspeitos e que estimativas meteorológicas são apenas precisas quando relativas a grandes áreas de vegetação uniforme.

Constante de raiz ou cultura

O volume de água que pode ser extraído de um solo, antes que a atenuação das reservas comece a limitar a transpiração, depende da textura do solo, da profundidade, do estado inicial de umidade e da profundidade alcançada pelas raízes.

A constante de raiz é definida como o máximo deficit de água do solo que pode ocorrer sem interferir na transpiração. A constante da raiz é, primariamente, mas não completamente, uma característica da planta e ela varia com seu crescimento e desenvolvimento e com a densidade do sistema radicular. A constante da raiz é expressa nos mesmos termos como a precipitação, i.e., a altura de água corresponde à quantidade de água em consideração, que cobriria uniformemente a superfície do solo. Para pastos permanentes, ela é da ordem de 75 mm a 120 mm; para culturas herbáceas sobre solo de textura média, 50 mm; enquanto para árvores frutíferas com sistemas radiculares profundos pode ser acima de 200 mm. Deve ser dada ênfase ao fato de que estes são apenas exemplos, a constante de raiz de uma cultura relativamente resistente à seca, como a da alfafa, pode exceder 100 mm, enquanto aquela de árvores frutíferas cujas raízes estão confinadas a camadas superficiais pode ser menor que 75 mm.

Cobertura incompleta da cultura

Onde existem manchas de solo nu entre as plantas e superfície do solo molhada, há perda de água por evaporação na mesma taxa que uma superfície aberta de água e, consequentemente, nenhuma ou pouca modificação precisa ser feita sobre a perda de água estimada (aqui a diferença entre a taxa de transpiração e a taxa de evaporação de superfície aberta é ignorada). Mas, quando a superfície descoberta do solo se torna seca, ela virtualmente não perderá água por evaporação, e, nessas circunstâncias, o volume calculado de água perdida pela cultura deve ser reduzido em proporção à área livre de folhagem. Esse é o princípio no qual se baseia a prática tradicional de conservação de água do solo pela manutenção de uma crosta seca. Quando se aplica essa técnica, o cultivo para produzir essa camada deve-se limitar à profundidade menor possível porque, se solo úmido for levado à superfície, este perderá sua água, e o resultado será perda e não conservação de água. É fácil observar a propriedade de reter água por meio de uma superfície seca, no fim da primavera, quando solo úmido pode ser encontrado a alguns centímetros abaixo da superfície seca; esse solo permanecerá úmido até tarde no verão, caso não haja crescimento vegetal e seu cultivo seja evitado.

Deficit de água do solo

A água sai da planta e da superfície do solo a uma taxa que depende principalmente das condições meteorológicas. O solo da rizosfera contém uma quantidade finita de água, a redução da qual pode ser reposta pela precipitação por cima, lateralmente por movimento através de rachaduras ou, muito vagarosamente, mesmo lateralmente e no sentido ascendente por movimento capilar de água em resposta a gradientes de potencial. Esse fluxo de água dentro do solo é denominado redistribuição e é um processo contínuo em solo no qual plantas se desenvolvem. Em uma estação normal, diferente das condições de monção, a taxa de perda de água do sistema excede consideravelmente a taxa de reabastecimento a partir dessas outras fontes, e, consequentemente, o conteúdo de água no solo e seu potencial associado são progressivamente abaixados, e daí um deficit de água resulta.

O deficit de água é a quantidade pela qual diminui o estado de umidade do solo abaixo da capacidade de campo. Ele é normalmente expresso em termos de precipitação, e, consequentemente, o deficit equivale à precipitação máxima ou irrigação que um solo pode absorver sem perdas por drenagem.

O deficit de umidade do solo não é relacionado com o tipo de solo; dadas condições meteorológicas produzirão o mesmo deficit em um solo arenoso, como em um solo de boas propriedades de retenção, mas o efeito desse deficit idêntico sobre o crescimento vegetal é bem diferente nos dois tipos de solo. Por exemplo, 25 mm de deficit podem representar o uso de quase toda a água disponível nos primeiros 40 cm de um solo arenoso, ao passo que em um solo barrento apenas metade da água disponível teria sido utilizada. Assim, um parâmetro relacionado com as condições às quais uma cultura está sujeita é a porcentagem de uso da água disponível. Essa é frequentemente utilizada como um critério para determinar quando aplicar água em experimentos de irrigação. Pode ser observado que um dado uso da água disponível corresponde aproximadamente ao mesmo potencial de água em qualquer solo, mas ele aumenta como resultado de perdas diferentes de água em diferentes solos e a acumulação de diferentes deficits de umidade do solo.

Relação planta-atmosfera

A água move-se pela planta e para a atmosfera como um resultado da evaporação da água pela folhagem por causa da incidência de energia solar.

A evaporação pode ser medida por lisímetros de balança e evaporímetros, mas, por causa de problemas de localização e exposição desses instrumentos, é normalmente mais satisfatório estimar esses parâmetros a partir de dados meteorológicos e físicos.

Métodos de estimativa baseados em partição de energia ou balanço de energia requerem medidas de energia líquida, dissipação de calor no solo e mudanças na temperatura e umidade do ar.

Métodos de correlação aerodinâmicos e de turbulência requerem medidas diretas do fluxo ascendente de vapor d'água na atmosfera.

Métodos de combinação, incluindo-se o de Penman, combinam o balanço de energia relativo com o sistema ar-planta-solo e fatores que influenciam a transferência de calor e água para fora do sistema.

A transpiração e a evaporação atuais são geralmente menores do que as estimativas potenciais, por causa das restrições impostas pela falta de água no solo, limitação na extensão radicular e cobertura incompleta do solo pela folhagem.

A magnitude do efeito de um dado deficit de água no solo depende do tipo de solo e da porcentagem de esgotamento da água disponível e, consequentemente, do estresse ao qual a cultura é submetida. Normalmente quanto maior o estresse, tanto maior a redução no crescimento por causa da interferência na absorção de dióxido de carbono.

Efeitos do estresse de água em culturas

Altos valores de tensão de água no solo ou estresse (baixo potencial de água no solo), causados por teores baixos de água no solo, se opõem à passagem da água para a planta e através de suas superfícies transpirantes para a atmosfera. O resultado dessa oposição é o aumento do deficit de pressão de sucções dentro dos tecidos da planta e isto é ainda intensificado por condições de alta demanda evaporativa – forte radiação solar, alta temperatura, baixa umidade e movimento rápido de ar (altas velocidades de vento). Essas condições são típicas em ambientes tropicais e subtropicais (e assim em casa de vegetação e em região temperada) e necessitam apenas que a demanda evaporativa seja satisfeita para transformá-las de condições quase que letais em plantas para condições de máximo crescimento.

A restrição no suprimento de água diminui a entrada de dióxido de carbono, e, assim, uma planta com suprimento limitado de água é menor do que uma com suprimento não limitado de água. O desenvolvimento de órgãos é frequentemente mais lento em plantas sob estresse, mas há exceções como o amadurecimento de ervilhas que é provocado pela conversão de açúcar em amido nos cotilédones das sementes em desenvolvimento. O alívio ao estresse de umidade no momento da intumescência das sementes atrasa o amadurecimento e prolonga o período no qual as ervilhas são suficientemente doces para atender às exigências da indústria de produtos congelados.

O efeito mais óbvio que aparece na maioria das culturas com suprimento adequado de água é a produção de mais folhagem, em comparação com culturas em que ocasionalmente a transpiração é limitada. Essa folhagem extra pode ou não vir acompanhada por órgãos florais ou de armazenamento maiores ou em maior quantidade, e nisso diferentes espécies se comportam de modo desigual. O *Pelargonium zonal* produz, prioritariamente, folhas no lugar de flores, se supermolhado, mas couve-flor produz uma inflorescência maior; a ervilha produz mais grãos por vagem, se água extra for adicionada no momento da abertura das flores; mas ervilhas maiores, se a água é fornecida quando as vagens se intumescem. Existe ainda diferença de resposta entre cultivares. Alguns desses efeitos são o resultado da manutenção de determinado tratamento de água durante todo o desenvolvimento da cultura; outros ocorrem quando o estresse de água é aliviado temporariamente, durante um estádio de crescimento sensível à umidade. Em gramíneas, se a cultura for molhada antes desse estádio crítico, a produção requerida é constituída de folhas e não de sementes. Assim, o tratamento de irrigação deve ser dado a uma cultura em função de quais órgãos serão comercializados.

Esses fenômenos nos dão a oportunidade de fazer bom uso do suprimento controlado de água.

Relações solo-água-planta em algumas culturas de expressão econômica

Discutem-se aspectos de crescimento e desenvolvimento das espécies, tanto da parte aérea como do sistema radicular, períodos críticos de demanda de água e as necessidades hídricas.

Milho (*Zea mays* L.)

O milho (*Zea mays* L.) é originário da região andina da América Central e hoje é cultivado em todas as regiões temperadas e tropicais. É um dos cereais mais importantes tanto para o consumo humano como animal, sendo cultivado para grãos e forragem. A produção mundial atualmente é de 335 milhões de toneladas de grãos procedentes e, aproximadamente, 118 milhões de hectares.

Existem muitos tipos de milho adaptados a um amplo espectro de condições de clima e de cultivo. Ele é cultivado em épocas nas quais a temperatura média do ar é superior a 15 °C e livre de geadas. A adaptabilidade do material genético em diferentes climas muda muito, dependendo da seleção correta do material, de tal modo que a duração do ciclo fenológico da cultura coincida com a duração da temporada de crescimento e, ainda, da finalidade para a qual se produz a cultura.

Quando as temperaturas médias durante o ciclo são maiores que 20 °C, os genótipos precoces atingem a maturação entre 80 e 110 dias, e aqueles tardios entre 110 e 140 dias. Quando as temperaturas médias diárias são inferiores a 20 °C, estende-se o período para chegar ao amadurecimento em aproximadamente 10 a 20 dias para cada 0,5 °C de diminuição da temperatura, dependendo do genótipo. A 15 °C, a cultura de milho para grão leva de 200 a 300 dias para amadurecer. Com temperatura média diária de 10 °C a 15 °C, o milho é cultivado, principalmente, como forragem, por causa do problema de formação da semente e de amadurecimento do

grão sob condições frias. Para a germinação, a temperatura média mínima diária é de aproximadamente 10 °C, estando a ótima entre 18 °C e 20 °C. A cultura é muito sensível à geada, particularmente no estágio de plântula, porém tolera condições atmosféricas quentes e secas até enquanto se dispuser de água suficiente para a planta e as temperaturas forem inferiores a 45 °C. As necessidades de temperatura, expressas como soma das temperaturas médias diárias, para as cultivares de ciclo médio, são de 2.500 graus-dia a 3.000 graus-dia, enquanto as precoces necessitam em torno de 1.800 graus-dia, e as tardias de 3.700 graus-dia ou mais.

Com respeito ao fotoperíodo, o milho é considerado como planta neutra ou de dias curtos. Seu desenvolvimento é, porém, muito afetado pela quantidade de radiação solar, e as maiores produtividades são obtidas em condições de alta radiação. As cinco ou seis folhas situadas próximo ou acima da espiga são a fonte de assimilação para o enchimento de grão, e, portanto, a luz deverá penetrá-las. Os métodos de plantio e o espaçamento variam, sendo os fertilizantes e a água fatores decisivos na escolha da ótima população de plantas com relação à interceptação de luz e aos rendimentos máximos. A população varia de 20 mil plantas ha^{-1} a 30 mil plantas ha^{-1} para as cultivares tardias, até 50 mil plantas ha^{-1} a 80 mil plantas ha^{-1} para as cultivares precoces. O espaçamento entre fileiras varia entre 0,5 m e 0,90 m, e a profundidade de semeadura é de 5 cm a 7 cm, com uma ou mais sementes por cova. Quando se cultiva para forragem, a população de plantas é 50% maior.

O solo deve ser bem drenado e arejado, pois a cultura é sensível a condições de saturação de água, mesmo por alguns dias apenas. As necessidades de fertilizantes para o milho em grão são relativamente elevadas, chegando até cerca de 200 kg ha^{-1} de nitrogênio (N), 50 kg ha^{-1} a 80 kg ha^{-1} de fósforo (P) e 60 kg ha^{-1} a 100 kg ha^{-1} de potássio (K) para as cultivares altamente produtivas. Geralmente, a cultura pode ser produzida de forma contínua enquanto for mantida a fertilidade do solo.

A cultura do milho é moderadamente sensível à salinidade. As perdas de produtividade em razão da condutividade elétrica do solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Perdas de produtividade de milho em função da condutividade elétrica do solo.

Perda (%)	Condutividade elétrica do solo (mmhos cm^{-1} a 25 °C, ou dS m^{-1})
0	0 a 2,5
10	5,0
25	6,0
50	7,0
100	10 ou mais

O sistema radicular é fasciculado, e sua profundidade é determinada geneticamente. De maneira geral, pode-se dizer que cerca de 60% do sistema se encontra na camada superficial de 0 a 30 cm, e que a profundidade média máxima é de 1 m, podendo, às vezes, atingir 1,5 m. A Tabela 2 mostra um exemplo de distribuição radicular para uma cultura de milho não irrigada.

Tabela 2. Extração de água do perfil de solo por uma cultura de milho em função do estádio de desenvolvimento.

Período (dias)	% de ET_a			
	Profundidade (cm)			
	0–30	30–60	60–90	90–120
0–15	100	0	0	0
15–30	70	30	0	0
30–60	60	20	20	0
60–90	60	15	15	10
90–120	60	15	15	10

% de ET_a: porcentagem da evapotranspiração de cada camada de solo.

Verificou-se que, para a maioria das cultivares, o desenvolvimento radicular é proporcional à umidade. Esse aumento também se reflete em aumento de produtividade. Por isso, a cultura é tida como exigente em água. Apesar disso, ela é uma das culturas mais eficientes no uso da água, i.e., produz um grande acúmulo de matéria seca por unidade de água absorvida.

Para produções ótimas, cultivares de ciclo médio (90 a 110 dias) exigem de 500 mm a 800 mm de água por ciclo, dependendo das condições climáticas. O período de máxima exigência é na fase do embonecamento ou um pouco depois dele; por isso, deficits de água que ocorrem nesse período são os que provocam maiores reduções na produtividade. Deficit de água anterior ao embonecamento reduz a produtividade em 20% a 30%; no embonecamento, em 40% a 50%; e após o embonecamento, em 10% a 20%. A extensão do período de deficit também é importante.

O milho tem por coeficientes de cultura os seguintes valores: 0,3 a 0,5 de 0 a 30 dias; 0,7 a 0,85 de 30 a 75 dias; 1,05 a 1,20 de 75 a 120 dias; 0,8 a 0,9 de 120 a 140 dias; e 0,55 na colheita.

Ótimas produtividades de milho variam de 6 t ha^{-1} a 9 t ha^{-1}. Em condições de chuva natural, a produtividade oscila entre 2 t ha^{-1} e 4 t ha^{-1}, dependendo do híbrido e das condições solo-clima.

Necessidades hídricas

Em termos de produção total de matéria seca, o milho utiliza eficientemente a água e, entre os cereais, é potencialmente a cultura de maior rendimento em grãos. Para se obter produção máxima, um cultivo de grãos com período médio de amadurecimento necessita entre 500 mm e 800 mm de água, dependendo do clima. Devem-se acrescentar a essa quantidade as perdas durante o transporte e a aplicação. O coeficiente de cultivo (kc) que relaciona as necessidades hídricas máximas (ETm) com a evapotranspiração de referência (ET_0) para diferentes estágios de crescimento da cultura do milho em grão é o seguinte: no estágio inicial, 0,3–0,5 (15 a 30 dias); no estágio de desenvolvimento, 0,7–0,85 (30 a 45 dias); no estágio intermediário, 1,05–1,2 (30 a 45 dias); no estágio final, 0,8–0,9 (10 a 30 dias); e, na colheita, 0,55–06.

Suprimento de água e rendimento da cultura

A frequência, a lâmina de irrigação e a chuva têm um efeito pronunciado sobre o rendimento em grãos. O milho parece ser relativamente tolerante aos deficits hídricos durante os períodos vegetativo (1) e de maturação (4). A maior diminuição nos rendimentos em grão provocada pelos deficits hídricos ocorre durante o período de floração (2), incluindo inflorescência, estigma e polinização, por causa, principalmente, da redução do número de grãos por espiga. Esse efeito é menos pronunciado quando a planta sofre deficit hídrico no período vegetativo precedente (1). Deficits hídricos severos durante o período de floração (2), particularmente na época de formação da espiga e da polinização, podem resultar num rendimento baixo ou nulo de grãos, em razão do secamento dos estigmas. Durante o período de formação da colheita (3), os deficits hídricos podem traduzir-se em diminuição de rendimento por causa da redução do tamanho do grão; porém, durante o período de maturação (4) tem pouco efeito sobre o rendimento de grãos.

O efeito da limitação de água sobre o rendimento do milho em grãos é considerável, e é necessário o controle cuidadoso da frequência e da lâmina de irrigação para obter rendimentos ótimos em condições de escassez de água. Portanto, onde o suprimento de água for limitado, pode ser mais vantajoso atender, dentro do possível, a todas as necessidades hídricas (ETm) para se obter rendimento próximo do máximo sobre uma área limitada, em vez de se distribuir a água limitada sobre uma área maior.

O milho prospera em solos bem drenados, devendo-se evitar o encharcamento, particularmente durante os períodos de floração (2) e formação da colheita (3). O encharcamento durante a floração (2) pode reduzir o rendimento em grãos em até 50% ou mais.

Absorção de água

Quando as condições de evaporação correspondem a uma ETm de 5 mm dia^{-1} a 6 mm dia^{-1}, o esgotamento da água disponível no solo (Sa) até 55% tem um pequeno efeito sobre o rendimento (p = 0,55). Para se obter um desenvolvimento rápido e profundo das raízes, pode ser vantajoso o esgotamento um pouco maior de água durante os períodos iniciais de crescimento. Durante o período de maturação, pode-se permitir um esgotamento de 80% ou mais.

Embora nos solos profundos as raízes possam atingir a profundidade de 2 m, o sistema mais ramificado fica situado na camada superior de 0,8 m a 1,0 m, e cerca de 80% da absorção da água do solo ocorre dentro dessa camada. A profundidade e a taxa de crescimento das raízes, no entanto, são bastante influenciadas pelo regime pluviométrico e práticas de irrigação adotadas. Além da umidade do solo e níveis dos nutrientes, a estratificação estrutural e textural, os sais e o lençol freático influem fortemente no desenvolvimento das raízes.

Calendário de irrigação

Para se obter boa uniformidade e desenvolvimento rápido das raízes, a zona radicular deve, onde for possível, estar úmida no momento da semeadura ou logo depois. Levando-se em conta o nível da ETm, para atender plenamente às necessidades hídricas, o nível de esgotamento da água fica em torno de 40% no período de estabelecimento (0), entre 55% e 65% durante os períodos 1, 2 e 3, e até 80% durante o período de maturação (4).

Onde a precipitação for baixa e o suprimento de água for limitado, o calendário de irrigação deve ser proposto com o objetivo de evitar os deficits hídricos durante o período de floração (2), seguido pelo período de formação da colheita (3). Quando um deficit hídrico severo é inevitável durante o período de floração (2), pode-se economizar água, reduzindo-se o suprimento durante o período vegetativo (1), bem como durante o de formação da colheita (3), sem provocar perdas adicionais de rendimento.

Em condições de chuvas marginais e suprimento limitado de água de irrigação, o número de irrigações pode variar entre 2 e 5. Em seguida, apresenta-se um calendário para o tempo dessas aplicações de irrigação (Tabela 3). Para se obter boa uniformidade e desenvolvimento adequado das raízes, a zona radicular potencial deve estar úmida, seja mediante chuvas ou irrigação, antes ou logo depois da semeadura.

Produtividade

Em condições irrigadas e produção de grãos para fins de comercialização, é considerada boa produtividade 6 t ha^{-1} a 9 t ha^{-1} (com 10% a 13% de umidade). A eficiência de utilização de água para o rendimento obtido (Ey) em grãos varia entre 0,8 kg m^{-3} e 1,6 kg m^{-3}.

Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)

O sorgo (*Sorghum bicolor*) parece ter sido cultivado na Etiópia há cerca de 5 mil anos. A produção mundial na atualidade é de 52 milhões de toneladas de grãos procedentes de 44 milhões de hectares.

Tabela 3. Calendário de aplicação de irrigação durante o período de desenvolvimento da cultura do milho.

Número de irrigações	Estabelecimento (0)	Vegetativo (1)	Floração (2)	Formação da colheita (3)	Maturação (4)
2	----------		----------		
3	----------	---------	------ ------	------	
4	----------	----------	---------	----------	
5	----------	------	----------	---------- ------	---------

O sorgo possui um número de características que o classifica como cultura resistente à seca. É cultivado extensivamente em condições de sequeiro para a produção de grãos e de forragem. Em zonas secas com precipitações baixas e/ou irregulares, a cultura pode responder de forma favorável à irrigação suplementar. Entretanto, existem diferenças consideráveis entre as diversas cultivares quanto à resposta à irrigação, sendo que aquelas consideradas muito tolerantes à seca respondem ligeiramente, enquanto as outras produzem rendimentos altos com irrigação, porém baixos quando a água é limitada. A temperatura é fator importante na seleção da cultivar. As temperaturas ótimas para as cultivares altamente produtivas são superiores a 25 °C, mas algumas estão adaptadas a temperaturas mais baixas, produzindo rendimentos aceitáveis. Quando as temperaturas médias diárias durante o período de crescimento são superiores a 20 °C, as cultivares precoces de grãos levam de 90 a 110 dias, e as intermediárias de 110 a 140 dias para amadurecer. Quando as temperaturas médias diárias são inferiores a 20 °C, há um prolongamento no período de crescimento de cerca de 10 a 20 dias para cada 0,5 °C de queda na temperatura. Dependendo da cultivar, e a 15 °C, a cultura de sorgo para grãos levaria de 150 a 300 dias até a maturação. Com temperaturas médias diárias na faixa de 10 °C a 15 °C, o cultivo de sorgo somente poderá ser realizado para forragem, em razão dos problemas relativos ao estabelecimento da semente e do amadurecimento do grão em condições frias. Temperaturas baixas (<15 °C) e altas (>35 °C) durante a floração e a formação da colheita provocam um mau estabelecimento da semente, problemas de maturação e rendimentos reduzidos.

Para interceptação ótima da luz, o índice de densidade (razão entre plantas por hectare e espaçamento entre fileiras) é em torno de 3 mil, quando se dispõem de quantidades suficientes de água e fertilizantes (100 mil plantas ha^{-1} a 150 mil plantas ha^{-1}). Em zonas com escassez de água (precipitação + irrigação), quanto maior for a escassez, maior será a vantagem de espaçamento maior. O sorgo é uma planta de dias curtos, porém existem cultivares neutras em relação à duração do dia.

A cultura se adapta bem à maioria dos solos, porém melhor nos de textura leve a média. O solo deve ter, preferencialmente, aeração e drenagem boas. O sorgo é relativamente tolerante a períodos curtos de encharcamento. As necessidades de fertilizantes são de até 180 kg ha^{-1} de N, 20 kg ha^{-1} a 45 kg ha^{-1} de P e 35 kg ha^{-1} a 80 kg ha^{-1} de K.

Necessidades hídricas

Para se obter produção elevada, as necessidades hídricas (Etm) da cultura de sorgo de 110 a 130 dias estão entre 450 mm e 650 mm, dependendo do clima, devendo-se incluir, ainda, as perdas durante a condução e a aplicação da água. O coeficiente de cultivo (kc), que relaciona a evapotranspiração máxima (Etm) com a evapotranspiração de referência (Et_0), possui os seguintes valores: durante o estágio inicial, 0,4 (20 a 25 dias); no estágio de desenvolvimento, 0,7–0,75 (30 a 40 dias); no estágio intermediário, 1,0 a 1,15 (40 a 45 dias); no estágio final, 0,75–0,8 (30 dias); e, na colheita, 0,5–0,55 (Tabela 4).

O sorgo é relativamente mais resistente à seca do que muitas outras culturas, como o milho. Isso se deve a seu sistema radicular extenso, ao controle efetivo da evapotranspiração e aos estômatos com capacidade de recuperação rápida após os períodos de estresse hídrico, assim como à sua capacidade de suportar a estiagem. Entretanto, quando o período de crescimento é longo, as cultivares com perfilhamento são capazes de se recuperar, até certo ponto, dos deficits hídricos anteriores nos períodos iniciais de crescimento, mediante a formação de perfilhos adicionais portadores de panículas. Os deficits hídricos severos durante o período de floração (2) causam o fracasso da polinização ou o secamento da panícula. A diminuição

Tabela 4. Períodos de desenvolvimento da cultura do sorgo.

Período	Período de desenvolvimento	Dia
0	**Estabelecimento** (desde a semeadura até o início da formação da espiga)	15–20
1	**Vegetativo** (desde o início da formação da panícula até a saída desta)	20–30
2	**Floração** (desde o início até o estabelecimento da semente)	15–20
3	**Formação da colheita** (desde o estabelecimento da semente até o amadurecimento fisiológico)	35–40
4	**Maturação** (desde o amadurecimento fisiológico até a colheita)	10–15
	Ciclo total da cultura do sorgo	95–125

de rendimento resultante pode ser compensada parcialmente pelos perfilhos adicionais com panícula.

O sorgo mostra grande flexibilidade com relação às lâminas e à frequência de suprimento de água em razão das suas características de resistência à seca. Quando o suprimento de água é limitado, pode ser vantajoso distribuir água disponível numa área maior. Embora se reduza o rendimento por unidade de área, a eficiência de utilização de água para o rendimento obtido será maior, resultando numa produção global superior em relação ao volume de água fornecido. O momento de suprimento de água deve ser programado com o objetivo de reduzir os deficits hídricos ao mínimo durante os períodos de estabelecimento (0), floração (2) e início de formação da colheita (início de 3).

Absorção de água

O sistema radicular principal, pouco ramificado, cresce rapidamente em solos profundos de 1 m a 1,5 m. O sistema secundário se inicia várias semanas após a emergência e estende-se rapidamente até 2 m, dependendo da profundidade de solo úmido. A profundidade máxima é atingida geralmente no momento da emissão das panículas. Em solos profundos, o sistema radicular extenso permite flexibilidade adicional no calendário de irrigação. Dependendo da lâmina e da frequência de irrigação, 60% (menos frequente) a 90% (frequente) da absorção de água ocorre a partir do primeiro metro de profundidade do solo. Normalmente, quando o sorgo está plenamente desenvolvido, 100% da água é extraída da primeira camada de 1 m a 2 m (D = 1-2 m). Em condições em que a Etm é de 5 mm dia^{-1} a 6 mm dia^{-1}, pode ser esgotado em torno de 55% da água total disponível no solo, sem reduzir a absorção de água (p = 0,55). Durante a maturação (4), pode ser esgotado até 80% da água disponível.

Calendário de irrigação

Quando a chuva não é suficiente e o suprimento de água de irrigação é limitado, para se alcançar a produção ótima, a aplicação de irrigação deve ser baseada no propósito de evitar os deficits hídricos durante os períodos de utilização máxima de água desde a floração (2) até o início do período de formação da colheita (3). Quando o suprimento de água for limitado durante o período de floração, a economia de água pode ser feita sem provocar perdas significativas de rendimento, reduzindo-se o suprimento de água durante o período vegetativo (1), no período final de formação da colheita (final de 3) e no período de maturação (4).

O número de irrigações varia normalmente entre um e quatro, dependendo das condições climá-

ticas e da textura do solo. A eficiência máxima de utilização de água será obtida quando essas irrigações estiverem bem programadas em relação à sensibilidade da cultura aos deficits hídricos.

A irrigação é reduzida, na maioria das vezes, por métodos superficiais (faixas, bacias ou corrugação).

Produtividade

Em condições de irrigação, são considerados bons rendimentos entre 3,5 t ha e 5,0 t ha (12% a 15% de umidade).

A produtividade em grãos, quando irrigado por inundação, com pouca ou nenhuma chuva, tendo período total de crescimento de 90 dias, com Etm de 425 mm a 450 mm e lâmina de aplicação líquida em torno de 300 mm, fica em torno de 800 kg ha^{-1}, com o máximo de 1.300 kg ha^{-1}.

Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa anual cultivada para obtenção de vagens verdes e, principalmente, de sementes secas em forma de grão. Ele é uma excelente fonte de proteína, principalmente nas regiões do terceiro mundo. Originário das regiões semitropicais da América Central, encontra-se adaptado a várias condições climáticas. A maioria das cultivares destinadas para a produção de grãos tem um crescimento determinado. Muitas, porém, têm um crescimento indeterminado, principalmente aquelas cultivadas para a produção de vagens verdes.

Apesar de a leguminosa possuir a capacidade de fixar nitrogênio da atmosfera em seus nódulos no sistema radicular, o feijão é tido como um mau fixador. Raramente mais de 30% de seu nitrogênio provém da fixação biológica simbiótica com as bactérias *Rhizobium* spp.

O feijão desenvolve-se bem em áreas de precipitação pluvial média, não se adapta a condições muito úmidas. Chuva em excesso e temperaturas altas causam a queda de flores e aumentam a incidência de moléstias. O intervalo ótimo de temperaturas médias diárias está entre 15 °C e 20 °C. Abaixo de 10 °C, o crescimento é praticamente inibido, e, acima de 27 °C, seu crescimento começa a ser prejudicado.

O ciclo completo da cultura é de 60 a 90 dias no caso de colheita de vagens verdes, e 90 a 120 dias para produção de grãos. A cultura é sensível à salinidade, e a redução de produção é função da condutividade elétrica (CE) do solo: 0% para CE de 0 a 1 mmhos cm^{-1} a 25 °C; 10% para 1,5 mmhos cm^{-1}; 25% para 2,3 mmhos cm^{-1}; 50% para 3,6 mmhos cm^{-1}; e 100% para valores maiores que 6,5 mmhos cm^{-1}.

O sistema radicular do feijão, apesar de poder atingir a profundidade de 1,0 m, é bastante superficial (80% a 90% nos primeiros 25 cm). Por isso, a cultura responde a frequentes irrigações. De forma geral, pode-se dizer que a cultura é muito sensível à umidade do solo, e sua produtividade pode ser fortemente afetada mesmo com curtos períodos de falta de água. Não existe informação adequada sobre os efeitos de deficit de água no período pré-floral, mas é de consenso geral que deficit de água durante a floração e formação de vagens diminui a produtividade. Em um experimento no qual a cultura foi submetida a um deficit de água correspondente a um potencial matricial de -8 atm em períodos: (a) após floração, (b) pré-floração, (c) floração, as reduções de produtividade foram, respectivamente, 35%, 53% e 71%.

Os coeficientes de cultura K, médios, variam de 0,3 a 0,4 de 0 a 20 dias; 0,65 a 0,75 de 20 a 40 dias; 0,95 a 1,05 de 40 a 70 dias; 0,9 a 0,95 de 70 a 90 dias; e 0,85 a 0,9 nos restantes até a colheita.

A necessidade de água da cultura para ciclos de 60 a 120 dias é de 300 mm a 500 mm; a falta de água pode, porém, reduzir sensivelmente a produtividade da cultura. Boas produtividades de feijão estão entre 1.500 kg ha^{-1} a 2.000 kg ha^{-1} de sementes secas, mas podem chegar a 3.000 kg ha^{-1}.

Referências

RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (ed.). **A cultura do milho irrigado**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 317 p.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; BRADSTREET, E. D.; HEMMINGSEN, E. A. Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants. **Science**, v. 148, p. 339-346, 1965. DOI: 10.1126/science.148.3668.339.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. (ed.). **Técnicos, fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.