

ABSORÇÃO DE ÁGUA PELAS PLANTAS: ÁGUA DISPONÍVEL VERSUS EXTRAÍVEL E A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS

WATER ABSORPTION BY PLANTS: AVAILABLE VERSUS EXTRACTABLE SOIL WATER AND CROP PRODUCTION

Reimar Carlesso¹

- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -

RESUMO

Um aspecto importante, no entendimento da relação entre a absorção de água e a produção das culturas, é como ocorre o balanço no suprimento de água do solo para satisfazer a demanda evaporativa da atmosfera. O suprimento de água é determinado pela habilidade da cultura em utilizar a água armazenada no solo e, a demanda, por outro lado, é determinada pela combinação dos fatores meteorológicos interagindo com o "dossel" vegetativo da cultura. Apesar da abundante literatura disponível, diferentes critérios tem sido utilizados na determinação do momento de ocorrência e da duração de um deficit hídrico. Muita ênfase tem sido dada para a quantificação do consumo de água pelas plantas nos diferentes subperíodos de desenvolvimento e reduzida importância tem sido conferida a quantificação da quantidade de água disponível (extraível) e seus efeitos no crescimento e desenvolvimento das plantas. Na discussão sobre a extração de água pelas plantas deve-se considerar, primeiramente, o problema da precisão na definição dos limites de disponibilidade de água. Esta publicação apresenta uma análise crítica das limitações normalmente encontradas na utilização dos limites de disponibilidade de água. A relação entre a água disponível e a água extraível do solo é analisada a partir de resultados sobre a taxa de transpiração e a fração de água extraível, a profundidade efetiva de extração do sistema radicular e, a extração de água por unidade de profundidade.

Palavras-chave: água disponível, água extraível, raízes.

SUMMARY

An important issue to understanding the effect of water shortage on crop yield is how crops balance the supply of water from the soil to match the demand for water from the atmosphere. Supply is determined by the crop ability to utilise the stored soil water and, demand, on the other hand, is determined by a combination of meteorological factors interacting with the crop canopy. Different criteria have been used to determine the timing and duration of water deficits despite the abundant literature available. Much attention has been given to the quantification of crop water consumption in different stages of development. However, considerations about the total amount of plant water available (extractable) in the soil profile to affect plant growth and development have received little attention. A discussion of water extraction must first consider the problem of accurately defining the limits to soil water availability. This review presents a critical analysis of the limitations usually encountered in using the limits concept of soil water availability. The relationship between water available and extractable is analysed based on results of transpiration rates and fraction of available water, depth of water extraction and, extraction per unit soil depth.

Key words: available water, water extraction, root growth.

¹Engenheiro Agrônomo, PhD, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Rural, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, 97119-900 - Santa Maria, RS.

INTRODUÇÃO

A água extraída do solo pelas plantas é evaporada pelas folhas em proporção à demanda evaporativa da atmosfera. A resposta à demanda evaporativa da atmosfera não é controlada unicamente pelas condições meteorológicas mas também pela cultura. Além disso, a parte aérea das plantas afeta a absorção líquida de radiação, a temperatura e a as propriedades aerodinâmicas do "dossel" (ROBERTSON, 1991). Estudos entre diferentes espécies de culturas tem demonstrado que o fator mais importante na determinação do total de água extraída do solo é a profundidade de extração do que a extração que ocorre em cada profundidade e que a quantidade de água extraída é correlacionada com a produtividade das culturas em condições onde o suprimento de água é limitado (SQUIRE et al., 1987).

A água extraível está relacionada com a produtividade das culturas das seguintes maneiras. Na primeira, a taxa de extração em relação à demanda evaporativa determina se a cultura está ou não submetida a um deficit hídrico. Na segunda, a extensão da extração de água pela cultura determina a produtividade possível em uma situação de água limitante às plantas. A quantidade de água extraível de um solo pode ser obtida pelo produto da profundidade efetiva de extração pela quantidade removida por unidade de profundidade. Na terceira, a variação temporal da extração de água controla o tempo de duração de produção de biomassa em situações de deficit hídrico. Isto tem implicações na redistribuição da biomassa para órgãos economicamente importantes da planta.

Água disponível versus água extraível do solo

Na discussão sobre a extração de água pelas plantas deve-se considerar, primeiramente, o problema da precisão na definição dos limites de disponibilidade de água. Diferentes critérios tem sido utilizados na determinação do momento de ocorrência e da duração do deficit hídrico. Apesar da abundante literatura disponível sobre os efeitos do deficit hídrico no crescimento e desenvolvimento das plantas, poucos estudos tem investigado a sensibilidade dos indicadores do deficit hídrico no solo. Muita atenção tem sido dada aos problemas associados com a avaliação dos limites de disponibilidade de água no solo às culturas e a dinâmica do crescimento radicular. Entretanto, considerações sobre a disponibilidade total de água no solo às plantas e o seu impacto no crescimento e desenvolvimento das plantas tem recebido pequena atenção.

A maneira tradicional de avaliar os limites da água disponível tem sido feita através da medida do "ponto de murcha permanente" e da "capacidade de campo" de amostras de solo retiradas do campo. O conteúdo de água é avaliado nos potenciais de $-0,03$ ou $-0,01$ MPa para a capaci-

dade de campo e $-1,5$ MPa para o ponto de murcha permanente. Vários estudos criticam estas definições, entre eles RITCHIE (1981), RATCLIFF et al. (1983) e REID et al. (1984).

Os principais argumentos são de que as plantas podem retirar água do solo submetida a potenciais menores que $-1,5$ MPa, embora esta extração de água muito frequentemente signifique um erro na determinação do conteúdo de água (GARDNER & EHLING, 1963). Determinações laboratoriais do ponto de murcha e da capacidade de campo freqüentemente não conferem com valores obtidos a campo. Como exemplo, RATCLIFF et al. (1983) encontraram que o potencial de $-0,03$ MPa para a determinação da capacidade de campo, subestima a determinação a campo do limite superior de disponibilidade em solos arenosos e superestima para solos de textura siltosa ou argilosa. O potencial de $-1,5$ MPa subestima o ponto de murchamento comparado ao limite inferior para solos de textura arenosa e siltosa e superestima em solos francos e argilosos. Um outro problema com o conceito de água disponível é que a determinação esta baseada somente na profundidade do sistema radicular e freqüentemente, em alguns solos, ocorre um expressivo movimento ascendente da água para a profundidade ocupada pelas raízes (MASON et al., 1983). Além disso, quando a densidade radicular for baixa, especialmente nas camadas mais profundas, nem toda a água disponível é extraída pela cultura durante o ciclo de desenvolvimento.

Para substituir o inadequado conceito de água disponível, RITCHIE (1981) propôs o emprego do conceito de água extraível. A água extraível é definida para um combinação particular solo-cultura pela diferença entre o conteúdo de água no perfil do solo após a ocorrência da drenagem, a partir de um umedecimento completo (denominado de limite superior) e o conteúdo de água do perfil depois que plantas, desenvolvidas normalmente, tenham extraído toda a água possível do perfil (denominado de limite inferior). No entanto, existe um elevado número de problemas na determinação na água extraível. Primeiro, na determinação do limite inferior é importante que a cultura tenha um desenvolvimento "normal" do sistema radicular e que nenhum tipo de estresse cause redução no crescimento das raízes. Isto pode ocasionar um aumento no valor do conteúdo de água correspondente ao limite inferior. Segundo, a água extraível não é somente determinada pela absorção de água pelas raízes, a evaporação da água do solo diminui o conteúdo de água nas camadas superficiais do solo. De acordo com REID et al. (1984) a evaporação da água no solo pode diminuir o conteúdo de água superficial para valores inferiores a ponto de murcha permanente. Terceiro, a água extraível depende do comportamento da cultura em relação ao stress. Se a densidade radicular em uma parte do perfil suprir a necessidade de água da cultura (quando baixa) a taxa de extração é somente uma pequena parcela da demanda e, o dossel pode compensar a baixa extração

através da redução da área foliar ou da condutividade estomatal. De acordo com SQUIRE et al. (1987) isto pode efetivamente diminuir a extração de água do solo mesmo quando o potencial de água for superior a $-1,5\text{MPa}$.

A água disponível às plantas (total) e a fração da água disponível (razão entre a quantidade atual e a quantidade potencial de água no solo) são os indicadores do déficit hídrico mais utilizados (RITCHIE et al., 1972; ROSENTHAL et al., 1987). Esses indicadores do déficit hídrico possuem vantagens sobre outros fatores do déficit de água porque eles são primariamente dependentes da taxa de uso da água e das propriedades físicas do solo (RITCHIE et al., 1972). Resumindo, a água extraível (disponível) do perfil de um solo é a quantidade de água compreendida entre o limite superior e o limite inferior de disponibilidade de água. Esses limites devem ser determinados em condições de campo, em condições normais de crescimento da cultura e, principalmente, considerando-se a profundidade efetiva do sistema radicular das plantas.

Taxa de transpiração e a fração de água extraível

Para a maioria das culturas, durante um período de déficit hídrico a condutividade estomatal é ajustada para manter em equilíbrio, nas folhas, o balanço de água na planta. Muitos agrônomos e cientistas do solo tem largamente aceito a idéia que a taxa de extração de água não é limitante até um valor crítico da fração de água disponível - FAD (ou extraível) no interior da zona de crescimento radicular, e que, além deste limite crítico a resistência do sistema solo-planta ocasiona uma diminuição na taxa de transpiração e na condutância estomatal (RITCHIE & JORDAN, 1972; TURNER, 1986). Esta resposta de acordo com GARDNER & EHLIG (1963) teoricamente pode ser derivada pelas conhecidas relações entre a taxa de transpiração e o potencial de água na folha, e do potencial de água na folha e o potencial de água no solo.

Inúmeros estudos, compreendendo várias espécies e tipos de solo tem demonstrado que a transpiração está em equilíbrio com a demanda evaporativa quando o FAD for reduzido para 0,3 a 0,4 (WRIGHT et al., 1983; ROSENTHAL et al., 1987) com a cultura do sorgo, (RITCHIE et al., 1973; TURNER et al., 1985; SINCLAIR & LUDLOW, 1986) com outras espécies. Valores de aproximadamente 0,50 têm sido apresentados (ROSENTHAL et al., 1987; CARLESSO, 1993) como causadores de uma significativa redução nas taxas de alongação das folhas e valores menores que 0,30 são normalmente apresentados como o limite onde a alongação das folhas é mínima e a senescência das folhas é acelerada (CARLESSO, 1993; GRANT et al., 1989).

O valor da FAD crítica varia entre estudos, entretanto, nenhum estudo tem explicado, a ordem de sensibilidade de processos fisiológicos e morfológicos e porque a valor crítico de FAD se mantém conservadoramente em uma grande variedade de condições.

Numerosos estudos, entretanto, tem demonstrado que o valor crítico da FAD em que a transpiração diminui é diferente do valor comumente utilizado de 0,3 a 0,4. Primeiro, o estudo de DENMEAD & SHAW (1962) apresentaram resultados alternativos demonstrando que a FAD crítica era maior (a transpiração foi reduzida mais cedo) quando a demanda evaporativa era mais elevada. Entretanto, RITCHIE (1973) interpreta diferentemente esses resultados afirmando que as plantas do experimento de DENMEAD & SHAW (1962) cresceram em vasos, os quais não permitiram expansão do sistema radicular nas camadas mais profundas e úmidas do perfil. Prevenindo, assim, um possível movimento ascendente da água para a zona de desenvolvimento radicular. No entanto, a explicação de Ritchie provavelmente é válida para solos com maior disponibilidade de água, onde a expansão das raízes em direção as zonas mais úmidas seria suficiente para absorver água suficiente para manter a taxa de transpiração relativa próxima de 1,0, quando as plantas são submetidas a uma elevada demanda.

É importante salientar que a maioria dos experimentos citados anteriormente nos quais a valor crítico da FAD é 0,3-0,4, foram predominantemente conduzidos em solos com alta disponibilidade de água, onde a explicação dada por Ritchie é correta. GARDNER (1960) demonstrou teoricamente que em solos com elevada disponibilidade de água, o valor crítico da FAD seria menor do que em solos com baixa disponibilidade de água. As informações acima apresentadas explicam a grande diversidade de dados para a relação entre a taxa de transpiração relativa e a FAD. Isto é especialmente evidente em estudos com plantas cultivadas em vasos onde a expansão radicular foi restringida (SINCLAIR & LUDLOW, 1986; ROSENTHAL et al., 1987) ou em solos com baixa disponibilidade de água (ROSENTHAL et al., 1987).

Outros fatores além do nível de demanda evaporativa e da quantidade de água disponível podem também alterar a relação entre a taxa de transpiração relativa e a FAD. Diferenças na distribuição do sistema radicular com a profundidade podem variar em função do genótipo em uso (WRIGHT et al., 1983) distribuição anteriores das precipitações ou irrigações (PROFFITT et al., 1985) ou condições do solo (TAN et al., 1990) entre outros fatores tem sido apresentadas. Culturas com menor comprimento de raízes nas camadas mais profundas apresentam uma FAD crítica mais elevada (a taxa de transpiração relativa diminui quando submetida a um pequeno déficit hídrico). Espécies ou cultivares que apresentam menor capacidade de manutenção do turgor apresentam uma FAD crítica mais elevada, em situações de déficit hídrico, devido ao rápido fechamento estomático.

Profundidade de Extração

A quantidade de água extraída pelas culturas pode ser explicada pelo produto da profundidade total de extração pela quantidade de água extraída por unidade de profundidade.

Muitos estudos tem demonstrado que entre espécies de culturas, a profundidade de extração é um determinante mais forte da quantidade total de água extraída do que a extração por unidade de profundidade, e que, isto está intimamente relacionado com a produtividade da cultura submetida a condições deficit hídrico (SQUIRE et al., 1987). SPONCHIADO et al. (1989) observaram que o cultivo de genótipos de feijão em um solo profundo e com deficit hídrico proporcionou profundidades do sistema radicular variando de 0,8 a 1,3m e que, diferiram em termos de água extraída e produtividade por um fator de 3. No entanto, sob um solo que restringia o crescimento das raízes, a uma mesma profundidade, os genótipos apresentaram semelhantes quantidades de água extraída e produtividade. Desta forma, sistemas radiculares profundos tem sido largamente sugeridos como um parâmetro de seleção para melhorar a produtividade em ambientes com baixa disponibilidade hídrica (TAYLOR, 1983). Outros estudos, entretanto, tem alertado que isto envolverá um consumo de importantes fotoassimilados em detrimento do crescimento da parte aérea e com possíveis reflexos na produção (JORDAN & MILLER, 1980; PASSIOURA, 1983; LUDLOW & MUCHOW, 1990). JORDAN et al., 1983 demonstraram através da simulação matemática que a resposta da cultura, em termos de aumento de produtividade ocorreria somente pelo aumento da profundidade do sistema radicular em estações com elevada demanda evaporativa ou de reduzida precipitação.

Quando uma cultura está crescendo somente com a água armazenada no perfil do solo, a profundidade de extração pode ser caracterizada por um frente de extração bidimensional que avança no perfil do solo em função do tempo com aproximadamente a mesma taxa de avanço do sistema radicular. MCGOWAN (1974) desenvolveu um método para determinar a profundidade de extração em função do tempo. Ele consiste na identificação do tempo, a uma dada profundidade, quando o conteúdo de água começa a ser drasticamente reduzido. Valores da taxa de avanço em profundidade da frente de extração varia de 1 a 2cm/d para culturas de clima temperado (GREGORY et al., 1978; MCGOWAN et al., 1984) e leguminosas tropicais (SQUIRE et al., 1987) e, de 1 a 4cm/d para cereais tropicais e dicotiledônias (SQUIRE et al., 1987; MEINKE et al., 1990). Algumas dessas diferenças entre grupos de espécies podem ser relacionadas com diferenças existentes nas temperaturas nas quais as plantas foram cultivadas. Entretanto, leguminosas tropicais cultivadas no mesmo ambiente que cereais tropicais possuem menores taxas de avanço da frente de

extração, demonstrando que existe um fator genético envolvido em diferentes espécies na velocidade da frente de extração (SQUIRE et al., 1987).

O avanço da frente de extração é de alguma maneira sensível ao balanço entre a disponibilidade de água e a demanda evaporativa. Por exemplo, a frente de extração pode ser mais rápida em solos arenosos ou em ambientes onde a demanda evaporativa for elevada (ODA, 1987). O avanço da frente de extração por ser retardado em solos com elevada quantidade de água disponível (MEINKE et al., 1990), quando o solo for reumedecido (MCGOWAN et al., 1984) ou por inúmeras restrições químicas e físicas existentes no perfil do solo.

O fato da velocidade da frente de extração de várias espécies concordar com a taxa medida de extensão das raízes em situações controladas (HAMBLIN, 1985) indica que, na maioria das situações, o avanço da frente de extração normalmente coincide com a frente de avanço radicular, com reduzidas raízes avançando mais rapidamente que a frente de extração (ODA, 1987). Entretanto, sob condições de baixa demanda evaporativa, as raízes podem se estender muito a frente da frente de extração (GREGORY et al., 1978) ou em solos com alta condutividade hidráulica a frente de extração pode avançar de 30-40cm a frente da frente radicular devido ao movimento ascendente da água para o interior da zona radicular (PARKER et al., 1989).

A profundidade final de extração pode ser até 40cm mais profunda que a profundidade total das raízes (GREGORY et al., 1978; REID et al., 1984; PARKER et al., 1989). Isto tem sido atribuído ao movimento ascendente da água, embora existe a possibilidade que em alguns casos a profundidade do sistema radicular é subestimado, devido aos métodos tradicionais de amostragem de raízes, que apresentam baixa precisão onde a densidade radicular é baixa.

Extração por unidade de profundidade

Em solos rasos onde a profundidade das raízes normalmente é restrita, a quantidade de água extraída não varia significativamente entre culturas. Muitas plantas cultivadas em solos profundos e submetidas a condições de água limitante extraem toda a água. Entretanto, existem muitas informações indicando que expressivas quantidades de água disponível permanecem, até a maturidade, nas partes inferiores do perfil. Esta incompleta extração tem sido atribuída a uma menor densidade de raízes (JORDAN & MILLER, 1980). Em nenhum desses estudos originais analisaram se a pequena extração era devida ao atraso na chegada da frente radicular para extrair água ou se as raízes profundas eram menos efetivas (a taxa de absorção por unidade de comprimento de raízes era menor que na superfície). PASSIOURA (1983) analisando os resultados de JORDAN & MILLER (1980) demonstrou que o comprimento das raízes eram suficientes, em teoria, para extrair toda a água antes da

maturação. Isto o levou a concluir que as raízes eram menos efetivas com a profundidade causando uma menor extração de água do que a possível teoricamente.

As razões para esta menor extração efetiva pelas raízes em relação a profundidade tem sido extensivamente discutidas (PASSIOURA, 1983; HAMBLIM, 1985). Raízes de plantas cultivadas em solos de textura fina com estrutura massiva dos agregados do subsolo podem tornar-se alongadas e finas devido ao fato que as raízes estão confinadas aos planos de fratura do solo. Isto também pode ser originário da aeração deficiente nas camadas mais profundas e pode explicar a reduzida extração observada nas camadas mais profundas nos experimentos conduzidos por BARRACLOUGH & WEIR (1989) e BLAND & DUGAS (1989). Uma elevada resistência axial ao fluxo de água nas raízes também pode ser outra razão da dificuldade de algumas culturas em extrair completamente a água disponível na camada inferior de seus sistemas radiculares (TAYLOR & KLEPER, 1973). A resistência axial é baixa nas dicotiledônias devido ao crescimento de raízes secundárias que propiciam um amplo suprimento de largos canais de xilema (TAYLOR & KLEPER, 1973). Entretanto, em cereais, as plantas podem depender inteiramente das raízes seminais para extrair água do subsolo se o déficit hídrico impedir o estabelecimento de raízes adventícias (PASSIOURA, 1974). Numerosos estudos comparando cereais com dicotiledônias tem apresentado quantidades superiores de água extraída em profundidade pelas dicotiledônias (MASON et al., 1983; BREMNER et al., 1986) e taxas mais rápidas de absorção por unidade de comprimento de raízes (HAMBLIN & TENNANT, 1987), independente da cultura utilizada ou da intensidade do déficit hídrico.

Quando as condições do subsolo são mais propícias para o crescimento radicular, um aumento na densidade radicular em relação a profundidade pode resultar numa maior extração de água. Densidade populacional maiores extraem mais água das camadas mais profundas. Em estudos onde toda a população de plantas foi submetida a um déficit semelhante, a extração foi superior para densidades populacionais maiores e relacionada com o maior comprimento de raízes em profundidade (AZAM-ALI et al., 1984; SIMMONDS & WILLIAMS, 1989). Genótipos com maturação tardia produzem raízes mais profundas, nas camadas mais profundas, como apresentada por BLUM & ARKIN (1984), podem resultar em maior quantidade de água extraída (BLUM, 1974). Quando o déficit hídrico (JORDAN & MILLER, 1971) ou uma nutrição deficiente (BROWN 1971) reduzem o crescimento radicular, a extração de água pode ser impedida nas camadas mais profundas do perfil.

CONCLUSÕES

Nos últimos 20 a 30 anos um expressivo progresso tem sido alcançado no estudo da absorção de água pelas raízes e na definição de conceitos sobre água disponível e extraível do solo, entretanto muito deve ser ainda investiga-

do. A água extraível do perfil de um solo, determinada a partir de resultados apresentados nesta revisão, é um índice que melhor representa a quantidade de água disponível as plantas. A extração de água é influenciada pela distribuição geométrica das raízes viáveis e da disponibilidade de água no solo. Experimentos em condições de campo devem ser conduzidos para melhor explicar tópicos aqui apresentados, visando aumentar conhecimentos sobre todos os processos e interações envolvidas. Ênfase deve ser dado sobre a frente de avanço de absorção de água e a frente de avanço do sistema radicular e, principalmente, da profundidade efetiva do sistema radicular das plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZAM-ALI, S.N., GHANE, M.M., MONTEITH, J.L. Effects of planting density on water use and productivity of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) grown on stored water. I. Growth of roots and shoots. *Experimental Agriculture*. Cambridge, v. 20, p. 203-214, 1984.
- BARRACLOUGH, P.B., WEIR, A.H. **Yield, water uptake and root growth of winter wheat**. London: AFRC Institute of Arable Crops Research, 1989, Annual Report.
- BLAND, W.R., DUGAS, W.A. Cotton root growth and soil water extraction. *Soil Science Society of America Proceedings*. Madison, v. 53, p. 1850-1855, 1989.
- BLUM, A. Genotypic responses in sorghum to drought stress. I Responses to soil moisture stress. *Crop Science*, Madison, v. 14, p. 361-364, 1974.
- BLUM, A., ARKIN, G.F. Sorghum root growth and water use as affected by water supply and growth duration. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 9, p. 131-142, 1984.
- BREMNER, P.M., PRESTON, G.K., de St. GROTH, C.F. A field comparison of sunflower (*Helianthus annuus*) and sorghum (*Sorghum bicolor*) in a long drying cycle. I. Water extraction. *Australian Journal of Agricultural Research*. Cambridge, v. 37, p. 483-493, 1986.
- BROWN, P. Water use and soil water depletion by dryland winter wheat as affected by nitrogen fertilization. *Agronomy Journal*, Madison, v. 63, p. 43-46, 1971.
- CARLESSO, R. **Influence of soil water deficits on maize growth and leaf area adjustments**. East Lansing-MI, 268 p. Dissertação de Doutorado, Michigan State University, USA. 1993.
- DENMEAD, O.T., SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by moisture content and meteorological conditions. *Agronomy Journal*, Madison, v. 54, p. 385-390, 1962.
- GARDNER, W.R. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science*, Madison, v. 89 p. 63-73, 1960.
- GARDNER, W.R., EHLING, C.F. The influence of soil water on transpiration by plants. *Journal of Geophysical Research*, v. 68 p. 5719-5724, 1963.
- GRANT, R.F., JACKSON, B.S., KINIRY, J.R. et al. Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, p. 61-65, 1989.

- GREGORY, P.J., MCGOWAN, M., BISCOE, P.V. Water relations of winter wheat. II. Soil water relations. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 91 p. 103-116, 1978.
- HAMBLIN, A. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38 p. 95-158, 1985.
- HAMBLIN, A., TENNANT, D. Root length density and water uptake in cereals and grain legumes: How well are they correlated? **Australian Journal of Agricultural Research**, Cambridge, v. 38 p. 513-527, 1987.
- JORDAN, W.R., DUGAS, W.A., SHOUSE, P.J. Strategies for crop improvement for drought-prone regions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 7 p. 281-299, 1983.
- JORDAN, W.R., MILLER, F.R. Genetic variability in sorghum root system: Implications for drought tolerance. In: TURNER, N.C., KRAMER, P.J. **Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stresses**. New York: Wiley Interscience, 1980. p. 383-399.
- LUDLOW, M.M., MUCHOW, R.C. A critical evaluation of the traits for improving crop yields in water limited environments. **Advances in Agronomy**, New York, v. 43 p. 107-153.
- MASON, W.K., MEYER, W.S., SMITH, R.C.G., et al. Water balance of three irrigated crops on fine-textured soils of the Riverine Plain. **Australian Journal of Agricultural Research**, Cambridge, v. 34 p. 183-191, 1983.
- MCGOWAN, M. Depth of water extraction by roots. In: IAEA. **Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies**. Vienna: IAEA, 1974, p. 435-445.
- MCGOWAN, M., BLANCH, P., GREGORY, P.J., et al. Water relation of winter wheat. V. The root system and osmotic adjustment in relation to crop evaporation. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 102 p. 415-425, 1984.
- MEINKE, H., HAMMER, G.L., WANT, P. Soil water extraction in sunflower. In: **Proceedings 8th Australian Sunflower Association Workshop**, 1990. Kooralbyn, Australia.
- OVERSEAS DEVELOPMENT ADMINISTRATION (ODA). **Micrometeorology in tropical agriculture. I. Introduction, methods and principles**. London: ODA, 1987. 203 p.
- PARKER, C.J., CARR, M.K.V., JARVIS, N.J., et al. Effects of subsoil loosening and irrigation on soil physical properties, root distribution and water uptake of potatoes (*Solanum tuberosum*). **Soil and Tillage Research**, v. 13, p. 267-285, 1989.
- PASSIOURA, J.B. Grain yield, harvest index and water use of wheat. **Journal of the Australian Institute of Agricultural Science**, v. 43, p. 117-121, 1974.
- PASSIOURA, J.B. Roots and drought resistance. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 7, p. 265-280, 1983.
- PROFFITT, A.P.B., BERLINER, P.R., OOSTERHUIS, D.M. A comparative study of root distribution and water extraction efficiency by wheat grown under high-and low-frequency irrigation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 77, p. 655-662, 1985.
- RATCLIFF, L.F., RITCHIE, J.T., CASSEL, D.K. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory measured properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 770-775, 1983.
- REID, J.B., HASHIM, O., GALLAGHER, J.N. Relations between available and extractable soil water and evapotranspiration from a bean crop. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 9, p. 193-209, 1984.
- RITCHIE, J.T. Influence of soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn canopy. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 893-897, 1973.
- RITCHIE, J.T. Soil water availability. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 58, p. 327-338, 1981.
- RITCHIE, J.T., BURNETT, E., HENDERSON, R.C. Dryland evaporative flux in a subhumid climate. III. Soil water influence. **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, p. 168-173, 1972.
- RITCHIE, J.T., JORDAN, W.R. Dryland evaporative flux in a sub-humid climate. IV. Relation to plant water status. **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, p. 173-176, 1972.
- ROBERTSON, M.J. **Water extraction by field-grown grain sorghum**. St. Lucia, Queensland. (PhD. Dissertation) - The University of Queensland, Australia, 1991.
- ROSENTHAL, W.D., ARKIN, G.F., SHOUSE, P.J., et al. Water deficits effects on transpiration and leaf growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 1019-1026, 1987.
- SIMMONDS, L.P., WILLIAMS, J.H. Population, water use and growth of groundnut maintained on stored water. II. Transpiration and evaporation from soil. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 25, p. 63-75, 1989.
- SINCLAIR, T.R., LUDLOW, M.M. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. **Australian Journal of Agricultural Research**, Cambridge, v. 13, p. 329-341, 1986.
- SPONCHIADO, B.N., WHITE, J.W., CASTILLO, J.A., et al. Root growth of four common bean cultivars in relation to drought tolerance in environments with contrasting soil types. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 25, p. 249-257, 1989.
- SQUIRE, G.R., ONG, C.K., MONTEITH, J.L. Crop growth in semi-arid environments. In: **Proceedings of the International Pearl Millet Workshop**. ICRIAT Center, India, 1987.
- TAN, C.S., MEYER, W.S., SMITH, R.C.G., et al. Alternative methods of estimating water deficits stress on wheat grown on undisturbed and repacked soil in drainage lysimeters. **Australian Journal of Agricultural Research**, Cambridge, v. 41, p. 267-276, 1990.
- TAYLOR, H.M. Modifying root system of cotton and soybean to increase water absorption. In: TAYLOR, H.M., JORDAN, W.R., SINCLAIR, T.R. **Limitations to Efficient Water Use and Crop Production**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1983. p. 57-64.
- TAYLOR, H.M., KLEPPER, B. Rooting density and water extraction patterns for corn (*Zea mays* L.). **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 965-968, 1973.
- TURNER, N.C. Adaptations to water deficits: a changing perspective. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 13, p. 175-190, 1986.
- TURNER, N.C., SCHULZE, E.D., GOLLAN, T. The response of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. II. In the mesophytic herbaceous species *Helianthus annuus*. **Oecologia**, v. 65, p. 348-355, 1985.
- WRIGHT, G.C., SMITH, R.C.G., MORGAN, J.M. Differences between two grain sorghum genotypes in adaptation to drought stress. III. Physiological responses. **Australian Journal of Agricultural Research**, Cambridge, v. 34, p. 637-651, 1983.