

MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE MILHO EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA E DO ACÚMULO DE GRAUS-DIA, COM E SEM IRRIGAÇÃO¹.

MODELLING OF MAIZE GROWTH AS A FUNCTION OF SOLAR RADIATION AND AIR TEMPERATURE, WITH AND WITHOUT IRRIGATION.

Solange França², Homero Bergamaschi³, Luís Mauro Gonçalves Rosa⁴

RESUMO

A radiação solar, a temperatura do ar e a disponibilidade hídrica afetam o crescimento das plantas. A quantidade de radiação incidente, e a proporção desta interceptada pelas plantas são determinantes fundamentais do rendimento. Este experimento foi conduzido na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Eldorado do Sul - RS, com objetivo de ajustar, para o milho, o modelo de crescimento proposto por GOSSE *et al.* (1986), representado pelo acúmulo de matéria seca aérea, em função da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e da temperatura do ar. Os tratamentos consistiram de parcelas irrigadas (solo próximo à capacidade de campo), e parcelas não irrigadas, (recebendo somente chuva). A ocorrência do déficit hídrico durante o crescimento vegetativo causou atraso nos estádios fenológicos e necessidade de maior acúmulo de graus-dia para o milho completar o ciclo. A redução na disponibilidade hídrica afetou negativamente a evolução do IAF e de M_{Sa}. Em condições irrigadas, a eficiência de utilização da radiação foi de 2,60g M_{Sa} para cada MJ de PAR interceptado, e de 1,44g M_{Sa} MJ⁻¹ quando a cultura foi submetida ao déficit hídrico.

Palavras-chave: Milho, graus-dia, modelagem, IAF, temperatura, disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

Solar radiation, air temperature, and water availability affect plant growth and development. The amount of radiation intercepted by the plants is fundamental to crop yield. The objectives of this study were to test the growth model proposed by GOSSE *et al.* (1986) using a maize crop. The experiment was performed at the Experiment Station of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul, in Eldorado do Sul - RS. The model uses the photosynthetically active radiation (PAR) portion of the solar spectrum and the air temperature to predict above ground dry matter accumulation (DM). Treatments used were: irrigated plots (soil kept close to field capacity), and non irrigated plots (rain fed only). The occurrence of drought stress during the vegetative growth caused delays in the appearance of the phenological stages of maize, and, therefore, a need to accumulate a higher sum of degree days to complete its cycle. The water availability resulted in a differentiated behaviour between treatments, which affected negatively the development of the leaf area index and dry matter accumulation. On the irrigated plots, the radiation use efficiency of maize was 2.60g of above ground DM per MJ of PAR. Drought, however, caused this efficiency to be reduced to a value of 1.44g of above ground DM per MJ of PAR.

Key words: Maize, degree days, modelling, LAI, temperature, water availability.

¹Extraído da Dissertação de Mestrado em Fitotecnia apresentada pelo primeiro autor à Faculdade de Agronomia, UFRGS em agosto de 1997.

²Eng^a. Agr^a., Mestre em Fitotecnia, opção em Agrometeorologia, Programa de Pós-graduação em Agronomia, UFRGS. Bolsista do CNPq, Professora da Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC, Bahia.

³Eng. Agr., Dr., Prof. Adjunto, Dep. de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia, Faculdade de Agronomia, UFRGS, Caixa Postal 776, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS. Bolsista do CNPq.

⁴Biol. Ph.D., Prof. Adjunto, Dep. de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia, Faculdade de Agronomia, UFRGS, Caixa Postal 776, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS. Bolsista do CNPq. Autor para correspondência

INTRODUÇÃO

A radiação solar, a temperatura e a disponibilidade hídrica afetam o crescimento da cultura, de maneira que a quantificação destes fatores pode ser utilizada no ajuste de modelos de simulação do desenvolvimento e da produção de culturas. Em condições potenciais a quantidade de radiação incidente e a proporção desta que é interceptada pelas plantas são determinantes fundamentais do rendimento.

Embora todo o complexo climático exerça influência sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas, a temperatura é o fator dominante (BERLATO & SUTILI, 1976; BERLATO *et al.*, 1984). Já a radiação solar é, praticamente, a única fonte de energia para os processos fisiológicos e bioquímicos que ocorrem nos vegetais. Sendo assim, a produção final de biomassa depende, em última instância, da eficiência com que as folhas convertem energia radiante em energia química através da fotossíntese (ASSIS & MENDEZ, 1989).

Nem todos os comprimentos de onda do espectro solar podem ser utilizados pelos órgãos clorofilados. Na conversão da energia dos fótons incidentes em energia química, através do aparelho fotossintético de uma folha, são utilizadas apenas as radiações com comprimento de onda entre 400 e 700 nm (PAR), com uma eficiência variável dentro deste intervalo (DEBENEIX, 1994).

Para qualquer espécie vegetal, em condições de suprimento hídrico e mineral não limitantes, ocorre uma relação linear entre o acúmulo de matéria seca aérea e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada, permitindo ajuste de modelos simples para a estimativa da produção potencial em um determinado local (GOSSE *et al.*, 1986). Esse tipo de modelo foi aplicado para diferentes culturas, por vários autores, com o objetivo de estimar a produção de matéria seca da parte aérea (GALLAGHER & BISCOE, 1978; SPIERTZ, 1982; GOSSE *et al.*, 1984) e também da produção total de matéria seca (CHARLES-EDWARDS *et al.*, 1986; KINIRY *et al.*, 1989). O coeficiente angular da curva de regressão entre a massa de matéria seca total e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada define a eficiência de uso da radiação para a produção de biomassa (MONTEITH, 1977).

Para THOMAS & FUKAI (1995) a quantidade de biomassa produzida pelas culturas pode ser definida através de uma estrutura fisiológica simples, baseada na quantidade de radiação solar interceptada e na sua eficiência de conversão em matéria seca. Como KINIRY *et al.* (1989) sugeriram, a eficiência de conversão (eficiência de utilização da radiação, RUE) é, freqüentemente, uma constante para a cultura, em um ambiente com boa disponibilidade de água, mas pode ser afetada por outros fatores ambientais. MUCHOW (1989) observou que a diminuição na produção de biomassa de milho, sorgo e setária itálica, causada pela redução de água disponível, foi primeiramente, asso-

ciada a uma redução na eficiência de utilização da radiação, ao invés de uma redução na interceptação de radiação.

A eficiência de conversão proposta por BONHOMME *et al.* (1982) é da ordem de 3 g MSa da parte aérea (MSa) MJ⁻¹. De acordo com KINIRY *et al.* (1989), foram encontrados, em termos de quantidade de MSa produzida por unidade de PAR_{int}, valores médios de 2,2, 2,2 e 2,3 gMJ⁻¹ PAR_{int} para girassol, arroz e trigo, respectivamente. Para sorgo e milho as médias foram 2,8 e 3,5 g MSa MJ⁻¹ PAR_{int}, respectivamente. Também para milho e sorgo, MUCHOW & DAVIS (1988) encontraram valores semelhantes, de 3,56 e 2,78 g Msa MJ⁻¹ PAR_{int}, respectivamente.

Em trabalho conduzido por CIRILO & ANDRADE (1994), as médias da RUE para o milho, através dos anos, foram 3,3 para a semeadura de setembro, 3,6 para outubro e 4,2g Msa MJ⁻¹ para novembro. Contrariamente, a RUE diminuiu do período de formação dos estigmas até a maturidade fisiológica em todos os anos. Na média dos diferentes anos, os valores médios da RUE foram 2,7, 2,7, 2,0 e 1,7g Msa MJ⁻¹ para as semeaduras de setembro, outubro, novembro e dezembro, respectivamente.

Este trabalho visa desenvolver um modelo de crescimento para o milho, considerando informações de radiação solar e temperatura do ar durante o ciclo desta cultura, em diferentes condições hídricas. Os objetivos foram: a) ajustar um modelo de estimativa do índice de área foliar (IAF) e de matéria seca aérea (MSa) em função do acúmulo de graus-dia para a cultura do milho; b) ajustar um modelo de estimativa de acúmulo de matéria seca aérea (MSa) em função do somatório de PAR interceptada para a cultura do milho; c) avaliar o impacto do déficit hídrico sobre o crescimento do milho.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), em Eldorado do Sul -RS (latitude: 30°05'22"S, longitude: 51°39'08"W, altitude aproximada de 40m). O clima da região é subtropical úmido de verão quente do tipo fundamental Cfa, conforme a classificação climática de Köppen.

O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento Arroio dos Ratos, um plintosolo, de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos. O preparo do solo consistiu da passagem de um rolo faca em uma cobertura de aveia e ervilhaca estabelecida previamente, de uma aração, sendo, em seguida, realizadas duas gradagens. A adubação de base foi realizada a partir da interpretação da análise de solo, aplicando-se, a lanço, 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 120 kg ha⁻¹ de K₂O e 40 kg ha⁻¹ de N.

A semeadura do híbrido Pioneer 3230 foi realizada no dia 25 de outubro de 1995, com espaçamento de 0,75m entre linhas e 0,20m entre plantas (67.000pl ha⁻¹). Para o controle das plantas daninhas, principalmente papuã (*Brachiaria plantaginea*) e tiririca (*Cyperus rotundus*), foi realizada aos 21 dias após a emergência (DAE) uma aplicação localizada de herbicida à base de paraquat (1,5 l ha⁻¹) + coadjuvante.

Como adubação de cobertura realizou-se duas aplicações de nitrogênio na forma de uréia, no estádio 1 de desenvolvimento segundo HANWAY (1963), sendo a primeira aos 21 DAE na dose de 40kg ha⁻¹ de N e a segunda aos 28 DAE na dose de 60kg ha⁻¹ de N.

Considerando que o sistema de aspersão em linha utilizado não permite a casualização para o fator água (HANKS et al., 1980), o delineamento experimental foi em faixas com cinco repetições (BERGONCI, 1997). Cada bloco foi constituído por cinco parcelas com dimensões de 3m de largura e 16m de comprimento, compostas por quatro fileiras de milho. Os tratamentos compreenderam diferentes lâminas d'água, obtidas em função de gradientes de aspersão em direção transversal às linhas de plantas. Neste trabalho, foram considerados os tratamentos extremos: com irrigação (sem déficit hídrico, solo mantido próximo à capacidade de campo) e não irrigado (com déficit hídrico).

Em intervalos de sete dias, a partir da emergência (ocorrida em 1º de novembro de 1995), foram realizadas amostragens para avaliação de matéria seca aérea (MSa) e índice de área foliar (IAF). O índice de área foliar foi determinado através da medição da área foliar, feita em planímetro ótico modelo LI 3000 (Licor, Lincoln, EUA), de uma planta por repetição, totalizando cinco plantas por tratamento. O IAF de cada amostra foi determinado segundo BEADLE (1993):

$$IAF = \frac{AF}{S} \quad (1)$$

sendo AF a área foliar da amostra (m²) e S a área do terreno ocupada pela amostra (m²).

Para determinação da massa de matéria seca aérea total (MSa) foram coletadas quatro plantas por repetição. O material foi colocado em estufa com circulação de ar forçada, à temperatura de aproximadamente 70°C até atingir massa constante.

Dados meteorológicos foram obtidos através de uma estação automatizada, modelo W2000 (Campbell Scientific, Logan, EUA), localizada junto à área experimental. A radiação fotossinteticamente ativa (PAR), correspondente à faixa de 400-700 nm, para o cálculo da PAR incidente (PAR_{inc}) no topo da cultura, foi estimada a partir da radiação solar global (Rs) medida na estação automatizada.

Dentro da cultura, a PAR foi medida através de conjuntos de células de silício amorfo, sendo cada conjunto de células composto por sete sensores ligados em paralelo e espaçados de 15 cm, montados sobre barras de alumínio, de acordo com metodologia de PANDOLFO et al. (1993) e calibrados contra um sensor de referência (LICOR, Inc.). Os sensores foram conectados a um sistema automatizado de registro, modelo CR 10 (Campbell Scientific, Logan, EUA), e as médias registradas em intervalos de 15 minutos. Os totais diários foram obtidos pela integração dos registros, considerando o período das 7 às 18 h.

O acúmulo de graus-dia (GD) foi calculado segundo BERLATO et al. (1984):

$$GD = T_{méd} - T_b \quad (2)$$

onde T_{méd} é a temperatura média do ar (°C), obtida a partir de 24 temperaturas horárias, e T_b é a temperatura mínima basal do milho. A temperatura mínima basal utilizada neste cálculo foi de 8°C, de acordo com BERLATO & SUTILI (1976), JONES & KINIRY (1986), HESKETH & WARRINGTON (1989) e KINIRY (1991).

Os modelos para estimativa do índice de área foliar e da massa de matéria seca aérea produzida em função do acúmulo de graus-dia (IAF_{GD} e MSa_{GD}, respectivamente) relativo ao período de crescimento, e massa de matéria seca aérea em função do somatório de PAR interceptada (MSa_{PAR}) foram ajustados com o auxílio de análise de regressão, pelo método dos mínimos quadrados.

O ajuste do modelo relacionando a produção de matéria seca com o total de radiação interceptada e o acúmulo de graus-dia, no período de crescimento da cultura, foi baseado no método proposto por GOSSE et al. (1984), onde:

$$MSa = \alpha * PAR_{int} \quad (3)$$

sendo MSa a produção de matéria seca aérea (kg ha⁻¹) e PAR_{int} a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ m⁻² dia⁻¹), enquanto α é determinado pela regressão de MSa em função de PAR_{int} representando a eficiência de uso da radiação (RUE). Por sua vez a variável PAR_{int} é dada por:

$$PAR_{int} = PAR_{inc} * \epsilon_i \quad (4)$$

onde PAR_{inc} é a radiação fotossinteticamente ativa incidente e ϵ_i é a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa.

A eficiência de interceptação (ϵ_i) de PAR foi calculada, para o período de 30 de novembro de 1995 a 19 de janeiro de 1996 (no horário das 7 às 18h), a partir do coeficiente de transmissão de PAR (CT) segundo VARLET-GRANCHER et al. (1989):

$$\epsilon_i = 1 - CT \quad (5)$$

sendo o coeficiente de transmissão (CT) para a PAR determinado por:

$$CT = \frac{PAR_t}{PAR_{inc}} \quad (6)$$

onde PAR_t (PAR transmitida) é a radiação que passa através da cultura e atinge níveis inferiores do dossel ou o nível do solo e PAR incidente (PAR_{inc}) é a quantidade de radiação que chega no topo da cultura.

Em função dos dois parâmetros meteorológicos, PAR_{inc} e acúmulo de graus-dia (GD), a produção de matéria seca aérea pode ser determinada através da seguinte equação:

$$MSa = \alpha * PAR_{inc} * \epsilon_{i2} \quad (7)$$

sendo α determinado pela equação 3, e ϵ_{i2} (eficiência de interceptação de PAR estimada) pela seguinte fórmula:

$$\epsilon_{i2} = \beta * (1 - \exp(-k * IAF_{GD})) \quad (8)$$

onde β é a máxima eficiência de interceptação determinada pela equação 5, IAF_{GD} foi calculado pela regressão entre o acúmulo de graus-dia (GD) e o IAF observado, e k é o coeficiente de extinção determinado segundo CAMPBELL (1986).

Sendo assim, a equação 7 pode ser expressa da seguinte forma:

$$MSa = \alpha * \{ PAR_{inc} * \beta * [1 - \exp(-k * IAF_{GD})] \} \quad (9)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A temperatura média do ar variou entre 20 e 27°C, durante o período experimental, não ocorrendo portanto, limitação térmica para o desenvolvimento do milho. Com relação à radiação solar global, esta se manteve acima de 21 MJ m⁻² dia⁻¹ na maior parte do período experimental, exceto no período entre 75 e 100 dias após a emergência (DAE), quando ocorreu uma redução da mesma, devido à ocorrência de um período de alta nebulosidade e precipitação pluvial.

Comparando os tratamentos I_0 (sem irrigação) e I_4 (com irrigação), nota-se que a precipitação pluvial ocorrida foi insuficiente para proporcionar um adequado desenvolvimento do milho, necessitando suplementação hídrica ao longo do período experimental (Figura 1). O período de menor disponibilidade água (deficiência hídrica) para o tratamento I_0 ocorreu entre 20 e 50 DAE, nos estádios fenológicos 1 e 2, que correspondem a 4 e 8 folhas expandidas. Posteriormente, ocorreram curtos períodos de deficiência hídrica, entre 60 e 70 DAE, entre 73 e 80 DAE e no final do ciclo, a partir dos 96 DAE, ou seja, nos estádios fenológicos 4, 5 e a partir do 7, que representam os estádios de pendoamento, espigamento e grão pastoso, respectivamente, na escala de HANWAY (1963).

A variação do índice de área foliar (IAF) durante o ciclo da cultura apresentou um desenvolvi-

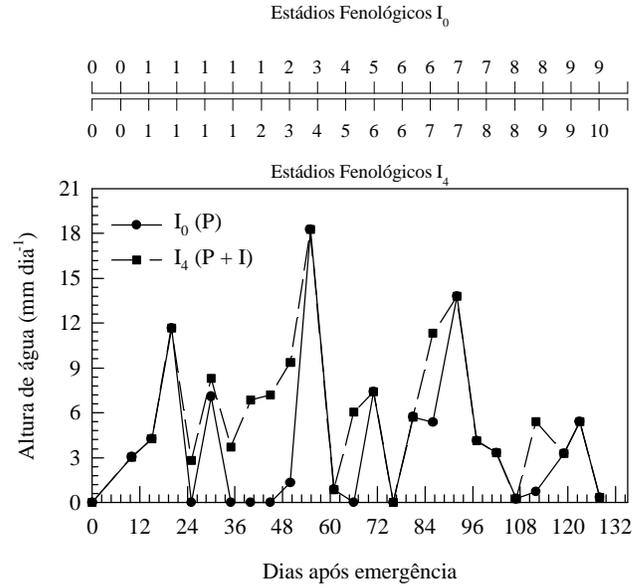


Figura 1. Precipitações pluviárias (P) e irrigações (I), em intervalos de cinco dias, em função de dias após a emergência e de estádios fenológicos (Hanway, 1963) em milho. Eldorado do Sul, RS, 1995/96.

to diferenciado em função da disponibilidade hídrica, para os tratamentos I_0 e I_4 . Os tratamentos apresentaram IAF similares somente no início do ciclo até 28 DAE (408 GD) (Figura 2A, símbolos).

O IAF máximo foi de 5,8 no tratamento I_4 aos 56 DAE (853 GD) coincidindo com o estádio fenológico 4, o qual corresponde ao pendoamento. Para o tratamento I_0 o IAF máximo foi de 3,6 aos 77 DAE (1187 GD), coincidindo com o estádio fenológico 6, que corresponde ao enchimento de grãos.

BERGONCI (1997), em experimento similar, obteve IAF máximo de 5,8 aos 62 DAE no tratamento I_0 e de 6,0 aos 76 DAE no tratamento I_4 , na safra 1993/94, enquanto na safra 1994/95, o IAF máximo foi de 4,1 e 4,7 aos 56 DAE, para os tratamentos I_0 e I_4 , respectivamente. Estas diferenças, segundo o autor, se devem ao fato de ter ocorrido um período de estiagem entre 60 e 80 DAE (pendoamento - espigamento) na safra 1993/94, o que provocou um atraso na evolução do IAF, enquanto que, na safra 1994/95, houve uma distribuição da precipitação mais uniforme, não caracterizando déficit hídrico prolongado ao longo do ciclo do milho.

O IAF máximo estimado para o tratamento I_4 foi de 5,5 atingido com 1.187 GD, e para o tratamento I_0 o IAF máximo estimado foi de 3,4 atingido aos 1.296 GD (Figura 2A, linhas). Observa-se que, além da deficiência hídrica ter reduzido o IAF, houve uma maior

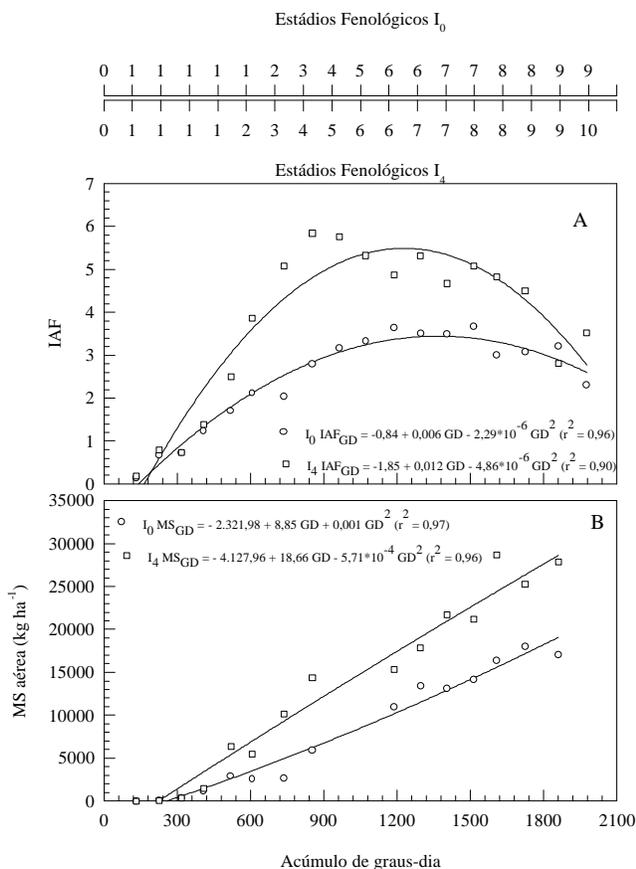


Figura 2. Índice de área foliar - IAF (A) e matéria seca aérea - MSa (B) em função do acúmulo de graus-dia e de estádios fenológicos (Hanway, 1963) em milho, com irrigação (I_4) e sem irrigação (I_0). Eldorado do Sul, RS, 1995/96.

exigência térmica para ocorrência do IAF máximo estimado. Entretanto, ambos ocorreram no estágio 6 de desenvolvimento, que corresponde a grão leitoso. A diferenciação entre os tratamentos nas curvas de IAF, em função do acúmulo de graus-dia, começou a ocorrer a partir de 520 GD acumulados (4 folhas expandidas, estágio 1).

O déficit hídrico causou um atraso em termos de desenvolvimento fenológico. No tratamento I_4 as plantas atingiram o estágio 2 (oito folhas expandidas) com 606 GD, enquanto no tratamento I_0 este estágio somente foi atingido com 737 GD, mantendo-se sempre uma defasagem em termos de acúmulo de graus-dia e estádios fenológicos até a maturação fisiológica do milho.

O acúmulo de matéria seca aérea (MSa) até 28 DAE (408 GD) não apresenta diferença entre os tratamentos. A partir desta data começa a ocorrer diferenciação entre os tratamentos, devido à deficiência

hídrica ocorrida no tratamento I_0 . Entre 36 e 48 DAE (520 a 737 GD), o crescimento estabilizou no tratamento I_0 , período em que ocorreu o déficit hídrico, retomando seu crescimento após este período, mas sempre inferior ao tratamento I_4 (Figura 2B).

O menor acúmulo de MSa para o tratamento I_0 pode ser explicado pelo menor IAF atingido (Figura 2 A e B). Estes resultados indicam que a fotossíntese total da comunidade de plantas foi afetada em um de seus componentes que é a área foliar. Os resultados encontrados neste trabalho estão de acordo com de TANGUILING *et al.* (1987) e PASSIOURA (1994), os quais citam que mesmo déficits hídricos não muito severos afetam a expansão foliar com conseqüente redução do IAF e do acúmulo de matéria seca aérea. ECK (1986) também observou uma diminuição na produção de matéria seca de folhas, colmos e espigas de milho, quando o déficit ocorreu durante quatro semanas, a partir de 41 dias após a semeadura.

O acúmulo de MSa em função de graus-dia durante o período experimental (Figura 2B) foi semelhante até os 408 GD acumulados (estádio 1, com quatro folhas expandidas). Posteriormente, o tratamento I_4 foi superior ao tratamento I_0 até o final do ciclo do milho. O tratamento I_4 atingiu seu rendimento máximo observado de 28.662 kg ha⁻¹ de MSa com 1.724 GD, enquanto que para o tratamento I_0 este foi de 18.015 kg ha⁻¹ de MSa com 1.861 GD.

Constata-se que o tratamento I_4 apresentou melhor desempenho em relação a IAF e MSa, em razão das maiores taxas de crescimento proporcionadas, atribuídas à melhor disponibilidade hídrica ocorrida. De acordo com os resultados, o estágio 10, que corresponde à maturação fisiológica, foi atingido aos 126 DAE (1.976 GD) no tratamento I_4 e aos 133 DAE (2.098 GD) no tratamento I_0 . Esta diferenciação entre os tratamentos começou aos 35 DAE, devido à ocorrência de deficiência hídrica no tratamento I_0 a partir dos 28 DAE.

A Figura 3 representa o acúmulo de matéria seca aérea (MSa) do milho em função da radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (ΣPAR_{int}), para as duas condições hídricas. A eficiência de utilização da radiação (RUE) para este experimento, foi de 1,44g de MSa para cada MJ de PAR_{int} para o tratamento I_0 . No entanto, para o tratamento I_4 , a RUE foi de 2,60g de MSa para cada MJ de PAR_{int} . Assim, para o tratamento I_4 , a RUE apresenta valores similares aos obtidos para diferentes espécies de metabolismo C_4 , como milho, cana-de-açúcar e panicum (2,49, 2,65 e 2,39, respectivamente), com média de 2,51g de MSa para cada MJ de PAR_a (GOSSE *et al.*, 1986).

As diferenças encontradas entre os resultados dos modelos de estimativa de IAF para I_4 e I_0 são decorrentes do atraso na fenologia das plantas, resultantes dos efeitos do déficit hídrico ocorrido.

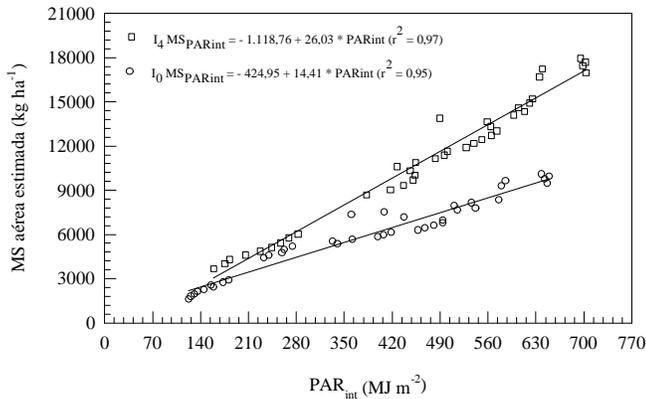


Figura 3. Relação entre matéria seca (MSa) aérea estimada e somatório de radiação fotossinteticamente ativa interceptada (PAR_{int}) para o milho, com irrigação (I_4) e sem irrigação (I_0). Eldorado do Sul, RS, 1995/96.

Em diferentes condições hídricas, a diferença observada na eficiência de utilização de radiação é explicada por RUSSEL *et al.* (1989), para os quais a limitação hídrica causa redução na RUE em um grande número de espécies. Esta condição de estresse reduz inicialmente a formação do IAF por redução na expansão da área foliar, causa fechamento dos estômatos e redução na taxa fotossintética, podendo, posteriormente, causar senescência prematura das folhas.

GOSSE *et al.* (1984) também obtiveram, para alfafa, uma relação linear entre rendimento de MSa e PAR absorvida (PAR_a), em que a eficiência de utilização da radiação foi de 1,76g de MSa para cada MJ de PAR_a , em crescimento de primavera e verão. BARNI *et al.* (1995) determinaram um valor médio da eficiência de utilização da radiação para girassol de 2,5 g de MSa por MJ de PAR absorvida.

Em função do valor de RUE obtido no tratamento I_4 , coincidente com o valor potencial proposto por GOSSE *et al.* (1986) para espécies C_4 , pode-se afirmar que não houve limitação de qualquer natureza neste tratamento. Como o tratamento I_0 apresentou menor RUE, isto foi devido à deficiência hídrica, uma vez que esta foi a variável preponderante entre os dois tratamentos. Esta tendência é demonstrada por RUSSEL *et al.* (1989), segundo os quais um ambiente que apresenta alguma condição de estresse, pode causar redução no crescimento, ou redução no índice de área foliar, portanto, influenciando a interceptação da radiação.

O ajuste do modelo potencial (sem déficit hídrico) de previsão de matéria seca aérea (eq. 9), na forma proposta por GOSSE *et al.* (1984), para a cultura do milho, tendo como variáveis de entrada a radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{inc}), e o

somatório das temperaturas médias do ar (GD), assumiu a seguinte forma:

$$MSa = 2,60 * PAR_{inc} * 0,93 * \left\{ 1 - \exp \left[-0,87 * (-1,85 + 0,012 * GD - 4,86.10^{-6} * GD^2) \right] \right\}$$

simplificando:

$$MSa = 2,42 * PAR_{inc} * \left\{ 1 - \exp \left[-0,87 * (-1,85 + 0,012 * GD - 4,86.10^{-6} * GD^2) \right] \right\}$$

A ocorrência de déficit hídrico durante o desenvolvimento do milho alterou o modelo no que se refere ao IAF. Além disso, o coeficiente α (eq. 9) ficou alterado para 1,44. Desta forma, sob condições de estresse hídrico, o modelo assume a seguinte forma:

$$MSa = 1,44 * PAR_{inc} * 0,93 * \left\{ 1 - \exp \left[-0,87 * (-0,84 + 0,0063 * GD - 2,29.10^{-6} * GD^2) \right] \right\}$$

utilizando a mesma simplificação anterior, temos:

$$MSa = 1,34 * PAR_{inc} * \left\{ 1 - \exp \left[-0,87 * (-0,84 + 0,0063 * GD - 2,29.10^{-6} * GD^2) \right] \right\}$$

CONCLUSÕES

A produção de MSa e o IAF em milho podem ser estimados a partir de modelos de relação com a temperatura média do ar através do acúmulo de graus-dia e com o somatório de radiação solar global, considerando PAR interceptada.

Déficit hídrico durante o crescimento vegetativo em milho ocasiona atraso na ocorrência de estádios fenológicos e necessidade de maior acúmulo de graus-dia para a cultura completar seu ciclo. Da mesma forma, afeta negativamente o índice de área foliar e o acúmulo de matéria seca aérea.

A disponibilidade hídrica afeta o modelo de estimativa de matéria seca e índice de área foliar em função do acúmulo de graus-dia. O modelo de estimativa de matéria seca em função do somatório de radiação fotossinteticamente ativa interceptada também é afetado pelo déficit hídrico.

Na ausência de limitação hídrica, a eficiência de utilização da radiação fotossinteticamente ativa do milho está na ordem de grandeza prevista para espécies de metabolismo C_4 , sendo reduzida com a ocorrência de déficit hídrico.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, F.N. de, MENDEZ, M. E. G. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 2, n. 7, p. 797-800, 1989.
- BARNI, N. A., BERLATO, M.A., BERGAMASCHI, H. et al. Rendimento máximo do girassol com base na radiação solar e temperatura: II. Produção de fitomassa e rendimento de grãos. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 201-216, 1995.
- BEADLE, C.L. Growth analysis. In: HALL, D.O., SCURLOCK, J.M.O., BOLHAR-NORDENKAMPF, H.R. et al. **Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual**. London : Chapman & Hall, 1993. p. 36-46.
- BERGONCI, J.I. **Indicadores de déficit hídrico em milho**. Porto Alegre : UFRGS, 1997. 117 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.
- BERLATO, M., SUTILI, V. Determinação das temperaturas bases dos subperíodos emergência-espigamento e emergência-espigamento de três cultivares de milho (*Zea mays* L.). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO, 11., 1976, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba : Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Departamento de Genética; 1978. p. 523-527.
- BERLATO, M.A., MATZENAUER, R., SUTLI, V. R. Relação entre temperatura e o aparecimento de fases fenológicas do milho (*Zea mays* L.). **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 111-132, 1984.
- BONHOMME, R., RUGET, F., DERIEUX, M et al. Relations entre production de matière sèche aérienne et énergie interceptée chez différents génotypes de maïs. **C. R. Academie Sciences**, Série III, Paris, n. 294, p. 393-397. 1982.
- CAMPBELL, G.S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 36, n. 3-4, p. 317-321. 1986.
- CHARLES-EDWARDS, D.A., DOLEY, D., RIMMINGTON, G.M. **Modelling plant growth and development**. London : Academic Press, 1986. 235 p.
- CIRILO, A.G., ANDRADE, F.H. Sowing date maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. **Crop Science**, Madison, v. 34, p. 1039-1043, 1994.
- DEBENEIX, V. **Definition des parametres d'utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement utile a la photosynthese**. Iut mesures physiques : Universite de Creteil, 1994. 38 p.
- ECK, H.V. Effects of water deficits on yield, yield components and water use efficiency of irrigated corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, n. 6, p. 1035-1040, 1986.
- GALLAGHER, J.N., BISCOE, P.V. Radiation absorption, growth and yield of cereals. **Journal Agric. Sci.** Great Britain. v. 91, p. 47-60, 1978.
- GOSSE, G., CHARTIER, M., LEMAIRE, G. Mise au point d'un modèle de prévision de production pour une culture de Luzerne. **C. R. Academie Sciences**, Série III, Paris, v. 298, p. 541-544, 1984.
- GOSSE, G., VARLET-GRANCHER, C., BONHOMME, R. Et al. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v. 6, p. 47-56, 1986.
- HANKS, R.J., SISSON, D.V., HURST, R.L. et al. Statistical analysis of results from irrigation experiments using the line-source sprinkler system. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 4. p. 886-888, 1980.
- HANWAY, J.J. Growth stages of corn (*Zea mays* L.). **Agronomy Journal**, Madison, v. 55, n. 5, p. 487-491, 1963.
- HESKETH, J.D., WARRINGTON, I.J. Corn growth response to temperature: rate and duration of leaf emergence. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 696-701, 1989.
- JONES, C.A., KINIRY, J.R. **CERES-maize: A simulation model of maize growth and development**. College Station, Texas : A & M Univ. Press, 1986.
- KINIRY, J.R. Maize phasic development. In: **Modeling plant and soil systems**. Madison : ASA-CSSA-SSSA, 1991. p. 55-70. (Agronomy Monograph n. 31).
- KINIRY, J.R., JONES, C.A., O'TOOLE, J.C. et al. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, p. 51-64, 1989.
- MONTEITH, J.L. Climate and efficiency of crop production in Britain. **Phil Trans. R. Soc.**, London, v. 281, p. 277-294, 1977.
- MUCHOW, R.C. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment. II. Effect of water deficits. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 20, p. 207-219, 1989.
- MUCHOW, R.C., DAVIS, R. Effects of nitrogen supply on comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. II. Radiation

- interception and biomass accumulation. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 18, p. 17-30, 1988.
- PANDOLFO, C., BERGAMASCHI, H., NABINGER, C. Montagem de células de silício amorfo para medição de radiação fotossinteticamente ativa (PAR - 400 a 700 nm). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 8., 1993, Porto Alegre. **Resumos ...** Santa Maria : Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/ UFRGS/ UFSM, 1993. 211 p., p. 94.
- PASSIOURA, J.B. The yield of crops in relation to drought. In: BOOTE, H.J., BENNETT, J.M. SINCLAIR, T.R. et al. **Physiology and determination of crop yield**, Madison : ASA, ESSA, SSA, p. 343-359, 1994.
- RUSSEL, G., JARVIS, P.G., MONTEITH, J.L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: **Their growth, form and function**. RUSSEL, G., MARSHALL, B., JARVIS, P. G. (eds.). Cambridge : Society for experimental biology seminar series 31/ University Press, Cambridge. p. 31-40, 1989.
- SPIERTZ, J.H.L. Physiological and environmental determinants of potential crop productivity. **Proc. 12th Int. Potasse Inst. Cong.**, Goslar (RFA), p. 27-45, 1982.
- TANGULING, V.C., YAMBAO, E.B., O'TOOLE, J.C. et al. Water stress effects on leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. **Plant and Soil**, Ontario, v. 103, p. 155-168, 1987.
- THOMAS, FUKAI, S. Growth and yield response of barley and chickpea to water stress under three environments in southeast queensland. I. Ligth interception, crop growth and grain yield. **Australian Journal Agricultural Research**, v. 46, p. 17-33, 1995.
- VARLET-GRANCHER, C., GOSSE, G., CHARTIER, M. Et al.. Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v. 9, p. 419-439, 1989.