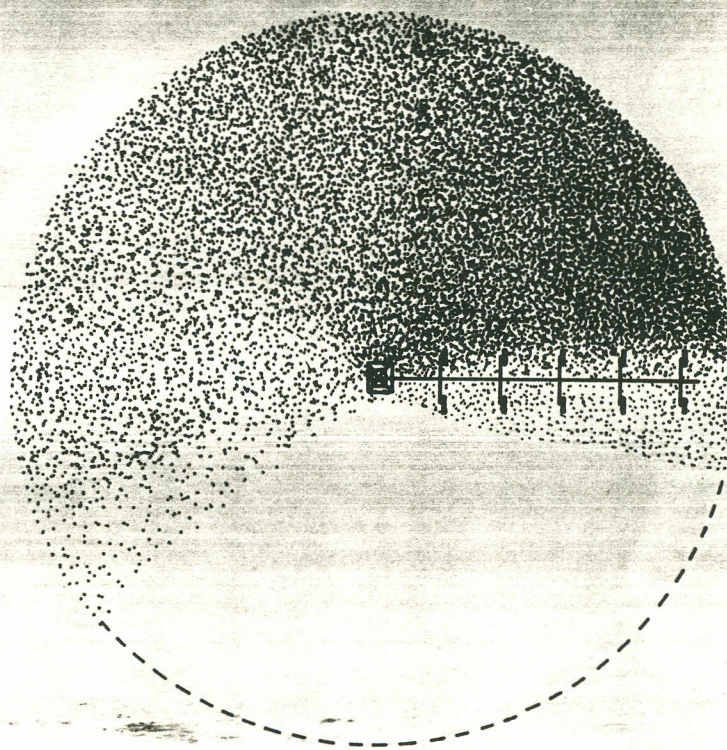


VII CURSO DE USO E MANEJO DE IRRIGAÇÃO



2432



EMBRAPA
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo
35 700 Sete Lagoas-MG

MARA
Ministério da Agricultura
e Reforma Agrária



**VII CURSO DE USO E
MANEJO DE IRRIGAÇÃO**

13 a 31 maio de 1991

CNPMS Sete Lagoas-MG

CURSO DE USO E MANEJO DA IRRIGAÇÃO

Transporte de água no sistema SOLO - PLANTA - ATMOSFERA

"TRANSPIRAÇÃO"

Paulo César Magalhães¹

1. Introdução
2. Caminhamento do vapor d'água
3. Resistência ao fluxo e assimilação de CO_2
4. Transpiração relativa
5. Medição da transpiração
6. Mecanismo estomático - Fisiologia dos estômatos
7. Fatores que afetam a taxa de transpiração
8. Importância da transpiração
9. Gutação
10. Referências

¹ Pesquisador do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo -
EMBRAPA - Cx. postal 151 - 35700, Sete Lagoas - Mg

1. INTRODUÇÃO

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 2 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 a difusão dos gases. Pode-se considerar a transpiração como o fluxo de água proveniente de um reservatório de capacidade limitada, o solo, a outro de capacidade ilimitada, a atmosfera, sendo a força impulsora o gradiente de potencial de água.

A água é o constituinte mais abundante dos tecidos da planta. 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 nenhuma função aparente. Uma das curiosidades da natureza é a terrível ineficiência da economia de água pelas plantas. Embora plantas necessitem de

água em quantidades relativamente grandes 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, usa-se nas reações metabólicas.

2. 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 dos mesmos na folha.

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 1 indica as resistências encontradas ao fluxo da água. Observa-se as resistências do solo, raiz, xilema, mesófilo, espaços intercelulares, estômatos, camada limite e resistência da cutícula. As resistências dos espaços intercelulares (r_i) e dos estômatos (r_s) ocorrem em série, (Fig. 2) 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.

Na folha tem-se:

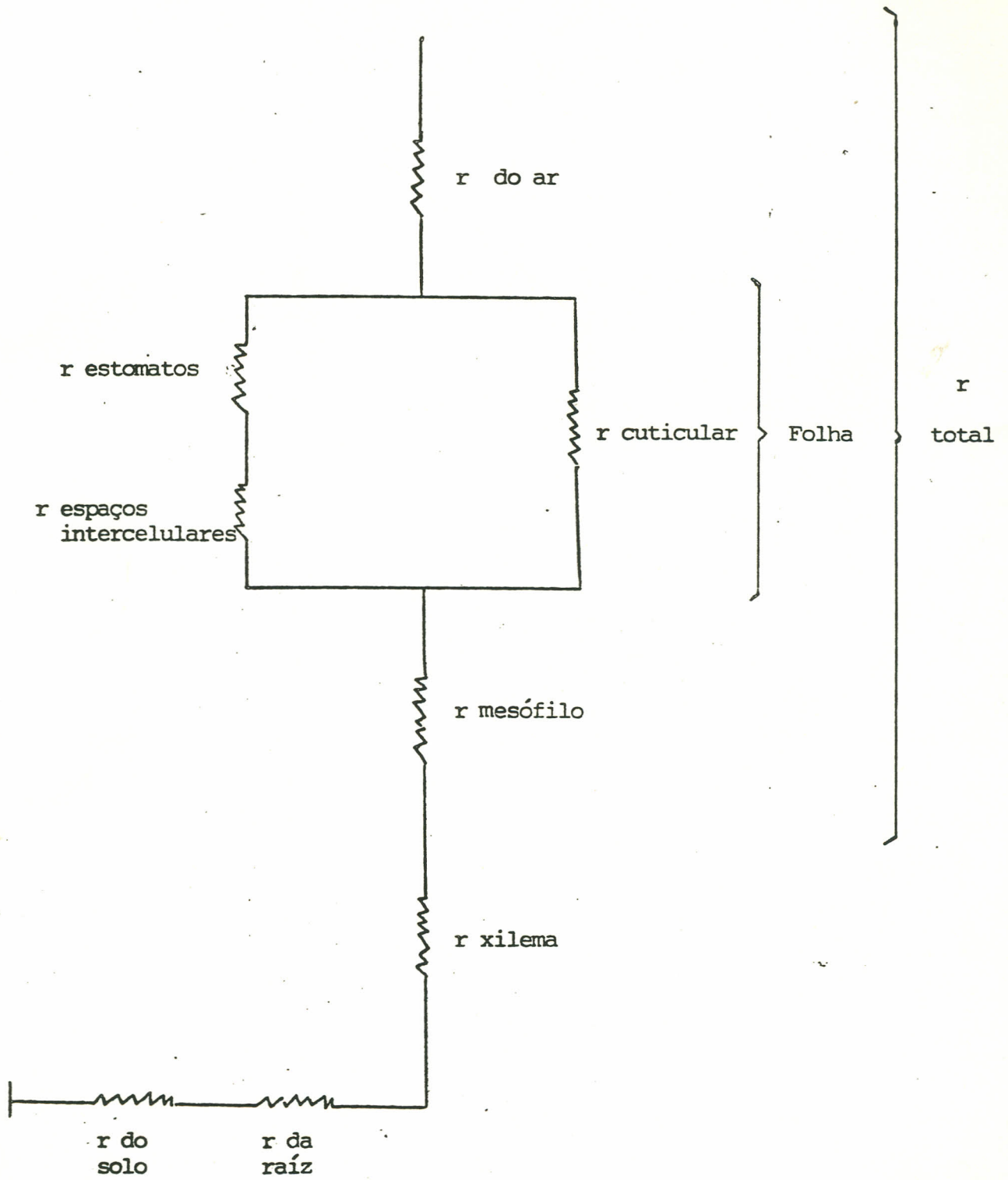


FIGURA 1. Resistências encontradas ao fluxo da água.

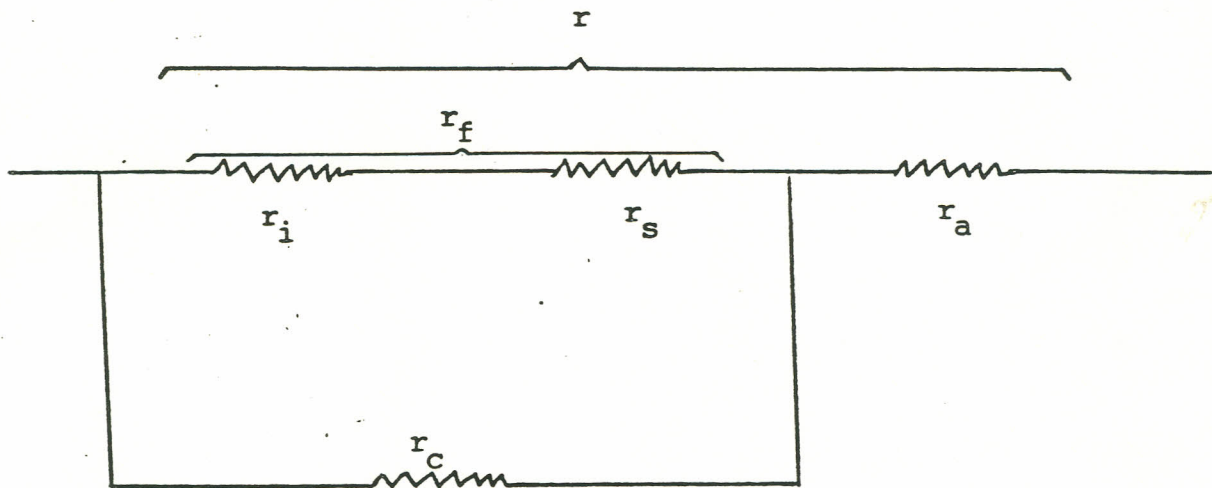


FIGURA 2. Resistência da folha ao fluxo de água.

$$\left. \begin{array}{l}
 r_i = r \text{ dos espaços intercelulares} \\
 r_s = r \text{ dos est6matos} \\
 r_a = r \text{ da camada limite} \\
 r_c = r \text{ da cut6cula}
 \end{array} \right\} r_f = r \text{ da folha}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 r_f \\
 r_a \\
 r_c
 \end{array} \right\} r = r \text{ total}$$

As resist6ncias r_i e r_s correspondem a resist6ncia da folha que est6 ligada em s6rie a da camada limite (r_a). No circuito el6trico, para dois resistores em paralelo, $r = r_1 \cdot r_2 / (r_1 + r_2)$. Desde que na folha ($r_i + r_s$) e r_a est6o em paralelo, 6 conveniente expressar suas resist6ncias combinadas como resist6ncia total da folha para o vapor d'6gua (r_f). Assim $r_f = (r_i + r_s) \cdot r_a / (r_i + r_s + r_a)$. Esta 6 portanto a r_f da folha que somada a $r_c = r$ total. Com os est6matos abertos, r_c 6 muito maior que a resist6ncia em paralelo com ela ($r_i + r_s$). Neste caso a resist6ncia da folha 6 dada por $r_i + r_s$.

Deve-se ressaltar que existem duas superf6cies na folha, a superior (s) e a inferior (i). As resist6ncias r_{fs} e r_{fi} est6o em s6rie com as da camada limite r_{as} e r_{ai} . O arranjo paralelo deste caminhamento atrav6s das superf6cies superior e inferior da folha leva a express6o da resist6ncia total 6 difus6o do vapor d'6gua da folha:

$$r = (r_{fs} + r_{as}) (r_{fi} + r_{ai}) / (r_{fs} + r_{as} + r_{fi} + r_{ai})$$

3. RESIST6NCIA AO FLUXO E ASSIMILAO DE CO₂

O caminhamento do CO₂ 6 um pouco mais complicado que o do vapor d'6gua, pois o CO₂ vindo do ar atmosf6rico, deve

ultrapassar a camada-limite adjacente à folha, os estômatos, os espaços intercelulares até as células do mesófilo e, eventualmente adentrar os cloroplastos. 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.

Alguém poderia questionar: Por que é necessário se perder tanta água por transpiração para se chegar ao final do ciclo de uma cultura como o milho por exemplo? Provavelmente porque uma parte essencial daquelas sementes de milho e 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 este 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 difundirá para a atmosfera.

4. 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 a condutibilidade. Se esta 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, a condutibilidade hidráulica do solo, o volume e densidade das raízes, a resistência interna da planta, o potencial crítico de

fechamento dos estômatos e a transpiração potencial.

5. MEDIÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO

Vários métodos tem 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 aqueles métodos existentes destacam-se:

- a) Métodos gravimétricos (pesagens)
- b) Potômetro
- c) Medições gasométricas rápidas
- d) Coleta e pesagem do vapor d'água
- e) Medição por absorção de radiação infra-vermelha
- f) Método do cloreto de cobalto
- g) Medição por psicrometria
- h) Higrômetros de resistência

a) Métodos gravimétricos

O método das pesagens é, sem dúvida, o mais simples. Consiste em se pesarem vasos ou apenas partes de plantas no início e no fim de um determinado intervalo de tempo. Como se quer apenas a transpiração, o vaso deverá ter a superfície do solo coberta com algum material impermeável. Os ganhos ou perdas de peso atribuídos a fotossíntese, respiração e ao crescimento são desprezíveis. É um método restrito a plantas passíveis de se cultivarem em vasos.

b) Potômetro

A vantagem aqui é que a taxa de água absorvida é muito parecida com a taxa de transpiração. O aparelho é bem simples,

baixo custo, fácil de ser fabricado e é preciso. Consta de um frasco de vidro com água no qual a planta é fixada através de uma borracha. O mesmo é conectado a uma pipeta graduada. A desvantagem está no fato de que o aparelho mede absorção de água ao invés de transpiração; o que pode variar em certas circunstâncias.

c) **Medições gasométricas rápidas**

Neste tipo inclui-se as medidas feitas pelos porômetros.

d) **Colata e pesagem do vapor d'água**

Transpiração pode ser medida incluindo a planta num container de vidro, de forma que o vapor d'água possa ser capturado e medido.

e) **Medição por absorção de radiação infravermelha.**

É um método preciso e de grande resolução; no entanto necessita calibrações frequentes, além de ser caro.

f) **Método do Cloreto de Cobalto**

Este é um método que é indicado pela troca de cor ao invés de peso. Discos de papel de filtro são impregnados em solução de cloreto de cobalto 3%. A troca de cor de azul para rosa é indicativo da taxa de transpiração.

g) **Psicrometria**

Leituras baseadas no uso de 2 termopares.

h) Higrômetros de resistência

O mais conhecido atualmente é o higrômetro de cloreto de lítio que se baseia no princípio de que a pressão do vapor d'água do ar é relacionada à resistência elétrica de uma película de cloreto de lítio.

6. MECANISMO ESTOMÁTICO - FISILOGIA DOS ESTÔMATOS

Se o suprimento de água às plantas for adequado e as temperaturas não forem extremas, a luz induz à abertura e o escuro ao fechamento dos estômatos. Os movimentos dos estômatos são, portanto, fotoativos nas plantas superiores de modo geral. Diversas hipóteses surgiram na tentativa de explicar como os estômatos respondiam à presença ou ausência de luz. As células-guarda alteram-se em volume pela mudança na turgescência, abrindo ou fechando os estômatos. Surge então a pergunta: Qual seria o mecanismo indutor do transporte de água para dentro ou para fora das células-guarda? As teorias existentes podem ser agrupadas em:

- a) Controle dos potenciais de água e osmótico
- b) Hipótese do amido-açúcar
- c) Acúmulo de íons

a) Controle dos potenciais de água e osmótico

A primeira suspeita para a causa da abertura estomática seria alguma relação osmótica que resultasse na dilatação das células guarda dos estômatos. Suponhamos que o potencial osmótico da célula guarda se tornasse mais negativo em relação às células ao redor; água seria esperada de mover por osmosis em direção a este potencial mais negativo, causando portanto um

aumento na pressão, acontecendo conseqüentemente a dilatação das células guarda. Outra possibilidade seria para a parede celular das células guarda se tornarem menos rígida (mais elástica) de forma que a mesma possa esticar mais facilmente, diminuindo o potencial de pressão e permitindo a absorção de água e por conseguinte a dilatação. Numerosas medidas indicam que o potencial osmótico das células guarda se torna com certeza mais negativo quando os estômatos estão abertos, porém não se tem verificado mudanças na elasticidade ou pressão.

b) Hipótese amido-açúcar

Sugere que a fotossíntese nas células guarda aumenta o pH delas, as quais resultam na quebra do amido em açúcares e assim baixando o potencial osmótico. Os estômatos quando abertos atingem $\text{pH} = 7$ e quando fechados 4 a 5. Embora haja evidências que sustentam a hipótese amido-açúcar, o teor de amido e a abertura estomática nem sempre são correlacionados

c) Acúmulo de íons

Cientistas japoneses foram os primeiros a observar que quando os estômatos abrem, quantidades relativamente grandes de K^+ íons movem das células vizinhas para dentro das células guarda. As quantidades de K^+ acumulando nos vacúolos das células guarda durante a abertura estomática são suficientes para justificar a abertura. Aumentos de cerca de $0,5 \text{ m}$ na concentração de K^+ são suficientes para diminuir o potencial osmótico cerca de 20 bars. Luz causa um armazenamento de K^+ nas células guarda. Quando as folhas são transferidas para o escuro, K^+ move para fora das células guarda indo alojado nas células vizinhas, e os estômatos fecham. Todas as evidências

concordam que o transporte de K^+ das células vizinhas para as células guarda é a causa do potencial osmótico mais negativo e portanto da abertura estomática, o inverso causa o fechamento dos estômatos. A situação porém não é tão simples assim, tendo aprendido acerca da absorção do K^+ , pergunta-se: Qual é o mecanismo de movimento do K^+ ? Não se pode considerar a abertura estomática tão simples quanto um transporte ativo, controlado metabolicamente (energia fornecida pela luz). Caso isto fosse verdade não seria possível explicar a abertura de estômatos no escuro e em ambientes livres de CO_2 , os quais são também acompanhados da entrada de K^+ . Foi observado em folhas de Vicia faba (leguminosa) que a medida que K^+ ions entraram nas células guarda, um número equivalente de H^+ ions saíam. Devido a isto é que o pH aumenta nas células guarda.

7. FATORES QUE AFETAM A TAXA DE TRANSPIRAÇÃO

Existem fatores ambientais e da planta influenciando a taxa de transpiração.

Fatores da planta

- a) Relação raiz/parcie aérea: Numa situação onde todas as condições para boa transpiração estão presentes, a eficiência da superfície absorvedora (raiz) e a superfície evaporadora (folha) controla a taxa de transpiração.
- b) Área foliar: Parece lógico afirmar que quanto maior a área foliar, maior será a magnitude da perda de água.

c) Estrutura foliar: Cutícula espessa, paredes celulares também espessa, parênquima paliçádico bem desenvolvido, estômatos, aprofundados, todos esses fatores afetam a taxa de transpiração.

Entre os fatores ambientais destacam-se:

- a) Temperatura e Umidade relativa: O efeito indireto da temperatura interferindo na concentração de vapor d'água do ar pode afetar substancialmente a transpiração, ocasionando inclusive o fechamento dos estômatos por déficit hídrico. Baixos teores de umidade do ar podem causar fechamento dos estômatos independentemente do teor de água nas folhas.
- b) Luz: É um fator primário neste mecanismo, sendo que os estômatos normalmente se abrem na presença de luz e se fecham em sua ausência. (Desde que a planta esteja com bom suprimento de água).
- c) CO_2 : O teor de CO_2 dentro das células guarda exerce um efeito pronunciado sobre os estômatos. Baixas concentrações promovem sua abertura e altas concentrações causam rápido fechamento, mesmo em presença de luz.

d) Água: O potencial de água nas folhas é sem dúvida o fator principal no controle dos estômatos. Déficit de água provoca seu fechamento e o aumento do potencial tende a abrir os estômatos. O efeito da água é o mais determinante, uma vez que condições de déficit provocam o fechamento dos estômatos independentemente das condições de luz, CO₂ ou temperatura.

2

8. IMPORTÂNCIA DA TRANSPIRAÇÃO

O processo da transpiração provoca um gradiente que controla toda a movimentação de água dentro da planta. Sendo assim ela atua como agente refrescante não permitindo que as folhas das plantas sofram um super-aquecimento.

Efeito no crescimento e desenvolvimento

A conclusão de que a transpiração é fundamental no crescimento e desenvolvimento foi alcançada após alguns pesquisadores exporem plantas a ambientes com alta umidade relativa. O resultado foi que estas plantas tiveram seu crescimento reduzido pela metade.

Efeito na absorção de sais minerais

Devido a presença de sais minerais e água juntos no solo, e por causa de ambos serem absorvidos pelas raízes, pensava-se que a absorção de sais e seu transporte aconteciam em consequência da transpiração. No entanto numerosos estudos mostraram claramente que a absorção de sais é predominantemente um processo ativo (requer energia metabólica) e que somente uma pequena quantidade de sal é absorvida passivamente como resultado da absorção da água. Uma vez absorvido os sais eles caem no

xilema das raízes e aí sim a transpiração influencia decisivamente na translocação e distribuição na planta.

Absorção de CO_2 : É através da transpiração que a planta pode absorver CO_2 da atmosfera.

9. GUTAÇÃO

Plantas crescendo num solo úmido, quente, em condições de alta umidade relativa exibirá gotículas de água na margem das folhas. A este fenômeno de perda de água denomina-se "gutação". Pode-se deduzir por meio destas condições descritas que a absorção de água é favorecida ao passo que a transpiração não. Isto é, nestas condições a absorção de água excede tremendamente a transpiração. A água é empurrada para cima através do xilema e expulsa através de estruturas especializadas chamadas "hidatódios".

10. REFERÊNCIAS

1. SALISBURY, F.B. & ROSS, C.W. The photosynthesis - transpiration compromise. In: CAREY, J.C. ed. **Plant Physiology**; second edition. Wadsworth Publishing Company, Inc. Belmont, California 1982. p. 32-46.
2. TING, I.T. Gas exchange and stomatal physiology. In: FUNSTON J. ed. **Plant Physiology**. Addison - Wesley Publishing Company - Univ. of California, Riverside. 1982. p. 101-124.

3. DELVIN, R.M. Water relations - IN: Plant Physiology, third edition. D. Van Nostrand Company, New York, 1975 p. 43-86.
4. FERRI, M.G. & REICHART K. Água IN: Fisiologia Vegetal 1. Mario Guimarães Ferri - E.P.V., EDUSP São Paulo 1979. p. 3-25.
5. KLAR, A.E. Transpiração - IN: A água no sistema Solo-Planta-Atmosfera. Nobel - São Paulo 1984 - p. 347-385.