

Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica

Jefferson Horn Kunz⁽¹⁾, João Ito Bergonci⁽²⁾, Homero Bergamaschi⁽¹⁾, Genei Antonio Dalmago⁽³⁾, Bruna Maria Machado Heckler⁽¹⁾ e Flavia Comiran⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Fac. de Agronomia, Dep. de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia, Av. Bento Gonçalves, nº 7.712, CEP 91540-000 Porto Alegre, RS. E-mail: jhkunz@yahoo.com.br, homerobe@ufrgs.br, bruheckler@hotmail.com, flaviacomiran@pop.com.br ⁽²⁾UFRGS, Instituto de Biociências, Av. Bento Gonçalves, nº 9.500, Prédio 43423, CEP 91501-970 Porto Alegre, RS. E-mail: joão.bergonci@ufrgs.br ⁽³⁾Embrapa Trigo, Rod. BR 285, Km 294, CEP 99001-970 Passo Fundo, RS. E-mail: dalmago@cnpt.embrapa.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de interceptação e de uso da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) pela cultura do milho em diferentes sistemas de manejo do solo, arranjos de plantas e disponibilidade hídrica. O milho foi cultivado em plantio direto e preparo convencional, na combinação com duas disponibilidades hídricas (irrigado e sequeiro) e espaçamentos de 40 e 80 cm entre fileiras de plantas. Em cada tratamento, foram instalados sensores para medida da RFA transmitida pela cultura, na superfície do solo, ao passo que a RFA incidente foi medida acima da cultura. A redução da distância entre fileiras aumentou a eficiência de interceptação em todos os tratamentos. Sob plantio direto, a cultura apresentou maior eficiência de interceptação em relação ao preparo convencional. O déficit hídrico diminuiu a eficiência de interceptação devido ao enrolamento foliar, e esse efeito foi mais pronunciado em preparo convencional, em ambos espaçamentos estudados. Embora a eficiência de interceptação tenha sido maior no espaçamento de 40 cm, a eficiência de uso não diferiu entre espaçamentos, mas diminuiu em condições de déficit hídrico.

Termos para indexação: *Zea mays*, déficit hídrico, conteúdo relativo de água, sistema plantio direto, manejo do solo.

Interception and use of solar radiation by maize, as modifying soil tillage, row spacing and irrigation water availability

Abstract – The objective of this work was to evaluate the efficiency of interception and use of photosynthetically active radiation (PAR) by maize crops submitted to different conditions of soil tillage, plant arrangement, and water availability. Maize was cropped in no-tillage and conventional tillage, combined to treatments of soil water availability (irrigated and in rain fed), and plant row spacing (40 and 80 cm among rows). Sensors were installed in each treatment, for measuring the PAR transmitted by the canopy to the soil surface, while the incoming PAR was measured above the crop. Increments of efficiency of interception were obtained by reducing the row spacing in all treatments. Higher values of efficiency of interception were observed in no-tillage than in conventional tillage. Water deficits reduced efficiency of interception due to the rolling up of leaves, and this effect was higher in conventional tillage than in no-tillage, for both row spacings. Although the highest efficiency of interception was obtained with 0.4 m spacing, the efficiency of PAR use did not differ among treatments of row spacing. However, efficiency of use of maize crops was reduced by water deficits.

Index terms: *Zea mays*, water deficit, relative water content, no-tillage, soil management.

Introdução

A radiação solar vem se destacando nas pesquisas dos últimos anos, que buscam explorar o rendimento potencial das culturas. Embora a temperatura e o fotoperíodo sejam os principais fatores que atuam sobre o desenvolvimento vegetal, do ponto de vista quantitativo e qualitativo, a radiação solar é fundamental para o desenvolvimento e o crescimento vegetal na agricultura,

efetuado pelos processos fotomorfogenéticos e fotossintéticos.

Estudos têm demonstrado relação linear entre fitomassa produzida e a energia radiante absorvida ao longo do ciclo em grande número de espécies (Tollenar & Bruulsema, 1988). No entanto, somente uma fração do espectro solar é utilizada pelas plantas para o processo de acúmulo de matéria seca: a radiação fotossinteticamente ativa (RFA). A quantidade de radiação absorvida é um

fator determinante do rendimento de uma cultura. Entretanto, deve-se considerar que a conversão da radiação absorvida em matéria seca depende da fotossíntese, que varia conforme a espécie, a qualidade da radiação, a temperatura do ar e a fração de carbono fixado não consumido na respiração (Gallagher & Biscoe, 1978).

A maneira como a radiação fotossinteticamente ativa é interceptada pelo dossel das plantas é fundamental para a fotossíntese e para a produção da cultura (Stewart et al., 2003). Segundo esses autores, fatores como forma, densidade populacional e espaçamento entre linhas, afetam a distribuição da área foliar no dossel das plantas.

Recentemente, diferentes arranjos espaciais resultantes da combinação do espaçamento entre linhas de semeadura e o número de plantas por metro (na linha de semeadura) têm sido estudados com maior frequência pela maior ou menor adaptação das culturas ao ambiente. O fator arranjo de plantas na cultura do milho foi alvo de muitas pesquisas (Kasperbauer & Karlen, 1994; Johnson et al., 1998; Argenta et al., 2001). A conclusão foi de que a distribuição de plantas na linha possibilitaria melhor aproveitamento de luz, água e nutrientes, acarretando maior rendimento da cultura.

Um dos objetivos da modificação do arranjo de plantas, pela redução da distância entre linhas, é encurtar o tempo necessário para que a cultura intercepte o máximo da radiação solar incidente e, com isso, incrementar a quantidade de energia captada por unidade de área e de tempo. Assim, o melhor arranjo de plantas, teoricamente, é aquele que proporciona distribuição mais uniforme das plantas na linha de semeadura, devido, principalmente, ao melhor aproveitamento do ambiente.

Na ausência de estresse, a produção de fitomassa é uma função linear do acúmulo de radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura, sendo que o coeficiente angular da curva de regressão entre a fitomassa e RFA define a eficiência de uso da radiação (Shibles & Weber, 1966). O aproveitamento de RFA para a produção de matéria seca também depende de outras variáveis de manejo da cultura e condições meteorológicas, especialmente, da condição hídrica.

A deficiência hídrica é uma das principais causas de perda de rendimento em milho, exercendo efeitos variados sobre a planta, dependendo de seu estágio de desenvolvimento, do nível da deficiência e da sua duração. No Estado do Rio Grande do Sul, a disponibilidade de água às plantas é o fator que afeta o

rendimento das culturas com maior frequência e intensidade (Matzenauer et al., 1995).

O principal efeito e o primeiro a se manifestar numa situação de déficit hídrico é a redução da expansão celular, pois, em condições de restrição hídrica, o limiar de turgescência ou potencial de pressão mínimo para que haja expansão pode não ser atingido. Déficits hídricos mais severos podem também afetar o processo de divisão celular (Kramer & Boyer, 1995). Por afetar esses processos, a deficiência hídrica afeta o desenvolvimento das plantas, com decréscimo da área foliar, reduzindo a fotossíntese da planta. Entretanto, a mudança mais visível no dossel vegetativo da cultura de milho sob déficit hídrico é o enrolamento das folhas, cuja intensidade está relacionada com o potencial da água nas folhas (Carlesso, 1997; Moulia, 2000). De acordo com Earl & Davis (2003), o déficit hídrico reduz a produção de grãos do milho, pela redução da absorção de RFA devido à menor área foliar, decorrente da murcha ou enrolamento foliar em períodos de estresse severo ou pela senescência precoce das folhas. Além disso, a redução de rendimento pode ocorrer pela redução da eficiência com que RFA absorvida ou interceptada é utilizada pela cultura para a produção de matéria seca (eficiência de uso de RFA), bem como pela redução do índice de área foliar que limita o rendimento de grãos.

A retenção e a disponibilidade de água às plantas em diferentes sistemas de manejo do solo dependem da porosidade e da presença da palha em cobertura. Segundo Salton & Mielniczuk (1995), a cobertura de palha age tanto por sombreamento, de modo a reduzir a incidência de radiação e absorção de energia para a evaporação, quanto pela formação de um colchão de ar, que, por possuir menor condutividade térmica, retarda o aquecimento do solo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o rendimento, a eficiência de interceptação e de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do milho sob diferentes sistemas de manejo do solo, arranjos de plantas e disponibilidade hídrica.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS, localizada no Município de Eldorado do Sul, na região ecoclimática da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul (30°5'S, 51°40'W e altitude aproximada de 40 m). O clima da região é subtropical do tipo Cfa, de acordo com a classificação

de Köppen, com média anual de temperatura de 19,2°C e precipitação pluvial de 1.446 mm.

O solo da área experimental, de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos, é um Argissolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 2006). Os solos dessa unidade de mapeamento se caracterizam como imperfeitamente drenados, com relevo suavemente ondulado e de textura arenosa. Na Tabela 1 encontra-se o laudo realizado, dos principais atributos, pelo laboratório de Análises de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS em 2004.

Os sistemas de manejo do solo foram implantados no inverno de 1995, em uma área de aproximadamente 0,5 ha, cultivada em blocos com o sistema plantio direto (PD) e em preparo convencional (PC). Desde então, os sistemas de manejo vêm sendo cultivados com uma mistura de aveia-preta (*Avena strigosa*) e ervilhaca (*Vicia sativa*) no inverno e milho no verão. Durante o verão de 2003/2004, a área foi cultivada com soja.

Para a instalação do experimento, nos blocos sob plantio direto, a cobertura vegetal foi dessecada com a aplicação de 1.440 g de ingrediente ativo por hectare de herbicida à base de glifosato e, posteriormente, acamada ao solo com auxílio de rolo-faca. Nos demais blocos, foi feito preparo convencional por meio de aração e gradagem, na primeira quinzena de outubro de 2004, sendo a biomassa verde de aveia e ervilhaca incorporada ao solo, no mesmo momento da aplicação do herbicida nas áreas em plantio direto.

O milho híbrido Pioneer 32R21, de ciclo precoce, foi semeado em 18/11/2004, em espaçamentos de 80 e 40 cm entre fileiras, orientadas na direção leste-oeste. Utilizou-se semeadora de três linhas para milho, com disco para corte da palha e haste sulcadora (facão). As sementes foram colocadas entre 4 e 5 cm de profundidade. A emergência das plantas ocorreu em 27 de novembro. Realizou-se o desbaste de plantas 15 dias após a emergência, para ajuste da população em 70 mil plantas por hectare.

A adubação de base foi efetuada de acordo com a análise do solo, realizada pelo Laboratório de Análises de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS.

Na adubação de base, foram aplicados 45 kg ha⁻¹ de N, 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 180 kg ha⁻¹ de K₂O. Foram feitas duas adubações de nitrogênio em cobertura, quando as plantas apresentavam a quarta e a oitava folhas visíveis, equivalentes a 60 kg ha⁻¹ de N, cada uma, na forma de uréia não incorporada ao solo.

Antes da semeadura do milho, foram aplicadas 960 g ha⁻¹ do i.a. glifosato para controlar plantas daninhas não eliminadas na gradagem nos blocos em preparo convencional. Após a semeadura, foram feitas aplicações complementares de herbicida pré-emergente à base de atrazine+simazine (4,5 L ha⁻¹) e nicossulfuron (1 L ha⁻¹), aplicado duas vezes no início do ciclo das plantas, em ambos sistemas de manejo do solo.

O sistema de aspersão em linhas não permite casualização do fator água (Hanks et al., 1980) e, por isso, utilizou-se delineamento experimental em faixas, com três repetições. Os tratamentos consistiram em dois sistemas de preparo do solo, dois níveis de disponibilidade hídrica e dois espaçamentos entre fileiras de plantas. Os dois sistemas de manejo (PD e PC) constituíram as parcelas principais. Os dois níveis de disponibilidade hídrica ocuparam as subparcelas e se constituíram da seguinte maneira: com irrigação (I – umidade do solo próximo à capacidade de campo) e sequeiro (NI). Os dois espaçamentos entre fileiras (40 e 80 cm) foram distribuídos nas subsubparcelas. A área foi dividida em três blocos de 256 m² (dimensões de 32x80 m), constituídos por parcelas de 7 m de comprimento e 4 m de largura, cada uma delas contendo 7 e 14 fileiras de milho, nos espaçamentos de 80 e 40 cm, respectivamente.

O sistema de irrigação foi disposto nas laterais do experimento, de maneira que ficassem duas áreas irrigadas nos extremos e duas áreas não irrigadas no centro do experimento. Este sistema era composto por duas linhas de irrigação com oito aspersores cada, colocados na direção norte-sul, com 3 m de altura e distância de 6 m entre si. No controle da irrigação, foi considerado o potencial matricial da água no solo, medido pelos tensiômetros de coluna de mercúrio, à profundidade de 45 cm nos tratamentos irrigados. As irrigações foram efetuadas às 6h da manhã, sob ausência de vento, a fim de evitar deriva nas aplicações. As irrigações eram feitas sempre que o potencial matricial da água atingia -0,06 MPa a 45 cm de profundidade, no tratamento irrigado. Em cada irrigação, o volume de água foi determinado em lisímetro de pesagem, cultivado com o

Tabela 1. Laudo da análise do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) na profundidade de 0–30 cm.

Sistema	pH em água	MO (g kg ⁻¹)	P (mg dm ⁻³)	K (mg dm ⁻³)	CTC (cmol _c dm ⁻³)	V (%)	Argila (g kg ⁻¹)
PD	5,0	23	25,6	184,5	7,7	45,1	29,3
PC	5,1	21	9,7	166,3	7,8	47,1	28,3

mesmo híbrido e mesma população de plantas, localizado no centro de uma área de 0,54 ha junto ao experimento.

Para medição da área foliar, foram coletadas três plantas por tratamento, sendo uma em cada repetição, com frequência semanal. A área foliar foi medida em planímetro eletrônico (marca LICOR, modelo LI 3000). Considerando-se a área foliar de cada planta, foi calculado o índice de área foliar (IAF, $m^2 m^{-2}$), pela equação: $IAF = AF/S$, em que AF é a área foliar verde da amostra (m^2) e S a área do terreno ocupada pela amostra (m^2). Considerou-se como área foliar verde, as folhas que apresentavam coloração verde em dois terços ou mais da lâmina foliar.

A partir dos valores de IAF de cada tratamento, foram ajustados modelos para descrever a evolução do índice, a cada semana, até IAF máximo. Em todos os tratamentos, o modelo sigmoidal com três parâmetros foi o que melhor se ajustou à evolução de IAF em função de graus-dia acumulados. A equação ajustada foi:

$$IAF_{est} = a / (1 + e^{(X - X_0)/b})$$

em que IAF_{est} é o IAF estimado pelo modelo; a, b e X_0 são os coeficientes do modelo e X é a respectiva variável independente (graus-dia acumulados desde a emergência).

Determinou-se a massa de matéria seca da parte aérea de três plantas, em cada repetição e tratamento, as quais foram secadas em estufa a 65°C, até peso constante.

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) incidente sobre a cultura foi medida com um sensor quantum, marca Licor, instalado acima do dossel. Mediu-se a radiação fotossinteticamente ativa transmitida pela cultura pelos conjuntos de sensores montados em barras de alumínio de 1 m de comprimento, contendo cinco células de silício amorfo ligadas em paralelo. Estes foram conectados a um sistema "datalogger" Campbell CR10, que registrava, a cada 15 min, médias de RFA incidente e RFA transmitida ao nível do solo. Os totais diários foram calculados pelo somatório dos registros, no período das 7 às 19h (horário local). Em cada combinação de tratamentos, foram instaladas três barras de sensores para medição de RFA transmitida pela cultura na superfície.

A radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{int}) pela cultura foi calculada de acordo com a equação: $RFA_{int} = RFA_{inc} - RFA_{ts}$, em que RFA_{inc} e RFA_{ts} correspondem à radiação fotossinteticamente ativa incidente e transmitida pela cultura, respectivamente.

A eficiência de interceptação (ϵ_{int}) da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura foi estimada pela razão entre RFA_{int} e RFA_{inc} :

$$\epsilon_{int} = RFA_{int}/RFA_{inc}$$

A fim de estimar o coeficiente de extinção do dossel para RFA, foram ajustados modelos lineares para a eficiência de interceptação da RFA em função do índice de área foliar (IAF) diário. Considerou-se o coeficiente de extinção como sendo o parâmetro angular b da equação, com base na lei de Beer, adaptada de Monsi & Saeki (1953):

$$\ln(1 - \epsilon_{int}) = -b \cdot IAF$$

em que ϵ_{int} é a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa; b é o coeficiente angular da equação (inclinação da reta); e IAF é o índice de área foliar estimado a partir da equação 1.

A eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa (EUR) foi calculada a partir da matéria seca acumulada e da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{int}) acumulada no mesmo período. Ajustaram-se modelos lineares para peso acumulado de matéria seca da parte aérea em função de RFA interceptada, cujos coeficientes angulares (inclinação das retas) representam a eficiência com que cada densidade de plantas transforma a radiação fotossinteticamente ativa interceptada em biomassa aérea.

Medições de conteúdo relativo de água na folha (CRA) foram efetuadas em torno das 12h (horário local), em dias sem nebulosidade. Coletou-se a primeira folha totalmente expandida e exposta à radiação solar, em duas plantas por tratamento, colocada imediatamente em sacos de plástico e acondicionada em caixa térmica para evitar perda de água. Posteriormente, retirou-se cinco discos foliares de 1 cm de diâmetro que foram imediatamente pesados em balança analítica para determinar a matéria fresca. A seguir, os discos foliares eram dispostos em placa de Petri com água destilada para saturar durante 24 horas. Após secagem com papel-filtro, os discos foram pesados para determinação da matéria túrgida e colocados em estufa a 65°C até peso constante, para posterior determinação da matéria seca.

O CRA foi calculado a partir dos cinco discos foliares de acordo com a equação:

$$CRA = MF - MS/MT - MS,$$

em que CRA é o conteúdo relativo de água em porcentagem; MF é a matéria fresca em g; MS é a matéria seca em g; e MT é a matéria túrgida em g.

O efeito dos tratamentos, sistemas de manejo do solo, irrigado e sequeiro e arranjo de plantas, sobre as variáveis avaliadas foi testado pela análise de variância, seguida pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Resultados e Discussão

A evolução do índice de área foliar no tempo seguiu o padrão característico de plantas anuais, porém, com diferenças entre os níveis de disponibilidade hídrica (Figura 1). Na condição irrigada (I) e no espaçamento

de 80 cm, o IAF máximo do milho atingiu valores de 5,2 e 5,3 com 1.086 graus-dia acumulados em PDI80 e PCI80, respectivamente. Quanto ao espaçamento de 40 cm, o IAF máximo foi de 4,9 e 5,2 com 951 graus-dia acumulados em PDI40 e PCI40, respectivamente. Na área não irrigada, o IAF oscilou entre 2,5 e 3,8, o que significa redução média de 40% em relação ao IAF máximo verificado na condição irrigada. As diferenças de IAF entre as condições hídricas podem ser atribuídas à menor taxa de expansão celular (Passioura, 1994) e ao intenso

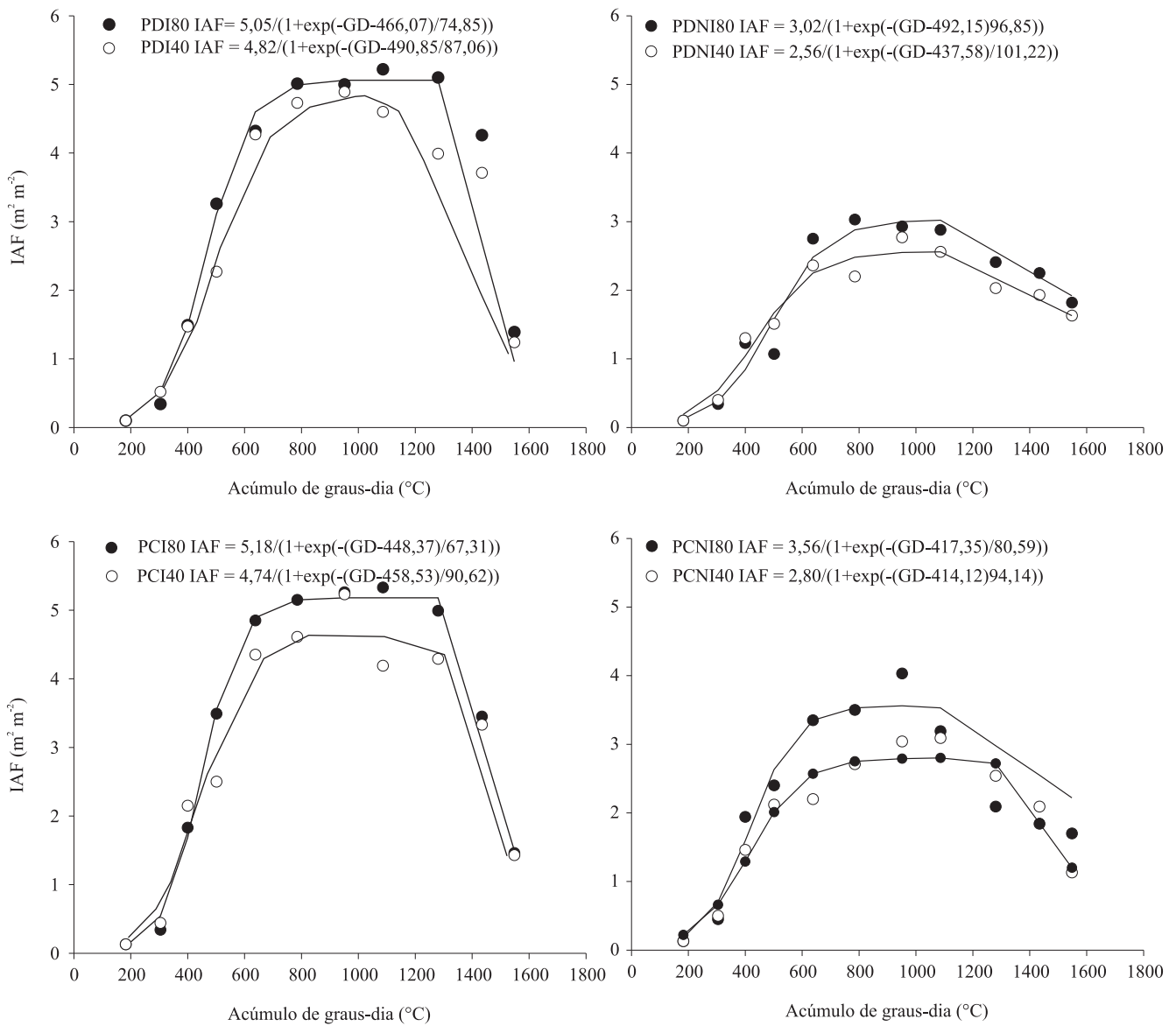


Figura 1. Evolução do índice de área foliar (IAF) medido (●○) e estimado (—) do milho sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), irrigado (I) e de sequeiro (NI) em dois arranjos de plantas (40 e 80 cm), de acordo com graus-dia acumulados.

processo de senescência foliar, quando a cultura esteve submetida a deficit hídrico (Figura 2).

Após o nível máximo, houve redução de IAF devido ao processo natural de senescência das folhas. A queda mais acentuada de IAF em PDI40 e PCI40, após o pico máximo, pode ser atribuída à senescência das folhas basais causada pelo auto-sombreamento. Resultados semelhantes foram constatados por Borrás et al. (2003), em um experimento que avaliou populações de milho em quatro densidades de semeadura e dois espaçamentos. Estes autores verificaram que a senescência das folhas foi maior em espaçamentos reduzidos e altas densidades de semeadura, embora ela tenha sido influenciada também por condições ambientais de crescimento da cultura.

O conteúdo relativo de água (CRA) nas folhas apresentou variações semelhantes entre os dias de medição, nos dois sistemas de cultivo e nas duas disponibilidades hídricas (Figura 3). Depois de 48 dias da emergência, o CRA alcançou os menores valores nos tratamentos não irrigados (NI), sendo que estes foram de 78, 77, 81 e 85% nos tratamentos PCNI80, PCNI40, PDNI80 e PDNI40, respectivamente. Por sua vez, nos tratamentos irrigados (I), o CRA se manteve próximo a 95%, indicando ausência de deficit hídrico. Os baixos valores de CRA nos tratamentos não irrigados podem ser atribuídos à combinação de elevada demanda evaporativa com baixa disponibilidade hídrica do solo, durante vários dias consecutivos, que salientaram as diferenças entre os tratamentos irrigados e não irrigados.

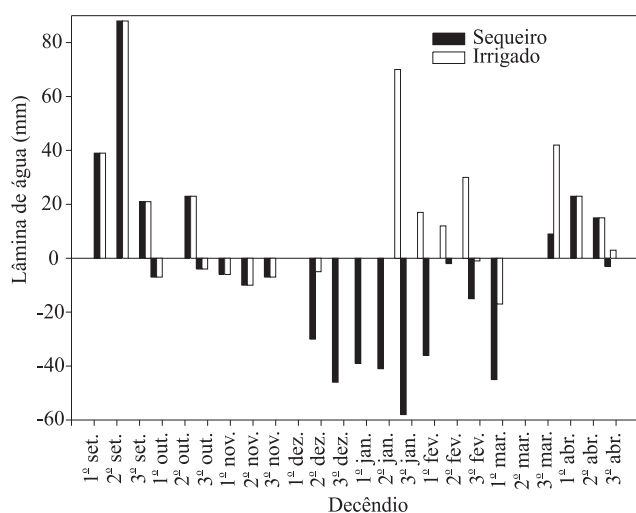


Figura 2. Balanço hídrico decendial durante o ciclo de crescimento e desenvolvimento da cultura do milho irrigado e de sequeiro.

Os valores de CRA que caracterizam a presença de estresse hídrico são variáveis de acordo com as espécies vegetais. Contudo, em mesófitas esses valores estão em torno de 80%. Em arroz, Lafitte (2002) e, em feijoeiro, Lazcano-Ferrat & Lovatt (1999) observaram ocorrência de estresse a partir de CRA de 80%, resultando em acentuada queda de rendimento e aumento de prolina em feijoeiro. Em milheto, Kasuka et al. (2005) caracterizaram CRA abaixo de 80% como estresse severo, e entre 80 e 90%, como suave estresse. Em milho, Kang et al. (2002) observaram redução da área foliar a partir de CRA de 80%, dessa forma, caracterizando a ocorrência de estresse hídrico. Por sua vez, espécies de *Amaranthus*, caracterizadas como tolerantes à seca, só apresentaram sintomas de estresse hídrico a partir de 70 a 75% de CRA (Liu & Stützel, 2002). Em plantas sem irrigação, o maior teor relativo de água sob plantio direto (PD) pode ser atribuído à maior disponibilidade de água às plantas (Dalmago, 2004).

Na Figura 4, é apresentada a eficiência de interceptação de RFA da cultura do milho de acordo com o índice de área foliar. O aumento da eficiência de interceptação de RFA foi acompanhado por um aumento do IAF da cultura até 50 a 60 dias após a emergência, quando ocorreu o IAF máximo (Figura 2), estabilizando a eficiência de interceptação num limite máximo (Figura 4).

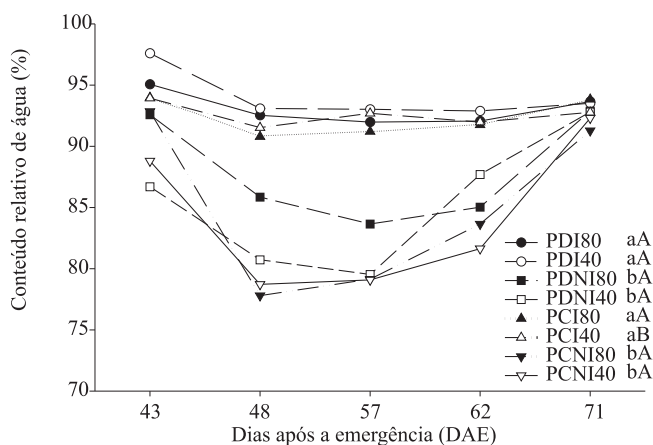


Figura 3. Conteúdo relativo de água em folhas de milho sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), irrigado (I) e de sequeiro (NI), em dois arranjos de plantas (40 e 80 cm). Tratamentos com a mesma letra minúscula, comparando disponibilidade hídrica, e com a mesma letra maiúscula, comparando manejo, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos estão de acordo com os relatos por Bergamaschi et al. (2004) e Lindquist et al. (2005) para a mesma cultura.

Na análise dos diferentes espaçamentos, os resultados da Figura 4 indicam que, numa mesma densidade de plantas, houve aumento da eficiência de interceptação da RFA com a redução do espaçamento entre as linhas de semeadura. Isso ocorre devido à distribuição mais equidistante entre as plantas, que possibilita a ocupação mais rápida do espaço entre as linhas, durante o período de crescimento. Além disso, menores espaçamentos podem permitir melhor arquitetura foliar, favorecendo a interceptação da RFA, tendendo a reduzir a competição por água e nutrientes (Johnson et al., 1998).

A maior eficiência de interceptação de RFA pelas plantas em PD, em relação à disponibilidade de água e espaçamentos, evidencia condições distintas de um ou mais fatores de crescimento das plantas entre os sistemas de cultivo. De acordo com Bianchi (2004), plantas sob plantio direto apresentam características de conservadoras de água, isto é, não apresentam variações acentuadas em seu potencial da água. Seus resultados mostraram que, em situação de elevada demanda evaporativa, houve diminuição da condutância foliar pelo

fechamento estomático, mantendo maior turgidez das folhas em relação às plantas sob PC. Os dados de conteúdo relativo de água mostram tendência de melhor condição hídrica das folhas sob plantio direto irrigado e sequeiro (Figura 3) em relação ao preparo convencional. Portanto, pode ter ocorrido pequeno déficit hídrico no solo em preparo convencional, mesmo no tratamento irrigado, reduzindo ϵ_{int} neste sistema, principalmente se considerarmos que as irrigações sempre foram feitas com base nos tensiômetros em PD.

Tratamentos em plantio direto (PDNI80 e PDNI40) apresentam valores mais elevados de ϵ_{int} do que em preparo convencional (Figura 4). Assim, pode-se inferir que o enrolamento foliar, além de ser provocado pelas condições meteorológicas, pode ser devido à variabilidade de armazenagem de água do solo, mostrando, assim, melhor condição hídrica das plantas sob PDNI em relação ao PCNI. Dalmago (2004) também observou que o sistema plantio direto mantém maior disponibilidade de água, por período mais prolongado, em relação ao sistema convencional. Portanto, a melhor condição hídrica das plantas em plantio direto não irrigado pode explicar a maior ϵ_{int} da RFA em condições extremas de déficit hídrico neste sistema.

A eficiência de uso da RFA, que estima a eficiência de conversão da radiação solar em matéria seca acumulada da parte aérea ($g\ MS\ MJ^{-1}$ de RFA_{int}), está representada na Figura 5. Os coeficientes angulares obtidos demonstram que a eficiência de uso de RFA foi de 4,0, 3,2, 1,4 e 1,1 g de MS aérea por megajoule de RFA_{int} nos tratamentos sob plantio direto: PDI80, PDI40, PDNI80 e PDNI40, respectivamente. Nos tratamentos sob preparo convencional, a eficiência foi de 3,5, 3,7, 1,2 e 1,5 g de MS aérea por megajoule de RFA_{int} em PCI80, PCI40, PCNI80 e PCNI40, respectivamente.

Na análise dos diferentes arranjos de plantas, observa-se que a eficiência de uso de RFA_{int} foi menor em PDI40, alcançando valor de 3,2 g $MS\ MJ^{-1}$ de RFA_{int} , ao passo que, sob PCI40, a eficiência de uso da RFA_{int} foi de 3,7 g $MS\ MJ^{-1}$ de RFA_{int} . A menor eficiência de conversão da RFA_{int} , em matéria seca da parte aérea (MS), sob PDI40 pode ter sido causada pelo auto-sombreamento das folhas neste espaçamento, causando senescência das folhas, refletindo-se em menor IAF (Figura 2). Ou seja, mesmo com alta eficiência de interceptação de RFA (Figura 4), que significa menos radiação transmitida às folhas inferiores do dossel, não se confirmou o que vários autores afirmam sobre o fato de a produção de MS por uma cultura ser diretamente proporcional à quantidade de radiação interceptada.

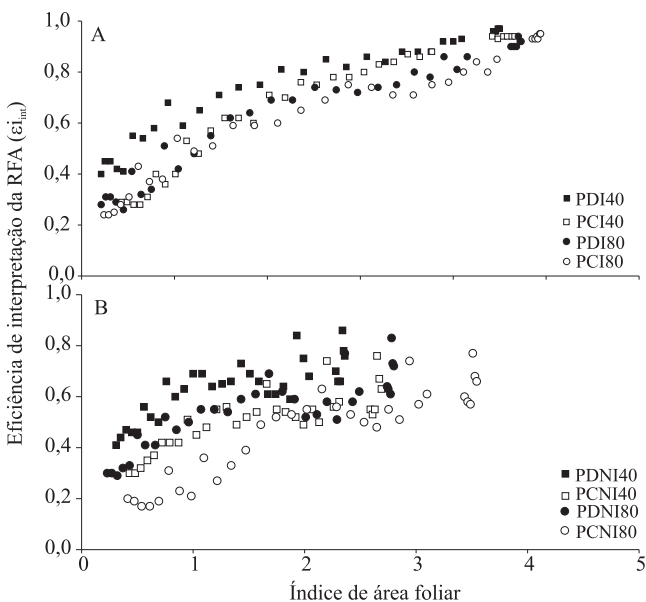


Figura 4. Eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do milho em sistema de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), irrigado (I) (A) e não irrigado (NI) (B), em dois arranjos de plantas (40 e 80 cm), em função do índice de área foliar.

Assim, esses dois parâmetros isolados mostram que não há maior produção de matéria seca, o que pode ser atribuído a outros fatores. Charles-Edwards et al. (1986) afirmaram que, em plantas com alta densidade populacional, folhas que se encontram nos níveis mais baixos do dossel ficam mais sombreadas e possuem atividade metabólica baixa e, com isso, não contribuem para o crescimento da planta. Assim, plantas que estão sob algum tipo de estresse podem interceptar e absorver a mesma quantidade de radiação que plantas não estressadas. Porém, plantas estressadas podem apresentar menor taxa fotossintética e, com isso, menor eficiência de uso da radiação.

No entanto, este valor de eficiência de uso da RFA de $3,2 \text{ g MS MJ}^{-1} \text{ RFA}_{\text{int}}$ está dentro de valores encontrados por outros autores para a cultura do milho em espaçamento reduzido. Em trabalho com dois híbridos de arquitetura contrastante, Westgate et al. (1997) encontraram valores para eficiência de uso de RFA de 2,69 e $3,02 \text{ g MS MJ}^{-1} \text{ RFA}_{\text{int}}$, em dois anos diferentes, em espaçamentos de 0,38 m. Diferenças

observadas pelos diversos autores na eficiência de uso da RFA também podem ser decorrentes da densidade da população de plantas e espaçamento, condições de crescimento da cultura e cultivares. Dependem, também, de como foram tomados os valores de matéria seca (total ou aérea) e de RFA (interceptada, absorvida ou incidente). Ainda, de acordo com Gosse et al. (1986), a eficiência de uso da radiação, nos tratamentos irrigados, apresenta valores semelhantes aos obtidos para diferentes espécies C_4 , como, por exemplo, milho, cana-de-açúcar e *Panicum* sp. de 2,49, 2,65 e 2,39, respectivamente, com média de $2,51 \text{ g MS MJ}^{-1} \text{ RFA}$ absorvida.

A eficiência de uso de RFA apresentou valores reduzidos com a ocorrência do deficit hídrico, principalmente pela diminuição do IAF (Figura 2). Em consequência, houve diminuição da quantidade de radiação interceptada (Figura 4), refletindo-se em menor conversão da RFA em MS da parte aérea. Os valores encontrados foram de 1,4 e $1,1 \text{ g MS MJ}^{-1} \text{ RFA}_{\text{int}}$ para os tratamentos PDNI80 e PDNI40, respectivamente,

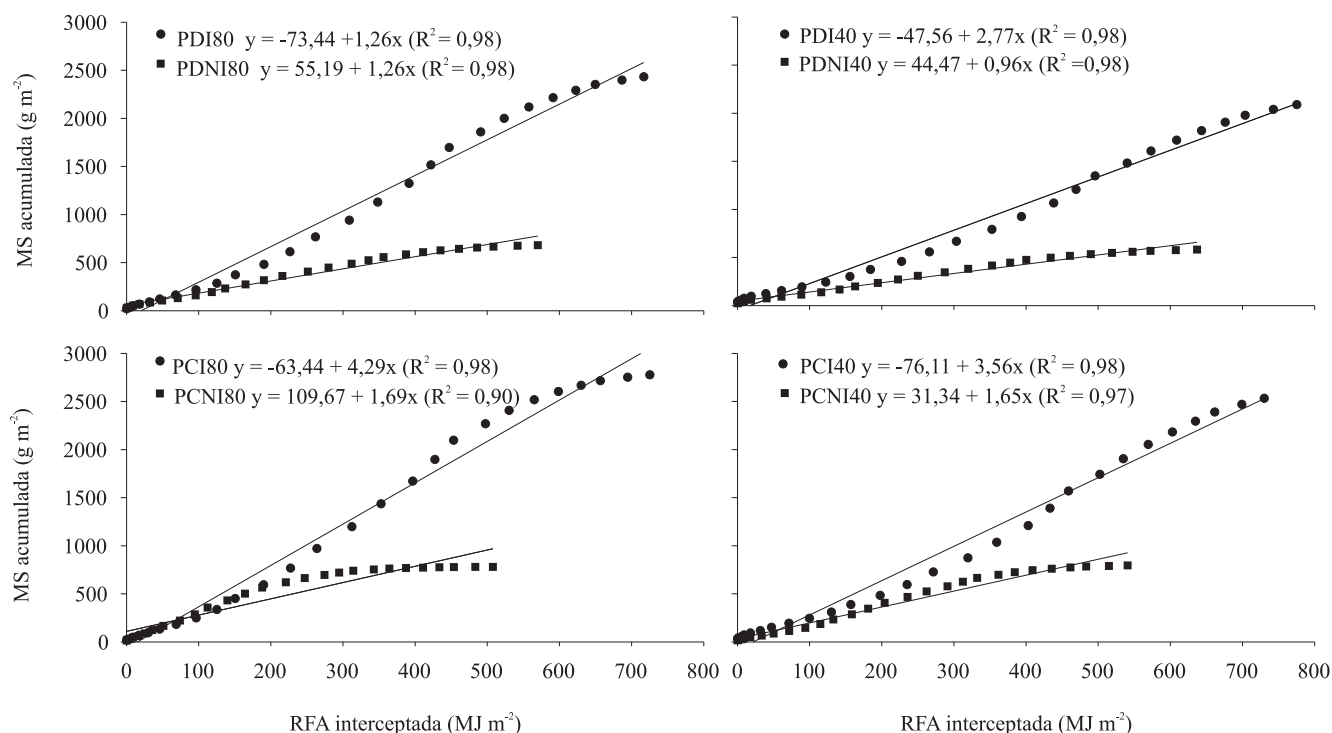


Figura 5. Relação entre massa de matéria seca aérea (MS) acumulada e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA) pelo milho em sistema de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), irrigado (I) e não irrigado (NI) e dois arranjos de plantas (40 e 80 cm).

enquanto EUR ficou em 1,2 e 1,5 g MS MJ⁻¹ RFA_{int} nos tratamentos PCNI80 e PCNI40. Na média das parcelas irrigadas e não irrigadas, houve diminuição de 61% na eficiência de uso da RFA na condição de deficit hídrico.

Os fatores que causam redução da eficiência de uso da RFA, em condições de deficit hídrico, estão relacionados a vários mecanismos, como redução da expansão da área foliar, fechamento dos estômatos e, como consequência, diminuição da taxa fotossintética, causando senescência prematura das folhas (Russell et al., 1989). Resultados de Earl & Davis (2003) também demonstraram diminuição na eficiência de uso da radiação na cultura do milho, avaliando-se o efeito de três níveis de irrigação sobre este parâmetro. Os valores da eficiência de uso da radiação foram de 2,99, 1,86 e 1,16 g MS MJ⁻¹ RFA_{int}, na ausência de deficit hídrico, deficit hídrico moderado e deficit hídrico severo, respectivamente. Esses autores concluíram que o efeito do deficit sobre EUR foi devido a alterações na eficiência do fotossistema II.

Na Tabela 2 são apresentados os valores de rendimento de grãos do milho em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em dois espaçamentos e duas disponibilidades hídricas. Houve interação dupla significativa entre disponibilidade hídrica e espaçamento no fator rendimento de grãos. Essas diferenças decorrem do efeito do deficit hídrico nos parâmetros anteriormente discutidos que, conseqüentemente, vão influenciar a produção de grãos na cultura do milho.

Em condições de deficit hídrico, os maiores rendimentos foram verificados no espaçamento de

80 cm, com rendimento de grãos médio de 475 kg ha⁻¹, ao passo que no espaçamento de 40 cm o rendimento médio foi de 193 kg ha⁻¹. Nos tratamentos irrigados, mesmo não havendo diferenças significativas, os maiores rendimentos foram alcançados nos menores espaçamentos, com rendimentos médios de 9.700 kg ha⁻¹ e de 8.892 kg ha⁻¹ nos espaçamentos de 40 e 80 cm, respectivamente (Tabela 2). Neste caso, a cultura em espaçamento reduzido interceptou mais radiação (Figura 4), resultando em maior produção de grãos. Segundo Johnson et al. (1998), a redução no espaçamento entre linhas possibilita elevação no rendimento de grãos, o que pode ser explicado pela melhor eficiência na interceptação da radiação solar e ao decréscimo de competição entre plantas na linha por luz, água e nutrientes, em virtude de distribuição mais equidistante.

Conclusões

1. O milho cultivado em plantio direto apresenta maior eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa em comparação ao preparo convencional, sendo esta maior em espaçamento reduzido.
2. A deficiência hídrica diminui a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, devido à redução do índice de área foliar e ao enrolamento das folhas.
3. A maior eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa em espaçamento reduzido não resulta em maior eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa.
4. Quando não há deficit hídrico, a eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa para milho apresenta valores semelhantes aos obtidos para diferentes espécies C₄, e é reduzida sob condições de deficit hídrico.
5. Quando há deficit hídrico, o maior rendimento ocorre no espaçamento entre linhas de 80 cm.

Referências

- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G.; FORSTHOFER, E.L.; MANJABOSCO, E.A.; HEREGARAY NETO, V. Resposta de híbridos simples de milho à redução do espaçamento entre linhas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, p.71-78, 2001.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MULLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER,

Tabela 2. Rendimento de grãos de milho (kg ha⁻¹) sob sistema de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), irrigado (I) e de sequeiro (NI) e dois arranjos de plantas (40 e 80 cm) e a interação entre a disponibilidade hídrica e espaçamento⁽¹⁾.

Disponibilidade hídrica		Rendimento
Irigado		9.295a
Sequeiro		334b
Sistema		
Plantio direto		5.238a
Preparo convencional		4.391a
Espaçamento (cm)		
80		4.683a
40		4.945b
Disponibilidade hídrica ⁽¹⁾		Espaçamento (cm)
Irigado	80	8.892a
Irigado	40	9.698a
Sequeiro	80	475b
Sequeiro	40	193b

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

- B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.831-839, 2004.
- BIANCHI, C.A.M. **Avaliação de indicadores da condição hídrica em milho sob diferentes níveis de água, em semeadura direta e convencional**. 2004. 97p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BORRÁS, L.; MADDONNI, G.A.; OTEGUI, M.E. Leaf senescence in maize hybrids: plant population, row spacing and kernel set effects. **Field Crops Research**, v.82, p.13-26, 2003.
- CARLESSO, R. Enrolamento e orientação de folhas de milho causada por déficits hídricos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.171-176, 1997.
- CHARLES-EDWARDS, D.A.; DOLEY, D.; RIMMINGTON, G.M. **Modelling plant growth and development**. Sydney: Academic Press, 1986. 235p.
- DALMAGO, G.A. **Dinâmica da água no solo em cultivo de milho sob plantio direto e preparo convencional**. Porto Alegre, 2004. 243p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- EARL, H.J.; DAVIS, R.F. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. **Agronomy Journal**, v.95, p.688-696, 2003.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- GALLAGHER, J.N.; BISCOE, P.V. Radiation absorption, growth and yield of cereals. **Journal of Agricultural Science**, v.91, p.47-60, 1978.
- GOSSE G.; VARLET-GRANCHER, C.; BONHOMME, R.; CHARTIER, M.; ALLIRAND, J.M.; LEMAIRE, G. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, v.6, p.47-56, 1986.
- HANKS, R.J.; SISSON, D.V.; HURST, R.L.; HUBBARD, K.G. Statistical analysis of results from irrigation experiments using the line-source sprinkler system. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.886-888, 1980.
- JOHNSON, G.A.; HOVERSTAD, T.R.; GREENWALD, R.E. Integrated weed management using narrow corn row spacing, herbicides, and cultivation. **Agronomy Journal**, v.90, p.40-46, 1998.
- KANG, S.; SHI, W.; CAO, H.; ZHANG, J. Alternate watering in soil vertical profile improved water use efficiency of maize (*Zea mays* L.). **Field Crops Research**, v.77, p.31-41, 2002.
- KASPERBAUER, M.J.; KARLEN, D.L. Plant spacing and reflected far-red light effects on phytochrome-regulated photosynthate allocation in corn seedlings. **Crop Science**, v.34, p.1564-1569, 1994.
- KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic Press, 1995. 495p.
- KUSAKA, M.; LALUSIN, A.G.; FUJIMURA, T. The maintenance of growth and turgor in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) Leeke) cultivars with different root structures and osmo-regulation under drought stress. **Plant Science**, v.168, p.1-14, 2005.
- LAFITTE, R. Relationship between leaf relative water content during reproductive stage water deficit and grain formation in rice. **Field Crops Research**, v.76, p.165-174, 2002.
- LAZCANO-FERRAT, I.; LOVATT, C.J. Relationship between relative water content, nitrogen pools, and growth of *Phaseolus vulgaris* L. and *P. acutifolius* A. Gray during water deficit. **Crop Science**, v.39, p.467-475, 1999.
- LINDQUIST, J.L.; ARKEBAUER, T.J.; WALTERS, D.T.; CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, v.97, p.72-78, 2005.
- LIU, F.; STÜTZEL, H. Leaf water relations of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to soil drying. **European Journal of Agronomy**, v.16, p.137-150, 2002.
- MATZENAUER, R.; BEGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; RIBOLDI, J. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.3, p.85-92, 1995.
- MONSI, M.; SEAKI, T. The light factor in plant communities and its significance for dry matter production. **Japanese Journal of Botany**, v.14, p.22-52, 1953.
- MOULIA, B. Leaves as shell structures: double curvature, auto-stresses, and minimal mechanical energy constraints on leaf rolling in grasses. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.19, p.19-30, 2000.
- PASSIOURA, J.B. The yield of crops in relation to drought. In: BOOTE, H.J.; BENNET, J.M.; SINCLAIR, T.R.; PAULSEN, G.M. (Ed.). **Physiology and determination of crop yield**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1994. p.343-359.
- RUSSEL, G.; JARVIS, P.G.; MONTEITH, J.L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: RUSSELL, G.; MARSHAL, B.; JARVIS, P.G. (Ed.) **Plant canopies: their growth, form and function**. Cambridge: University Press, 1989, p.21-40.
- SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.313-319, 1995.
- SHIBLES, R.M.; WEBER, C.R. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. **Crop Science**, v.6, p.55-59, 1966.
- STEWART, D.W.; COSTA, C.; DWYER, L.M.; SMITH, D.L.; HAMILTON, R.I.; MA, B.L. Canopy structure, light interception and photosynthesis in maize. **Agronomy Journal**, v.95, p.1465-1474, 2003.
- TOLLENAAR, M.; BRUULSEMA, T.W. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. **Agronomy Journal**, v.80, p.580-585, 1988.
- WESTGATE, M.E.; FORCELLA, F.; REICOSKY, D.C.; SOMSEN, J. Rapid canopy closure for maize production in the northern US corn belt: radiation-use efficiency and grain yield. **Field Crops Research**, v.49, p.249-258, 1997.

Recebido em 14 de maio de 2007 e aprovado em 19 de outubro de 2007