

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA - MARA
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA
CENTRO DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO TRÓPICO SEMI-ÁRIDO - CPATSA
COORDENADORIA DE TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA AGROPECUÁRIA - CTTA
SETOR DE TREINAMENTO - ST

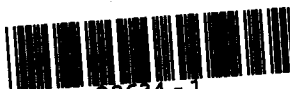
MOVIMENTO DE ÁGUA NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA

MANOEL TEIXEIRA NETO
Pesquisador CNPq/CPATSA-EMBRAPA

PETROLINA - PE

JULHO/1992

Movimento de água no sistema
1992 FL - 14233



28634-1



MOVIMENTO DE ÁGUA NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA

Entre todos os fatores climáticos que afetam o crescimento da planta, o déficit hídrico é que mais limita a produção das plantas. O crescimento da planta é imediatamente suspenso assim que a planta enfrenta uma situação de baixa disponibilidade de água. O bom desenvolvimento das plantas depende da existência de um sistema vascular capaz de mover a grande quantidade de água necessária para o processo da transpiração. Também, a presença de um sistema regulador da perda de água é de fundamental importância para manter absorção e transpiração em equilíbrio.

LEIS GERAIS DE TRANSPORTE

O movimento de água pode ser descrito através das leis que governam o movimento de calor, eletricidade, e até mesmo difusão. De uma maneira geral:

$$\text{Fluxo} = -K \times \text{Força motora}$$

onde K se refere as propriedades do sistema em estudo, e é portanto um fator de proporcionalidade. Este coeficiente possui um sinal negativo porque o movimento acontece sem o uso de energia.

A lei de Fourier e a lei de Ohms descrevem o movimento de calor e eletricidade respectivamente. Em ambos os casos o movimento de calor e eletricidade obedece a equação acima. O gradiente de temperatura (dT) é a força motora no transporte de calor, e K varia com o material do sistema em estudo. Por exemplo: a condutividade térmica dos metais é maior que a da madeira. No transporte de eletricidade, o gradiente no potencial elétrico ou voltagem (dT) é a força motora para o transporte de eletrons, o que é inversamente proporcional a resistência do sistema.

O movimento de água é governado pelas leis de Poiseulle e Darcy. De acordo com Darcy, o movimento de água em um ambiente poroso, como é o solo, é proporcional ao gradiente de pressão e a condutância ou inversamente proporcional a resistência do meio. A lei de Poiseulle aplica-se mais particularmente ao movimento de água em tubos capilares como no tecido do xilema. Aqui o movimento de água é proporcional a queda da pressão e a quarta potência do raio do microtubo, e inversamente proporcional a viscosidade do líquido.

TERMINOLOGIA

Os termos resistividade, condutividade, resistência, e condutância tem sido usado vagamente e indiscriminadamente em relação ao movimento de água no solo e na planta. Um exemplo é o termo L_p na equação que descreve o fluxo de volume de água:

$$J_v = L_p (\Delta \Psi_p + \delta \Delta \Psi_s)$$

tal termo é denominado condutividade hidráulica, mas na verdade ele é a condutância do sistema em estudo porque as dimensões do sistema não são especificadas.

Condutância e resistência são termos gerais e variam entre os diferentes materiais. Contudo, condutividade refere-se a condutância (eletricidade, ar, água, etc) através de um condutor com dimensões especificadas e sob uma certa força motora. Assim, também, resistividade refere-se a medição da resistência determinada para um sistema com suas dimensões especificadas.

Resistência e condutância aplica-se a capacidade dos estômatos em conduzir gases, porque nenhum termo de distância é usado, somente a velocidade.

O CONCEITO SOLO-PLANTA-ATMOSFERA

O movimento de água através do sistema solo-planta-atmosfera é melhor entendido quando tratamos o movimento de água separadamente para cada componente do sistema. por exemplo a taxa de absorção de água depende da taxa de transpiração e da velocidade com que a água move do solo para superfície das raízes. A taxa de transpiração depende da abertura estomática, dos fatores afetando a evaporação, e da taxa de absorção de água. Equação do transporte de água.

Em termos gerais o transporte de água pode ser descrito por uma simples equação:

$$\text{Fluxo} = \frac{\text{Força motora}}{\text{Resistência}}$$

mais especificamente:

$$\text{Fluxo} = \frac{\text{Diferença do Potencial Hídrico}}{\text{Resistência}}$$

Esta equação é similar a equação que descreve o fluxo de eletricidade (Lei de Ohm) onde:

$$\text{Corrente elétrica} = \frac{\text{voltagem}}{\text{resistência}}$$

Os fatores afetando o movimento de água pode ser descrito por seus efeitos no potencial hídrico ou resistência.

Quando em equilíbrio o movimento de água pode ser descrito pela seguinte expressão:

$$\text{Fluxo} = \frac{\text{WP solo} - \text{WP raiz}}{\text{R solo}} = \frac{\text{WP raiz} - \text{WP xilema}}{\text{R raiz}} = \frac{\text{WP xilema} - \text{WP folha}}{\text{R xilema} - \text{R folha}} = \frac{\text{WP folha} - \text{WP raiz}}{\text{R folha} - \text{R ar}}$$

R = Resistência

WP = Potencial hídrico

Esta expressão nos mostra como a água move do solo até o ar através da planta. Contudo, ela é uma maneira generalizada, o que resulta em uma simplificação da complexidade do fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera. Adicionalmente esta expressão assume: (1) Um equilíbrio no fluxo de água o que raramente acontece nas plantas. Isto limita o seu uso para situações onde se verifique o equilíbrio do sistema. (2) Resistências constantes para os diferentes estágios do sistema solo-planta-atmosfera, como raízes, solo e folhas. Sabemos que nas raízes a resistência as vezes varia com o fluxo de água. (3) O transporte de água acontece na forma líquida. Contudo, sabemos que o transporte de água das folhas para a atmosfera acontece na forma gasosa.

CONTROLE DO MOVIMENTO DE ÁGUA

Não existem dúvidas que o movimento de água na planta e desta para o ambiente é controlado principalmente para resistência cuticular e estomatal na interfase folha-ar. Por um outro lado sabemos que adubação inadequada, secamento e resfriamento do solo onde se encontram as raízes, drasticamente diminui a transpiração, porque estes processos diminui a absorção de água e produz um déficit hídrico nas folhas o que causa o ressecamento dos estômatos.

As plantas possuem certos mecanismos para combater o déficit hídrico. Entre estes mecanismos está o controle estomatal. Em um experimento, Slatyer (1967) diminuiu a temperatura das raízes para induzir déficit hídrico. Ele observou que quando expostas a

luz, plantas que estavam no escuro, a transpiração aumenta e entra em equilíbrio depois de 30 minutos. Decorridos 1:30 minutos a transpiração e absorção entram em equilíbrio. Se neste momento a temperatura das raízes é diminuída, observa-se uma diminuição na taxa de absorção mais a transpiração não sofre nenhuma mudança devido a uma diminuição no potencial hídrico das folhas o que aumenta o gradiente no potencial hídrico entre as raízes e as folhas. Essa diminuição no potencial hídrico das folhas podem não ser causadas pelo fechamento dos estômatos, mas se a temperatura das raízes é diminuída mais um pouco, absorção também diminui o que causa uma queda adicional no potencial hídrico nas folhas. Esta queda pode ser suficiente para causar o fechamento dos estômatos. Neste caso a transpiração é diminuída e entra em equilíbrio com a absorção em uma taxa mais baixa que a anterior.

Em nossa experiência, sabemos que o controle estomatal sobre o déficit hídrico, geralmente é suficiente (dependendo do estresse aplicado) para fazer com que as folhas recuperem seu potencial hídrico que pode reabrir os estômatos e provocar a recuperação do turgor das folhas.

Em resumo este experimentos sugerem que: (1) Fluxo de água através das plantas é controlado principalmente na fase de vapor entre as superfícies de evaporação e o ar. (2) Os estômatos é o principal controlador do movimento de água através das plantas. (3) O aumento da resistência ao fluxo de água no solo e raízes reduz indiretamente a transpiração devido a redução do turgor das folhas, o que causa o fechamento dos estômatos.

Assim, a transpiração é controlada diretamente pelo os estômatos, mas o turgor é reduzido pela diminuição da absorção da água.

OUTROS TERMOS NA EQUAÇÃO DE FLUXO DE ÁGUA

Condutância versus resistência.

Duas outras maneiras de expressar as limitações no movimento de água em um sistema de condução sobre uma força motora constante é a resistência (s/cm) ou a condutância (cm/s).

A resistência pode ser expressa:

$$\text{Resistência} = \frac{\text{Gradiente no WP}}{\text{Fluxo}}$$

$$\text{Condutância} = \frac{1}{\text{Resistência}}$$

A resistência imposta ao movimento de água pode ser estimada através de medições do potencial hídrico em vários pontos do sistema conduzindo água e do fluxo total de água no sistema. A maioria dos dados sobre o fluxo de água são expressos em termos das suas resistências. Contudo, pode-se discutir que a condutância seria uma melhor maneira do que a resistência por também expressar a difusão de CO_2 e vapor de água através dos estômatos.

Capacitância.

Armazenamento de água nas células do parenquima é análogo ao armazenamento de eletricidade em capacitores elétricos. Como eletricidade nos capacitores, a água que é armazenada nas células do parenquima é usada para substituir a água que é perdida pela transpiração. A quantidade de água armazenada chega a 80% nas plantas herbáceas e a 50% a 55% nos troncos das árvores.

As plantas herbáceas perdem cerca de 25 a 30% do seu teor de água nos dias ensolarados, mas esta água é repostada durante a noite. Uma quantidade de água considerável é retirada da seiva bruta das árvores quando estas estão transpirando o que causa uma diminuição gradual no teor de umidade dos troncos durante o verão.

O fluxo de água através das diferentes partes das plantas de grande porte, geralmente acontece com taxas diferentes. Por exemplo: quando a transpiração aumenta rapidamente depois do nascer do sol, a absorção acontece a uma taxa menor que a taxa de perda de água pela transpiração. Isto causa uma redução no teor de umidade das folhas e caule.

Nas árvores, as vezes, existem uma progressiva redução no diâmetro do tronco, durante as horas de estresse intenso. Durante as primeiras horas da manhã a velocidade da seiva é mais rápida nos galhos que nas partes mais baixas dos troncos. Isto ocorre porque a resistência à remoção de água das células turgidas no parenquima é geralmente menor do que a resistência ao fluxo de água através do sistema radicular. Enquanto o teor de umidade das folhas e ramos das partes mais altas da planta diminui, absorção de água pelas raízes vai repondo aquela que é perdida pela transpiração. Quando a transpiração diminui no final da tarde, as células do parenquima se recaregam, fazendo com que a absorção continue por algum tempo a uma taxa maior que a taxa transpiratória.

A capacitância é um fator que é envolvido no lento equilíbrio do potencial hídrico quando a transpiração está mudando.

OUTROS MODELOS PARA O SOLO - PLANTA - ATMOSFERA CONTINUUN (SPAC)

Vários modelos para se estudar os sistema solo-planta-atmosfera têm sido propostos. A equação de van den Honert fez importante contribuição nos estudos das relações água-planta. Os modelos usados enfatizam diversos aspectos da relação água-planta como os estômatos, as folhas, ou mesmo o nível da planta como um todo.

A equação van den Honert, expressa de uma outra maneira serve para analisar o impacto dos fatores do solo sobre o balanço de água das plantas.

$$W_{Folha} = W_{Solo} - \text{Fluxo} \times \text{resistência}$$

Fluxo é a taxa transpiratória, e a resistência deve ser a resistência ao movimento de água na forma líquida do solo à folhas. Esta equação enfatiza a dependência do potencial hídrico das folhas a transpiração, potencial hídrico do solo, e a resistência ao movimento de água no sistema.

Modelos usados para simular o movimento de água no SPAC servem para melhor entendermos a resposta das culturas aos tratos culturais, fatores ambientais, e até mesmo alguns detalhes como o número de estômatos e ângulo foliar. Muitos modelos são também usados para determinar quando uma cultura deve ser irrigada.

Os modelos não criam novas informações, mas eles colocam as informações existentes em uma maneira que podem ser melhor aproveitadas.

FORÇAS MOTORAS RESISTÊNCIAS

A força motora causando o movimento de água é a diferença no potencial químico da água. Contudo, esta pode ser expressa em termos do potencial osmótico (W_o), pressão (W_p), matricial (W_m), e gravitacional (W_g) como na equação seguinte.

$$W_w = W_o + W_p + W_m + W_g$$

Cada uma destas forças são predominante nos diversos estágios como, solo, raízes, caules e folhas.

MOVIMENTO DE ÁGUA NO SOLO

Força motora: De todas as forças citada acima somente o potencial de pressão não existe no solo. A força gravitacional (W_g) importante quando o solo está com umidade é superior à sua capacidade de campo. A gravidade faz com que o excesso de água no solo seja drenado através dos poros não capilares até que o peso ou tensão da coluna de água seja balanceada com o potencial matricial do solo. O potencial matricial do solo consiste

principalmente de força capilares nos pequenos poros capilares onde a tensão superficial da água e as partículas do solo atraem-se mutuamente.

Em solos onde o conteúdo de água varia entre a capacidade de campo e o ponto permanente de murcha, o movimento de água acontece através da fina camada de água nos poros capilares no sentido do gradiente matricial. Este gradiente é produzido pela a evaporação da água da superfície do solo e pela absorção de água pelas raízes.

A água no solo também se move ao longo do gradiente osmótico, o qual é induzido pela maior concentração de sais nas diferentes regiões do solo. Aqui o movimento de água acontece na própria solução do solo (água move para os locais onde a solução do solo é mais concentrada).

Resistencias:

Com o teor de umidade aproximando-se os pontos de murcha o movimento de água na forma líquida diminui rapidamente porque o número e tamanho dos canais pelos quais a água move-se diminui e o gradiente e o potencial hídrico também diminui entre o solo e as raízes. Assim a resistência aumenta ou a condutância diminui. Perto do ponto permanente de murcha o movimento de água no solo acontece na forma de vapor. Têm-se proposto que quando o solo está secando e as raízes murchando, um pequeno espaço pode aparecer entre o solo e as raízes. Este pequeno espaço tem sido considerado por alguns autores com o principal fator aumentando a resistência da absorção de água.

MOVIMENTO DE ÁGUA DO SOLO PARA AS RAÍZES

Dois tipos de força fazem com que a água mova do solo para raízes: movimento osmótico em plantas que estão transpirando muito pouco e movimento em massa nas plantas que transpiram rapidamente. Estas formas são causadas por uma tensão ou pressão negativa que se desenvolve na seiva do xilema.

As principais forças envolvidas na absorção de água pode ser descrito como:

$$\text{Absorção} = \frac{(W_m + W_o)_{\text{solo}} - (W_p + W_o)_{\text{raiz}}}{R_{\text{solo}} + R_{\text{raiz}}}$$

O termo W_m refere-se do potencial matricial, W_o ao potencial osmótico do solo, W_p ao potencial de pressão, todos expressos em MPa. R refere-se a resistência do solo e raiz como indicado. Resistência são expressa em s/cm.

MOVIMENTO DE ÁGUA ATRAVÉS DAS PLANTAS

A região que absorve água mais rapidamente fica a poucos centímetros atrás da extremidades das raízes. Depois de penetrar nas raízes, a água move-se em direção aos tecidos vasculares, e antes de entrar no xilema a água deve passar pela endoderme onde as paredes celulares possuem uma região suberizada, impermeáveis ao movimento da água. Devido a presença desta camada denominada "casparian strip" a absorção de água é feita simplásticamente. Uma vez que a água entra no xilema ela move-se longitudinalmente para a base do caule, onde ela atravessa a zona de transição entre a raiz e o caule. Do caule a água move-se para os galhos e para as folhas. Nas folhas ela move-se através das células do mesofilo para as superfícies de evaporação. Nas plantas que estão transpirando, a força responsável pelo movimento de água é a tensão ou pressão negativa criada na água, pela evaporação da mesma, das paredes celulares das células, principalmente das células nas folhas.

O movimento de água em plantas tem sido expresso pela teoria de coesão. Em plantas com porte baixo, a pressão radicular pode suficientemente fazer com que a água atinja as partes mais altas das plantas. Contudo, a pressão radicular só aparece na maioria das plantas quando há suficiente umidade no solo e a taxa de transpiração desta planta é muito baixa.

A teoria de coesão explica como a água pode chegar as partes mais altas das plantas com altura superior a 120 m. Três elementos básicos desta teoria são: força motora, hidratação das paredes celulares, e a força de coesão entre as moléculas de água. O gradiente no potencial hídrico faz com que a água mova do solo para a atmosfera através da planta. A hidratação das paredes celulares é causada por pontes de hidrogênio e é também chamada adesão, a qual é muito atrativa entre diferentes moléculas. A força de coesão causadas pelas pontes de hidrogênio entre as moléculas de água é chave da teoria. Esta força é tão grande que quando a água é puxada para cima, por osmose ou evaporação no topo das árvores, a tensão criada se traduz por toda a parte até ao solo.

Transpiração - Transpiration

Transpiração pode ser considerada como o processo dominante na relação hídrica das plantas. Evaporação de água produz o gradiente de energia que é a principal causa do movimento de água para as plantas e através das plantas. Nos dias quentes e ensolarados, a transpiração causa diariamente déficit hídrico transiente nas plantas. Quando o solo está com pouca disponibilidade de água, a absorção não pode repor a perda de água pela transpiração, resultando no desenvolvimento de déficit hídrico permanentes, ponto de murcha permanente, e conseqüentemente a planta morre. Geralmente, mais plantas tem seu desenvolvimento atrofiado ou são mortas devido o déficit hídrico produzido pela transpiração que qualquer outro motivo.

A importância quantitativa da transpiração está no fato que geralmente as plantas transpiram acima de 80%. A precipitação que ocorre durante o ciclo de uma cultura, a quantidade de água que se perde pela combinação da transpiração com a evaporação (evapotranspiração) pode exceder muitas vezes a precipitação.

A EQUAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO É A SEGUINTE:

$$T = \frac{C_{\text{folha}} - C_{\text{ar}}}{R_{\text{folha}} + R_{\text{ar}}} \quad \text{ou} \quad \frac{E_{\text{folha}} - E_{\text{ar}}}{R_{\text{folha}} + R_{\text{ar}}}$$

Esta equação descreve que a taxa de transpiração T em $\text{g/cm}^2/\text{s}^1$, é proporcional à ΔC , que é a diferença na concentração de vapor d'água, ou diferença na pressão de vapor, entre a folha e o ar, dividido pela soma das resistências da folha e da camada de ar em contato com a folha (Boundary Layer).

As diversas resistências do processo transpiratório são: Resistência Cuticular R_c , Resistência Estomatal R_s , resistência da Parede celular das células do mesofilo, resistência dos espaços intercelulares R_i , e resistência do poro estomatal.

A resistência cuticular é muito pequena e é deixada de fora nos cálculos taxa transpiratória ou é misturada com a resistência da folha como todo. Todas estas resistências são consideradas como a resistência da folha e resistência do ar. Devido a limitação técnica, apenas algumas delas são calculadas separadamente. A resistência total R_e é a soma da resistência do R_{ar} mais a resistência da folha R_f .

$$R_e = R_f + R_{ar}$$

LITERATURA CONSULTADA

- PAUL J. KRAMER, 1983. Water Relation of Plantas. Academic Press, Inc. New York.
- HANS MEIDER e DAVID W. Sheriff, 1977. Water and Plants. John Wily and sous. New York.
- JOHN A. MILBURG. 1979, Water Flow in Plants. Serie Integrated Themes in Biology Loneman. New York.