

PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE MILHO SUBMETIDO A DIFERENTES NÍVEIS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO VIA MODELO DE SIMULAÇÃO¹

Marcia Xavier Peiter

Curso de Engenharia Agrícola - Universidade Regional do Alto Uruguai e Missões - URI Campus Santiago - Tel.(055)251-1715 - Rua 20 de setembro, 2410 - Santiago, RS

Fazal Hussain Chaudhry

*Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos - USP
Tel.(016)274-3444 - Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 - São Carlos, SP*

1 RESUMO

O advento de modelos simuladores de crescimento e produção de culturas agrícolas vem permitir que as quantidades de água aplicadas e o momento de rega possam ser testados com significativas reduções de custo, tempo e mão-de-obra, além do que, a estimativa da produção não é influenciada por eventuais fatores externos, alheios ao tratamento aplicado. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo a avaliação, calibração e validação de um modelo de simulação de produção para a cultura do milho quando submetido a diferentes níveis de irrigação, a fim de disponibilizar uma ferramenta que permita a análise desta cultura com maior rapidez e redução de custos. Para a validação do modelo, a cultivar de milho Pioneer 3069 foi submetida a quatro níveis de manejo de irrigação com três repetições em um conjunto de lisímetros de drenagem. Procedeu-se as irrigações sempre que a fração de água disponível fosse igual ou inferior a 0,90; 0,75; 0,60 e 0,45. Através dos resultados obtido, pode-se concluir que o modelo de simulação apresenta uma aceitável estrutura de rotinas para previsão da produção de massa seca total de milho quando a cultura é submetida a diferentes níveis de manejo de rega. Desta forma, o modelo pode ser utilizado para a avaliação das conseqüências produtivas e econômicas de diferentes estratégias de irrigação.

UNITERMOS: Simulação, milho, manejo de irrigação

PEITER, M.X., CHAUDHRY, F.H. Corn yield predicted when submitted to different irrigation management levels by simulation model

2 ABSTRACT

The advent of simulation models for growth and yield of crops makes it possible to test the influence of irrigation depths and their timings on the economy of agricultural production. This paper calibrates and validates a corn yield model for different irrigation management strategies to obtain a tool for rapid analysis of crop response without having to conduct repeated experiments. Thus, the corn cultivar Pioneer 3069 was submitted to four irrigation management levels with three replications in a number of drainage lysimeters. Irrigations were applied when the plant available water reaches 0,90; 0,75; 0,60 and 0,45. The results show that the calibrated model has an acceptable conceptual structure of computational routines to predict corn dry matter when the crop is irrigated according to different management levels. It is concluded further that the model is capable of predicting correctly the temporal variation of the observed leaf area index and soil water status.

KEY-WORDS: Simulation, corn, irrigation management

3 INTRODUÇÃO

Uma grande parte do território brasileiro é caracterizada por um regime pluviométrico insuficiente ou mal distribuído, que, na maioria das vezes, provoca reduções na produção agrícola. Segundo Epperson et al. (1993), a precipitação pluviométrica anual é, na maioria dos casos, suficiente para grande parte das culturas agrícolas. Entretanto, estas podem estar sujeitas a excesso ou falta de água em seus períodos críticos, o que provoca a variabilidade anual de produção e redução dos índices produtivos de muitas regiões. A fim de reduzir os riscos do investimento para a produção agrícola, são desenvolvidos os sistemas de irrigação, que, manejados de forma racional garantem níveis de produtividade sem flutuações significativas, independentemente das condições climáticas do período. Um sistema desejável de irrigação aplica a água em taxas que permitam sua infiltração e distribuição no espaço e no tempo, ajustando as necessidades da cultura em cada parcela de campo (Hoffman & Martin, 1993).

² Parte da Tese apresentada pela primeira autora para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil -Área de Hidráulica e Saneamento, pela Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

Durante muito tempo, técnicos e pesquisadores da área tentaram avaliar as conseqüências econômicas e produtivas de diversas estratégias de irrigação através de parcelas experimentais (Hook & Threadgill, 1988). Estes estudos têm uma variabilidade muito grande, em função de doenças, pragas, manejo e fertilidade do solo, e outros fatores intrínsecos ao processo produtivo. Além disto, experimentos para escolha de estratégias ótimas de irrigação exigem grandes áreas, repetições anuais e o custo torna-os inviáveis.

Com o advento de modelos simuladores de crescimento e produção de culturas agrícolas, as quantidades de água aplicadas e o momento de rega podem ser testados com significativas reduções de custo, tempo e mão-de-obra, além do que, a estimativa da produção não é influenciada por eventuais fatores externos, alheios ao tratamento aplicado. A simulação permite também, a incorporação no modelo da avaliação da produção ao longo de grandes períodos e as condições econômicas e climáticas de cada período de safra.

O milho constitui um dos principais insumos para o segmento agrícola, sendo utilizado em muitos sistemas e cadeias de produção. Dentre suas utilidades pode-se destacar a nutrição animal, em especial na suinocultura, na avicultura e na bovinocultura de leite. Na alimentação humana, o milho é comumente empregado "in natura" como milho verde, e na forma de subprodutos, como pães, farinhas e massas. Na indústria, o milho é empregado como matéria prima para produção de amido, óleo, farinha, glicose, produtos químicos e na elaboração de formulações alimentícias. Porém, de acordo com Pinazza (1993), pesquisas recentes têm revelado novas utilidades para o cereal, que no passado seriam pouco imagináveis. Este autor estima que hoje existam cerca de 600 produtos onde o milho participa como matéria básica.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo a calibração e validação de um modelo de simulação de produção para a cultura do milho quando submetido a diferentes níveis de irrigação, a fim de disponibilizar uma ferramenta que permita a análise desta cultura com maior rapidez e redução de custos.

4 METODOLOGIA

4.1 Calibração do Modelo de Produção

Stockle & Campbell (1985) sugerem um modelo para previsão da produção que baseia-se na simulação do transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera, vinculada à simulação de crescimento e fotossíntese. O balanço de água no solo é obtido por solução numérica da equação diferencial que descreve o fluxo e o armazenamento de água no solo. A quantidade de água perdida para atmosfera é regulada por uma iteração entre demanda atmosférica, potencial de água no solo e potencial de água na folha, sendo que esta última determina a resistência estomática. A demanda atmosférica é separada em transpiração e evaporação, de acordo com o índice de área foliar e estrutura do dossel.

A simulação da fotossíntese leva em conta fatores ambientais tais como radiação fotossinteticamente ativa, temperatura, concentração de CO₂ na atmosfera e fatores da planta, tais como estrutura do dossel, índice de área foliar e concentração interna de CO₂. A fixação de dióxido de carbono está diretamente relacionada com a acumulação de matéria seca. O crescimento radicular e o desenvolvimento do índice de área foliar são empiricamente relacionados com a acumulação de matéria seca pelo uso de informações coletadas da literatura.

O déficit hídrico e a acumulação de matéria seca são relacionados através do efeito do balanço de água na resistência estomática. A partição de matéria seca entre a parte aérea e as raízes depende do déficit, de forma que o crescimento radicular é aumentado quando o déficit hídrico está presente. O balanço de água e a acumulação de matéria seca são computados para fornecer uma aproximação realística das condições de campo.

A resistência externa e da camada limite ao fluxo de vapor de água, e a resistência da camada limite à transferência de CO₂ são estimadas de acordo com as equações dadas por Campbell (1977), assumindo-se uma temperatura de 20°C, uma velocidade média do vento de 1,5m/s e uma dimensão característica da folha de 0,1m.

A estimativa da produção potencial (CT), é atualizada horariamente ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, através da seguinte expressão:

$$CT = CT + DM.MT \quad (1)$$

onde: CT é a matéria seca acumulada na parte aérea (kg/m²), DM é a produção horária de matéria seca para toda a planta (kg/m²), e, MT é a fração de matéria seca total que compõem a parte aérea.

A produção horária de matéria seca para toda a planta (DM) é calculada de acordo com as equações:

$$DM = 0,34 \cdot \frac{PH}{1000} \quad \text{para o período vegetativo} \quad (2)$$

$$DM = 0,5 \cdot \frac{PH}{1000} \quad \text{para o período de polinização} \quad (3)$$

$$DM = 0,35 \cdot \frac{PH}{1000} \quad \text{para o período de maturação fisiológica} \quad (4)$$

onde PH é a taxa fotossintética de plantas sem déficit hídrico (g/m².s). A evolução dos períodos acima citados é estimada através de uma função auxiliar do modelo (CD) que relaciona os estágios de desenvolvimento da cultura em função das temperaturas máximas e mínimas do período. Os coeficientes 0,34; 0,5 e 0,35 são sugeridos por Monteith (1977) para a cultura do milho, de acordo com o estágio de desenvolvimento da cultura.

Coelho & Dale (1980) propõem uma função de temperaturas máximas e mínimas para correlacionar com a taxa de crescimento relativo do milho, e, conseqüentemente, com os estágios de desenvolvimento da cultura, através das seguintes equações:

$$CD = 0,027 \cdot T - 0,612 \quad \text{para } 6^{\circ}\text{C} \leq T < 21^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

$$CD = 0,086 \cdot T - 1,41 \quad \text{para } 21^{\circ}\text{C} \leq T < 28^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

$$CD = 1 \quad \text{para } 28^{\circ}\text{C} \leq T < 32^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

$$CD = -0,083 \cdot T + 3,67 \quad \text{para } 32^{\circ}\text{C} \leq T < 44^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

$$CD = 0 \quad \text{para } 44^{\circ}\text{C} \leq T \quad (9)$$

onde T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

No modelo de Stockle & Campbell (1985), a função CD é calculada para a temperatura máxima e para a mínima do dia. O valor a ser acumulado na função é a média aritmética das duas. Com base nas informações do experimento para validação do modelo de simulação, a soma térmica calculada neste trabalho para a maturação fisiológica da cultivar Pioneer 3069 foi de 74. Os valores da função CD foram calculados diariamente para o período de desenvolvimento da cultivar Pioneer 3069, utilizando-se valores de temperaturas máximas e mínimas, que foram cedidos pela Estação Meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria, RS. Relacionando-se os três estágios de desenvolvimento das cultivares em análise e os valores de CD ao final de cada um destes estágios, estabeleceram-se os seguintes limites:

$$\text{Periodo Vegetativo } 0 < CD \leq 34 \quad (10)$$

$$\text{Periodo de Polinizacao } 34 < CD \leq 48 \quad (11)$$

$$\text{Periodo de Maturacao } 48 < CD \leq 74 \quad (12)$$

A taxa fotossintética acumulada de plantas sem déficit hídrico (PH), é calculada a partir da seguinte fórmula:

$$PH = PH + (PS \cdot LS + PD \cdot LD) \cdot \Delta t \quad (13)$$

onde: PS é a fotossíntese para folhas iluminadas (g/s.m^2), LS é o índice de área foliar para folhas iluminadas, PD é a fotossíntese para folhas sombreadas (g/s.m^2), LD é o índice de área foliar para folhas sombreadas, e, Δt é o incremento de tempo considerado para o cálculo (3600s).

O índice de área foliar total (LAI) é dado pela soma de LS e LD, e é calculado em termos da função temperatura (CD) conforme Stockle & Campbell (1985), da seguinte forma:

Período Vegetativo ($0 < CD < 34$):

$$LAI = 7,6 \cdot CT \quad \text{para } 0 < LAI < 4,1 \quad (14)$$

$$LAI = 3,6 + 1,15 \cdot CT \quad \text{para } LAI > 4,1 \quad (15)$$

Período de Polinização e Maturação ($34 \leq CD < 74$):

$$LAI = LAI_p - 0,025 \cdot (CD - 34) \cdot F3 \cdot CF \quad \text{para } 34 \leq CD < 74 \quad (16)$$

Período após a Maturação Fisiológica ($CD \geq 74$):

$$LAI = LAI_p - 0,15 \cdot DAS \quad \text{para } CD \geq 74 \quad (17)$$

onde: CD e CT já foram definidos anteriormente, LAI_p é o índice de área foliar no dia anterior, F3 é um índice de stress calculado para área foliar, DAS é o dia em vigor, a contar da semeadura (dias após a semeadura), e CF é um parâmetro de ajuste do modelo de índice de área foliar, que para a cultivar Pioneer 3069 é 1,0873. As faixas de validade de cada eq.(14 a 17) são estabelecidas com base nos dados observados em Santa Maria conforme as eq. 10 a 12.

O índice de área foliar para folhas iluminadas é calculado de acordo com a proposta de Campbell (1977):

$$LS = \frac{[1 - \exp(-K_e \cdot LAI)]}{K_e} \quad (18)$$

onde: K_e é o coeficiente de extinção para uma distribuição foliar angular esférica (apropriada para o dossel do milho), e é dado por:

$$K_e = \frac{0,5}{\text{sen } \phi} \quad (19)$$

onde: ϕ é o ângulo de elevação solar, calculado horariamente de acordo com proposta de Campbell (1981):

$$\text{sen } \phi = \text{sen } \delta \cdot \text{sen } L + \text{cos } \delta \cdot \text{cos } L \cdot \text{cos } 15 \cdot (t_d - t_{sn}) \quad (20)$$

onde: δ é o ângulo de declinação solar, L é a latitude geográfica, t_d é a hora do dia para a qual o cálculo é realizado e t_{sn} é a hora do meio dia solar (no modelo é considerada 12).

O cálculo da declinação solar proposto para o modelo de Stockle & Campbell (1985) segue a metodologia de Swift (1976). A aferição dos valores foi feita ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento da cultura, e considerou-se como padrão, na comparação, as declinações fornecidas pelo Anuário Astronômico do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo. Verificou-se que a diferença média entre os dois métodos para todo o período avaliado foi de $5,71'$. Portanto, em função do pequeno erro encontrado, manteve-se no modelo, o método proposto por Swift (1976).

O índice de área foliar para folhas sombreadas (LD), é dado pela diferença entre o índice de área foliar total (LAI) e o índice de área foliar para folhas iluminadas (LS). A fotossíntese de folhas iluminadas e de folhas sombreadas (PS e PD) é

dada pelo ajuste de uma função potencial com dados de Hesketh & Baker (1969) e utilizada por Stockle & Campbell (1985). A função f_t foi representada, de acordo com proposta de Hofstra & Hesketh (1969), em função da temperatura da folha.

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) tanto de folhas iluminadas quanto de folhas sombreadas pode ser computada através da equação:

$$PAR = 0,5 \cdot S_t \left[K_e \cdot \left(1 - \frac{T_d}{T_T} \right) + \frac{T_d}{T_T} \right] \quad (21)$$

onde S_t é a radiação solar global (W/m^2), T_d é o coeficiente de transmissividade atmosférica difusa, e T_T é o coeficiente de transmissividade atmosférica total.

A radiação solar global (S_t) foi estimada de acordo com Estefanel et al. (1990), que recomenda a utilização do modelo de Angstrom modificado por Prescott e Penman, com coeficientes para cada mês:

$$\underline{S}_t = R_0 \cdot \left(\omega + \xi \frac{\eta}{\mu} \right) \quad (22)$$

onde \underline{S}_t é a radiação solar global ($MJ/m^2.dia$), R_0 é a densidade diária de fluxo de radiação global recebida no topo da atmosfera (cal/cm^2), η é a insolação (h), μ é a duração do período diurno (h) e os parâmetros ω e ξ são estimados através de regressão linear (Estefanel et al., 1990).

O coeficiente de transmissividade atmosférica difusa (T_d) é estimado, a partir da expressão:

$$T_d = T_T \left\{ 1 - \exp \left[\frac{(6 - 5,0,78)(T_T - 0,78)}{T_T} \right] \right\} \quad (23)$$

onde T_T é o coeficiente de transmissividade atmosférica total, que é calculado de:

$$T_T = \frac{S_t}{SR} \quad (24)$$

onde S_t já foi definido, e SR é a radiação solar teórica ($MJ/m^2.dia$), que é dada por:

$$SR = 1360 \cdot \text{sen } \phi \quad (25)$$

O efeito de déficit é introduzido na eq. (13). A taxa fotossintética potencial da planta é multiplicada por um índice de déficit hídrico (fator F), que varia de 0 a 1. Quando o valor de F é superior a 0,95, considera-se que não existe stress ambiental para a cultura e a taxa fotossintética real é idêntica a potencial. Quando F é menor que 0,95, a taxa fotossintética é dada pela expressão:

$$PH_a = PH \cdot F^\phi \quad (26)$$

onde ϕ é um coeficiente de ajuste à cultivar que poderá variar de 0,8 a 1,2 em função das características genotípicas da variedade. No modelo, adotaram-se o valor de 0,85 para a cultivar Pioneer 3069. Para adotar este valor testaram-se os coeficientes de 0,8 a 1,2 com passo 0,05.

Stockle & Campbell(1985), basearam-se na lei de Ohm para calcular o seu fator F, que no modelo é apresentado pela seguinte expressão:

$$F = \frac{\bar{\psi} - \psi_L - Z_1}{TP \cdot (RR + RL)} \quad (27)$$

onde $\bar{\psi}$ é o potencial médio ponderado de água no solo (J/kg), ψ_L é o potencial de água na folha (J/kg), Z_1 é o erro residual do método de Newton-Raphson, utilizado para a determinação do potencial de água na folha ($J/kg - |z_1| < 0,01$), TP é a transpiração potencial da cultura ($kg/s.m^2$), RR é a resistência radicular ao fluxo de água ($m^4/s.kg$), e RL é a resistência foliar ao fluxo de água ($m^4/s.kg$).

O potencial médio ponderado de água no solo ($\bar{\psi}$) é determinado pela expressão:

$$\bar{\psi} = \frac{\sum_{i=1}^M P(i)}{\sum_{i=1}^M RR(i)} \cdot RR \quad (28)$$

onde M são as camadas de solo consideradas no perfil em estudo, $P(i)$ é o potencial de água no solo (J/kg) na camada i , $RR(i)$ é a resistência radicular na camada i ($m^4/s.kg$) e RR é a resistência radicular ao fluxo de água ($m^4/s.kg$). O potencial de água no solo é determinado a partir do ajuste dos dados da curva característica de água no solo, conforme a expressão:

$$P(i) = \psi_e \cdot \left(\frac{\theta(i)}{\theta_s} \right)^{-b} \quad (29)$$

onde ψ_e é o potencial de água no solo no ponto de saturação (J/kg), $\theta(i)$ é o conteúdo volumétrico de água no solo na camada i , θ_s é o conteúdo volumétrico de água em solo saturado ($\theta_s = 0,49$).

Na Tabela 1 encontram-se os valores de $(\theta(i)/\theta_s)$ em função do potencial de água no solo de cinco horizontes característicos do solo podzólico vermelho-amarelo, unidade de mapeamento São Pedro. A média dos cinco horizontes foi utilizada para o ajuste do modelo. O modelo foi ajustado, e pode ser representado pela seguinte expressão:

$$Y = 0,001014559 \cdot X^{-7,024223} \quad (30)$$

TABELA 1 - Valores do conteúdo relativo de água no solo ($\theta_{(i)}/\theta_s$) e sua média em função do potencial de água (J/kg) para o solo podzólico vermelho-amarelo.

Camada (cm)	Potencial de Água no Solo (J/kg)							
	0,00	0,06	0,10	0,31	1,02	3,05	5,08	15,25
0-20	1,03	0,53	0,46	0,35	0,28	0,23	0,22	0,19
21-40	1,00	0,49	0,44	0,35	0,29	0,24	0,23	0,20
41-53	0,94	0,52	0,46	0,37	0,32	0,28	0,27	0,26
54-66	1,04	0,73	0,68	0,58	0,52	0,48	0,47	0,45
67-100	1,00	0,76	0,70	0,60	0,53	0,49	0,47	0,45
Média	1,00	0,61	0,55	0,45	0,39	0,34	0,33	0,31

A resistência radicular para um determinado horizonte i [RR(i)] foi obtida dividindo-se a resistência total do sistema radicular pela densidade de raízes existente na camada i . Os valores de resistência radicular e foliar ao fluxo de água foram calculados, de acordo com Acevedo (1975), através das expressões sugeridas por Stockle & Campbell (1985).

O potencial de água na folha é determinado através de método proposto por Stockle & Campbell (1985). Seja o potencial de água na folha, dado pela seguinte equação:

$$\psi_L = \bar{\psi} - TR \cdot (RL + RR) \quad (31)$$

onde TR é a transpiração real da cultura (kg/s.m²).

Sendo:

$$TR = TP \cdot F \quad (32)$$

Então, substituindo-se (32) em (31), temos:

$$\psi_L = \bar{\psi} - F \cdot TP \cdot (RL + RR) \quad (33)$$

Sendo:

$$F = \frac{\left(s + \gamma \cdot \frac{R_v^0 + R_{va}}{R_e} \right)}{\left(s + \gamma \cdot \frac{R_v - R_{va}}{R_e} \right)} \quad (34)$$

onde s é função da densidade de saturação de vapor de água (g/m³.kg), γ a constante psicrométrica em 20°C e 100kPa (g/m³.K), R_v^0 é a resistência estomática ponderada à transferência de vapor de água para plantas sem déficit (s/m), R_v é a resistência estomática ponderada à transferência de vapor de água real (s/m), R_{va} é a resistência ao fluxo de vapor de água na camada limite (s/m), e, R_e é a resistência combinada para convecção e transferência de calor das radiações de ondas longas (s/m).

Substituindo-se a eq.(34) em (33), obtém-se:

$$\psi_L = \bar{\psi} - \left\{ \frac{\left[s + \gamma \cdot \left(\frac{R_v^0 + R_{va}}{R_e} \right) \right]}{\left[s + \gamma \cdot \left(\frac{R_v - R_{va}}{R_e} \right) \right]} \right\} \cdot TP \cdot (RL + RR) \quad (35)$$

Sendo:

$$R_v = R_v^0 \left[1 + \left(\frac{\psi_L}{\psi_{LC}} \right)^{f_{cultura}} \right] \quad (36)$$

onde $f_{cultura}$ é um fator dependente da cultura utilizada no modelo (milho = 7), ψ_{LC} é o potencial crítico de água na folha (J/kg), o qual ocasiona o fechamento estomático.

Substituindo-se a eq. (36) em (35):

$$\psi_L = \bar{\psi} - \left[\frac{s + \gamma \left(\frac{R_v^0 + R_{va}}{R_e} \right)}{s + \gamma \left(\frac{R_v^0 \left(1 + \left(\frac{\psi_L}{\psi_{LC}} \right)^{f_{cultura}} \right) + R_{va}}{R_e} \right)} \right] \cdot TP(RL + RR) \quad (37)$$

Pela eq. (37), verifica-se que a determinação do potencial de água na folha tem necessidade da aplicação de um método numérico, pois é implícita em ψ_L . Stockle & Campbell (1985) sugerem a utilização do método de Newton-Raphson com erro aceitável menor que 0,01. A resistência estomática ponderada à transferência de vapor de água para plantas sem déficit é dada pela equação:

$$R_v^0 = \frac{LAI}{\left(\frac{LS}{R_s} + \frac{LD}{R_d} \right)} \quad (38)$$

onde LAI, LS e LD já foram definidos anteriormente, e, R_s e R_d são as resistências estomáticas para máxima atividade fotossintética (s/m) de folhas iluminadas e sombreadas respectivamente.

Para o cálculo do fator F, é necessária a determinação da transpiração potencial da cultura que é obtida através da diferença entre a evapotranspiração e a evaporação potencial horária, conforme equação abaixo:

$$TP = ET_p - E_p \quad (39)$$

onde ET_p é a evapotranspiração potencial da cultura segundo Priestley-Taylor ($g/m^2.s$), e E_p é a evaporação potencial do solo para a cultura de milho ($g/m^2.s$).

A estimativa da radiação líquida, da emissividade atmosférica, da nebulosidade, da evaporação potencial do solo para a cultura do milho e do coeficiente de transmissividade difusa para o dossel são calculadas de acordo com a proposta original de Stockle & Campbell (1985).

A temperatura do ar é calculada horariamente ao longo do dia através da interpolação de uma função senoidal, assumindo-se a temperatura máxima às 15h e mínima às 3h. A transpiração real é obtida multiplicando-se o fator F pela transpiração potencial da cultura.

A formulação do modelo de fluxo de água no solo é feita a partir da equação de Richards (1931) para movimento de água unidimensional, com a inclusão de um termo para extração de água pelas raízes. De acordo com Campbell (1985), o "fluxo matricial potencial" (MFP) pode ser utilizado na determinação do fluxo de água no solo. O MFP pode ser expresso por:

$$MFP = \int_{-\infty}^{\psi} K(\theta) \cdot d\psi \quad (40)$$

Supondo:

$$K(\theta) = K_s \cdot \left(\frac{\psi_e}{\psi} \right)^q \quad (41)$$

onde ψ_e é o potencial de água em solo saturado, K_s é a condutividade hidráulica saturada, e q é dado pela expressão:

$$q = 2 + \frac{3}{b} \quad (42)$$

onde b é o fator ajustado para a eq. (30).

A condutividade hidráulica saturada (K_s) foi determinada para o perfil através da média harmônica das condutividades dos cinco horizontes característicos. O valor de K_s utilizado no modelo foi de $0,001 \text{ kg.s/m}^3$.

Substituindo-se a eq. (41) em (42), obtém-se:

$$MFP = \frac{K(\theta) \cdot \psi}{1 - q} \quad (43)$$

O método de Newton-Raphson é utilizado para resolução das equações nos pontos considerados. O balanço de massa em cada ponto é dado por:

$$F_i = f_{i-1} - f_i + u_{i-1} - u_i + \rho_w (\theta_i^{j+1} - \theta_i^j) \frac{(Z_{i+1} - Z_{i-1})}{\Delta t_i} \quad (44)$$

onde i é a camada de solo considerada, j é o tempo, ρ_w é a densidade da água e f_i , u_i e θ são funções não lineares. A solução é obtida encontrando-se o potencial que obtenha $F_i = 0$ para todas as camadas. O fluxo gravitacional é dado por u_i , sendo:

$$u_i = gK(\theta)_i \quad (45)$$

A função f_i , é dada pela expressão:

$$f_i = - \frac{(K(\theta)_{i+1} \cdot \psi_{i+1} - K(\theta)_i \cdot \psi_i)}{[(Z_{i+1} - Z_i) \cdot (1-q)]} \quad (46)$$

Substituindo-se a eq. (46) em (45), obtém-se a seguinte expressão:

$$F = \frac{K(\theta)_i \psi_i - K(\theta)_{i-1} \psi_{i-1}}{(1-q)(z_i - z_{i-1})} - \frac{K(\theta)_{i+1} \psi_{i+1} - K(\theta)_i \psi_i}{(1-q)(z_{i+1} - z_i)} + g(K(\theta)_{i-1} - K(\theta)_i) + \frac{\rho_w (\theta_i^{j+1} - \theta_i^j)(z_{i+1} - z_{i-1})}{2\Delta t} \quad (47)$$

Na eq.(47) as condutividades hidráulicas são calculadas a partir de seus correspondentes potenciais de água da mais recente interação. A solução é, desta forma, através de diferenças. Para encontrar o Jacobiano, deriva-se a função F em relação a cada potencial, conforme as expressões abaixo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_i}{\partial \psi_i} &= \frac{K(\theta)_i}{z_i - z_{i-1}} + \frac{K(\theta)_i}{z_{i+1} - z_i} + \rho_w \frac{(z_{i+1} - z_{i-1})\theta_i}{2b\psi_i \Delta t} - \frac{qgK(\theta)_i}{\psi_i} \\ \frac{\partial F_i}{\partial \psi_{i-1}} &= \frac{-K(\theta)_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} + qg \frac{K(\theta)_{i-1}}{\psi_{i-1}} \\ \frac{\partial F_i}{\partial \psi_{i+1}} &= \frac{-K(\theta)_{i+1}}{z_{i+1} - z_i} \end{aligned} \quad (48)$$

Utilizando-se as eq.(47) e (48) forma-se um conjunto que pode ser solucionado pelo método de Newton-Raphson a fim de estimar o potencial no final do espaço de tempo considerado. A cada nova iteração, uma nova condutividade hidráulica e um novo conteúdo de água foram computados, pela estimativa do novo potencial. O conteúdo de água para cada camada é dado por:

$$\theta(i) = \theta_s \cdot \left(\frac{\psi_e}{\psi(i)} \right)^{1/b} \quad (49)$$

A cada iteração, o erro permissível é conferido, e o processo tem como critério de parada a soma dos valores absolutos do erro para o balanço de massa no perfil inteiro, que tem de ser menor que $10^{-6} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$. As condições de contorno são estabelecidas na parte superior, pelas condições atmosféricas e na inferior como potencial constante. As bases conceituais e a solução numérica são apresentadas passo a passo por Campbell(1985), inclusive com a implementação computacional do método.

De acordo com Stockle & Campbell (1985) o modelo de simulação proposto originalmente, necessita de uma função de distribuição do sistema radicular que reflita de maneira mais adequada o desenvolvimento das raízes para a sua validação em outras condições. Considerando-se as dificuldades de avaliação do sistema radicular em função da sua complexidade, adota-se aqui o modelo de Rasmussen & Hanks (1978), que é dado por:

$$RD = \frac{RD_{MAX}}{1 + RD_1 \cdot \exp \left(\frac{-RD_2 \cdot DA}{DA_{MAX}} \right)} \quad (50)$$

onde RD é a profundidade do sistema radicular em um dia considerado (DA), RD_{MAX} é a máxima profundidade atingida pelo sistema radicular, DA_{MAX} é o dia em que o sistema radicular atinge a máxima profundidade e RD_1 e RD_2 são coeficientes de ajuste para a cultura do milho. Neste trabalho consideraram-se os valores de 13,47 e 4,95 para RD_1 e RD_2 , respectivamente.

4.2 Dados Experimentais

O experimento utilizado para a validação do modelo de produção foi realizado em área experimental do Centro de Ciências Rurais, localizada no Campus da Universidade Federal de Santa Maria, na região fisiográfica da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul. A cultivar de milho (*Zea mays*) Pioneer 3069 foi submetida a quatro níveis de manejo de irrigação em condições de campo. Utilizaram-se, para o experimento, um conjunto de lisímetros de drenagem, que foi construído em fibra de vidro, com dimensões de 1,4 x 0,95m e profundidade de 1,3m, conforme Peiter (1994), protegidos das precipitações pluviométricas por uma cobertura de plástico transparente móvel.

As irrigações foram aplicadas para manter a fração de água disponível (FAD) na profundidade efetiva do sistema radicular das plantas superior a 0,90, 0,75, 0,60 e 0,45. Utilizaram-se três repetições por tratamento, perfazendo doze parcelas. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado. A semeadura foi realizada no dia 02 de janeiro de 1996, com orientação norte-sul. Semearam-se sete plantas por lisímetro, perfazendo uma população de 52.600 plantas.ha⁻¹. A área em torno da casa de vegetação foi cultivada com a cultura de milho, proporcionando uma bordadura de 500m². A cultura atingiu sua maturação fisiológica 120 dias após a semeadura.

O solo da área experimental pertence a unidade de mapeamento São Pedro, classificado como Podzólico vermelho-amarelo, de acordo com seus horizontes, que correspondem às seguintes profundidades: 0-20cm, 21-40cm, 41-53cm, 54-66cm e 67-130cm. No início do ciclo de desenvolvimento, selecionaram-se três plantas por parcela. A evolução da área foliar e senescência foram monitoradas três vezes por semana, durante o ciclo da cultura. A determinação da área foliar foi realizada desde o aparecimento das folhas no cartucho, até o surgimento da bainha. A área foliar das plantas foi calculada através do produto das medidas do comprimento e maior largura de cada folha, multiplicada pelo coeficiente de 0,75 (Stickler et al.,1961). As observações de senescência foram realizadas visualmente, estabelecendo-se uma escala de 0 a 100%, que

correspondiam às folhas totalmente verdes e totalmente senescentes, respectivamente. A colheita foi realizada quando as plantas atingiram a maturação fisiológica. As plantas coletadas foram secas em estufa a 65°C até atingirem peso constante com exceção das sementes. Foram avaliados o peso de sementes e massa seca total.

O controle de água no perfil do solo foi feito três vezes por semana, a partir de 10 dias após a emergência até a colheita. As determinações foram realizadas com sonda de nêutrons HIDROPROBE CPN503DR nos cinco horizontes característicos do perfil. As doses foram aplicadas manualmente ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento da cultura. Para o cálculo da FAD (fração de água disponível) considerou-se para cada camada como limite superior, a quantidade de água retida no solo, previamente saturado, após cessar a drenagem; e, como limite inferior a quantidade de água armazenada, após toda a extração possível realizada por plantas desenvolvidas normalmente, conforme metodologia apresentada por Carlesso (1995). As doses de irrigação utilizadas foram calculadas elevando-se o conteúdo de água no perfil dos limites inferiores estabelecidos pelos tratamentos até o limite superior.

O modelo de simulação necessita, para sua execução, de dados de entrada iniciais e diários. Os dados de entrada iniciais são especificados no item de calibração do modelo de simulação e os dados diários são: temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar global e irrigações e/ou precipitações pluviométricas. Os valores de temperatura máxima e mínima diária para o período de 120 dias a contar de 2 de janeiro de 1996 foram coletados da Estação Meteorológica da UFSM. Os valores de radiação solar global foram estimados com base na eq. (22). As irrigações foram contabilizadas ao longo do período de condução do experimento. As precipitações pluviométricas foram desconsideradas no processo devido a cobertura plástica móvel utilizada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito na metodologia, a produção horária de matéria seca é uma função da atividade fotossintética, que por sua vez é uma função da temperatura, do ângulo de elevação solar, da estrutura foliar e arquitetura do dossel da cultura. Portanto, torna-se imprescindível uma adequada previsão do índice de área foliar para que o modelo tenha uma capacidade de previsão aceitável de massa seca total ao final do ciclo de desenvolvimento.

Na Figura 1 é apresentada a evolução do índice de área foliar observada e simulada através do modelo calibrado ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultivar Pioneer 3069 quando submetida a diferentes níveis de manejo de irrigação. No tratamento com FAD 0,9, verifica-se a maior diferença entre os valores medidos e simulados do IAF a partir de 90 DAS. Isto provavelmente é decorrência das leituras de senescência, as quais foram feitas no trabalho experimental baseando-se em escala visual, o que ter causado discrepâncias nos resultados.

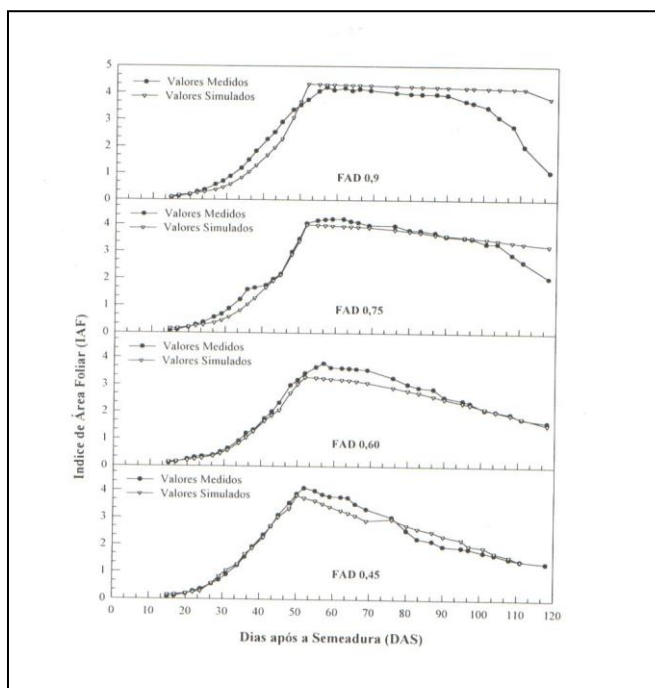


Figura 1 - Evolução do índice de área foliar ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultivar Pioneer 3069.

O modelo possui boa capacidade de previsão do período de máxima área foliar (50 DAS aproximadamente) da cultura, visto que todos os valores simulados encontram-se muito próximos dos valores medidos. Entretanto, a partir de 50 DAS, quando inicia-se a contabilização da senescência, verifica-se desvios maiores dos valores medidos. Os valores

simulados apresentam redução no índice de área foliar em função da quantidade de água aplicada, acompanhando o tratamento referido. Verifica-se que o maior incremento na senescência ocorre nos tratamentos de 0,60 e 0,45 de FAD, isto é, nestes dois tratamentos o processo de senescência é mais acentuado.

Este comportamento concorda com Ritchie (1981) e Carlesso (1995) que apresentam valores de FAD de 0,7 para o início do processo de redução do IAF para a cultura do milho. Assim, pode-se afirmar que o modelo de simulação representa uma adequada rotina para previsão do índice de área foliar para a cultivar Pioneer 3069.

A produção de massa seca total da parte aérea (MST) medida e simulada da cultivar Pioneer 3069 é apresentada na Tabela 2. A redução da produção de massa seca total do tratamento com FAD 0,9 para FAD 0,45 foi de 33% aproximadamente, tanto para valores medidos quanto simulados, o que indica a ocorrência do início do processo de déficit hídrico.

TABELA 2 - Valores de Massa Seca Total Medida (MSTM), Simulada (MSTS), Desvios (%), Produção de Grãos (PG) e Índice de Colheita (IC) para a Cultivar Pioneer 3069.

Tratamento FAD	MSTM ¹ (kg/m ²)	MSTS (kg/m ²)	Desvios ² (%)	PG Medida (kg/m ²)	IC
0.90	1,98	2,14	7,48	0,59	0,30 ³ a
0.75	1,97	2,01	1,99	0,63	0,32 a
0.60	1,46	1,58	7,59	0,47	0,32 a
0.45	1,32	1,42	7,04	0,38	0,29 a
Média			6,02		0,31

¹ Média de três repetições

² Desvio = [(| Valor medido - Valor simulado |) / Valor simulado] . 100

³ Os valores seguidos da mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey (P ≤ 0,05).

Comparando-se os valores de MST medidos e simulados, verifica-se que, em todos os tratamentos, os valores simulados são mais altos que os valores medidos. Isto, provavelmente, é decorrência da influência de outros fatores envolvidos no processo produtivo capazes de causar redução na produtividade de uma cultura, tais como fertilidade do solo, doenças e pragas, entre outros.

O desvio médio entre os valores medidos e simulados de MST para os quatro tratamentos foi de 6,02%. Robaina (1992), cita 10% como desvio médio aceitável, valor também aceito por Stewart & Hagan (1973), Stockle & Campbell (1985), Childs et al. (1977) e Feedes et al. (1978). Arnold & Stockle (1991) citam um erro médio de 14,1% entre os valores medidos e previstos para a cultura do milho. Os valores reduzidos de desvio encontrados provavelmente estão correlacionados à estimativa adequada do índice de área foliar nas diferentes estratégias de irrigação.

Além dos valores de desvios estarem dentro de intervalos aceitáveis para modelos de simulação, eles são da mesma ordem que os valores encontrados por Stockle & Campbell (1985) que verificaram desvios médios de 5,6, 4,4 e 5% para Davis (CA) em 1974, Davis (CA) e Fort Collins (CO) em 1975, respectivamente.

O modelo de Stockle & Campbell (1985) permite somente a estimativa da massa seca total. A estimativa da produção de grãos deve ser feita pela multiplicação da massa seca total produzida na parte aérea (MST) pelo índice de colheita (IC) da cultura e variedade analisada, conforme sugerido por Donald (1962). Na Tabela 2 encontram-se os valores de IC calculados para a cultivar Pioneer 3069 cultivada sob quatro níveis de manejo de irrigação. Verifica-se que os valores tendem a permanecer constantes dentro dos limites de deficiência hídrica ao qual foram submetidos.

De acordo com Deloughery & Crookston (1979), o índice de colheita de algumas variedades de milho apresenta variações em função do nível de déficit hídrico aplicado. Para variedades com esta característica, Stockle & Campbell (1985), sugerem a utilização do índice de stress hídrico acumulado ao longo do ciclo da cultura para estabelecer correlação com o índice de colheita e realizar a previsão da produção de grãos.

Segundo Acevedo (1975), o híbrido de milho Dekalb XL 22 apresenta flutuação do seu índice de colheita em função do déficit hídrico, ao passo que para o híbrido Funks 4444, cultivado por Stewart et al. (1977) não verificou-se esta variação. A variedade Pioneer 3069, portanto, não necessitou de correlação com o índice de déficit hídrico do modelo, pois sua variação, dentro dos limites dos tratamentos aplicados, não é significativa. Entretanto, é possível que em tratamentos onde o déficit hídrico apresente maior intensidade e duração seja necessária a utilização do índice de stress.

O fluxo de água no solo é utilizado, neste modelo, para estabelecer o nível de déficit hídrico e a respectiva redução da produção potencial da cultura. A adequada simulação deste processo é, portanto, fundamental para uma adequada estimativa da produção real horária do milho sob diferentes níveis de manejo.

Na Figura 2 é apresentada a fração de água disponível ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultivar Pioneer 3069, submetida a quatro níveis de manejo de irrigação. Optou-se pela apresentação da FAD e não o conteúdo de água do solo para que a disponibilidade hídrica em função do tempo possa ser avaliada. As frações de água disponível simuladas, apresentadas na mesma Figura, foram calculadas a partir dos conteúdos de água no solo fornecidos pelo modelo de simulação. Verifica-se que em todos os tratamentos, os valores de FAD estimados pelo modelo são bastante próximos dos valores determinados ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. Os desvios máximos entre os valores medidos e os valores estimados de FAD ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura foram de 11,9%, 8,2%, 12,8% e 8,4% para os tratamentos com FAD de 0,90, 0,75, 0,60 e 0,45, respectivamente. Entretanto, os desvios entre as repetições foram, na maior parte do período, maiores que estes valores, conforme demonstram os desvios dos valores calculados. Este fato é decorrência do controle de irrigações que foi feito individualmente em cada lisímetro.

Robaina (1992), apresenta como aceitáveis desvios em torno de 8% para o conteúdo de água no solo. Os desvios

determinados neste trabalho para FAD foram superiores aos citados na literatura, provavelmente em função do modelo de simulação, que considera para o cálculo a homogeneidade do perfil em toda a sua extensão. Como a unidade de mapeamento São Pedro apresenta variabilidade nas propriedades físico-hídricas de suas diferentes camadas, conforme apresentado por Berto (1995) em análise granulométrica do perfil desta unidade, a ocorrência destes desvios é inevitável.

Os desvios médios calculados entre os valores medidos e estimados de FAD para a cultivar Pioneer 3069 foram de 2,6%, 4,3%, 4% e 4,1% para os tratamentos de 0,90, 0,75, 0,60 e 0,45, respectivamente.

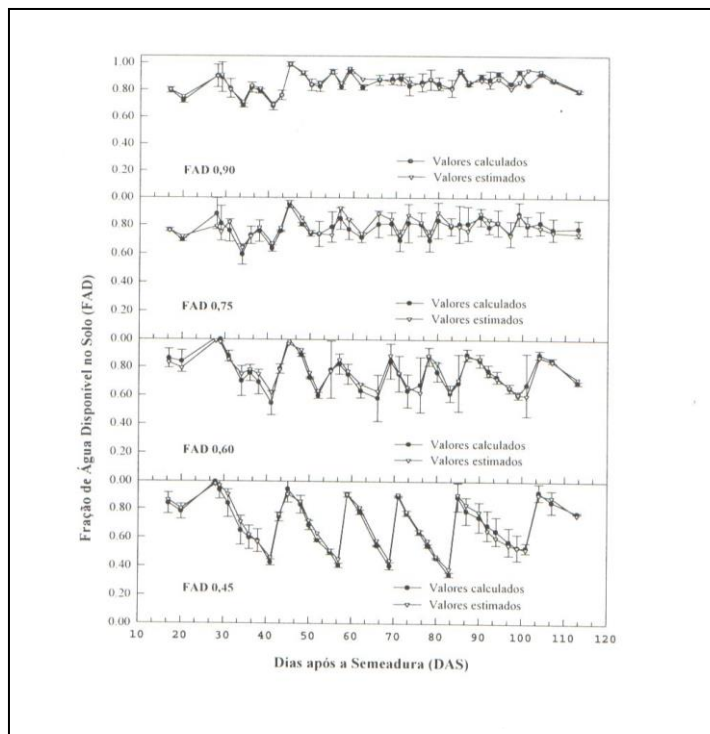


Figura 2 - Variação temporal média da fração de água disponível no solo calculado e estimado pelo modelo de STOCKLE & CAMPBELL (1985) para a cultivar Pioneer 3069, em lisímetros de drenagem. Santa Maria, RS.

Na Figura 2 verifica-se que os tratamentos foram diferenciados em relação ao manejo, pois enquanto a FAD do tratamento bem irrigado (FAD 0,90) tende a permanecer constante ao longo do ciclo da cultura, nos tratamentos com déficit hídrico é possível visualizar a redução progressiva do conteúdo de água do solo e a recarga feita pelas irrigações. Pela variação da FAD é possível afirmar que a demanda atmosférica foi maior no período de 40 a 80 DAS, enquanto que a partir de 80 DAS, o período entre recargas tornou-se maior.

Através da evolução temporal da FAD, pode-se verificar que os tratamentos iniciaram-se aproximadamente em 30 DAS. Portanto, embora o fluxo de água no solo esteja previsto dentro dos padrões aceitáveis para o período de desenvolvimento da cultura, o modelo não é validado para a fase inicial de desenvolvimento da cultura.

6 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos no experimento de validação do modelo de simulação de Stockle & Campbell (1985), pode-se concluir que o mesmo apresenta uma aceitável estrutura de rotinas para previsão da produção de massa seca total de milho quando a cultura é submetida a diferentes níveis de manejo de rega. Desta forma, o modelo pode ser utilizado para a avaliação das conseqüências produtivas e econômicas de diferentes estratégias de irrigação.

Entretanto, o modelo não foi avaliado quanto a sua robustez para: (i) níveis de déficit hídrico diferenciados ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura; (ii) tratamentos com déficit hídrico no período inicial de desenvolvimento da cultura (semeadura a 30 DAS), quando o sistema radicular ainda não está completamente desenvolvido, e, (iii) níveis de déficit hídrico de maior intensidade. Sugere-se, portanto, para trabalhos futuros, a verificação do comportamento do modelo de simulação nestas condições.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, E. *The growth of maize (*Zea mays* L.) under field conditions as affected by its water relations*. Davis, 1975.

- 253p. Tese (Doutoramento) - California State University.
- ARNOLD, J.G., STOCKLE, C.O. Simulation of supplemental irrigation from on-farm ponds. *J. Irrig. Drainage Eng.*, v.117, n.3, p.408-23, 1991.
- BERTO, J.L. *Modelo de simulação de extração da água do solo para a cultura da soja*. Santa Maria, 1995. 100p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria.
- CAMPBELL, G.S. *An introduction to environmental biophysics*. Berlin: Springer-Verlag, 1977.
- CAMPBELL, G.S. Fundamentals of radiation and temperature relations. *Physiological Plant Ecology I. Encyclop. Plant Physiol.*, New Ser. 12A, 1981.
- CAMPBELL, G.S. *Soil physics with basic: transport models for soil-plant systems*. Amsterdam: Elsevier, 1985.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. *Ciênc. Rural*, v.25, n.1, p.183-188, 1995.
- CHILDS, S.W., GILLEY, J.R., SPLINTER, W.E. A simplified model of corn growth under moisture stress. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.20, n.4, p.858-865, 1977.
- COELHO, D.T., DALE, R.F. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development: Planting to silking. *Agronomy Journal*, v.72, p.503-10, 1980.
- DELOUGHERY, R.L., CROOKSTON, R.K. Harvest index of corn affected by population density, maturity rating and environment. *Agron. J.*, v.71, p.557-80, 1979.
- DONALD, C.M. In search of yield. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.*, v.28, p.171-8, 1962.
- EPPERSON, J.E.; HOOK, J.E.; MUSTAFA, Y. Dynamic programming for improving irrigation scheduling strategies of maize. *Agricultural Systems*, v.42, p.85-101, 1993.
- ESTEFANEL, V. et al. Insolação e radiação solar na região de Santa Maria, RS: I - Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. *Ciênc. Rural*, v.20, n.3-4, p.203-18, 1990.
- FEEDES, R.A., KOWALIK, P.J., ZARADNY, H. *Simulation of field water use and crop yield*. New York: John Wiley, 1978. 188p.
- HESKETH, J., BAKER, D. Light and carbon assimilation by plant communities. *Crop Sci.*, v.7, p.285-93, 1969.
- HOFFMAN, G.J., MARTIN, D.L. Engineering systems to enhance irrigation performance. *Irrig. Sci.*, v.14, p.53-63, 1993.
- HOFSTRA, G., HESKETH, J.D. Effect of temperature on the gas exchange of leaves in the light and dark. *Planta*, v.85, p.228-37, 1969.
- HOOK, J.E., THREADGILL, E.D. *Scheduling irrigation for corn in the southeast*. Tifton: USDA,ARS, 1988.
- MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans.- Research Society of London*, v.281, p.277-329, 1977.
- PEITER, M.X. *Comportamento do sorgo granífero (*Sorghum bicolor Moench.*) quando submetido a diferentes níveis de irrigação*. Santa Maria, 1994, 82p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria.
- PINAZZA, L.A. Perspectivas da cultura do milho e do sorgo no Brasil. In: BÜLL, L.T., CANTARELLA, H. *Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba: POTAFOS, 1993. cap.1, p.1-21.
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediuns. *Physics*, v.1, p.318-33, 1931.
- RITCHIE, J.T. Soil water availability. *Plant Soil*, v.58, p.327-38, 1981.
- ROBAINA, A. D. *Estudo experimental e de simulação numérica da aplicação da água na produção das culturas*. São Carlos, 1992. 144p. Tese (Doutoramento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- STEWART, J.I., HAGAN, R.M. Functions to predict effects of crop water deficits. *Journal of Irrigation and Drainage*

Engineering, v.99, n.4, p.421-439, 1973.

STEWART, J.I., DANIELSON, R.E., HANKS, R.J., JACKSON, E.B., HAGAN, R.M., PRUITT, W.O., FRANKLIN, W.T., RILEY, J.P. *Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil*. Utah Water Lab., PRW 6.161-1, 1977.

STICKLER, F.C., WEARDEN, S., PAULI, A.W. Leaf area determination in grain sorghum. *Agron. J.*, v.53, p.187-88, 1961.

STOCKLE, C., CAMPBELL, G. A simulation model for predicting effect of water stress on yield: an example using corn. In: HILLEL, D. *Advances in Irrigation*. New York: Academic Press, 1985. v.3.

SWIFT, L.W. Algorithm for solar radiation on mountain slopes. *Water Resour. Res.*, v.12, p.108-12, 1976.