**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Atributos ecofisiológicos do híbrido DKB-390 e modelo estocástico para
previsão da produtividade de grãos**

Euro Roberto Detomini

Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2008**

Euro Roberto Detomini
Engenheiro Agrônomo

**Atributos ecofisiológicos do híbrido DKB-390 e modelo estocástico para previsão da
produtividade de grãos**

Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

**Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem**

**Piracicaba
2008**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Detomini, Euro Roberto

Atributos ecofisiológicos do híbrido DKB-390 e modelo estocástico para previsão da produtividade de grãos / Euro Roberto Detomini. - - Piracicaba, 2008.
147 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Agrometeorologia 2. Balanço hídrico 2. Distribuição (probabilidade) 3. Ecofisiologia vegetal 4. Milho 5. Modelagem matemática 6. Simulação estatística I. Título

CDD 633.15

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

O Grande Homem

Mantém o seu modo de pensar, independentemente da opinião pública.
É tranquilo, calmo, paciente, não grita e nem desespera.
Pensa com clareza, fala com inteligência, vive com simplicidade.
É do futuro, e não do passado.
Sempre tem tempo.
Não despreza nenhum ser humano.
Causa a impressão dos vastos silêncios da natureza: o Céu.
Não é vaidoso.
Como não anda à cata de aplausos, jamais se ofende.
Possui sempre mais do julga merecer.
Está sempre disposto a aprender, mesmo das crianças.
Vive dentro de seu próprio isolamento espiritual, aonde não chega nem louvor nem censura.
Não obstante, seu isolamento não é frio: Ama – Sofre – Pensa – Compreende.
O que você possui, dinheiro ou posição social; nada significa para ele.
Só lhe importa o que você é.
Despreza a opinião própria tão depressa verifica o seu erro.
Não respeita usos estabelecidos e venerados por espíritos tacanhos.
Respeita somente a verdade.
Tem a mente de Homem e o coração de Menino.
Conhece-se a si mesmo, tal que é, e conhece a DEUS.

Autor desconhecido

Aos meus pais Antônio e Neide

Dedico

Ofereço este trabalho à Margarida Garcia de Figueiredo, que me deu suporte e acompanhou com tamanha ênfase durante minha trajetória, e com quem divido muito dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Gloriosa Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, que por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem e do apoio financeiro (Bolsa) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), proporcionou-me um excelente curso em nível de Doutorado. Por intermédio das disciplinas oferecidas e/ou sugestões valiosas, proveram-me de formação e de conhecimento substancial os professores José Antônio Frizzzone, Sérgio Nascimento Duarte, Rubens Duarte Coelho, Tarlei Ariel Botrel, Jarbas Honório de Miranda, Paulo Libardi, Roseli Leandro, Sônia Stefano Piedade e Marcos Bernardes. Complementaram essa formação os Professores Klaus Reichardt e Donald Nielsen, devido ao despertar de novos horizontes através do *College on Soil Physics*. Proveram-me de apoio irrestrito os Professores Holger Meinke e Durval Dourado Neto – orientador. Em igual teor durante minhas poucas visitas a Campo Grande, apoiaram-me também aqueles que considero como “de casa”, Giovana e Eduardo, Jorge, Breno, Ednéia, D. Maria, e a família do Dr. Antônio Garcia de Figueiredo. Na condução dos experimentos e coleta de dados, o acadêmico Luis Fernando Druzina Massignan auxiliou-me de forma exemplar, tanto na definição das rotinas de trabalho quanto na execução das mesmas, tendo isso sido requerido naqueles chuvosos finais-de-semana. Ainda, proveram-me amizade nessa trajetória os então pós-graduandos Sérgio Weine e Ana Livia, Hudson de Paula, Adalberto e Fabiana, Tales M. Soares, Marcos Emanuel Velloso, Wulf Schmidt, Marconi Baptista, Yanê Gruber, Antônio Tavares, Sheila Leite, Marcelo Baldo, Lygia Romanach, Rosane Nunes de Faria e José Vidal; bem como os acadêmicos de graduação da República Κρυαμα, o “grupo de almoços dominicais” da Piedade, o extensionista Paul Andrews, e os pesquisadores Pedro Abel Vieira Júnior, Allan Peake, Brendan Power, Alastair Doherty, Jyosthena Owens, David Owens, Gabriela Borgognone e Darren, Jose Payero, Simon White, Trevor Hall e Malcolm Wegener. Agradecimentos especiais a Brivaldo de Almeida e a Ceres Cabral de Almeida, pela amizade e por colaborarem na operacionalização do desfecho da fase final do meu curso. Aos funcionários Sandra Silveira de Mello, Beatriz Duarte Novaes, Sílvia Borghesi, Elisabete São João, Helena Chamma, Marcelo Valente, Edson Moraes, Hodair Banzatto Junior, Eliana Garcia e Sílvia Zinsly, pela disposição e bom exemplo de servidão pública. A todos os nomes acima lembrados, espero também que a recíproca tenha sido verdadeira. A quem mais julgar-se merecer e que por ventura não foi aqui mencionado, muito obrigado.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS	15
1 INTRODUÇÃO	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Aspectos técnicos e filosóficos sobre modelagem.....	24
2.2 Simulação estocástica: distribuição normal bivariada e distribuição triangular	25
2.3 A água no sistema solo-planta-atmosfera	30
2.4 Interceptação de radiação solar	38
2.5 Comprimento astronômico do dia.....	41
2.6 Temperatura e desenvolvimento vegetal relativo	47
2.7 Assimilação de dióxido de carbono e fotossíntese	50
2.8 Nitrogênio	58
2.9 Produtividade de grãos e adequação genótipo-ambiente	61
3 MATERIAL E MÉTODOS	68
3.1 Modelo estocástico para estimação da produtividade de grãos.....	68
3.2 Experimentação de campo e obtenção de parâmetros	72
3.2.1 Base física e material genético empregado	72
3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos	74
3.2.3 Manejo e proteção da cultura durante a experimentação.....	75
3.2.4 Fitomassa seca e área foliar	76
3.2.5 Umidade do solo e balanço hídrico.....	77
3.2.6 Interceptação de radiação solar	80
3.2.7 Densidade do solo, curva de retenção e condutividade hidráulica sob saturação.....	82
3.2.8 Elementos e fatores do clima	83
3.3 Programa computacional para a verificação do modelo estocástico	84
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	85

	8
4.1	Elementos e fatores do clima 85
4.2	Fitomassa seca 93
4.3	Área foliar, transmitância e eficiência de uso da radiação..... 100
4.4	Consumo hídrico e coeficientes de cultura 109
4.5	Simulações determinísticas 116
4.6	Simulações estocásticas 122
4.7	Considerações finais 131
5	CONCLUSÕES 132
	REFERÊNCIAS 133
	APÊNDICE 146

RESUMO

Atributos ecofisiológicos do híbrido DKB-390 e modelo estocástico para previsão da produtividade de grãos

O milho é uma das culturas mais importantes do mundo, pois os produtos dele oriundos são largamente utilizados na indústria de amidos, na alimentação animal e humana, e também na produção de energia proveniente de biomassa. Por esse motivo, há sempre um grande interesse em conhecer a potencialidade de uso dos principais materiais genéticos disponíveis em relação aos ambientes em que serão inseridos. Este trabalho teve como objetivo central caracterizar, para o genótipo DKB-390 conduzido sob condição irrigada, atributos ecofisiológicos como área foliar, eficiência de uso da radiação, coeficiente de extinção, coeficientes de cultura, consumo hídrico e componentes de espiga; bem como conceitualizar modelos norteadores de manejo e de planejamento para cultura do milho, no intuito de obter a produtividade de grãos contemplada pelas incertezas climáticas diárias dos principais elementos do clima e suas correlações, para posteriormente se obter as correspondentes necessidades de água e de nitrogênio pela cultura. Para tanto, um experimento de campo foi conduzido, informações da literatura foram revisadas e levantadas, e modelos de previsão foram concebidos para a produtividade de grãos e para as demais variáveis de interesse. Como principais resultados, obteve-se: (i) sob condições adequadas de suprimento hídrico e de nitrogênio, o híbrido DKB-390 requer cerca de 573 litros de água para kg de grão que produz; (ii) o genótipo responde significativamente à segunda cobertura com nitrogênio, caso a cultura seja conduzida sob elevada população de plantas e adequado suprimento hídrico; (iii) a segunda cobertura com nitrogênio promoveu melhor manutenção da área foliar durante a fase de enchimento de grãos; (iv) o incremento da segunda cobertura de nitrogênio promoveu maior eficiência de uso da água pela cultura, bem como um leve aumento nos valores modais do número de grãos por fileira (da espiga) e da massa de 1000 grãos; (v) sob condições de adequado suprimento hídrico, o coeficiente de extinção médio, generalizado para todo o ciclo, é da ordem de 0,4267; valor que tende a ser maior na medida em que o suprimento de nitrogênio é menor; (vi) a eficiência de uso da radiação foi calculada em 3,52 g (fitomassa seca de parte aérea) MJ⁻¹ (radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada), tendo sido menor em função do emprego do regime de nitrogênio mais restritivo; (vii) os coeficientes de cultura obtidos do experimento podem ser utilizados para o manejo da irrigação do híbrido DKB-390, para os principais subperíodos, para que a produtividade não seja penalizada por déficit hídrico; (viii) o índice de colheita (expresso em relação à parte aérea) foi da ordem de 40% (variando entre 37% e 43%) sob condições de suprimento adequado de água e nitrogênio, valores que tenderam a ser maiores quando da restrição da segunda cobertura; (ix) o modelo determinístico proposto simulou adequadamente a evolução da produtividade de fitomassa de parte aérea do híbrido empregado, bem como sua produtividade de grãos sob adequadas condições de suprimento hídrico e de nitrogênio; (x) o modelo determinístico simulou adequadamente as evapotranspirações diárias o consumo hídrico através do método de Penman-Monteith; (xi) o modelo estocástico sugerido mostrou-se satisfatório, mediante o uso da distribuição normal bivariada das variáveis radiação solar e temperatura média do ar, para simular a produtividade de grãos sob condições de suprimento hídrico adequado e sob déficit moderado; e (xii) aparentemente, o modelo estocástico necessita ser melhorado quanto à capacidade de previsão das necessidades hídricas e de nitrogênio, pois tende claramente a subestimar as primeiras e superestimar as segundas.

Palavras-chave: Milho; Distribuição (probabilidades); Ecofisiologia vegetal; Agrometeorologia; Balanço hídrico; Modelagem matemática; Simulação estatística

ABSTRACT

Ecophysiological attributes of hybrid DKB-390 and stochastic model for predicting grain productivity

Maize is one of the world's most important crops, given that the products generated from this cereal are largely used by sectors like starch industry, animal and human nutrition, as well as biomass energy production and refineries. For these reasons, there is frequently a huge interest in knowing the potential adoption of the main available genotypes in relation to the environment in which they will be supposedly subjected. Considering the hybrid DKB-390 under full irrigated conditions, this work has as the central objective to characterize the most important ecophysiological attributes such as leaf area, radiation use efficiency, extinction coefficient, crop coefficients, water use and ear yield components. Additionally, specific goals were to conceptualize models applicable for both management and planning of maize crops in order to predict the grain productivity contemplated by daily climate uncertainties of the driven climate variables (i.e. radiation and temperature) and their correlation, then to achieve the water and nitrogen requirement corresponding to the predicted productivity. A field experiment was carried out, useful information from literature was obtained and reviewed, and models were created towards to support the prediction tools. The following outcomes might be highlighted: (i) under suitable conditions of both nitrogen and water supply, hybrid DKB-390 requires about 573 liters of water per each kilogram of produced grain; (ii) the genotype is significantly responsive to the second nitrogen covering when growing under high plant population and suitable water supply; (iii) the second nitrogen covering has enhanced better leaf area maintenance during grain filling stage; (iv) the second nitrogen covering has led to a better water use efficiency, as well as slightly increased modal values of the number of kernels per row (of ear) and the mass of a thousand kernels; (v) under suitable water supply, averaged extinction coefficient might be generalized as 0.4267 throughout the whole cycle, whereas tending to be higher as the nitrogen supply is restricted; (vi) the radiation use efficiency as calculated as 3.52 g (above-ground dry matter) MJ⁻¹ (intercepted photosynthetically active radiation), being smaller as the nitrogen supply is restricted; (vii) some crop coefficients were found for the main phenological stages and may be adopted for irrigation management of hybrid DKB-390, when one aims to not deplete the productivity; (viii) the harvest index (above-ground based) was found about 40% (varying from 37% to 43%) if water and nitrogen are added sufficiently, and is likely to be higher provided that the second covering is not done; (ix) the proposed deterministic model has performed well when simulating above-ground dry matter time course and its corresponding grain productivity under full and moderated water deficit conditions; (x) by using Penman-Monteith method, the deterministic model apparently simulates well both daily evapotranspiration and water uses; (xi) through bivariate normal distribution of averaged daily solar radiation and air temperature, the suggested stochastic model has simulated grain productivity in a satisfactory way; and (xii) the suggested stochastic model needs to be improved in terms of its water and nitrogen requirement predictability, given that it clearly tends to underestimate the former and overestimate the latter.

Keywords: Maize; Distribution (probability); Agrometeorology; Crop ecophysiology; Water balance; Mathematical modelling; Statistical simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Assimilação potencial de dióxido de carbono em função da radiação solar fotossinteticamente ativa absorvível, para diferentes temperaturas do ar.	53
Figura 2 –	Representação esquemática dos atributos do modelo	68
Figura 3 –	Estádios fenológicos da cultura do milho (FANCELLI, 1986; adaptado de Hanway (1966), e de Nel e Smit, 1978)	73
Figura 4 –	Croqui esquemático do delineamento experimental utilizado.....	74
Figura 5 –	(a) Separação do limbo foliar e das demais partições para mensuração de fitomassa seca; e (b) Integrador de área foliar LI 3000.	76
Figura 6 –	(a) tubos de acesso para a sonda de neutrôns; (b) posicionamento dos tubos. ...	78
Figura 7 –	Realização da contagem (a) padrão (CPSN); e (b) no campo (LSN).	78
Figura 8 –	Simulação da profundidade atingida pelo sistema radicular com o tempo.	79
Figura 9 –	Sensores quânticos (a): barra para mensuração da radiação fotossinteticamente ativa abaixo do dossel; (b) acima do dossel.	80
Figura 10 –	Curva de retenção do solo do experimento.	82
Figura 11 –	Relação entre temperatura média diária do ar e graus-dia, modelada pela função beta.	83
Figura 12 –	Tela do programa computacional gerado.	84
Figura 13 –	Comprimento astronômico do dia e brilho solar em função do dia do ano.....	85
Figura 14 –	Valores observados e calculados de brilho solar.	86
Figura 15 –	Variação, em função do dia do ano e ao longo do ciclo do genótipo DKB-390 (a) da radiação solar global, líquida e fotossinteticamente ativa; e (b) das temperaturas mínima, média e máxima do ar.....	87
Figura 16 –	Déficit de saturação de vapor do ar e pressões de vapor real e de vapor no ponto de saturação.	90
Figura 17 –	Variação da evapotranspiração de referência (equação de Penman-Monteith) e do suprimento de água ao longo do ciclo do genótipo DKB-390.....	92
Figura 18 –	Variação temporal da fitomassa seca de parte aérea da cultura.	97
Figura 19 –	Variação temporal da área foliar e da transmitância ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, para N60 e N90.	100

Figura 20 –	Eficiência de uso da radiação (a) para os tratamentos que receberam apenas a primeira cobertura; (b) para os tratamentos que receberam também a segunda cobertura.	107
Figura 21 –	Umidade do solo em função do perfil para as diferentes datas: (a) N60; e (b) N90.	110
Figura 22 –	Relação empírica entre biomassa de parte aérea e consumo hídrico para os grupos de tratamento N60 e N90.....	112
Figura 23 –	Variação temporal da eficiência de uso da água para N60 e N90.	113
Figura 24 –	Variação das taxas de produtividade de biomassa (simulada) de parte aérea e da produtividade de biomassa acumulada com o tempo para (a) $D_h = 1$; (b) $D_h = 0,75$	118
Figura 25 –	Variação das taxas de produtividade de biomassa (simulada) de parte aérea e da produtividade de biomassa acumulada com o tempo para (a) $D_h = 1$; (b) $D_h = 0,75$	120
Figura 26 –	Histogramas de produtividade de grãos de milho elaborados a partir da distribuição normal bivariada para radiação solar e temperatura, para as situações de suprimento adequado de nitrogênio, bem como de (a) condições hídricas ótimas; (b) condições hídricas ótimas; (c) condições hídricas ótimas e com densidade de semeadura de 5 plantas m^{-1} ; e (d) $D_h = 0,75$	124
Figura 27 –	Histogramas de produtividade de grãos de milho elaborados da distribuição normal bivariada para radiação solar e temperatura, para situações de suprimento sub-ótimo de nitrogênio, bem como de (a) condições hídricas ótimas; (b) condições hídricas ótimas; (c) condições hídricas ótimas e com densidade de semeadura de 5 plantas m^{-1} ; e (d) $D_h = 0,75$	127
Figura 28 –	Histogramas de produtividade de grãos de milho elaborados a partir da distribuição triangular para radiação solar e temperatura, para situações de (a) condições hídricas ótimas e suprimento adequado de nitrogênio; (b) condições hídricas ótimas e suprimento sub-ótimo de nitrogênio; (c) condições hídricas ótimas, suprimento adequado de nitrogênio e densidade de semeadura de 5 plantas m^{-1} ; e (d) suprimento hídrico a 75% do ótimo e suprimento adequado de nitrogênio.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores dos coeficientes empíricos da equação de Angstrom-Preščott utilizados pela FAO (FRÈRE; POPOV, 1979)	46
Tabela 2 –	Média das radiações ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) global (R_g), fotossinteticamente ativa mensurada (R_{FAmen}), fotossinteticamente ativa estimada (R_{FA}) e líquida (R_n) ocorrentes ao longo do ciclo e nos principais períodos do genótipo DKB-390	88
Tabela 3 –	Médias das temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) médias, máximas e mínimas, e amplitude térmica, durante os períodos referentes aos estádios vegetativos, de florescimento e de enchimento de grãos	89
Tabela 4 –	Parâmetros do modelo estatístico que descreve a variação temporal de fitomassa seca de parte aérea dos tratamentos submetidos a $60 \text{ kg (N) ha}^{-1}$...	96
Tabela 5 –	Parâmetros do modelo estatístico que descreve a variação temporal de fitomassa seca de parte aérea dos tratamentos submetidos a $90 \text{ kg (N) ha}^{-1}$...	96
Tabela 6 –	Análise de variância referente à produtividade de grãos de milho (kg ha^{-1}) em função das doses de nitrogênio, dos fungicidas e da casualização dos blocos	93
Tabela 7 –	Médias das produtividades de grãos do genótipo DKB-390 (kg ha^{-1}) obtidas em função dos tratamentos, em ordem decrescente	94
Tabela 8 –	Componentes de produtividade e produtividades estimadas (kg ha^{-1}), em função dos componentes, para os diversos tratamentos do genótipo DKB-390	98
Tabela 9 –	Parâmetros do modelo estatístico obtido para a área foliar em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos não submetidos à segunda cobertura	101
Tabela 10 –	Parâmetros do modelo estatístico obtido para a área foliar em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos submetidos à segunda cobertura ...	101

Tabela 11 –	Análise de variância referente ao índice de área foliar em função das doses de nitrogênio, dos fungicidas, da interação fungicida vs. nitrogênio e da casualização dos blocos, em cinco datas de amostragem	103
Tabela 12–	Parâmetros do modelo estatístico obtido para a transmitância em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos não submetidos à segunda cobertura	104
Tabela 13 –	Parâmetros do modelo estatístico obtido para a transmitância em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos submetidos à segunda cobertura...	104
Tabela 14 –	Consumo hídrico (mm) observado em função dos dias após a emergência (DAE) para os tratamentos submetidos a 60 e 90 kg (N) ha ⁻¹	109
Tabela 15 –	Parâmetros do modelo explanatório, para o consumo hídrico em função do tempo, para os tratamentos não submetidos à segunda cobertura.	111
Tabela 16 –	Parâmetros do modelo explanatório obtido, para o consumo hídrico em função do tempo, para os tratamentos submetidos à segunda cobertura	111
Tabela 17 –	Valores de coeficiente de cultura (Kc) em função de diferentes fases de desenvolvimento da cultura do milho irrigado	115

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

$A_0, \dots, A_9$	Parâmetros empíricos
a_{AP}, b_{AP}	Coefficientes empíricos de Angstrom-Prescott
ABS_N	Extração de nitrogênio ($M L^{-2}$)
AC	Ascensão capilar (L)
ACWg	Amplitude por classe dos valores de produtividade de grãos simulados
Adc	Taxa de assimilação de dióxido de carbono ($L T^{-1}$)
Adc_c	Taxa de assimilação de dióxido de carbono em condições ótimas ($L T^{-1}$)
Adc_N	Taxa de assimilação de dióxido de carbono sob elevadas nebulosidades ($L T^{-1}$)
AF	Área foliar por planta (L^2)
Ahn	Ângulo horário do nascer do sol
Alt	Altitude (L)
a_{SN}, b_{SN}	Parâmetros empíricos de ajuste para a equação da sonda de neutrôns
a_{Th}	Coefficiente empírico composto de Thornthwaite
Awg	Amplitude total dos valores de produtividade de grãos simulados
BOC	Balanço de ondas curtas ($M T^{-3}$)
BOL	Balanço de ondas longas ($M T^{-3}$)
CA	Classe de frequência
CA_{NC}	Última classe de frequência
CH	Consumo hídrico da cultura em condições hídricas ótimas (L)
CHa	Consumo hídrico da cultura em condições hídricas sub-ótimas (L)
CPSN	Contagem padrão da sonda de neutrôns
CUC	Coefficiente de uniformidade de Christiansen
CUE	Eficiência de uso do carbono
CUE_f	Eficiência de uso do carbono à base de fitomassa
D	Drenagem (L)
DAE	Dias após emergência
DAF	Duração de área foliar
dc	Diâmetro do coletor de água (L)
def_{sub}	Deflúvio subsuperficial (L)

def_{sup}	Deflúvio superficial (L)
D_h	Nível de suprimento hídrico
DJ	Dia do ano
Dr	Desenvolvimento relativo
$DRST$	Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre
D_{sem}	Densidade de semeadura (L^{-1})
$E1$	Estádio fenológico 1
$E2$	Estádio fenológico 2
E_{555}	Energia média de um mol de fótons fotossinteticamente ativos ($M L^2 T^{-2} N^{-1}$)
ea	Pressão atual de vapor ($M L^{-1} T^{-2}$)
Ef_{AN}	Eficiência de adubação nitrogenada
es	Pressão de saturação de vapor ($M L^{-1} T^{-2}$)
$es_{máx}$	Pressão máxima de saturação de vapor ($M L^{-1} T^{-2}$)
$es_{mín}$	Pressão mínima de saturação de vapor ($M L^{-1} T^{-2}$)
ET	Evapotranspiração da cultura em condições hídricas ótimas ($L T^{-1}$)
ETa	Evapotranspiração da cultura em condições hídricas sub-ótimas ($L T^{-1}$)
ETo	Evapotranspiração de referência ($L T^{-1}$)
EUA	Eficiência de uso da água ($M L^{-3}$)
Ev	Evaporação ($L T^{-1}$)
EXP_N	Exportação de nitrogênio pelos grãos ($M L^{-2}$)
E_λ	Energia associada ao comprimento de onda ($M L^2 T^{-2}$)
$F(X)$	Função de distribuição de X
$f(X)$	Função densidade de probabilidades de X
$F(X,Y)$	Função de distribuição conjunta de X e Y
$F(Y)$	Função de distribuição de Y
F_{Adc}	Fator de redução da assimilação de dióxido de carbono
FB	Taxa de fotossíntese bruta ($L T^{-1}$)
Fd	Fator de depleção de água no solo
f_i	Função auxiliar de discretização
FL	Taxa de fotossíntese líquida ($L T^{-1}$)
F_{Nub}	Fator de correção para nebulosidade

FO	Frequência “observada”
FO _{CMo}	Maior frequência “observada” por classe
f _{tc}	Fator de tortuosidade e conectividade dos poros
G _{cs}	Fluxo total de calor no solo ($M T^{-3}$)
GD	Tempo térmico (θ)
GDA	Tempo térmico acumulado (θ)
GD _{máx}	Tempo térmico à temperatura ótima de desenvolvimento vegetal (θ)
GR	Requerimento de glucose para elaboração de fitomassa
H	Comprimento astronômico do dia
h	Armazenamento de água no solo (L)
I	Índice térmico empírico de Thornthwaite
IAF	Índice de área foliar
IAF _m	Índice de área foliar médio
IAF _{máx}	Índice de área foliar máximo
IC	Índice de colheita à base de fitomassa seca de parte aérea
IC _T	Índice de colheita à base de fitomassa seca total
k	Coefficiente de extinção de luz
K(θ)	Condutividade hidráulica sob condições não saturadas ($L T^{-1}$)
K ₀	Condutividade hidráulica sob condições de saturação ($L T^{-1}$)
K _c	Coefficiente de cultura
K _{c0}	Coefficiente de cultura inicial
K _{c máx}	Máximo coeficiente de cultura
K _p	Constante de Plank ($M L^2 T^{-1}$)
K _y	Fator de resposta da cultura à água
L	Lâmina de irrigação (L)
LI	Limite inferior da classe de frequência
LI ₀	Limite inferior da primeira classe de frequência
LI _{CMo}	Limite inferior da classe que apresenta a maior frequência “observada”
LS	Limite superior da classe de frequência
LSN	Leitura de água no solo feita pela sonda de neutrôns
LS _{NC}	Limite superior da última classe de frequência

M_{1000}	Massa de mil grãos (M)
M_o	Moda
M_{oWg}	Moda dos valores simulados de produtividade de grãos
n	Tamanho da amostra
m, v, α	Parâmetros empíricos da equação de van Genuchten
N_1	Variável auxiliar 1
N_2	Variável auxiliar 2
$N60$	Grupo de tratamentos submetidos à primeira cobertura com nitrogênio
$N90$	Grupo de tratamentos submetidos à primeira cobertura com nitrogênio
NC	Número de classes de frequência
N_{ep}	Número de espigas por planta
N_{fe}	Número de fileiras por planta
N_{gf}	Número de grãos por fileira
N_i	Número de iterações
N_s	Fornecimento relativo de nitrogênio do solo
$N_{Wg \in Ca_i}$	Número de valores simulados que pertencem à i-ésima classe de frequência
P	Pressão atmosférica ($M L^{-1} T^{-2}$)
Plantas C3	Plantas que apresentam ciclo metabólico de Calvin-Benson
Plantas C4	Plantas que apresentam ciclo metabólico de Hatch-Slack
PO	Probabilidade “observada”
Pop	População de plantas (L^{-2})
PP	Precipitação pluvial (L)
q	Fluxo de água no solo ($L T^{-1}$)
Q_N	Recomendação de nitrogênio ($M L^{-2}$)
R	Taxa de respiração ($L T^{-1}$)
r	Distância entre o centro do pivô e o ponto de coleta (L)
R_{ab}	Fluxo de radiação absorvível ($M T^{-3}$)
R_{Adc}	Relação entre taxas de assimilação de dióxido de carbono
R_d	Fluxo de radiação solar global incidente no topo do dossel ($M T^{-3}$)
RET_N	Retorno de nitrogênio para o solo ($M L^{-2}$)
RFA	Fluxo de radiação fotossinteticamente ativa

RFA_0	Fluxo de radiação fotossinteticamente ativa incidente no dossel ($M T^{-3}$)
RFA_{ac}	Fluxo acumulado de radiação fotossinteticamente ativa interceptada ($M T^{-3}$)
RFA_{foton}	Fluxo quântico ($N L^{-2} T^{-1}$)
RFA_I	Fluxo de radiação fotossinteticamente ativa interceptada ($M T^{-3}$)
RFA_t	Fluxo de radiação fotossinteticamente ativa transmitida ($M T^{-3}$)
R_g	Fluxo de radiação solar global ($M T^{-3}$)
R_{gc}	Fluxo de radiação solar global em dias extremamente claros ($M T^{-3}$)
R_{gN}	Fluxo de radiação solar global em dias extremamente nublados ($M T^{-3}$)
RGR	Taxa de desenvolvimento relativo (T^{-1})
RI	Razão de insolação
R_n	Fluxo de radiação líquida para a vegetação ($M T^{-3}$)
R_{ns}	Fluxo de radiação líquida para o solo ($M T^{-3}$)
R_s	Coefficiente de respiração específica
R_T	Fluxo de radiação solar global incidente no topo da atmosfera ($M T^{-3}$)
RUE	Eficiência de uso da radiação ($M^2 L^2 T^{-2}$)
RUE_c	Eficiência de uso da radiação à base de carboidrato ($M^2 L^2 T^{-2}$)
RUE_g	Máxima eficiência de uso da radiação à base de carboidrato ($M^2 L^2 T^{-2}$)
S_e	Espaçamento da cultura (L)
Ses	Declividade da curva de pressão de vapor ($M L^{-1} T^{-2} \theta^{-1}$)
t	Tempo (T)
T	Temperatura do ar média do dia (θ)
$T1, \dots, T8$	Tratamento 1, ..., Tratamento 8
T_{-3d}	Temperatura do ar média dos três dias anteriores (θ)
TCC	Proporção de carbono na fitomassa
$TD_{máx}$	Temperatura crítica máxima para o desenvolvimento vegetal (θ)
$TD_{mín}$	Temperatura crítica mínima para o desenvolvimento vegetal (θ)
TD_{op}	Temperatura ótima para o desenvolvimento vegetal (θ)
TFC	Proporção de carbono na glucose
$T_{máx}$	Temperatura do ar máxima do dia (θ)
$T_{mín}$	Temperatura do ar mínima do dia (θ)

T_N	Teor de nitrogênio na proteína
T_{Nop}	Teor de nitrogênio nas outras partes
T_{PB}	Teor de proteína bruta nos grãos
u	Umidade de grãos
U	Número pseudo-aleatório
U_1	Número pseudo-aleatório 1
U_2	Número pseudo-aleatório 2
U_c	Número pseudo-aleatório crítico
$UR_{máx}$	Umidade relativa do ar máxima
$UR_{mín}$	Umidade relativa do ar mínima
V_2	Velocidade do vento a 2 metros de altura ($L\ T^{-1}$)
V_c	Volume de água coletado no ponto de coleta (L^3)
v_c	Velocidade de propagação da radiação ($L\ T^{-1}$)
$V_{máx}$	Valor máximo
$V_{mín}$	Valor mínimo
VPD	Déficit de saturação de vapor ($M\ L^{-1}\ T^{-2}$)
W_g	Produtividade de grãos ($M\ L^{-2}$)
W_{gd}	Produtividade deplecionada de grãos ($M\ L^{-2}$)
$W_{g_{máx}}$	Valor máximo simulado para a produtividade de grãos
$W_{g_{mín}}$	Valor mínimo simulado para a produtividade de grãos
W_n	Produtividade final de parte aérea ($M\ L^{-2}$)
W_{op}	Fitomassa seca de outras partes ($M\ L^{-2}$)
W_{pa}	Taxa de produção de fitomassa de parte aérea ($M\ L^{-2}\ T^{-1}$)
W_{pad}	Taxa de produção de fitomassa deplecionada de parte aérea ($M\ L^{-2}\ T^{-1}$)
X	Variável aleatória X
Y	Variável aleatória Y
z	Profundidade do solo (L)
Z	Variável reduzida da distribuição normal
Φ	Latitude
Θ	Fator de peso no cálculo da pressão de saturação de vapor
$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$	Parâmetros empíricos

ε	Erro
γ	Constante psicrométrica da água ($M L^{-1} T^{-2} \theta^{-1}$)
$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$	Parâmetros empíricos
ϕ_m	Potencial mátrico (L)
ϕ_T	Potencial total (L)
$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$	Parâmetros empíricos
λ	Comprimento de onda (L)
λ_{ab}	Fração absorvível da radiação fotossinteticamente ativa
λ_I	Fração interceptada da radiação solar incidente no topo do dossel
λ_{PAR}	Fração fotossinteticamente ativa da radiação solar global
λ_r	Albedo
μ_{Rg}	Média de radiação solar global
μ_T	Média de temperatura
μ_{Wg}	Média dos valores simulados de produtividade de grãos
θ	Umidade do solo à base volumétrica
ρ	Coeficiente de correlação de Pearson
σ	Desvio-padrão
θ_r	Umidade residual
σ_{Rg}	Desvio-padrão de radiação solar global
θ_s	Umidade de saturação
σ_T	Desvio-padrão de temperatura
σ_{Wg}	Desvio-padrão dos valores simulados de produtividade de grãos
σ_{xy}	Covariância de X e Y
τ	Transmitância
ω	Saturação relativa
$\varpi_1, \varpi_2, \varpi_3$	Parâmetros empíricos
ζ	Declinação solar
ξ_1, ξ_2	Coeficientes empíricos da equação do balanço de ondas longas

1 INTRODUÇÃO

O milho é uma das culturas mais importantes do mundo, pois os produtos dele oriundos são largamente utilizados na indústria de amidos, na alimentação animal e humana, e também na produção de energia proveniente de biomassa. Por esse motivo, há sempre um grande interesse em conhecer a potencialidade de uso dos principais materiais genéticos disponíveis em relação aos ambientes em que serão inseridos. A experiência prática de técnicos e produtores rurais já revela um grande domínio sobre a produção desse cereal. Por outro lado, a pesquisa é a principal geradora de informação norteadora de intervenção na lavoura.

A título de ilustração, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de grãos de milho, ocupando uma área de 12,964 milhões de hectares para produzir 42,514 milhões de toneladas por ano, resultando em uma baixa produtividade média de, aproximadamente, 3279 kg ha^{-1} , sendo 3295 kg ha^{-1} e 3233 kg ha^{-1} as médias dos períodos de safra e safrinha, respectivamente (CONAB, 2008). A produção total brasileira é nove vezes menor que a dos Estados Unidos, que utiliza uma área no máximo três vezes maior para a produção (FAO, 2007).

Parte dessa ineficiência nacional é explicada pelo menor potencial intrínseco do Brasil em relação aos EUA, já que o último apresenta maior fluxo de radiação solar disponível na principal estação de cultivo, maiores latitudes das regiões produtoras (que permitem maiores populações) e ainda solos com maior capacidade de armazenamento de água. Outra parte da ineficiência pode ser explicada pela má adequação genótipo-ambiente, às vezes em conjunto com o inadequado manejo de água em áreas irrigadas. Uma terceira parte poderia vir da carência de pesquisas ecofisiológicas aplicadas à cultura de milho, das quais se extrai, por exemplo, atributos como interceptação luminosa, assimilação de carbono, evapotranspiração, componentes de espiga, área foliar e biomassa; informações que devem subsidiar a prática da adequação genótipo-ambiente. Finalmente, uma outra fração seria ainda explicada pelas externalidades sócio-econômicas. A pesquisa deve se encarregar pela primeira e terceira partes, e a extensão rural pela segunda.

A relação entre as variáveis climáticas e a produção agrícola é complexa, devido as primeiras exercerem influência em todo o ciclo da cultura, das mais diferentes formas. A conexão e a compreensão dessas relações podem ser abordadas através de experimentação de campo e modelagem, as quais reúnem equações matemáticas, associadas ou não a componentes estatísticos, visando responder uma determinada questão de interesse (ex.: a magnitude de uma variável de interesse) ou ainda aferir o instrumento (o modelo) para outros usos.

Uma aplicação típica de modelos de produtividade agrícola ocorre quando se visa obter a otimização de uso de recursos, como terra e água. Se um economista ou engenheiro pretende realizar uma análise multiobjetivo para especificar quanto de cada cultura deverá ser plantado e em que época, visando obter máximo lucro e sustentabilidade ao longo do projeto, este profissional dependerá essencialmente de um modelo de produtividade para cada cultura. Sua análise e, conseqüentemente, o sucesso do projeto, serão tão melhores quanto mais refinados e embasados forem os modelos; não só os agrícolas como também os econômicos e sociais. Isso justifica a existência e a continuidade da área de pesquisa denominada modelagem.

Outro exemplo, o cultivo de milho é amparado por resoluções Federais que prevêem indenizações por parte de eventos climáticos inesperados (ex.: granizo, seca, vendaval). Cita-se a resolução nº 2403/97, que ampara culturas como algodão, arroz, feijão, milho e soja, desde que sejam cultivadas em áreas pertencentes ao zoneamento agrícola. Ainda, somente serão considerados válidos para fins de PROAGRO (Programa de Garantia da Atividade Agropecuária), para essas culturas, os produtores que optem por aplicar as recomendações técnicas referentes ao zoneamento implantado pelo Ministério da Agricultura e do Abastecimento, contemplando novo cronograma de semeadura, combinado com os materiais genéticos e grau de aptidão dos solos.

Como os cultivos agrícolas são extremamente dependentes das variáveis climáticas, eventos climatológicos adversos podem causar prejuízos nos cultivos. Torna-se importante, portanto, o planejamento baseado em uma projeção que abrange os principais valores de desempenho da cultura, quer seja, máximos, mínimos e modais. Para o caso de atributos como produtividade e necessidades de água e nitrogênio, a elaboração de modelos baseados em premissas físico-biológicas auxilia na correta quantificação e alocação de recursos para o planejamento da inserção de determinada cultura em um ambiente, restando ainda verificar se tal projeção não sofre objeções das condições físicas, topográficas e de fertilidade dos solos.

Este trabalho tem como objetivo central caracterizar, para o genótipo DKB-390 conduzido sob condição irrigada, atributos ecofisiológicos como área foliar, eficiência de uso da radiação, coeficiente de extinção, coeficientes de cultura, consumo hídrico e componentes de espiga; bem como conceitualizar modelos norteadores de manejo e de planejamento para a cultura do milho, no intuito de obter a produtividade de grãos contemplada pelas incertezas climáticas diárias dos principais elementos do clima e suas correlações, para posteriormente se obter os correspondentes requerimentos de água e de nitrogênio pela cultura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos técnicos e filosóficos sobre modelagem

O uso de modelos em agricultura é datado desde os primeiros cultivos da história da humanidade. Naquele período, já existia um modelo mental norteando que, plantando-se a cultura de uma determinada forma e em uma determinada época, haveria um certo desenvolvimento vegetal que levaria ao ponto de colheita dessa cultura em outra época. Isso foi melhorado com o passar do tempo pelos agricultores, que refinaram o modelo baseando-se em suas próprias experiências e observações. Já no século retrasado, estudiosos como Justus von Liebig e Carl von Wulffen concederam uma abordagem mais estruturada aos modelos, introduzindo o conceito de dinâmica dos sistemas, a partir dos quais seria possível compreender a interdependência de variáveis nos sistemas agrícolas e a ciclagem de nutrientes em função de três parâmetros básicos: quantidade, intensidade e eficiência (de WIT, 1990). A partir das décadas de 40 e 50, trabalhos mais elaborados vieram então a formalizar o que hoje seria o alicerce da modelagem em agricultura (ZADOCKS; RABBINGE, 1985).

Quanto mais complexo, mais explica e a pouco se aplica um modelo; porém, quanto menos aplicável, menos desejável ele é. Se esta visão persiste como válida, contribui-se para dissociar ciência de engenharia e vice-versa, ao invés de sintetizar as áreas do conhecimento rumo à melhoria da performance dos sistemas biológicos. Uma metodologia que deixa de ser desafiada, ativamente discutida e então modificada, pode significar o aceite definitivo dos diversos paradigmas existentes, ou por outro lado pode vir a se tornar esquecida e inútil com o tempo (MEINKE, 1996). Dessa forma, os modelos são definidos como um conjunto de equações matemáticas que representam, quantitativamente, as suposições relativas a um sistema real. Estes modelos têm como objetivo o avanço científico com base em uma análise de agregação dos diversos componentes do sistema estudado, possibilitando, assim, uma representação simplificada e organizada de atributos e processos do mundo real (THORNLEY; JOHNSON, 1990).

Tais premissas permitem criar a hipótese de que certas variáveis de interesse possam ser simuladas, a exemplo da produtividade de grãos de milho e das necessidades de água e de nitrogênio correspondentes. Por exemplo, se as exigências hídricas de uma cultura são requisitadas para uma determinada situação, a necessidade de irrigação pode ser obtida como consequência, diante da modelagem dos regimes pluviométricos (GHAHRAMAN; SEPASKHAH, 2004).

2.2 Simulação estocástica: distribuição normal bivariada e distribuição triangular

Quando de um modelo se obtém apenas um resultado possível, diz-se que este modelo é determinístico. Para situações nas quais as externalidades ou as incertezas exerçam menor influência no resultado final, a aplicação dos modelos determinísticos pode ser cabível e de grande aceitação como, por exemplo, no dimensionamento de sistemas de irrigação, na regulação de máquinas agrícolas, na mistura de reagentes químicos, ou ainda na recomendação de adubação de solos “homogêneos”. Por outro lado, as variáveis de interesse podem apresentar-se extremamente variáveis quanto a seus valores. Um procedimento estocástico viria a contemplar as incertezas ou variabilidades presentes nesse rol de valores, fazendo com que estes apresentassem não apenas um único resultado possível, mas sim várias possibilidades, cada uma destas associada a uma probabilidade de ocorrência. Os procedimentos estocásticos podem ser aplicados via cadeias de Markov (OCHOLA; KERKIDES, 2003; KELLER FILHO et al., 2006), análises espaço-temporais (TIMM et al., 2003), ou método de Monte Carlo (FIGUEIREDO et al., 2007).

A temperatura do ar diária em uma determinada localidade, por exemplo, pode apresentar infinitas possibilidades de ocorrência de valores. Disso exposto, há a possibilidade tanto de ocorrer o valor modal (o mais freqüente) quanto qualquer outro, sendo maior a probabilidade de ocorrer o primeiro, em relação aos demais. Como cada valor da variável contínua apresenta uma probabilidade de ocorrência, o conjunto dos valores pode ser eventualmente expresso por uma função característica das probabilidades. O método de Monte Carlo consiste em inverter a função de probabilidades, bastando-se conhecer o valor das probabilidades e explicitar a função para que haja o início da simulação (FIGUEIREDO et al., 2007).

A amostragem de um valor aleatório é necessária para que se inicie o processo de simulação Monte Carlo. Para tanto, deve-se realizar a geração prévia de um grande número de números pseudo-randômicos (“números aleatórios” ou “probabilidades”) para que estes, ao invés de serem correspondentes a uma distribuição desconhecida “a priori”, sejam correspondentes ao ajuste de uma distribuição (ex.: normal), da qual deverão ser amostrados o mesmo número de valores das variáveis de interesse. Em caso de simulações visando-se obter produções diárias de biomassa em função de valores diários de temperatura ou radiação solar, a geração pode ser feita para todos os dias do ciclo (DETOMINI et al., 2006).

A geração de números aleatórios deve ser executada de tal forma que estes sejam uniformemente distribuídos, ou seja, que a probabilidade de ocorrência de cada número gerado

seja teoricamente a mesma. Desenvolvido por Matsumoto e Nishimura (1998), o Mersenne-Twister é considerado o melhor algoritmo desenvolvido para essa finalidade, vindo como padrão nos principais pacotes estatísticos (ex.: R 5.2); embora seja possível também optar por outros algoritmos, como o de Wichmann e Hill (1982) ou o de Marsiglia e Zaman (1994).

Denomina-se “iterações” o número de vezes em que um número pseudo-randômico é gerado. Minimiza-se o erro (ϵ) da simulação quanto mais iterações (N_i) houver, dependendo do valor do desvio-padrão da variável aleatória (σ) em questão, pois (PROJECTWARE, 2007):

$$\epsilon = \frac{3 \cdot \sigma}{\sqrt{N_i}} \quad (1)$$

Dentre as diversas distribuições de probabilidades para variáveis aleatórias, discretas ou contínuas, a distribuição normal é a mais importante sob a ótica do conhecimento agrônomo, pois um grande número de fenômenos são estudados por intermédio dessa distribuição, e porque é a forma limite de diversas distribuições. Idealmente, uma distribuição é adotada para um conjunto de dados se estes descreverem apropriadamente tal distribuição. Isso pode ser verificado por testes como o do Qui-quadrado (paramétrico) ou o de Kolmogorov-Smirnov (não paramétrico). Porém, pelo teorema do limite central, se a amostra é muito grande ($n \rightarrow \infty$), a variância é minimizada porque $(\sigma^2/n) \rightarrow 0$ (tende a zero), fazendo com que a variável de interesse tenda a seguir distribuição normal [$\sim N(\mu, \sigma^2/n)$], em forma de sino mais acentuada, mesmo para populações não-normais (DEVORE, 2006, p.209).

Já a explicitação de uma função de probabilidades pode não ser tarefa das mais simples, principalmente para aquelas assintóticas ou multivariadas. A função de probabilidades genérica para qualquer distribuição bivariada é assim obtida:

$$F(X, Y) = F(X) \cdot F(Y) + \sigma_{xy} \quad (2)$$

em que $F(X, Y)$ é a probabilidade de ocorrer Y para um dado X ; $F(X)$ é a probabilidade de ocorrer X ; $F(Y)$ é a probabilidade de ocorrer Y ; e σ_{xy} é a covariância existente entre X e Y . No caso da distribuição normal bivariada, o uso da eq. (2) requer passos morosos e complexos, algumas vezes imprecisos, para a realização da amostragem das variáveis X e Y .

Um artifício simples para a obtenção de simulações via distribuição normal bivariada é a utilização das transformadas de Box-Muller para se obter as variáveis auxiliares 1 e 2 (N_1 e N_2), as quais dependem da geração prévia de dois números pseudo-aleatórios (U_1 e U_2 ; independentes e uniformemente distribuídos) conforme o seguinte procedimento (BOX; MULLER, 1958; p.610):

$$N_1 = [-2 \cdot \ln(U_1)]^{0.5} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot U_2) \quad (3)$$

$$N_2 = [-2 \cdot \ln(U_1)]^{0.5} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot U_2) \quad (4)$$

Em outras palavras, se há dois números aleatórios uniformemente distribuídos U_1 e U_2 , então as variáveis aleatórias-padrão normalmente distribuídas podem ser descritas por N_1 e N_2 , respectivamente, de acordo com as equações (3) e (4). Isso ocorre porque a distribuição qui-quadrado com dois graus de liberdade é uma variável aleatória facilmente gerada, ou seja, se duas variáveis seguem distribuição normal e são independentes, elas também seguem distribuição qui-quadrado. A geração é independente, mas as variáveis podem apresentar correlação.

Por exemplo, se a pretensão é simular valores de radiação solar e temperatura para cada dia do ano, o primeiro passo seria gerar dois valores pseudo-aleatórios (U_1 e U_2 , necessariamente entre 0 e 1), repetindo-se este passo N_i vezes (ex.: $N_i = 10000$). Isso significa que existirão 10000 valores para U_1 ($^1U_1, ^2U_1, \dots, ^{10000}U_1$) e mais 10000 para U_2 ($^1U_2, ^2U_2, \dots, ^{10000}U_2$), para cada dia do ano. Logo, ter-se-á, conseqüentemente, $^1N_1, ^2N_1, \dots, ^{10000}N_1$; e também $^1N_2, ^2N_2, \dots, ^{10000}N_2$.

Como a radiação solar governa praticamente todos os processos na Terra, tal variável pode ser gerada primeiramente. Para a i -ésima variável auxiliar-1 computada (iN_1), tem-se o i -ésimo valor de radiação solar (iR_g) gerado para um dia qualquer (HOGG; CRAIG, 1978):

$$^iR_g = \mu_{R_g} - \sigma_{R_g} \cdot ^iN_1 \quad (5)$$

em que μ_{R_g} e σ_{R_g} são a média e o desvio-padrão da radiação solar em um dia qualquer. É válido observar que a eq. (5) nada mais é do que a inversão da equação que expressa a variável reduzida (ou padronizada) Z em função da média, do desvio-padrão e do valor da variável X (neste caso, a radiação solar), sendo $Z \sim N(0,1)$.

As propriedades da distribuição normal univariada são: (i) a função densidade de probabilidade $f(X)$ é simétrica em relação à média $X = \mu$ e $f(z)$ é simétrica em relação à média $Z = 0$; (ii) $f(x)$ tem ponto de máximo para $X = \mu$ e $f(z)$ para $Z = 0$; (iii) $f(x)$ tende para zero, se x tende para $\pm \infty$ e $f(z)$ tende para zero, se z tende para $\pm \infty$; (iv) $f(X)$ tem dois pontos de inflexão, cujas abscissas valem $\mu - \sigma^2$ e $\mu + \sigma^2$, sendo que para $f(z)$ as abscissas valem, respectivamente, -1 e 1.

Em função da i -ésima variável auxiliar-2 computada (iN_2), da média e o desvio-padrão da temperatura média do ar (μ_T e σ_T , respectivamente) de um determinado dia, do valor de R_g computado na eq. (5), e da correlação (ρ) existente entre as variáveis R_g e T do mesmo dia, um valor de temperatura (iT) pode ser obtido a partir da seguinte expressão (HOGG; CRAIG, 1978):

$${}^i T = \left[\mu_T + \left(\rho \cdot \frac{\sigma_T}{\sigma_{Rg}} \right) \cdot ({}^i Rg - \mu_{Rg}) \right] + (1 - \rho^2)^{0.5} \cdot \sigma_T \cdot {}^i N_2 \quad (6)$$

Portanto, Rg e T são gerados Ni vezes para cada dia do ano e, conseqüentemente Ni valores são computados para as variáveis que dependem de Rg e/ou T. A verificação da normalidade bivariada pode ser realizada através dos coeficientes de assimetria e curtose, ao passo que o teste de Barlett pode ser executado para se verificar a homogeneidade de variâncias dos valores simulados em relação aos observados, permitindo assim identificar o tipo de simulação que melhor reproduz os dados observados. Conforme demonstrado por Martin et al. (2007), os quais trabalharam em uma escala diária para a produtividade soja, a simulação estocástica de dados com distribuição normal bivariada (radiação fotossinteticamente ativa e temperatura) é adequada e superior às simulações individuais das variáveis por distribuição triangular ou normal a 1,96 desvios padrão da média, pois as duas últimas apresentaram maior índice de rejeição.

A média e o desvio-padrão das variáveis Rg e T podem ser assim calculadas:

$$\mu_{Rg} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n Rg_i \quad (7)$$

$$\delta_{Rg} = \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (Rg_i - \mu_{Rg})^2 \right]^{0.5} \quad (8)$$

$$\mu_T = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n T_i \quad (9)$$

$$\delta_T = \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (T_i - \mu_T)^2 \right]^{0.5} \quad (10)$$

em que n é o tamanho da amostra; Rgi e Ti são os i-ésimos valores computados de radiação e temperatura, respectivamente, de um mesmo dia da série histórica.

O coeficiente produto-momento de Pearson pode ser utilizado para medir a correlação entre as variáveis, ou seja, a “força” e a direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas. Considerando-se uma amostra (MOORE, 1995; p.111):

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n [(Rg_i - \mu_{Rg}) \cdot (T_i - \mu_T)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Rg_i - \mu_{Rg})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \mu_T)^2}} \quad (11)$$

Os valores de ρ variam entre -1 e 1. Para variáveis independentes, $\rho = 0$. Já a covariância depende da correlação e avalia “como” as variáveis dependentes caminham juntas, independente do tamanho da amostra (WONNACOTT; WONNACOTT, 1985; p.132).

Caso não se disponha de um histórico das variáveis aleatórias, recorre-se à informação de caráter prático, ou que seja proveniente da opinião de um “especialista” no assunto, no sentido de se obter os valores necessários à simulação de uma variável que apresente distribuição de probabilidades triangular; a qual é usada para descrever subjetivamente a população de uma variável contínua. Essa distribuição apresenta três elementos-chave: moda (Mo , referente a um valor supostamente “mais provável”), máximo ($V_{máx}$) e mínimo ($V_{mín}$). O cálculo do número aleatório crítico (Uc) pode ser então obtido pela seguinte expressão (FRIZZONE, 2005; p.238):

$$Uc = \frac{Mo - V_{mín}}{V_{máx} - V_{mín}} \quad (12)$$

Pelo método de Monte Carlo, a variável de interesse (X) deverá assumir um valor de acordo com o seguinte procedimento, e conforme o número aleatório (U) gerado:

$$X = Mo \quad \text{se } U = Uc \quad (13)$$

$$X = V_{mín} + [U \cdot (V_{máx} - V_{mín}) \cdot (Mo - V_{mín})]^{0,5} \quad \text{se } U < Uc \quad (14)$$

$$X = V_{máx} - [(1 - U) \cdot (V_{máx} - V_{mín}) \cdot (V_{máx} - Mo)]^{0,5} \quad \text{se } U > Uc \quad (15)$$

As medidas de posição (média, μ_T) e de dispersão (variância, σ_T^2) para a distribuição triangular são determinadas conforme as equações a seguir, respectivamente:

$$\mu_T = \frac{(V_{mín} + Mo + V_{máx})}{3} \quad (16)$$

$$\sigma_T^2 = \frac{(V_{máx} - V_{mín})^2 + (Mo - V_{mín})^2 - (V_{máx} - V_{mín}) \cdot (Mo - V_{mín})}{18} \quad (17)$$

A distribuição triangular é muito utilizada no agronegócio e no gerenciamento de projetos, sendo a distribuição triangular simétrica um caso particularizado. Segundo Bressan (2002), a área sob a curva das distribuições normal e triangular, no intervalo $(\mu - \sigma)$ a $(\mu + \sigma)$, correspondem, respectivamente, a 0,6827 e 0,6498. Nos casos em que uma função linear parece ser apropriada para a descrição da distribuição dos valores dos erros das variáveis, a distribuição triangular apresenta-se como um bom modelo entre as distribuições normal e uniforme (esta, por sua vez, apresenta área igual a 0,57735 no intervalo mencionado).

2.3 A água no sistema solo-planta-atmosfera

A água se move no sistema solo-planta-atmosfera em qualquer uma de suas fases (sólida, líquida ou gasosa). No solo e na planta, os principais movimentos ocorrem pela fase líquida, apesar de os fluxos de vapor poderem assumir grande importância quando o solo se encontra “mais seco” e em certas partes da planta, como é o caso das câmaras estomatais na folha. Na atmosfera, o principal movimento ocorre na fase gasosa (vapor d’água), mas também pode ocorrer nas fases líquidas (chuva) e sólida (granizo ou neve, por exemplo), podendo assumir proporções importantes em algumas ocasiões (REICHARDT; TIMM, 2004).

Pela teoria dos potenciais, a qual está enraizada na termodinâmica e nas transformadas de Legendre, a água é movimentada sempre para do ponto “de maior” para o ponto “de menor energia”. Para solos isotrópicos, uma teoria bem aceita sobre o movimento da solução remete à equação diferencial parcial de Richards. Essa equação foi fruto da combinação da equação de Darcy-Buckingham com a equação da continuidade. Em particular, para solos não saturados não expansivos, a equação de Richards descreve a variação da umidade no espaço e no tempo, além de considerar também variações infinitesimais do potencial mátrico e da condutividade hidráulica do solo, assumindo esta última como sendo variável dependente da umidade. Um solo seria dito anisotrópico se a constante hidráulica de Darcy variasse com a direção no interior deste solo (LIBARDI, 2005; p.154).

As culturas necessitam manter um ambiente interno aquoso para seus processos gerais de crescimento. Quando as folhas de plantas C4 abrem os estômatos para absorver o dióxido de carbono necessário à fotossíntese, perdem cerca de 250 moléculas de H₂O para cada de CO₂ absorvido, valor este que consagra a razão de transpiração típica para essas plantas (TAIZ; ZEIGER, 2006; p.90). Isso implica em uma contínua extração de água do solo, originando fortes relações entre transpiração, desenvolvimento vegetal e os diversos mecanismos responsáveis por manter o estado hídrico interno das plantas.

Em adição à transpiração, as culturas perdem água também de forma indireta, através de evaporação proveniente do solo. Os processos somados resultam na evapotranspiração, ao passo que a distinção dos mesmos serve para explicar o consumo de água pelas culturas sob condições de “dossel não-fechado”, e também para entender a resposta das culturas ao armazenamento de água (LOOMIS; CONNOR; 1992 p.255). O maior determinante do consumo hídrico está

relacionado à duração do ciclo e, principalmente, à rapidez com que a cultura atinge condições de área foliar que resultem em “dossel fechado”.

Atributo importante mas dispensável para efeitos de gerenciamento, o inverso da razão de transpiração, denominado eficiência de transpiração, é afetado substancialmente pelas condições climáticas vigentes (TANNER; SINCLAIR, 1983). Agronomicamente, dá-se preferência ao termo eficiência de uso da água (EUA), de dimensão $M L^{-3}$, a qual contempla também o componente evaporação de água do solo. A abordagem de Viets Jr. (1962) sugere que a eficiência de uso da água pode aumentar mediante o aumento nas doses de adubação, já que esse aspecto pode incrementar relativamente a área foliar e reduzir as perdas por evaporação nos estádios iniciais da cultura. Porém, não levou em conta o aumento de transpiração decorrente do aumento foliar e de biomassa, os quais dependem em grande parte do balanço de nitrogênio existente durante o ciclo (GOOUDRIAN; KEULEN, 1978).

Assim, o conhecimento da magnitude do requerimento de água associado a uma correspondente produção de grãos é essencial para efeitos de planejamento, principalmente para casos onde as lavouras são conduzidas sob dependência de irrigação, locais onde o uso do insumo água vêm se tornando cada vez mais restritivo. Não obstante, o monitoramento da demanda hídrica deve ser procedido constantemente ao longo do ciclo, para que a definição quantitativa e qualitativa dos grãos não seja seriamente prejudicada. Numa escala temporal diária, uma forma relativamente simples de se manejar o suprimento de água consiste em dispor do uso de estações meteorológicas, para que se possa monitorar a evapotranspiração de referência pelas condições atmosféricas, e em dispor do uso de coeficientes de cultura, para que demanda do dossel seja também computada pelo método FAO pode ser empregado para manejo (ALLEN et al., 2006).

Faz-se necessário a obtenção dos valores de alguns atributos previamente à estimação da evapotranspiração de referência pelo método FAO. Em função das temperaturas máxima do dia ($T_{máx}$, °C) e mínima do dia ($T_{mín}$, °C), as pressões de saturação de vapor máxima ($e_{s_{máx}}$, kPa) e mínima ($e_{s_{mín}}$, kPa) diárias são ambas estimadas utilizando-se a equação de Teténs:

$$e_{s_{mín}} = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T_{mín}}{237,3 + T_{mín}}} \quad (18)$$

$$e_{s_{máx}} = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T_{máx}}{237,3 + T_{máx}}} \quad (19)$$

A pressão de saturação média do dia (e_s , kPa) não é simplesmente a média aritmética de $e_{s_{máx}}$ com $e_{s_{mín}}$. De acordo com Abbate et al. (2005), um fator de peso (Θ) deve ser atribuído para

que posteriormente se obtenha melhor precisão na estimativa da deficiência de saturação de vapor d'água média do dia (VPD, kPa), já que $\Theta > 0,5$ viria a conferir maior peso à $T_{\text{máx}}$ e à $UR_{\text{mín}}$. Os autores reforçam ainda que não há clareza quanto à definição exata deste fator. Tanner e Sinclair (1983) sugerem um valor entre 0,66 e 0,75 para a cultura do milho, quando esta é submetida a diferentes condições climáticas. O valor de $\Theta = 0,72$ pode ser adotado para o cálculo de e_s conforme a seguinte expressão (ABBATE et al., 2005):

$$e_s = \Theta \cdot es_{\text{máx}} + (1 - \Theta) \cdot es_{\text{mín}} \quad (20)$$

A partir dos dados coletados de umidade relativa máxima no dia ($UR_{\text{máx}}$, %) e de umidade relativa mínima do dia ($UR_{\text{mín}}$, %), e dos valores calculados de $es_{\text{mín}}$ e $es_{\text{máx}}$, obtém-se as pressões de vapor parcial mínima ($ea_{\text{mín}}$, kPa) e máxima ($ea_{\text{máx}}$, kPa) do dia, e posteriormente a média nesse dia (e_a , kPa):

$$e_a = 0,5 \cdot (ea_{\text{máx}} + ea_{\text{mín}}) \quad (21)$$

$$ea_{\text{máx}} = 0,01 \cdot UR_{\text{mín}} \cdot es_{\text{máx}} \quad (22)$$

$$ea_{\text{mín}} = 0,01 \cdot UR_{\text{máx}} \cdot es_{\text{mín}} \quad (23)$$

O VPD (kPa) médio do dia pode ser finalmente calculado:

$$VPD = e_s - e_a \quad (24)$$

Requeridos para a estimativa-padrão da evapotranspiração de referência pelo método FAO, a declividade da curva de pressão de vapor (Ses , kPa °C⁻¹) e o fluxo total de calor no solo (Gcs , MJ m⁻² dia⁻¹) diários foram calculados por (PEREIRA et al., 2002, p.239):

$$Ses = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)} \quad (25)$$

$$Gcs = 0,38 \cdot (T - T_{-3d}) \quad (26)$$

em que T se refere à temperatura do ar (°C) média do dia; e T_{-3d} é a média das temperaturas (°C) médias do ar dos três dias anteriores.

Definida como a perda de água para a atmosfera por meio de uma superfície extensa e vegetada, que cubra completamente um solo sem restrição de água, a evapotranspiração-padrão de referência (ET_o , mm dia⁻¹) é obtida pela equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 2006):

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot Ses \cdot (R_n - Gcs) + \frac{900 \cdot \gamma \cdot V_2 \cdot VPD}{T + 273}}{Ses + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot V_2)} \quad (27)$$

em que R_n se refere à radiação líquida média ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) no dia; V_2 à velocidade média do vento (m s^{-1}) diária; e γ à constante psicrométrica da água, a rigor, calculada em função da pressão atmosférica resultante da altitude de Piracicaba (equações não apresentadas), e posteriormente assumida como sendo constante igual a $0,0632 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Na ausência de aparelhos como o saldo radiômetro, a radiação líquida (R_n) pode ser estimada diante da soma das estimativas do balanço diário de onda longa (BOL, $\text{MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e de onda curta (BOC, $\text{MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) através do seguinte procedimento:

$$\text{BOL} = - \left[4,903 \cdot 10^{-9} \cdot (T + 273)^4 \cdot (\xi_1 - \xi_2 \cdot e_a^{0,5}) \cdot \left(-0,35 + 1,35 \cdot \frac{R_g}{R_{g_c}} \right) \right] \quad (28)$$

$$\text{BOC} = R_g \cdot (1 - \lambda_r) \quad (29)$$

$$R_n = \text{BOC} + \text{BOL} \quad (30)$$

em que R_g se refere à radiação global incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); R_{g_c} à radiação global incidente em dias completamente claros ($\text{MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); λ_r ao albedo; e ξ_1 e ξ_2 são os coeficientes empíricos iguais a 0,56 e 0,25 para locais/dias úmidos, ou 0,34 e 0,14 para locais/dias secos, respectivamente (DOORENBOS; PRUITT, 1975).

A desvantagem do método FAO, considerado o mais completo, é que ele depende do valor de entrada de quatro variáveis climatológicas (radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento), ao passo que o método de Thornthwaite (1948), o mais simples, requer somente dados de temperatura, além da estimativa do comprimento astronômico do dia (H_j). Para o j -ésimo dia do ciclo da cultura, este último método necessita antes que sejam calculados o índice térmico empírico (I_j), do coeficiente empírico composto (a_{Thj}) para que evapotranspiração de referência (ET_{o_j}) seja estimada, conforme o seguinte procedimento:

$$I_j = (0,2 \cdot T_j)^{1,514} \quad (31)$$

$$a_{Thj} = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I_j^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I_j^2 + 0,01792 \cdot I_j + 0,49239 \quad (32)$$

$$ET_{o_j} = 0,53 \cdot \left(10 \cdot \frac{T_j}{I_j} \right)^{a_{Thj}} \cdot \frac{H_j}{12} \quad (33)$$

Embora o método de Thornthwaite tenha subestimado a ET_o nos locais úmidos estudados por Amatya et al. (1995), ele pode ser utilizado em caso de ausência de dados de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, desde que aplicado um fator de correção às condições da época de análise e da região (AMATYA et al., 1995; BORGES; MEDIONDO, 2007). Para locais

onde o verão é quente e úmido, o mencionado método pode superestimar a ETo, levando a uma margem de segurança no cálculo do consumo hídrico final necessário para atender a máxima produtividade. Quando o solo fornece uma boa disponibilidade hídrica e a demanda evaporativa da atmosfera é muito elevada, a taxa de transpiração também é elevada. Porém, a absorção de água pelas raízes da planta não é suficiente, devido às perdas por transpiração. Isso ocorre devido a um desequilíbrio entre absorção e transpiração, gerando uma redução no potencial hídrico (mais negativo), o que levará a um estresse hídrico se a intensidade desse processo for elevada, mesmo havendo água armazenada em suficiência na zona radicular (ANNANDALE et al., 2000).

Um índice que procura contemplar as relações entre planta e atmosfera é o coeficiente de cultura (Kc), o qual pode ser obtido pela razão entre a evapotranspiração potencial da cultura (ET) e a evapotranspiração de referência (ETo). A primeira pode ser experimentalmente obtida através do balanço hídrico no solo comparando-se a variação do armazenamento de água (Δh , mm) com as entradas e saídas de água do sistema considerado. Pelo princípio de conservação de massas, uma forma diferenciada de expressar a variação de armazenamento de água no solo seria:

$$\Delta h = \int_{t_{\text{inicial}}}^{t_{\text{final}}} ETa \cdot dt + \int_{t_{\text{inicial}}}^{t_{\text{final}}} PP \cdot dt + \int_{t_{\text{inicial}}}^{t_{\text{final}}} L \cdot dt + \int_{t_{\text{inicial}}}^{t_{\text{final}}} q \cdot dt + \int_{t_{\text{inicial}}}^{t_{\text{final}}} def_{\text{sup}} \cdot dt + \int_{t_{\text{inicial}}}^{t_{\text{final}}} def_{\text{sub}} \cdot dt \quad (34)$$

em que a variável q se refere ao fluxo vertical (mm tempo⁻¹) de água, e as variáveis def_{sup} e def_{sub} se referem aos deflúvios superficiais (de entrada e saída no sistema considerado) e sub-superficiais (de entrada e saída no sistema considerado), respectivamente. Integrando-se a eq. (34), ETa se refere à evapotranspiração (mm); PP à precipitação (mm); L à lâmina de irrigação aplicada (mm); e Δt o intervalo de tempo assumido (ex.: $t = 1$ dia). A variável q se refere ao fluxo vertical (mm tempo⁻¹) de água, e as variáveis def_{sup} e def_{sub} se referem aos deflúvios superficiais (de entrada e saída no sistema considerado) e sub-superficiais (de entrada e saída no sistema considerado), respectivamente.

Numa situação prática, na qual se tenha segurança de que os fluxos laterais (deflúvios superficiais e sub-superficiais) possam ser desprezados devido à topografia e às condições físicas do perfil do solo, a eq. (34) pode ser reduzida para (LIBARDI, 2005; p.258):

$$\Delta h = ETa + PP + L + (q \cdot \Delta t) \quad (35)$$

Numa escala de tempo superior a um dia, a evapotranspiração pode ser também denominada como consumo hídrico (CHa, mm). Explicitando-se esta variável, a equação do balanço hídrico se resume a:

$$CHa = \Delta h - PP - L - (q \cdot \Delta t) \quad (36)$$

Como convenção:

$$(q \cdot \Delta t) = D, \text{ se } q < 0 \quad (37)$$

$$(q \cdot \Delta t) = AC, \text{ se } q > 0 \quad (38)$$

em que D se refere à drenagem (mm) ou movimento de água vertical descendente; e AC à ascensão capilar (mm) ou movimento de água vertical ascendente de água.

A variação infinitesimal do armazenamento (Δh , mm) ao longo da profundidade e do tempo é obtida resolvendo-se a equação diferencial parcial de acordo com:

$$\Delta h = \int_0^z \int_{t_{\text{inicial}}}^{t_{\text{final}}} \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dt \cdot dz = \int_0^z [\theta(z)_{\text{final}} - \theta(z)_{\text{inicial}}] \cdot dz = \int_0^z \theta(z)_{\text{final}} \cdot dz - \int_0^z \theta(z)_{\text{inicial}} \cdot dz = h_{\text{final}} - h_{\text{inicial}} \quad (39)$$

Se não há uma função que descreva $\theta(z)$, ou seja, o armazenamento de água em função da profundidade, recorre-se a um método numérico para solução de integrais, como o do Trapézio ou o de Simpson. Ambos serão mais precisos quanto maior for o número de discretizações. O segundo apresenta menor erro para cálculos de armazenamento com dados de umidade coletados através de sonda de neutrons (HAVERKAMP et al., 1984), e modifica a integral para:

$$h = \frac{\Delta z}{3} \cdot [{}^0\theta + 4 \cdot {}^1\theta + 2 \cdot {}^2\theta + \dots + 2 \cdot {}^{n-2}\theta + 4 \cdot {}^{n-1}\theta + {}^n\theta] \quad (40)$$

em que h é o armazenamento de água (cm) existente entre a profundidade inicial de mensuração (0z) e a profundidade final de mensuração (nz); Δz é a diferença de nível (m) entre duas profundidades (m) de amostragem de umidade em um solo; e ${}^i\theta$ é a umidade [cm^3 (água) cm^{-3} (solo)] da i-ésima profundidade do solo (ex.: ${}^0\theta$ é a umidade em 0z , e ${}^n\theta$ é a umidade em nz). A estimação do erro absoluto do método de Simpson pode ser encontrada em Spiegel (2002; p.342), e maiores detalhes sobre este método em Carnahan et al. (1969).

A avaliação do conteúdo de água na superfície do solo não é possível de ser realizada pela maioria dos equipamentos destinados para essa finalidade (tensiômetro, sonda de neutrons, TDR, FDR) e, por esse motivo, as mensurações iniciam-se geralmente em uma profundidade logo abaixo da superfície. Uma adaptação para a eq. (40) seria considerar, como fizeram Haverkamp et al. (1984) ao disporem de uma sonda de neutrons, que a umidade do solo avaliada na primeira profundidade (0z) é representativa até a superfície (${}^{-1}z$), mesmo porque o equipamento mencionado avalia uma esfera de influência em torno do ponto de medida, e não apenas a

umidade neste ponto. A eq. (40) seria adaptada incluindo-se a área de um retângulo e, expressando-se agora o armazenamento em mm:

$$h = 10 \cdot \left\{ \left[\frac{\Delta Z}{3} \cdot \left({}^0\theta + 4 \cdot {}^1\theta + 2 \cdot {}^2\theta + \dots + 2 \cdot {}^{n-2}\theta + 4 \cdot {}^{n-1}\theta + {}^n\theta \right) \right] + \left({}^0Z - {}^{-1}Z \right) {}^0\theta \right\} \quad (41)$$

Quando se trabalha com a sonda de neutrons, as leituras obtidas em campo (LSN) resultantes das contagens de neutrons atenuados pelas partículas de hidrogênio deverão ser relativizadas a uma contagem padrão (CPSN), resultando em uma contagem relativa. Esta apresenta uma relação de dependência linear com a umidade do solo (θ , $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), permitindo descrever a seguinte equação de calibração do aparelho (EVETT; STEINER, 1995):

$$\theta = a_{\text{SN}} + \frac{\text{LSN}}{\text{CPSN}} \cdot b_{\text{SN}} \quad (42)$$

em que a_{SN} e b_{SN} se referem aos parâmetros empíricos de ajuste do modelo.

O fluxo de solução (${}^i q$) ocorrente na i -ésima profundidade do solo é obtida pela equação de Darcy-Buckingham (REICHARDT; TIMM, 2004):

$${}^i q = -K(\theta) \cdot \frac{{}^{i-1}\phi_T - {}^{i+1}\phi_T}{\Delta z} \quad (43)$$

em que $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica (mm dia^{-1}); e ϕ_T é o potencial total (m) de água no solo.

Assumindo como referência o plano da superfície do solo, no qual o potencial gravitacional é zero e acima do qual é o mesmo é positivo, o potencial gravitacional para a i -ésima profundidade z seria igual ao valor negativo da profundidade, caso a dimensão do potencial seja em termos de distância. Diante dessas premissas e, para um solo insaturado não-expansivo, o potencial total do solo para a i -ésima profundidade é assim calculado:

$${}^i \phi_T = {}^i \phi_m + (-{}^i z) \quad (44)$$

em que ϕ_m é o potencial mátrico (m) do solo.

Diversas equações podem ser ajustadas empiricamente para expressar a umidade do solo em função do potencial mátrico. Baseada nos estudos de Mualem (1976), a equação de van Genuchten (1980) tornou-se muito conhecida pelo fato alguns de seus parâmetros terem sido identificados quanto ao seus significados físicos, bem como pelo fato destes serem úteis no cálculo da condutividade hidráulica do solo. O inverso do modelo de van Genuchten leva ao cálculo do potencial mátrico:

$$\phi_m = -\frac{1}{|\alpha|} \cdot \left(\frac{1}{\omega^{\frac{1}{m}}} - 1 \right)^{\frac{1}{v}} \quad (45)$$

em que α , m e v se referem aos parâmetros empíricos do modelo (normalmente, há a aproximação de que $m = 1 - 1 / v$), e ω à saturação relativa do solo, obtida a partir dos parâmetros também empíricos θ_r (umidade residual) e θ_s (umidade de saturação), de acordo com:

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (46)$$

Ainda:

$$K(\theta) = K_0 \cdot \omega^{f_{tc}} \cdot \left[1 - \left(1 - \omega^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (47)$$

em que K_0 é a condutividade hidráulica (mm dia^{-1}) do solo em condições de saturação; e f_{tc} é um parâmetro que representa a tortuosidade e conectividade dos poros, podendo ser assumido o valor robusto igual a 0,5 (MUALEM, 1976).

Para o caso do milho plantado na principal estação de cultivo no Brasil, o consumo hídrico mínimo necessário para a produtividade a contento é da magnitude de 400 a 500 mm, sendo a evapotranspiração diária muito variável, de ordem de 2 a 13 mm por dia. A disponibilidade de água influencia a produtividade de grãos de maneiras distintas em cada uma das principais etapas da cultura. Durante a fase vegetativa e de florescimento, o estresse por falta de água provoca uma perda quantitativa, já que as plantas definirão um menor número de fileiras por espiga e de grãos por fileira, respectivamente. Já esse estresse na fase de enchimento de grãos resulta em perdas qualitativas, pois o peso final dos grãos é afetado (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Os fluxos de radiação em direção a superfície terrestre compõem-se da radiação solar incidente de ondas curtas (direta e difusa) e da radiação de ondas longas. Em contra partida, a superfície reflete ondas curtas e radiação de ondas longas emitidas pela superfície para a atmosfera (TANNER; LEMON, 1962). A intensidade com que as ondas curtas são refletidas para o espaço (albedo) varia com o ângulo de incidência solar, grau de cobertura do solo, umidade do solo e das plantas e tipo e quantidade de cobertura por nuvens (BLAD; BAKER, 1972). A partir das trocas verticais de radiação é possível definir o saldo de radiação, que será utilizado nos processos de evaporação e também de transpiração das plantas, nos processos de aquecimento do ar, do solo e das plantas, e no processo de fotossíntese.

2.4 Intercepção de radiação solar

A forma com que as plantas interceptam e absorvem a radiação solar incidente é uma das características mais importantes, pois essa radiação servirá aos processos de fixação do dióxido de carbono atmosférico em um grupo de moléculas orgânicas mais complexas. Este processo origina uma entrada de energia livre na biosfera, sendo parte desta armazenada nos assimilados fotossintéticos e parte transferida, durante o processo de respiração, para compostos de alta energia, que podem ser utilizados na síntese de novos compostos e no processo de manutenção. O saldo de CO₂ fixado pela planta, ou fotossíntese líquida, é a diferença entre a taxa de fixação bruta e a taxa de perda de CO₂ durante o processo respiratório (JONES, 1994).

O coeficiente de extinção de luz (k) é um parâmetro relacionado à morfologia da vegetação, principalmente à distribuição vertical entre folhas, a qual reside na organização espacial das mesmas, esta definindo a proporção de luz que será transmitida em função das propriedades óticas e da geometria e disposição das folhas em relação à luz incidente (BERNARDES, 1987).

Matematicamente, k relaciona o ângulo foliar à habilidade de cada unidade de índice de área foliar em interceptar luz solar (LOOMIS e CONNOR, 1992; p.274). Seu valor varia principalmente em função da arquitetura do dossel, tipicamente entre as magnitudes de 0,7 a 1 para culturas com folhas planófilas (leguminosas em geral, por exemplo), ou de 0,3 a 0,5 para aquelas com erectófilas (boa parte dos híbridos de milho), em termos de valores médios (ROSENBERG et al., 1983). Por esse motivo, para que um máximo grau de intercepção de luz seja atingido, dosséis planófilos geralmente o fazem diante de um menor valor de índice de área foliar que os dosséis erectófilos.

De acordo com a Lei de Bouger-Lambert, o fluxo de radiação fotossinteticamente ativa transmitida (RFA_t , MJ m⁻² dia⁻¹) verticalmente ao longo do dossel pode ser derivada da Lei de Beer (MONSI e SAEKI, 1953):

$$RFA_t = RFA_0 \cdot (e^{-k \cdot IAF}) \quad (48)$$

em que RFA_0 se refere ao fluxo de radiação fotossinteticamente ativa incidente (MJ m⁻² dia⁻¹) no topo do dossel; k ao coeficiente de extinção [m² (solo) m⁻² (folha)]; e IAF ao índice de área foliar [m² (folha) m⁻² (solo)].

A diferença básica entre as leis de Bouger-Lambert e de Beer é que a segunda assume um meio homogêneo, tal como não ocorre com as folhas de uma população de plantas (LOOMIS e

CONNOR, 1992; p.36), fazendo com que o valor de k não seja constante nem ao longo do perfil das folhas, nem ao longo do ciclo da cultura. Contudo, tanto para culturas plenamente irrigadas quanto não, MEINKE (1996) confirma que k é variável, diminui com o desenvolvimento da cultura tendendo a não mais variar a partir de um certo valor de IAF, mas também demonstra que um valor constante pode ser assumido sem grandes problemas para efeitos de simulação de biomassa, desde que o dossel venha a atingir valores elevados de interceptação luminosa já nos estágios iniciais da cultura, o que se aplica mais aos casos das culturas irrigadas. Caso o máximo valor de IAF seja baixo nesta etapa, como pode ocorrer facilmente em culturas desenvolvendo-se sob baixo suprimento hídrico, a assunção de k constante pode gerar erros substanciais.

Uma vez que o índice de área foliar e que a fração de radiação transmitida podem ser medidos experimentalmente, a eq. (48) pode ser invertida de forma a explicitar k para a obtenção experimental de seus valores, de acordo com:

$$k = -\frac{1}{IAF} \cdot \ln\left(\frac{RFA_t}{RFA_0}\right) \quad (49)$$

em que o quociente RFA_t / RFA_0 pode ser interpretado como a transmitância, ou a fração de radiação fotossinteticamente ativa transmitida (τ) às “camadas de folha” inferiores (em relação ao topo da vegetação), fazendo que a fração interceptada (λ_I) seja, por definição:

$$\lambda_I = 1 - \tau \quad (50)$$

Na equação acima, λ_I pode ser também entendido, a grosso modo, como a denotação da porcentagem de cobertura do dossel em relação ao solo, considerando que as folhas são aleatoriamente orientadas e dispersas (LOOMIS; CONNOR, 1992; p.274); ou mais precisamente, como a soma das frações absorvidas e refletidas (RUSSEL et al., 1989).

Visando mostrar que o coeficiente de extinção é um dos fatores que mais contribuem para os padrões de alocação de nitrogênio no dossel, o qual depende também do IAF e do conteúdo de nitrogênio nas folhas, Yin et al. (2003) fornecem subsídios que evidenciam a existência de relações consistentes entre IAF e número de folhas dependendo do grau de cobertura do relvado, principalmente nos estádios em que esta cobertura é ainda pequena ou então já bem fechada, já nos estádios intermediários os padrões de alocação dependerão também do regime de adubação nitrogenada (ex.: parcelamento e época de aplicação).

Dependente do valor de k , a interceptação de luz pelo dossel das culturas é essencial para a fotossíntese e, conseqüentemente, para a produção de biomassa. Assim, esse atributo deve ser

considerado em qualquer modelo de simulação, tal como fizeram Monteith (1965), Jones e Kiniry (1986) e MEINKE et al. (1997); ou quando da utilização do programa computacional APSIM 5.2 (APSRU, 2007), que assume um valor fixo de $k = 0,45$ para o caso do milho.

Salienta-se que a transmitância (τ) está associada também à questão do consumo hídrico, mais especificamente no que concerne à quantificação da fração da evapotranspiração que corresponde à evaporação do solo. A fragmentação da evapotranspiração nos componentes evaporação e transpiração é oriunda do balanço de energia entre cultura e superfície do solo, gerando fluxos radiantes denominados radiação líquida para a vegetação (R_n) e radiação líquida para o solo (R_{ns}), ambas em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Assumindo-se que a superfície do solo não encontra-se seca e, analogamente à eq. (48), a relação entre radiações pode ser descrita por (RITCHIE, 1972):

$$\tau = \frac{R_{ns}}{R_n} \therefore R_{ns} = R_n \cdot \tau \quad (51)$$

A utilização da equação de Monteith (1964) combinadas com as estimativas separadas de R_{ns} e de R_n permitem descrever a seguinte equação (LOOMIS; CONNOR, 1992, p.230):

$$E_v = ET \cdot \frac{R_{ns}}{R_n} \quad (52)$$

em que ET se refere à evapotranspiração (mm dia^{-1}) potencial da cultura.

Substituindo a eq. (51) na eq. (52), tem-se um modelo que descreve a evaporação do solo (E_v , mm dia^{-1}) em função da evapotranspiração e da transmitância, que em termos práticos poderia ser entendida como a “fração da área de solo que não é coberta pela vegetação”:

$$E_v = ET \cdot \frac{R_n \cdot \tau}{R_n} \therefore E_v = ET \cdot \tau \quad (53)$$

Os valores de transpiração poderiam ser derivados da diferença entre ET e E_v . Hammer e Muchow (1994) apresentam uma forma alternativa para se estimar a transpiração diária de uma cultura, bastando que se conheça os valores do ganho diário de fitomassa, do déficit de saturação de vapor de água (VPD, kPa) e do coeficiente de eficiência de transpiração (CEF, kPa). Para a cultura do milho, o programa computacional APSIM assume um valor de CEF igual a 0,009 (APSRU, 2007). Trabalhando com a cultura do girassol, Connor et al. (1985) observaram que a evaporação pode ser também obtida a partir do gráfico que expressa o acúmulo de biomassa aérea em função do consumo hídrico, no ponto onde a reta cruza a abscissa. Os autores demonstraram que a evaporação foi maior nos casos onde a irrigação foi mais freqüente, intermediária com irrigações esparsas, e menor onde não houve irrigação.

2.5 Comprimento astronômico do dia

Também conhecido como “fotoperíodo”, o comprimento astronômico do dia é definido como a diferença, em horas, existente entre o nascer e o pôr do sol. Essa diferença em função do local e da época do ano, exceto para a linha imaginária do equador. A quantificação do fotoperíodo pode ser importante tanto por expressar uma idéia de tempo potencial para fotossíntese quanto por razões de ordem fisiológica para com a determinação do florescimento da cultura. Sendo o milho uma planta originalmente de dias curtos (acima do valor de fotoperíodo crítico, o florescimento é atrasado), os limites de fotoperíodo crítico para essa cultura não são bem definidos, embora dias longos possam ampliar o comprimento da fase vegetativa e o número de folhas, ocasionando assim um atraso no florescimento (FERRAZ, 1966).

O ângulo formado entre o plano imaginário equatorial terrestre e a reta que “une” a terra ao sol é denominado declinação solar (ζ , °), necessário como cálculo prévio ao do fotoperíodo:

$$\zeta_j = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot (DJ - 80) \right] \quad (54)$$

em que DJ se refere ao dia do ano. Para o dia 2 de Fevereiro, por exemplo, tem-se $DJ = 32$. A declinação apresenta valores negativos quando o sol encontra-se no hemisfério sul.

O comprimento astronômico (H , h dia⁻¹) do i -ésimo dia da cultura é assim calculado:

$$H_j = \frac{24}{\pi} \cdot \arccos \left[-\tan \left(\zeta_j \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \tan \left(-\Phi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right] \quad (55)$$

em que Φ se refere à latitude (em decimais) do local de interesse. Os valores de Φ são negativos para localidades do hemisfério sul.

Devido à presença de nuvens e de outras partículas atenuantes na atmosfera, apenas uma fração do comprimento astronômico do dia é transformado em brilho solar, fração esta denominada razão de insolação (RI). Sendo $RI = 1$ para dias perfeitamente claros, o valor desta razão é utilizado na equação de Angstrom-Prescott (PEREIRA et al., 2002, p.98):

$$\frac{R_g}{R_T} = a_{AP} + b_{AP} \cdot RI \quad \therefore R_g = (a_{AP} + b_{AP} \cdot RI) \cdot R_T \quad (56)$$

em R_T se refere à radiação solar (MJ m⁻² dia⁻¹) incidente no topo da atmosfera terrestre, a_{AP} e b_{AP} aos parâmetros empíricos da equação.

Enquanto o comprimento astronômico pode ser estimado pela eq. (55), o brilho solar pode ser medido através de um heliógrafo (ex.: do tipo Campbell-Stokes). A relação R_g / R_T é

conhecida como “índice de claridade”, ou ainda “transmitância global”. Quando RI tende a zero (dias extremamente nublados), o índice de claridade é denominado “mínimo” e tende a ser igual ao intercepto a_{AP} ; e quando tende a um, é denominado “máximo” e tende a ser igual à soma dos parâmetros. Para Hinrichsen (1994), o parâmetro a_{AP} representaria a fração difusa da luz, e o parâmetro b_{AP} significaria a fração direta.

Para se estimar um valor para R_T para o j -ésimo dia do ciclo da cultura em função do dia do ano e da latitude, faz-se o seguinte procedimento (PEREIRA et al., 2002; p.88):

$$R_{Tj} = 37,6 \cdot DRST_j^2 \cdot \left[Ahn_j \cdot \sin\left(\Phi \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \sin\left(\zeta_j \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \cos\left(\Phi \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \cos\left(\zeta_j \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \sin(Ahn_j) \right] \quad (57)$$

em que $DRST_j^2$ e Ahn_j se referem à distância relativa Sol-Terra (também denominado fator de correção da excentricidade da órbita terrestre) e ao ângulo horário ($^\circ$) do nascer do sol, respectivamente, ambos para o j -ésimo dia do ciclo, sendo:

$$DRST_j^2 = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(DJ \cdot \frac{2 \cdot \pi}{365}\right) \quad (58)$$

$$Ahn_j = \frac{\pi \cdot H_j}{24} \quad (59)$$

O conhecimento da magnitude da razão de insolação é importante porque ele está relacionado com a redução da produtividade. Nas espécies C4, embora haja uma pequena tendência da fotossíntese líquida continuar aumentando em função do aumento da densidade de fluxo radioativo, mais do que nas plantas C3, existem ainda grandes diferenças entre espécies adaptadas à radiação direta e à difusa, ou entre folhas de uma mesma espécie crescendo em irradiâncias diferentes. Nas espécies adaptadas à luz difusa ou em folhas sombreadas, a fotossíntese líquida pode saturar a menos de $100 \mu\text{mol (RFA)} \text{ m}^{-2} \text{ (folha)} \text{ s}^{-1}$, a qual representa, aproximadamente, 5% da radiação total. As folhas adaptadas à luz direta, por outro lado, freqüentemente continuam a responder a valores típicos para toda luz solar. O ponto de compensação de luz também varia a partir de baixos valores, da ordem de $0,5$ a $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nas espécies adaptadas à sombra, até valores de $40 \mu\text{mol (RFA)} \text{ m}^{-2} \text{ (folha)} \text{ s}^{-1}$ nas folhas de adaptadas à radiação direta (JONES, 1994). A taxa de assimilação de CO_2 [$\text{Adc}, \mu\text{L (CO}_2\text{)} \text{ cm}^{-2} \text{ (folha)} \text{ h}^{-1}$] pelas culturas decresce na medida em que ocorre a presença de dias nublados, de acordo a seguinte expressão (HEEMST, 1986):

$$\text{Adc} = F_{\text{Nub}} \cdot \text{Adc}_N + (1 - F_{\text{Nub}}) \cdot \text{Adc}_C \quad (60)$$

em que Adc_N se refere à taxa de assimilação de CO_2 [$\mu L (CO_2) cm^{-2} (folha) h^{-1}$] ocorrente em dias completamente nublados; Adc_C à taxa de assimilação de CO_2 [$\mu L (CO_2) cm^{-2} (folha) h^{-1}$] ocorrente em dias perfeitamente claros; e F_{Nub} à relação existente entre radiação solar ocorrente em dias extremamente nublados (R_{gN} , $MJ m^{-2} dia^{-1}$) e a radiação solar ocorrente em um dias normalmente claros (R_g , $MJ m^{-2} dia^{-1}$) – incidente no topo da vegetação. O fator de redução não foi claramente explicado pela concatenação de idéias mostrada no trabalho de Heemst (1986), e será aqui melhor discorrido.

As diferenças existentes no padrão de fotossintético de plantas adaptadas à sombra e ao sol podem ser explicadas por diversos fatores. Há evidências de que todos os componentes do aparato fotossintético adaptam-se de forma conjunta. Na presença de elevada densidade de fluxo de radiação, por exemplo, folhas adaptadas à luz direta tendem a ser mais espessas, com uma área de superfície interna maior que a de folhas de adaptadas à sombra, além de tender a apresentar mais clorofila e muito mais carboxilase, por unidade de área. Pelo fato de a resistência do mesófilo, por unidade de superfície de célula, ser aproximadamente constante, esta resistência tende a diminuir com o aumento da irradiância, em decorrência da mudança na razão entre a área de superfície da célula do mesófilo e a área de superfície da folha (NOBEL et al., 1975), como ocorre na resistência estomática.

As reações fisiológicas envolvendo a luz também são afetadas por altos níveis de irradiância, visto que acarretam em um maior desenvolvimento das granas nas folhas de plantas adaptadas a luz difusa, ao passo que a capacidade para transporte de elétrons é marcadamente reduzida. BOARDMAN et al. (1975), por exemplo, demonstraram que o transporte de elétrons nos dois sistemas, quando expresso em termos de clorofila, pode ser até 14 vezes mais intenso em cloroplastos extraídos de plantas adaptadas à luz direta do que aquele verificado em cloroplastos extraídos de plantas sombreadas. Parte desse efeito pode gerar uma leve diminuição no tamanho da unidade fotossintética vegetal (MALKIN; FORK, 1981). Os componentes da cadeia de transporte de elétrons, isto é, citocromo “f” e citocromo “b”, são particularmente reduzidos nas plantas submetidas à baixa luminosidade.

Somente pequenas diferenças têm sido observadas na inclinação inicial da curva de resposta da fotossíntese à luz, embora haja da grande diferença na fotossíntese líquida de folhas submetidas à saturação por luz. A recíproca desta inclinação nos fornece o requerimento de quantum por CO_2 fixado, e é uma medida da eficiência da fotossíntese, sendo um valor

relativamente constante ao redor de 19 para plantas C4, enquanto para as C3, é muito dependente da temperatura e da concentração de oxigênio (EHLERINGER; BJÖRKMAN, 1977).

Conforme os dados apresentados por Heemst (1986), é aparentemente robusta a relação entre as taxas de assimilação de CO₂ de dias extremamente nublados e perfeitamente claros. Para plantas de ciclo C4 em latitudes entre 0 e 50°, dias completamente nublados apresentam uma magnitude de redução de Adc em torno de 30 a 40%, em relação a dias perfeitamente claros. Por exemplo, interpolando-se os dados apresentados por Heemst (1986) para o caso da latitude de Piracicaba, a taxa de assimilação de CO₂ de plantas C4 existente em dias completamente nublados (Adc_N) seria aproximadamente 34,34% da existente em dias perfeitamente claros (Adc_C), considerando-se a média dos meses de Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março, e com pouca diferença entre todos os meses. Portanto, para caso específico citado:

$$\frac{Adc_N}{Adc_C} = 0,3434 \quad (61)$$

De forma genérica, porém, a relação entre as taxas de assimilação (R_{Adc}) seria:

$$R_{Adc} = \frac{Adc_N}{Adc_C} \therefore Adc_N = R_{Adc} \cdot Adc_C \quad (62)$$

Substituindo a eq. (62) na eq. (60):

$$Adc = F_{Nub} \cdot R_{Adc} \cdot Adc_C + (1 - F_{Nub}) \cdot Adc_C \quad (63)$$

Colocando-se em evidência o atributo Adc_C:

$$Adc = [F_{Nub} \cdot R_{Adc} + (1 - F_{Nub})] \cdot Adc_C \quad (64)$$

Na equação acima, o termo dentro do colchetes representa um fator de redução (F_{Adc}) da taxa de assimilação potencial de dióxido de carbono (Adc_C), sendo dependente de R_{Adc} e de F_{Nub}:

$$F_{Adc} = F_{Nub} \cdot R_{Adc} + (1 - F_{Nub}) \quad (65)$$

Já o fator de nebulosidade é mais variável e decorrente dos fluxos de radiação solar dos diversos estratos da atmosfera, sendo definido, conforme já mencionado, por:

$$F_{Nub} = \frac{R_{gN}}{R_g} \quad (66)$$

A rigor, a radiação solar global incidente no topo da vegetação somada à radiação solar que fosse atenuada pelas nuvens resultaria na radiação solar de um dia perfeitamente claro (R_{gC}, MJ m⁻² dia⁻¹), permitindo elaborar o seguinte raciocínio:

$$Rg_c = Rg + Rg_N \quad (67)$$

A eq. (67) pode ser rearranjada sob duas formas:

$$Rg_N = Rg_c - Rg \quad (68)$$

$$Rg = Rg_c - Rg_N \quad (69)$$

Substituindo a eq. (68) e a eq. (69) na eq. (66):

$$F_{Nub} = \frac{Rg_c - Rg}{Rg_c - Rg_N} \quad (70)$$

Outra relação robusta, a radiação solar média para dias completamente nublados pode ser assumida como sendo 20% da radiação solar média para dias completamente claros, conforme colocado por Heemst (1986). Assim:

$$Rg_N = 0,2 \cdot Rg_c \quad (71)$$

Substituindo a eq. (71) na eq. (70):

$$F_{Nub} = \frac{Rg_c - Rg}{Rg_c - 0,2 \cdot Rg_c} \therefore F_{Nub} = 1,25 \cdot \left(1 - \frac{Rg}{Rg_c} \right) \quad (72)$$

A radiação solar global incidente na vegetação (Rg) é facilmente mensurável e serve como valor de entrada em quase todos os modelos de simulação. Já a variável Rg_c necessitaria ser estimada. Cabe ressaltar que não é necessário dispor da mensuração do brilho solar para se obter Rg_c , para posteriormente se obter F_{Nub} . Confirmando isso, observa-se duas condições particulares para dias perfeitamente claros:

$$Rg = Rg_c \quad (73)$$

$$RI = 1 \quad (74)$$

Substituindo a eq. (73) e a eq. (74) na eq. (56), explicita-se a variável Rg_c de forma que não haja necessidade de valores de entrada de brilho solar para o cálculo da razão de insolação. A eq. (56), ao ser rearranjada convenientemente, torna-se:

$$Rg_c = (a_{AP} + b_{AP}) \cdot R_T \quad (75)$$

A rigor, os valores de a_{AP} e b_{AP} variam também conforme a região e a época do ano. Os valores específicos desses parâmetros podem ser determinados experimentalmente, como fizeram Dallacort et al. (2004) e Dornelas et al. (2006), sendo iguais a 0,25 e 0,50 os valores ajustados para Piracicaba, no geral primavera-verão (PEREIRA et al., 2002; p.100). Frère e Popov (1979)

forneçam valores globais para esses coeficientes, para efeitos de simulação, os quais são apresentados na Tabela 1 (valores adotados pela FAO).

Para o j-ésimo dia de ciclo da cultura, o fator de nebulosidade pode ser finalmente descrito substituindo-se a eq. (75) na eq. (72):

$$F_{\text{Nubj}} = 1,25 \cdot \left(1 - \frac{Rg_j}{(a_{\text{AP}} + b_{\text{AP}}) \cdot RT_j} \right) \quad (76)$$

Em síntese, se os coeficientes de Angstrom-Prescott são assumidos e R_T é calculado em função de local e data, e de posse dos valores de radiação solar global incidente (R_g), obtém-se o fator de nebulosidade será utilizado na obtenção do fator de redução da taxa de assimilação de CO_2 . Verdoodt et al. (2004) corroboram o uso desse fator de redução, proposto por Heemst (1986), para a taxa de assimilação de dióxido de carbono em função das condições de nebulosidade do dia.

Tabela 1 – Valores dos coeficientes empíricos da equação de Angstrom-Prescott utilizados pela FAO (FRÈRE; POPOV, 1979)

Região do planeta	a_{AP}	b_{AP}
Zonas frias e temperadas	0,18	0,55
Zonas tropicais secas	0,25	0,45
Zonas tropicais úmidas	0,29	0,42

O efeito da deficiência hídrica sobre a assimilação líquida tem sido assunto de muitos artigos (KAISER, 1987). Entretanto, há controvérsias quanto à importância relativa do fechamento estomático e das mudanças na capacidade do mesófilo como causas das diminuições observadas na assimilação de CO_2 . Estudos recentes sobre a fluorescência da clorofila evidenciam que a alta densidade de fluxo radioativo, durante o estresse hídrico, pode acarretar danos fotoinibitórios no fotossistema II, embora sugerindo que o transporte de elétrons é, relativamente, pouco afetado em condições de baixo potencial hídrico. Assim, há possibilidade de que o fechamento estomático desuniforme tenha sido a causa da diminuição da capacidade fotossintética do mesófilo, conforme algumas constatações (BOYER, 1976).

2.6 Temperatura e desenvolvimento vegetal relativo

A energia radiante que atinge a superfície terrestre é responsável por alguns dos principais processos físicos, dentre esses a convecção, a qual está relacionada ao aquecimento do ar. A temperatura é um índice que expressa a quantidade de calor sensível de um corpo, e a energia radiante é responsável pelas variações desse índice no ar. A temperatura do ar é um dos efeitos mais importantes da radiação solar. O aquecimento da atmosfera próxima à superfície terrestre se dá através de condução molecular ou difusão turbulenta (PEREIRA et al., 2002, p.111).

Em geral, o efeito da temperatura na funcionalidade das plantas pode ser compreendido através das atividades enzimáticas. A conformação e o formato das enzimas é essencial nas reações em que participam, e essa conformação depende da temperatura. Sob temperaturas muito baixas, as enzimas não são flexíveis a contento para plasticamente se alterarem a ponto de atender a conformação exigida para que a reação enzimática ocorra. Sob temperaturas muito baixas, as enzimas são coaguladas e novas estruturas são obtidas, sendo estas não capazes de catalizar as reações. Tipicamente, as curvas que representam a ação da temperatura têm dois lados: um segmento crescente, onde a ativação térmica das moléculas aumenta a eficiência das reações; e um segmento decrescente, onde elevadas temperaturas progressivamente inativam certas enzimas específicas. Entre esses dois lados há um pico correspondente à temperatura ótima (BOURDU, 1984). É por este motivo que há uma temperatura mínima, uma ótima e outra máxima para as diferentes respostas dos vegetais à temperatura (BONHOMME, 2000).

Comparando os tempos gastos para que a cultura do trigo atingisse a maturidade em diferentes regiões, foi o francês Reaumur, a mais de 250 anos atrás, quem primeiro levantou o conceito de “graus calóricos” visando estabelecer uma relação entre taxa de desenvolvimento vegetal e temperatura do ar. Reichardt e Timm (2004, p.82) comentam que a dimensão correta para o uso do conceito de “graus-dia” deveria ser, a rigor, computada simplesmente em graus Celsius, pois trata-se de uma somatória de diferenças de temperaturas ao longo do tempo. Nesse sentido, faria certo sentido que o atributo “graus-dia”, por ser matematicamente a área encerrada pelo gráfico de temperatura versus o tempo contínuo, fosse expresso daquela maneira, pois reforçaria a idéia associada ao tempo de ciclo da cultura. Uma terminologia mais apropriada parece ser a “soma térmica” ou “tempo térmico” (BONHOMME, 2000).

A predição, com acurácia, da taxa de desenvolvimento da cultura do milho em regiões de clima temperado consiste no alicerce da definição dos principais índices e zonas térmicas dessas

regiões. Stewart et al. (1998) salienta que, embora diversos outros fatores como fotoperíodo, umidade do solo, radiação solar e fertilidade possam afetar a taxa de desenvolvimento das plantas, esta é primeiramente afetada pela temperatura. O papel da temperatura como elemento central descritor dos eventos fenológicos e associados ao ciclo da cultura do milho é amplamente fundamentado na literatura (WRIGHT; KEENER, 1982; JONES; KINIRY, 1986; YAN; HUNT, 1999; TOJO SOLER et al., 2005).

Ao revisar a definição de “graus-dia”, Bonhomme (2000) aponta as limitações do método tradicional e sugere a função beta, proposta por Yin et al. (1995), como sendo ideal para se calcular o tempo térmico, caso se opte por modelos não lineares; pois tal função é baseada em leis matemáticas relativamente flexíveis e apresenta poucos parâmetros, sendo ainda todos com significado físico-biológico. O método tradicional de cálculo dos “graus-dia” depende de algumas correções e condições específicas para ser corretamente aplicado, conforme mostraram Villa Nova et al. (2005), e ainda apresenta a limitação de não contemplar a não linearidade existente entre temperatura e taxa de desenvolvimento vegetal.

Se a taxa de desenvolvimento relativo de uma cultura apresenta uma forma funcional não linear (PEREIRA et al., 2002; p.332), mas em contrapartida apresenta uma relação linear com o tempo térmico, então este pode ser descrito também por uma função não linear. A função beta simplificada representa bem esse conceito através do seguinte modelo (YIN et al., 1995):

$$GD_j = GD_{\max} \cdot \left(\frac{TD_{\max} - T_j}{TD_{\max} - TD_{op}} \right) \cdot \left(\frac{T_j - TD_{\min}}{TD_{op} - TD_{\min}} \right)^{\frac{TD_{op} - TD_{\min}}{TD_{\max} - TD_{op}}} \quad (77)$$

em que GD_j se refere ao tempo térmico (°C dia) ocorrente no j -ésimo dia do ciclo; T_j se refere à temperatura média diária do ar (°C) no j -ésimo dia do ciclo da cultura (após a emergência); $TD_{\min}$ se refere à temperatura (°C) abaixo da qual não há desenvolvimento; $TD_{\max}$ à temperatura (°C) acima da qual não há desenvolvimento; TD_{op} à temperatura (°C) ótima de desenvolvimento; $GD_{\max}$ soma térmica (°C dia), existente em um dia, que correspondente à temperatura ótima. Se $TD_{op} = 35$ °C, $GD_{\max} = 25$ °C dia, e $TD_{\max} = 44$ °C, conforme adotado pelo APSRU (2007).

O valor da temperatura mínima (ou “temperatura basal inferior”) exerce pouca influencia na taxa de desenvolvimento e na precisão da determinação dos estágios fenológicos da cultura se o valor da temperatura ótima for muito superior ao da temperatura mínima (BONHOMME, 2000a). A prova disso é que, se temperatura mínima é assumida como zero, o modelo mostra significativa resposta de soma térmica somente a partir de um determinado valor de temperatura,

mostrando que $TD_{\min} = 0$ é uma assunção coerente, o que eliminaria esse parâmetro do modelo (YAN; HUNT, 1999). Neste caso, a função beta simplificada se resumiria ainda mais para:

$$GD_j = GD_{\max} \cdot \left(\frac{TD_{\max} - T_j}{TD_{\max} - TD_{op}} \right) \cdot \left(\frac{T_j}{TD_{op}} \right)^{\frac{T_{op}}{TD_{\max} - T_{op}}} \quad (78)$$

A somatória dos tempos térmicos diários resulta no tempo térmico acumulado (GDA_j , °C dia) até um j-ésimo dia qualquer do ciclo:

$$GDA_j = \sum_{j=1}^n GD_j \quad (79)$$

Reichardt e Timm (2004, p.428) exteriorizam a importância da adimensionalização de uma variável, já que isso abre a possibilidade de generalização, tornando-a, portanto, melhor comparável em valores. Visando criar modelos extrapoláveis, Dourado Neto (1999) converteu para adimensional o desenvolvimento da cultura do milho, de acordo com a equação abaixo:

$$Dr_j = \frac{GDA_j}{GDA_{pmf}} \quad (80)$$

em que Dr_j se refere ao desenvolvimento relativo da cultura; GDA_{pmf} à soma térmica acumulada (°C dia), após a emergência, até o ponto de maturidade fisiológica ($j = pmf$).

O tempo verificado entre a emergência e o pleno florescimento da cultura do milho pode se tornar levemente mais curto em relação ao ideal, já que para cada unidade de temperatura média diária superior a 21,1 °C, nesse período, pode haver uma antecipação de 2 a 3 dias no tempo necessário para o florescimento (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000; p.24). Já entre o florescimento e o ponto de maturidade fisiológica, no entanto, temperaturas médias diárias superiores a 26 °C são necessárias para acelerar o tempo para a finalização do ciclo da cultura.

Por apresentar o hábito de florescimento do tipo determinado (o crescimento vegetativo cessa em definitivo quando ocorre o florescimento) e pela sensibilidade à temperaturas na fase de emissão do pendão e de polinização, um híbrido de milho pode ter seu potencial de produção levemente afetado em função de condições esporádicas de dias longos e muito quentes na fase vegetativa, interferindo ou não na produção final de grãos, já que um acréscimo de temperatura pode ser compensado pelo maior comprimento astronômico dos dias nessa fase (já que isto pode retardar o florescimento – ver item anterior). Como recomendações práticas, regiões cujo verão apresenta temperatura média diária inferior a 19 °C e noites com temperaturas médias abaixo de 12,8 °C, não são recomendadas para a cultura do milho (FANCELLI; DOURADO NETO, 1999).

2.7 Assimilação de dióxido de carbono e fotossíntese

A grande maioria das plantas pertencentes à família das poáceas, bem como algumas dicotiledôneas, realizam seu ciclo fotossintético através de uma rota metabólica peculiar e especializada. Acredita-se que seja uma adaptação dessas plantas, em relação às C3, que as habilita a ter maiores taxas fotossintéticas. Com a anatomia foliar modificada, as plantas C4 fixam o CO_2 no mesófilo, através da enzima carboxilase fosfoenolpiruvato (PEP), para formar principalmente o ácido oxaloacético (AOA), com 4 carbonos ou “C4” – designação esta que as caracterizam como plantas C4 (HATCH; SLACK, 1966). Os ácidos C4 são posteriormente transportados para cloroplastos especializados (ricos em clorofila) das células da bainha, onde haverá uma descarboxilação enzimática que levará a uma alta concentração local de CO_2 , favorecendo uma fixação secundária normal C3 (ciclo de Benson-Calvin) através da ação da RUBP-carboxilase (rubisco) nas poáceas C4.

A RUBP-carboxilase possui grande afinidade pelo CO_2 , mas quando em presença de O_2 , pode exercer a função de uma oxigenase. A função dessa enzima tem sido relacionada com a inibição na presença de O_2 e ao fenômeno da fotorrespiração em plantas C3. O processo de fotorrespiração é dependente do ciclo do ácido glicólico. A RUBP-oxigenase pode catalisar a produção de fosfogicolato e acelerar o mencionado processo. Essa ineficiência fotossintética apresentada pelas gramíneas C3 é um mecanismo de adaptação que tem por finalidade evitar maiores prejuízos aos tecidos, os quais seriam decorrentes de um excesso de luz. A fotorrespiração é inexpressiva ou não observada em poáceas C4, fato que se deve à elevada afinidade da PEP-carboxilase pelo CO_2 , associado à anatomia foliar dessas plantas, fazendo com que a combinação entre química e anatomia foliar reduza a concentração de CO_2 nos espaços internos foliares, e concentre CO_2 nos cloroplastos da bainha, dentro da qual a performance da enzima rubisco é aumentada (TAIZ; ZEIGER, 2006).

Uma das principais vantagens da via C4 é que ela conduz a uma redução na sensibilidade a baixas concentrações intra-celulares de CO_2 . Desta forma, plantas C4 são mais habilitadas a continuar a fixação de carbono quando a fenda estomática inicia seu fechamento devido a fatores como a seca, caracterizando-as como mais eficientes que as plantas C3 em termos de eficiência do uso da água. Essas vantagens são mais evidentes em ambientes com altas temperaturas e altas intensidades de luz (ROBSON, 1981). As plantas C4 praticamente não apresentam fotorrespiração porque a enzima rubisco fica isolada nas células interiores. Esse um dos motivos pelos quais as

plantas C4 apresentam taxas fotossintéticas mais elevadas que as C3, especialmente quando as primeiras são submetidas a elevados níveis de irradiância e altas temperaturas (LOOMIS; CONNOR, 1992, p.260).

A fotossíntese e a respiração ocorrem simultaneamente independentemente da presença ou não de luz, sendo que a respiração é a oxidação dos produtos já fotossintetizados. Esse processo metabólico não pode ser considerado como uma perda, visto que algumas estruturas de reserva da planta ao liberarem o ATP e os redutores NADH e FADH, elementos que irão fazer parte das reações bioquímicas em conjunto com as substâncias intermediárias, servirão de precursores na síntese das substâncias essenciais à manutenção e ao crescimento das plantas (SALISBURY; ROSS, 1991). Ao nível de dossel, o balanço energético entre a taxa de assimilação bruta de CO₂ e a taxa de respiração é geralmente positivo durante o dia, e resulta na taxa de fotossíntese líquida que, em termos práticos, é a produção primária de carboidrato (energia) da qual depende os organismos heterotróficos do planeta, sendo:

$$FL = FB - R \quad (81)$$

em que FL é a taxa de fotossíntese líquida (dimensão: M L⁻² T⁻¹ ou L T⁻¹); FB à taxa de fotossíntese bruta (M L⁻² T⁻¹ ou L T⁻¹); e R à taxa de respiração (M L⁻² T⁻¹ ou L T⁻¹).

Conforme Gifford (2003), a respiração total (R) pode ser entendida como sendo uma fração da fotossíntese bruta, denominada respiração específica (Rs), ou seja:

$$R = Rs \cdot FB \quad (82)$$

Substituindo a eq. (82) na eq. (81):

$$FL = FB - Rs \cdot FB \quad \therefore FL = FB \cdot (1 - Rs) \quad (83)$$

A variável Rs é função da respiração de manutenção, da respiração de crescimento e da taxa relativa de desenvolvimento (que é função das características do ambiente e da idade da planta). O termo (1 - Rs) pode ser entendido como eficiência de uso do carbono (CUE, adimensional), atributo cuja magnitude varia entre 0,40 a 0,65; e que é relativamente conservador em relação à idade da planta e ao tamanho da mesma, à concentração de CO₂ na atmosfera e à temperatura. De qualquer forma, tem-se a expressão (GIFFORD, 2003):

$$CUE = 1 - Rs \quad (84)$$

Substituindo a eq. (84) na eq. (83):

$$FL = FB \cdot CUE \quad (85)$$

Comparando alguns dos principais modelos descritores de fotossíntese líquida em nível foliar, Pachepsky et al. (1996) destacam o uso do modelo tipo hipérbole-retangular tanto por sua simplicidade quanto por apresentar seus três parâmetros com significado físico/biológico (máxima taxa de fotossíntese, eficiência quântica e taxa de respiração no escuro), sendo desnecessário inserir equações mais complexas, em modelos de simulação voltados à agricultura, para o cálculo dos processos de fotossíntese. Drouet e Bonhomme (2004) ajustaram esses parâmetros empiricamente, relacionando-os com um teor de nitrogênio por unidade de área foliar. Thornley e Johnson (1990) também discorrem sobre este modelo, mas descrevem em seguida os processos fotossintéticos como sendo dependentes da temperatura, esta modificando principalmente o valor do parâmetro que se refere à “máxima taxa de fotossíntese líquida”.

Ao analisar os dados apresentados por Heemst (1986) para plantas de ciclo C₄, Assis et al. (2006) propõem o seguinte função de duas variáveis para descrever a taxa potencial de assimilação bruta de dióxido de carbono [Adc_c , $\mu\text{L}(\text{CO}_2) \text{ cm}^{-2} (\text{folha}) \text{ hora}^{-1}$]:

$$Adc_c = \frac{A_0 + A_1 \cdot R_{ab} + A_2 \cdot R_{ab}^2 + A_3 \cdot R_{ab}^3 + A_4 \cdot \ln(T)}{1 + A_5 \cdot R_{ab} + A_6 \cdot R_{ab}^2 + A_7 \cdot R_{ab}^3 + A_8 \cdot \ln(T) + A_9 \cdot [\ln(T)]^2} \quad (86)$$

em que T se refere à temperatura do ar ($0 < T < 40 \text{ }^\circ\text{C}$) média do dia; R_{ab} ao fluxo de radiação solar fotossinteticamente ativa absorvível [$0 < R_{ab} < 0,35 \text{ cal cm}^{-2} (\text{folha}) \text{ min}^{-1}$] médio do dia. Os parâmetros empíricos determinados através de análise de regressão são: $A_0 = 1,566792$; $A_1 = 53515909$; $A_2 = -221,805971$; $A_3 = 310,191491$; $A_4 = -0,491961$; $A_5 = -0,190506$; $A_6 = 0,373910$; $A_7 = -0,088166$; $A_8 = -0,554728$; e $A_9 = 0,080398$.

A partir de um certo valor de temperatura (por volta de 33°C), Adc_c declina, mesmo aumentando-se o valor de R_{ab} , podendo-se visualizar esse aspecto na Figura 1, a qual poderia ser também representada numa superfície de resposta. A $39 \text{ }^\circ\text{C}$, por exemplo, a resposta de Adc_c à R_{ab} é menor do que a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Padrão de variação semelhante é apresentado por Lizaso et al. (2005). As curvas de resposta apresentam um padrão de variação de Adc_c em relação a R_{ab} semelhante à uma hipérbole retangular, exceto para temperaturas muito baixas (por exemplo, 1 e $5 \text{ }^\circ\text{C}$), podendo, portanto, representar de maneira satisfatória o fenômeno de interesse. As curvas representam bem o fenômeno de interesse, quando comparadas com as curvas de três diferentes modelos apresentadas por Pachepsky et al. (1996).

Figura 1 – Assimilação potencial de dióxido de carbono em função da radiação solar fotossinteticamente ativa absorvível, para diferentes temperaturas do ar

Pelo balanço de ondas curtas, a radiação solar disponível para o interior do dossel (R_{ab}) é a radiação incidente disponível (R_d , $M T^{-3}$) no topo da vegetação menos a radiação refletida pela mesma, que por sua vez é uma fração (λ_r) da radiação incidente (PEREIRA et al., 2002; p.182):

$$R_{ab} = R_d - \lambda_r \cdot R_d \quad \therefore \quad R_{ab} = R_d \cdot (1 - \lambda_r) \quad (87)$$

em que λ_r é a fração de radiação recebida que é refletida. O valor do albedo (λ_r) equivale a 1 quando há reflexão total da luz, e a 0 quando há absorção total (WIKIPEDIA, 2007).

Apenas uma fração da radiação disponível no topo da vegetação será traduzida em radiação solar fotossinteticamente ativa para as plantas, e apenas uma fração desta é absorvível, concluindo-se que:

$$R_d = R_g \cdot \lambda_{PAR} \cdot \lambda_{ab} \quad (88)$$

em que R_g é a radiação solar global média incidente no dia ($MJ m^{-2} dia^{-1}$); e λ_{PAR} e λ_{ab} são as frações fotossinteticamente ativa de R_g e absorvida da fotossinteticamente ativa, respectivamente.

Substituindo a eq. (88) na eq. (87):

$$R_{ab} = R_g \cdot \lambda_{PAR} \cdot \lambda_{ab} \cdot (1 - \lambda_r) \quad (89)$$

O fluxo radiação solar fotossinteticamente ativa absorvível [R_{ab} , MJ m⁻² (folha) dia⁻¹], se for ponderado em relação ao comprimento astronômico do dia (H , h dia⁻¹), pode ser descrito de acordo com a seguinte equação:

$$R_{ab} = 0,3987 \cdot \frac{R_g}{H} \cdot \lambda_{PAR} \cdot \lambda_{ab} \cdot (1 - \lambda_r) \quad (90)$$

A eq. (90) foi parametrizada conforme a seguinte análise dimensional:

$$R_{ab} \cdot \frac{\text{cal}_{ab}}{\text{cm}_f^2 \cdot \text{min}} = \frac{R_g \cdot \frac{\text{MJ}_{inc}}{\text{m}_f^2 \cdot \text{dia}} \cdot \frac{10^6}{\text{M}} \cdot \frac{\text{cal}_{inc}}{4,18 \cdot \text{J}_{inc}} \cdot \frac{\text{m}_f \cdot \text{m}_f}{(10^2 \cdot \text{cm}_f) \cdot (10^2 \cdot \text{cm}_f)}}{H \cdot \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot \frac{60 \cdot \text{min}}{\text{h}}} \cdot \lambda_{PAR} \cdot \frac{\text{cal}_{PAR}}{\text{cal}_{inc}} \cdot \lambda_{ab} \cdot \frac{\text{cal}_{ab}}{\text{cal}_{PAR}} \cdot \left(1 - \lambda_r \cdot \frac{\text{cal}_{ref}}{\text{cal}_{inc}} \right) \quad (91)$$

em que cm_f se refere ao centímetro de folha; m_f ao metro de folha; cal_{ab} à caloria contida na radiação fotossinteticamente ativa incidente que é absorvida; J_{inc} ao Joule contido na radiação que é incidente; cal_{inc} à caloria contida na radiação que é incidente; cal_{PAR} à caloria contida na radiação que é fotossinteticamente ativa incidente, cal_{ab} à caloria contida na radiação fotossinteticamente ativa que é absorvida; e cal_{ref} à caloria contida na radiação que é refletida.

A rigor, as funções de transferência de calor e de trabalho não são diferenciáveis, pois, pela terceira lei da termodinâmica, há a definição da variação de energia, e não da energia absoluta de um sistema. Isso ocorre porque calor e trabalho são quantidades que dependem de um “histórico”, não sendo suficiente conhecer apenas os estados final e inicial, senão o caminho exato seguido pelo sistema durante a variação de estado (LIBARDI, 2005, p.64). Assim, todo calor que se transfere para um corpo deixa de ser calor, e passa ser energia interna daquele corpo. O que se mede, via de regra, é a transferência de energia, e não a energia de um corpo, tornando a expressão “caloria contida na radiação” uma expressão não completamente correta.

Adota-se $\lambda_{PAR} = 0,5$ MJ (radiação fotossinteticamente ativa incidente) MJ⁻¹ (radiação global incidente), conforme sugerem Sinclair e Muchow (1999) em extensa revisão; $\lambda_{ab} = 0,85$ MJ (radiação fotossinteticamente ativa absorvida) MJ⁻¹ (radiação fotossinteticamente ativa interceptada), conforme sugerem Sinclair e Muchow (1999) e Bonhomme (2000b); e $\lambda_r = 0,23$ para o albedo [MJ (radiação refletida pelo sistema solo-planta) MJ⁻¹ (radiação solar global incidente)], de acordo com Oguntunde e Giesen (2004) para a cultura do milho. A variável R_{ab} não considera a fração de luz interceptada porque as curvas derivadas dos dados extraídos de Heemst (1986), referente às várias respostas de A_{dc} vs. radiação em função da temperatura [eq. (86)]; já consideram a

radiação como sendo interceptada, visto que são oriundos de medidas pontuais realizadas diretamente nas folhas.

À base de carboidrato e não de biomassa, Choudhury (2001) deduz que a eficiência de uso do carbono (CUE) relaciona a eficiência de uso da radiação pela cultura [RUE_c , g (CH_2O adicionado à estrutura da biomassa) MJ^{-1} (radiação fotossinteticamente ativa interceptada)] com a eficiência de uso da radiação para fotossíntese bruta [RUE_g , g (CH_2O produzido pela fotossíntese bruta) MJ^{-1} (radiação fotossinteticamente ativa incidente – neste caso, toda ela é interceptada e absorvida)], permitindo estabelecer o seguinte quociente:

$$CUE = \frac{RUE_c}{RUE_g} \quad (92)$$

Na equação acima, todas as variáveis são definidas à base de CH_2O (CHOUDHURY, 2001). Se RUE_c é substituído pela tradicional eficiência de uso da radiação [RUE , g (fitomassa seca de parte aérea) por MJ^{-1} (radiação fotossinteticamente ativa interceptada)], CUE permanece adimensional e não modifica a dimensão da taxa de fotossíntese líquida, embora adquira outra magnitude de valor. CUE é então convertido para “eficiência de uso do carbono para a produção de fitomassa” (CUE_f). Disso exposto:

$$CUE_f = \frac{RUE}{RUE_g} \quad (93)$$

Pela eq. (93), nota-se que CUE_f é uma forma de se relativizar RUE. Para a cultura do milho, embora Loomis e Amthor (1999) tenham estimado uma RUE potencial por volta de 4,9 g (fitomassa seca total) MJ^{-1} (RFA absorvida), poucos trabalhos relatam valores excedendo 3,4 g (fitomassa seca de parte aérea) MJ^{-1} (RFA interceptada), conforme Sinclair e Muchow (1999).

Trabalhando em condições de campo quase ótimas, Lindquist et al. (2005) recomendam os valores mínimos equivalentes a 3,7 g MJ^{-1} (RFA interceptada) ou 3,8 g MJ^{-1} (RFA absorvida) para modelos de simulação que necessitem da RUE como variável de entrada, em modelos de produtividade de grãos de milho. Tais valores foram obtidos em dois diferentes ambientes, durante cinco estações de crescimento (cinco anos), e foram calculados assumindo-se uma relação linear empírica entre radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada e fitomassa seca acumulada de parte aérea. Demetriades-Shaw et al. (1994) criticam esse tipo de abordagem, alegando que existe nela uma fragilidade tanto lógica quanto aritmética, embora RUE correlacione fortemente fitomassa e radiação interceptada, para qualquer espécie, e que apresenta

respaldos científicos em diversos trabalhos (RUSSEL et al, 1989, p.23; ARKEBAUER et al., 1994; ANDRADE et al., 1996, p.62; SINCLAIR; MUCHOW, 1999; LINDIQUIST et al., 2005).

Substituindo a eq. (92) na eq. (85):

$$FL = FB \cdot \frac{RUE_c}{RUEg} \quad (94)$$

Já em termos de fitomassa, substitui-se a eq. (93) na eq. (85):

$$Wpa = FB \cdot \frac{RUE}{RUEg} \quad (95)$$

A verificação conjunta das relações e dos fatores de conversão que resultam na equação da taxa diária de produtividade de fitomassa seca de parte aérea ($M L^{-2} T^{-1}$), corrigida para o dossel, é obtida através da seguinte análise dimensional:

$$Wpa \cdot \frac{kg \cdot Wpa}{ha \cdot dia} = \frac{FB \cdot kg \cdot CH_2O}{ha \cdot dia} \cdot \frac{kg \cdot W}{GR \cdot kg \cdot CH_2O} \cdot \frac{TCF \cdot kg \cdot C}{kg \cdot W} \cdot \frac{kg \cdot CH_2O}{TCC \cdot kg \cdot C} \cdot \frac{10^3 \cdot g \cdot CH_2O}{kg \cdot CH_2O} \cdot \frac{RUE \cdot \frac{g \cdot Wpa}{MJ_{int}}}{RUEg \cdot \frac{g \cdot CH_2O}{MJ_{inc}}} \cdot \frac{\lambda_I \cdot MJ_{int}}{MJ_{inc}} \cdot \frac{kg \cdot Wpa}{10^3 \cdot g \cdot Wpa} \quad (96)$$

em que GR se refere ao requerimento de glucose [kg (glucose) kg^{-1} (fitomassa)] para a elaboração de uma unidade (kg) de fitomassa seca; TCF à proporção de carbono na fitomassa [kg (carbono) kg^{-1} (fitomassa)]; TCC à proporção de carbono na glucose [kg (carbono) kg^{-1} (glucose)]; e λ_I à fração de radiação interceptada pelo dossel [eq. (50)].

O atributo TCF assume um valor robusto por volta de 0,45 (LOOMIS; CONNOR, 1992; p.258), e TCC é fixo, igual a 12/30. Por ser uma cultura de grãos não-oleaginosos, a cultura do milho requer, por exemplo, menos glucose para elaborar fitomassa que a cultura da soja, fazendo com que a primeira apresente valores de GR por volta de 1,391 (NRC, 1982). Já o valor de RUEg gira em torno de 5,4 g para a cultura do milho (CHOUDHURY, 2001). Ao inserir esses valores na eq. (96):

$$Wpa \cdot \frac{kg \cdot Wpa}{ha \cdot dia} = \frac{FB \cdot kg \cdot CH_2O}{ha \cdot dia} \cdot \frac{kg \cdot W}{1.391 \cdot kg \cdot CH_2O} \cdot \frac{0,45 \cdot kg \cdot C}{kg \cdot W} \cdot \frac{30 \cdot kg \cdot CH_2O}{12 \cdot kg \cdot C} \cdot \frac{10^3 \cdot g \cdot CH_2O}{kg \cdot CH_2O} \cdot \frac{RUE \cdot \frac{g \cdot Wpa}{MJ_{int}}}{5,4 \cdot \frac{g \cdot CH_2O}{MJ_{inc}}} \cdot \frac{\lambda_I \cdot MJ_{int}}{MJ_{inc}} \cdot \frac{kg \cdot Wpa}{10^3 \cdot g \cdot Wpa} \quad (97)$$

Solucionando-se a análise dimensional acima, obtém-se a parametrização da equação que expressa a taxa diária de fotossíntese líquida [Wpa , kg (fitomassa seca de parte aérea) $ha^{-1} dia^{-1}$] corrigida para o dossel de plantas C4:

$$Wpa = 0,1498 \cdot FB \cdot \lambda_I \cdot RUE \quad (98)$$

É necessário ainda uma equação que expresse a fotossíntese bruta, em termos de dossel e ao longo do ciclo, para que a eq. (98) seja aplicada adequadamente. Assim como λ_I , FB irá variar

com o tempo, o qual apresenta grande variação temporal quanto aos atributos climáticos que são determinantes do desenvolvimento da área foliar, que por sua vez fornece uma idéia de aporte para a fotossíntese. Se os valores diários de Wpa são somados até uma dia qualquer do ciclo, obtém-se o acúmulo de matéria seca até esse dia (VERDOODT et al., 2004, DETOMINI et al., 2006), bastando multiplicá-lo pelo índice de colheita para se obter a produtividade final de grãos.

A partir da lei dos gases ideais de Clapeyron, que transforma o volume de uma substância em massa da mesma (no caso, volume de CO₂ em massa de CO₂, que é posteriormente convertido em CH₂O pela equação da fotossíntese), faz-se a análise dimensional:

$$FB \cdot \frac{\text{kg}_{\text{CH}_2\text{O}}}{\text{ha} \cdot \text{dia}} = \frac{Adc \cdot \frac{\mu \cdot L_{\text{CO}_2}}{\text{cm}^2_{\text{folha}} \cdot \text{h}} \cdot \frac{10^{-6}}{\mu} \cdot \frac{10^4 \cdot \text{cm}^2_{\text{folha}}}{\text{m}^2_{\text{folha}}} \cdot \frac{30 \cdot \text{g}_{\text{CH}_2\text{O}}}{44 \cdot \text{g}_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{\text{kg}_{\text{CH}_2\text{O}}}{10^3 \cdot \text{g}_{\text{CH}_2\text{O}}} \cdot IAF \cdot \frac{\text{m}^2_{\text{folha}}}{\text{m}^2_{\text{solo}}} \cdot \frac{10^4 \cdot \text{m}^2_{\text{solo}}}{\text{ha}} \cdot H \cdot \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot P \cdot \text{atm}}{(T + 273) \cdot K \cdot \frac{0,082 \cdot \text{atm} \cdot L_{\text{CO}_2}}{\text{mol}_{\text{CO}_2} \cdot K} \cdot \frac{\text{mol}_{\text{CO}_2}}{44 \cdot \text{g}_{\text{CO}_2}}} \quad (99)$$

A parametrização final da eq. (99) resulta na seguinte equação da taxa de fotossíntese bruta diária [FB, kg (CH₂O) ha⁻¹ dia⁻¹] para o j-ésimo dia:

$$FB_j = \frac{36,5854 \cdot Adc_j \cdot IAF_j \cdot H_j \cdot P_j}{T_j + 273} \quad (100)$$

em que Adc_j se refere à taxa de assimilação de dióxido de carbono [$\mu\text{L}(\text{CO}_2) \text{cm}^{-2}(\text{folha}) \text{h}^{-1}$]; IAF_j ao índice de área foliar; e H_j ao comprimento astronômico (h dia⁻¹) do dia; T_j à temperatura média do ar no dia; e P_j à pressão (atm).

Em caso de não haver disponibilidade de dados para P_j, assume-se P (em kPa) em função da altitude (Alt, m), de acordo com Allen et al. (2006; p.31):

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot \text{Alt}}{293} \right)^{5,26} \quad (101)$$

Para transformar para atm, basta dividir o valor encontrado por 101,3. O valor de P não se reduz substancialmente com o aumento da altitude. Quanto maior esta, no entanto, menor deverá ser as temperaturas do local, e conseqüentemente maior deverá ser a energia requerida para a vaporização da água (em outras palavras, o calor latente de vaporização). Isso se traduz em um fator de redução de produtividade em função do aumento da altitude, embora a redução de temperatura possa implicar, por outro lado, em um fator de aumento de produtividade devido às menores taxas de respiração durante a noite. Elevadas produções podem estar associadas a elevadas taxas respiratórias (PARSONS, 1988).

2.8 Nitrogênio

O nitrogênio é o elemento mineral mais requerido pelos vegetais, sendo fundamental na formação de biomassa e em diversos processos fisiológicos dos vegetais. Embora seja disponível em abundância na natureza (78% do ar que respiramos), sua fixação industrial é originada a partir de um elevado custo energético. Esse paradoxo faz do elemento um dos principais gargalos da agricultura, principalmente para os sistemas agrícolas conduzidos sob altos níveis de emprego de tecnologia. Quando o elemento não é limitante para o desenvolvimento vegetal em condições hídricas adequadas, a produtividade é determinada pelo efeito combinado da radiação solar e temperatura (KEULEN et al., 1989).

Dourado Neto e Detomini (2005) deduzem um modelo mecanístico para calcular o requerimento de fertilizante nitrogenado em pastagens (dimensão: $M L^{-2}$), baseando-se para tanto em oito variáveis independentes e adimensionais, e em mais uma com dimensão $M L^{-2}$. Esta última seria a produtividade almejada, que para o caso da cultura do milho traduzir-se-ia em produtividade almejada de grãos, ou produtividade potencial de grãos [W_g , kg (grãos) ha^{-1}], em caso de produtividade máxima. A exportação do elemento N [EXP_N , kg (N) ha^{-1}] é obtida simplesmente pela quantidade de nitrogênio que é veiculada na requerida produtividade:

$$EXP_N = W_g \cdot T_{PB} \cdot T_N \quad (102)$$

em que T_{PB} e T_N são os teores de proteína bruta na parte exportável [kg (proteína bruta) kg^{-1} grão] e de nitrogênio na proteína [kg (N) kg^{-1} (proteína bruta)], respectivamente. O produto entre ambos corresponde ao teor de nitrogênio nos grãos.

Ao final do ciclo da cultura, o retorno acumulado de nitrogênio [RET_N , kg (N) ha^{-1}] com os restos culturais ao solo é assim expresso:

$$RET_N = W_{op} \cdot T_{Nop} \quad (103)$$

em que W_{op} se refere à produtividade de outras partes [kg (outras partes) ha^{-1}] que não a da parte exportável (grãos); e T_{Nop} ao teor de N nessas outras partes [kg (N) kg^{-1} (outras partes)].

Como a produtividade de outras partes multiplicada pela fração de interesse equivale ao mesmo que a produtividade de interesse multiplicada pela fração restante, pode-se inferir que:

$$W_{op} \cdot IC = W_g \cdot (1 - IC_T) \quad (104)$$

em que IC_T se refere ao índice de colheita [kg (grãos) kg^{-1} fitomassa seca total].

Rearranjando a (104) de maneira conveniente:

$$W_{op} = \frac{Wg \cdot (1 - IC_T)}{IC} \quad (105)$$

A extração de nitrogênio ou absorção acumulada [ABS_N , kg (N) ha^{-1}] é, portanto:

$$ABS_N = RET_N + EXP_N \quad (106)$$

Por conseguinte, a quantidade requerida de nitrogênio oriunda de fertilizante (Q_N , kg ha^{-1}) será a extração de nitrogênio descontando-se a quantidade relativa de nitrogênio que é fornecida pelo solo, e levando em consideração a eficiência [Ef_{AN} , kg (N extraído pela planta e que é proveniente do fertilizante adicionado) kg^{-1} (N total aplicado via fertilizante)], conforme a seguinte equação:

$$Q_N = \frac{ABS_N \cdot (1 - N_s)}{Ef_{AN}} \quad (107)$$

Substituindo a eq. (106) na eq. (107), tem-se:

$$Q_N = \frac{(RET_N + EXP_N) \cdot (1 - N_s)}{Ef_{AN}} \quad (108)$$

Substituindo a eq. (102) e a eq. (103) na eq. (108), tem-se:

$$Q_N = \frac{(Wg \cdot T_{PB} \cdot T_N + T_{Nop} \cdot W_{op}) \cdot (1 - N_s)}{Ef_{AN}} \quad (109)$$

Substituindo a eq. (105) na eq. (109), encontra-se a equação apresentada por Dourado Neto e Fancelli (2000), a qual nos fornece a recomendação prática de adubação nitrogenada [Q_N , kg (N de fertilizante) ha^{-1}]:

$$Q_N = \frac{Wg \cdot [(T_{PB} \cdot T_N \cdot IC_T) + T_{Nop} \cdot (1 - IC_T)] \cdot (1 - N_s)}{IC_T \cdot Ef_{AN}} \quad (110)$$

O atributo T_{Nop} de uma planta é a soma dos produtos da fitomassa de uma diferente partição pelo seu correspondente teor de nitrogênio. Keulen et al. (1989) comentam que T_{Nop} tende a cair linearmente ao longo da cultura se não há restrição no suprimento de N à cultura, e reportam as seguintes magnitudes genéricas para os teores de N dessas partições no ponto de maturidade fisiológica: a) folhas: 0,02 kg kg^{-1} ; b) colmo: 0,008 kg kg^{-1} ; e c) 0,01 kg kg^{-1} . Um valor modal para T_{Nop} estaria na ordem de 0,006 kg kg^{-1} . Wolschick et al. (2003) também reportam magnitudes para as massas (por planta) de colmo, folhas e grãos, bem como os teores de N das folhas mais os colmos, da palhada da espiga, do sabugo e dos grãos. Nestes, o teor de N é em torno de 0,014 kg kg^{-1} , dependendo do nível e da forma de adubação empregada.

A máxima taxa de assimilação de dióxido de carbono é linearmente correlacionada com a concentração de N nas folhas, em uma vasta amplitude, pelo menos até cerca de $0,06 \text{ kg kg}^{-1}$, ou ainda até o valor 2 kg (N) m^{-2} (folha); embora nenhum efeito significativo dessa concentração sobre a eficiência de uso da luz tenha sido verificada nos trabalhos de Wilson (1975) e de Cook e Evans (1983). Diversos estudos também indicaram que a eficiência do uso da água aumentou com o aumento da disponibilidade de nitrogênio (VIETS JR, 1962; KEULEN, 1975). A interpretação desses resultados se torna difícil a partir do momento em que não se faz a distinção entre a água perdida por transpiração e àquela perdida por evaporação do solo. Plantas se desenvolvendo sob carência de nitrogênio apresentam, normalmente, menor área foliar que aquelas se desenvolvendo sob ótimas condições nutricionais, resultando em um auto-sombreamento mais tardio pelas primeiras. Consequentemente, uma grande quantidade de água é perdida através do solo, reduzindo a eficiência de uso da água (KEULEN et al., 1989).

As relações existentes entre suprimento de nitrogênio, produção de biomassa, teores de nitrogênio e índice de colheita não são completamente explicadas na literatura. Contudo, se o suprimento de nitrogênio é muito elevado a ponto de levar a elevadas taxas de produtividade de biomassa total, o índice de colheita pode até diminuir com o aumento da produtividade de grãos, pois outras partes (ex.: vegetativas) podem se desenvolver em uma proporção ainda maior (KEULEN et al., 1989). Outro aspecto importante foi observado por Kramer (1979) e Mesdag (1979), os quais encontraram uma relação negativa entre o aumento de produtividade e o teor de proteína nos grãos de cereais, havendo ainda um certo confundimento com o fato de o material genético ser de alta ou baixa proteína. Não obstante, a característica genética da longevidade de folhas pode favorecer tanto a produtividade de grãos quanto o teor de N nestes, pelo fato de poder existir um prolongamento na translocação do elemento (KEULEN et al., 1989).

Já Ef_{AN} e N_s serão dependentes, principalmente, da classe textural do solo (argiloso ou arenoso), do teor de matéria orgânica do solo, do fertilizante utilizado (uréia, sulfato de amônio, por exemplo), da forma de aplicação (à lança ou incorporado através da água de irrigação; localizado ou em área total), da condição climática e do sistema de produção (seqüência de cultura, se houver). Particularmente, a N_s poderá depender também da profundidade efetiva do sistema radicular (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). A rigor, a informação sobre os atributos Ef_{AN} e N_s é gerada concomitantemente pela pesquisa, utilizando-se a técnica isotópica do fertilizante marcado com ^{15}N (ZAPATA, 1990).

2.9 Produtividade de grãos e adequação genótipo-ambiente

Define-se produtividade potencial de grãos como a produtividade de um genótipo em um ambiente no qual ele é adequado, sem limitações edafoclimáticas e nutricionais, livre da ação de pragas e doenças, e com os demais estresses efetivamente controlados (EVANS, 1993). A produtividade máxima de uma cultura quando todos os outros fatores limitantes da produtividade, passíveis de controles, são removidos ou minimizados, independente da viabilidade econômica do sistema. Segundo Cooper (2003) para com a cultura da soja, os objetivos de se estudar as produtividades máximas são: (i) tentar repetir nos campos de multiplicação as produtividades encontradas nas parcelas experimentais; (ii) detectar os fatores limitantes da produtividade de grãos; e (iii) identificar as produtividades máximas possíveis para a cultura.

A posição geográfica define a latitude, que por sua vez define, por exemplo, o ângulo médio sob o qual deve permanecer uma placa solar para a captação de energia na latitude em que se encontra. Uma assunção razoável seria imaginar as folhas funcionando como uma placa solar. Portanto, quanto mais distante do equador é região produtora, maior deve ser o ângulo ideal das folhas de uma lavoura para que esta capture luz de forma eficiente. Com as folhas mais inclinadas (mais eretas), há a possibilidade de se elevar a população de plantas preservando-se a questão da competição intra-específica por luz, favorecendo finalmente a produtividade de planta por área (MAGALHÃES; SILVA, 1987). Para latitudes muito grandes, no entanto, genótipos não tolerantes a baixas temperaturas ficariam comprometidos quanto ao seu desenvolvimento, o que restringiria a escolha desse genótipo para esses locais.

Ainda, quanto mais próximo do equador se localiza a unidade produtora de biomassa, maior é a disponibilidade de energia solar quando consideramos um ano completo, mas menor é a disponibilidade quando consideramos apenas uma estação de cultivo. A luz interceptada pela população será função da arquitetura e arranjo espacial das folhas, bem como da população de plantas empregada. A eficiência de conversão e partição de fotoassimilados, no entanto, é função da temperatura e da habilidade do genótipo quanto às suas relações fonte-dreno (FANCELLI; DOURADO NETO, 1999).

Os híbridos de milho são caracterizados como precoce, superprecoce ou tardios, em função da soma térmica que acumulam da emergência ao florescimento. Se um genótipo precoce é posicionado em locais com temperaturas noturnas quentes, a fase vegetativa poderá ser encurtada e o florescimento antecipado, fazendo com que a aparato fotossintético seja “sub-dimensionado”,

já que se tratam de plantas de hábito de crescimento determinado. Do contrário, um material tardio pode ter seu ciclo prolongado se for posicionado em locais com temperaturas noturnas frias, implicando em desenvolvimento vegetativo exacerbado e na postergação de seu florescimento, aumentando assim a competição, entre órgãos, pelos fotoassimilados. Ambas as situações levam à redução do potencial produtivo dos híbridos de milho (FANCELLI, DOURADO NETO, 2000, p.121).

O índice de colheita (IC), que se constitui na fração dos grãos produzidos em relação à fitomassa seca de parte aérea (as vezes considerado em relação ao todo), pode ser empregado em programas de melhoramento genético e de avaliação de performance de genótipos submetidos a diferentes condições climáticas (DONALD; HAMBLIN, 1976). Ainda, o índice de colheita pode indicar a habilidade de um híbrido combinar produtividade e destinar massa de matéria seca acumulada a componentes de interesse econômico. As características morfológicas e fisiológicas associadas com a elevada produtividade de grãos variam para os diferentes híbridos. A precocidade conferiu aos materiais existentes os maiores índices de partição (DURÃES et al., 1993). Por outro lado, a maior habilidade de partição relacionada aos híbridos superprecoces e precoces somente se manifesta quando forem satisfeitas as exigências climáticas e nutricionais (FANCELLI, 1986).

O IC máximo para a cultura do milho encontra-se próximo a 0,60 obtido em regiões de clima temperado e elevada latitude. Em contrapartida, os menores índices de colheita mencionados na literatura referem-se àqueles oriundos de países como Gana (IC = 0,27) e Quênia (IC = 0,10), ambos situados na África tropical (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000; p.48). Por não existir relações bem documentadas sobre a variação de IC em relação às variáveis climáticas e com a fitomassa total, um critério estocástico pode ser assumido para a simulação deste atributo.

Se dois genótipos diferentes são submetidos a uma oferta ambiental não restritiva ao desenvolvimento vegetal, o genótipo que apresentar maior habilidade em produzir parte aérea deverá ser considerado o mais adequado para sistemas intensificados. Porém, se este mesmo genótipo for submetido a uma restrição ambiental (principalmente de suprimento hídrico), ele deverá supostamente alterar sua partição em prol do sistema radicular, o qual tenderá a ser relativamente maior (em fitomassa) que o sistema radicular ocorrente na situação não-restritiva, ainda que a fitomassa absoluta total seja menor, nessas condições. Esse fenômeno pode ocorrer também para o genótipo mais rústico, porém em menores proporções, o que levaria o genótipo

mais rústico a produzir, eventualmente, parte aérea até maior que a do genótipo hábil para parte aérea, sob condições restritivas (DETOMINI; DOURADO NETO, 2005).

A competição entre indivíduos de uma mesma população por recursos materiais e energéticos seleciona aqueles que detêm características adaptativas superiores (de natureza morfológica e fisiológica, principalmente). A capacidade de destinar, prioritariamente, recursos para a reprodução, sobrevivência, desenvolvimento, crescimento e defesa podem ser consideradas formas de adaptação importantes expressas pela variação temporal da alocação de fotoassimilados (CODY, 1966). Genótipos tropicais de milho apresentam partição de fotoassimilados (que pode ser inferida pela variação temporal da massa de matéria seca) característica, o que pode explicar o baixo rendimento quando comparados aos de clima temperado. A produtividade de milho é limitado pela amplitude do dreno. Essa limitada capacidade de dreno em híbridos de genótipos tropicais é atribuída pela competição entre as diferentes partes vegetativas (folhas, colmos e brácteas) e a espiga (GOLDSWORTHY; COLEGROVE, 1974).

O elevado porte, excessivo número de folhas, maturação tardia, pendão avantajado, maior nível de dominância apical e baixo índice de colheita foram importantes para a adaptação ao ambiente tropical. Plantas com essas características poderiam competir, eficientemente, com outras plantas de rápido crescimento, bem como serem submetidas a intensa desfolha ocasionada por insetos. Ainda, as reservas de açúcares no colmo pode ser, evolutivamente, resultado da resistência à seca, bem como à tolerância a podridões da haste (EVANS, 1975).

Para o caso específico da cultura de milho, é por esses motivos que a produtividade potencial (considerando uma única safra) no Brasil tende a ser intrinsecamente menor que a nos Estados Unidos: neste país, a principal estação de cultivo apresenta dias mais longos (há mais tempo para fotossíntese), com temperaturas médias diurnas maiores (favorável ao crescimento) e noturnas menores (reduzindo as taxas respiratórias – também favorável ao crescimento), e as populações podem ser mais adensadas devido às maiores latitudes. Analisando-se ainda os aspectos edáficos, os solos norte-americanos apresentam, normalmente, maiores capacidades de troca catiônica e de retenção de água, provendo condições para a obtenção de maiores produtividades. Isso possibilita que a escolha dos híbridos seja feita para materiais precoces ou superprecoces, os quais são capazes de expressar seu maior índice de colheita nessas condições.

Quando o suprimento de água e nutrientes não é limitante, tal como o controle de pragas, a intervenção humana na lavoura deve buscar a melhor época de semeadura e a melhor população

de plantas, diante da premissa que o híbrido escolhido seja adequado à região. Do ponto de vista geométrico e assumindo que as plantas de milho exercem a cobertura do solo de maneira circular (ex.: vista aérea encerrando um círculo), a população de plantas seria otimizada, em cm^2 por planta, se a semeadura fosse realizada de forma hexagonal (DOURADO NETO et al., 2003), o que só não é possível devido ao modo de operação das semeadoras. Desconsiderando-se as perdas sementes inviáveis e as por mortalidade das plantas viabilizadas ao longo da lavoura, a população de plantas (Pop, plantas ha^{-1}) é assim calculada:

$$\text{Pop} = 10^4 \cdot \frac{D_{\text{sem}}}{S_e} \quad (111)$$

em que D_{sem} é a densidade de semeadura (plantas m^{-1}); e S_e é o espaçamento (m).

O aporte de fotossíntese de uma planta é definida pela magnitude do desenvolvimento da área foliar da mesma, diante da premissa que outros órgãos vegetais não realizam fotossíntese relevante. Introduzido por Watson (1947) para permitir que a extrapolação da assimilação de CO_2 pelas culturas fosse feito em termos de área plantada, e não de plantas individuais, o índice de área foliar [IAF, m^2 (folha) m^{-2} (solo)] no j-ésimo dia do ciclo pode ser assim calculado:

$$\text{IAF}_j = 10^{-8} \cdot \text{AF}_j \cdot \text{Pop} \quad (112)$$

em que AF_j é a área foliar por planta [cm^2 (folha) planta^{-1}] no j-ésimo dia do ciclo da cultura.

Dwyer e Stewart (1986) propuseram um modelo tipo “sino” (em Inglês, denominada “*Bell-shaped function*”) para caracterizar a área de uma folha, em plantas de milho, em função do número de folhas já expandidas. Tal modelo foi consagrado porque expressa parâmetros com significado biológico, como grau de espessura foliar, grau de simetria foliar, área foliar da maior folha, e número de ordem desta. Como desvantagem, o modelo apresenta o grande número de parâmetros, guardando ainda um certo grau de empirismo quando da estimação dos dois últimos parâmetros mencionados. O modelo foi amplamente analisado em estudos posteriores (KEATING; WAFULA, 1992; ELINGS, 2000; VALENTINUZ; TOLLENAR, 2006).

A eq. (112) servirá à eq. (100) no cálculo da taxa de fotossíntese bruta, que por sua vez resultarão em taxas diárias de produtividade. Outros modelos de estimativa da área foliar são também reportados na literatura, como os de, Tardieu et al. (2000), em casa de vegetação, que propõem um modelo de expansão foliar contemplando deficiência hídrica, assim como fizeram Reymmond et al. (2003), que envolveram também os aspectos genéticos do milho. Já Yang e

Alley (2005) deduzem um modelo mecanístico, resultante em um modelo de Gauss capaz de explicar a distribuição de área foliar na planta.

Yin et al. (2003) apontam que a grande limitação da maioria dos modelos de área foliar é que estes não contemplam a questão do nitrogênio como elemento-chave à determinação da área foliar, tampouco a distribuição do elemento ao longo do perfil do dossel. Água e nitrogênio são os fatores que mais interferem no desenvolvimento da área foliar, que por sua vez é o componente vegetal que mais determina o potencial produtivo. A água atua no mecanismo de expansão foliar, ao passo que o nitrogênio atua nos processos fotossintéticos.

Visando estabelecer uma relação funcional entre fitomassa e evapotranspiração para diferentes condições disponibilidade hídrica, Doorenbos e Kassam (1979) relacionaram os consumos hídricos com as produções de parte aérea, e propuseram:

$$1 - \frac{W_{gd}}{W_g} = k_y \cdot \left(1 - \frac{CH_a}{CH} \right) \quad (113)$$

em que W_g e W_{gd} ($M L^{-2}$) se refere à produtividade da cultura em condições de baixo e de elevado suprimento hídrico, respectivamente; CH_a e CH os consumos hídricos (mm) correspondentes; e K_y é o fator de reposta da cultura à água.

Para a cultura do milho, o valor de K_y varia para as fases vegetativas ($K_y = 0,4$), de florescimento ($K_y = 1,5$), e de enchimento de grãos ($K_y = 0,5$), podendo ainda ser adotado um valor genérico para todo o ciclo ($K_y = 1,25$). Baseando-se no modelo de Doorenbos e Kassam (1979) e nas diferenças de K_y para cada fase da cultura, Rao et al. (1988) apresentaram um modelo multiplicativo para contemplar a dependência do estresse hídrico de uma fase com um estresse ocorrente em outra fase. Numa escala diária, isso não faz muito sentido porque um estresse moderado de 20%, por exemplo ($D_h = 0,80$ e $F_d = 0,75$; ver adiante), ocasionaria depleção total antes que a cultura atingisse quatro folhas, o que na prática não se aplica. Numa escala diária, a eq. (113) talvez pudesse ser reescrita da seguinte maneira:

$$1 - \frac{W_{pad}}{W_{pa}} = k_y \cdot \left(1 - \frac{ET_a}{ET} \right) \quad (114)$$

ET_a é a evapotranspiração ($mm \text{ dia}^{-1}$) da cultura numa situação qualquer de déficit hídrico; e ET a evapotranspiração potencial da cultura de milho ($mm \text{ dia}^{-1}$). O consumo hídrico de uma fase seria a soma das evapotranspirações diárias ocorrentes nesta fase.

Os valores de K_y para a maioria das culturas foram determinados supondo-se ser linear a relação entre produtividade relativa e evapotranspiração relativa, bem como válida para déficits

hídricos até 50%, ou seja $(1 - ETa/ET) = 0,5$. Esses valores estão baseados em análise de dados experimentais de campo que abrangem uma ampla faixa de condições de crescimento, de variedades altamente produtivas, bem adaptadas ao ambiente de crescimento e desenvolvidas sob rigoroso nível de manejo (FRIZZONE, 2005; p.251).

Visando estabelecer uma relação funcional entre a eficiência de uso da água e o consumo hídrico para a cultura do trigo, Abbate et al. (2005) modelaram uma equação parabólica que interpreta a redução de D_h , a partir de uma condição sem déficit hídrico ($D_h = 1$) até 50% ($D_h = 0,5$), a variável F_d sendo também reduzida, mas em menor proporção que as reduções que ocorrem quando de D_h é abaixo de 50%, fazendo com que estas maiores reduções denotem um estresse severo. Entretanto, segundo este mesmo modelo, a eficiência relativa de uso da água sempre aumenta com a redução do valor de F_d , ou seja, quanto maior o estresse hídrico (menor o F_d), maior deverá ser a eficiência de uso da água, mesmo que isso implique em redução de produtividade. A limitação deste modelo é a pequena variação na redução da produtividade quando estresses hídricos moderados são aplicados (ex.: $1 < D_h < 0,75$).

A relação ETa/ET pode ser interpretada como um nível de estresse hídrico sobre o qual as culturas se desenvolvem (LAAR et al., 1992; p.40), sendo igual a zero o nível máximo de estresse por escassez de água. Denominando-a como critério de suprimento hídrico (D_h), tem-se:

$$D_h = \frac{ETa}{ET} \therefore ETa = D_h \cdot ET \quad (115)$$

Substituindo a eq. (115) na eq. (114), e rearranjando de forma conveniente:

$$W_{pad} = W_{pa} \cdot [1 - k_y \cdot (1 - D_h)] \quad (116)$$

em que W_{pad} é a taxa de produtividade ($kg\ ha^{-1}\ dia^{-1}$) de parte aérea deplecionada diária.

A eq. (116) pode ser entendida como sendo uma função de resposta da cultura, à água, em função do nível de déficit que se opera. O termo dentro dos colchetes pode ser interpretado como um fator de depleção [F_d , kg (fitomassa seca potencial de parte aérea) kg^{-1} (fitomassa seca deplecionada de parte aérea)] da variável W_{pa} , ou seja:

$$F_d = 1 - k_y \cdot (1 - D_h) \quad (117)$$

Logo, a taxa de produtividade de fitomassa seca de parte aérea em um dia será:

$$W_{pad} = W_{pa} \cdot F_d \quad (118)$$

Demonstrando-se a eq. (118) por análise dimensional:

$$\frac{W_{pad} \cdot \text{kg} \cdot \text{fitomassa deplecionada}}{\text{ha} \cdot \text{dia}} = \frac{W_{pa} \cdot \text{kg} \cdot \text{fitomassa potencial}}{\text{ha} \cdot \text{dia}} \cdot \frac{F_d \cdot \text{kg} \cdot \text{fitomassa deplecionada}}{\text{kg} \cdot \text{fitomassa potencial}} \quad (119)$$

Integrando-se de forma finita as taxas de produtividade deplecionada diária:

$$W_n = \sum_{j=0}^n W_{pad_j} \quad (120)$$

em que W_{pad_j} é a taxa de produtividade deplecionada no j -ésimo dia [kg (fitomassa seca de parte aérea deplecionada) $\text{ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$]; e W_n a produtividade final de fitomassa seca de parte aérea obtida no ponto de maturidade fisiológica [kg (fitomassa seca de parte aérea) ha^{-1}].

Pela eq. (120), nunca há perda de fitomassa, o que pode ser justificado pelo fato de as contabilidades individuais de W_{pa} já contemplarem as perdas por senescência via equação empírica da área foliar. A produtividade potencial de grãos de milho (W_g , kg (grãos) ha^{-1}), à base úmida, pode ser entendida como sendo toda a produtividade final [W_n , kg (MS) ha^{-1}] corrigida pelo índice de colheita [IC , kg (grãos) kg^{-1} (parte aérea)]. Portanto:

$$W_g = W_n \cdot IC \quad (121)$$

Para se converter de índice de colheita à base de fitomassa de parte aérea (IC) para índice de colheita à base de fitomassa seca total (IC_T), basta multiplicar IC pela fração da fitomassa total que corresponde à fitomassa de parte aérea. Quando isso é feito visando aplicar IC na eq. (110), ao invés de IC_T , Q_N é aumentado na medida em que essa fração se torna menor.

Caso se almeje obter a produtividade de grãos corrigido pela umidade dos mesmos no ponto de colheita [u , g (H_2O) g^{-1} (grão); geralmente: $u = 0,13$], tem-se:

$$W_g = \frac{W_n \cdot IC}{(1-u)} \quad (122)$$

Segundo Jensen (1968):

$$ET_a = K_c \cdot ET_o \quad (123)$$

Se ET_a é tida como a evapotranspiração da cultura numa situação qualquer, e ET como a evapotranspiração potencial, e se a eq. (123) é substituída na eq. (115):

$$ET_a = D_h \cdot K_c \cdot ET_o \quad (124)$$

O atributo D_h deve ser definido previamente em função de análise econômica, caso o recurso água seja escasso a ponto de sensibilizar substancialmente o valor monetário da produção (FIGUEIREDO et al., 2007). Em tese, a variável ET_a é passível de monitoramento na prática do manejo da irrigação, pois D_h pode ser previamente definido, K_c tabelado e ET_o calculado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Modelo para estimação da produtividade de grãos

A eq. (122) foi utilizada para a estimação da produtividade de grãos, podendo ser explicada pela reunião dos demais atributos do modelo geral (Figura 2).

Figura 2 – Representação esquemática dos atributos do modelo

As variáveis RUE , k e $AF(T)$ foram determinadas através de experimento de campo; as variáveis λ_{PAR} , λ_{ab} , λ_r , a_{AP} e b_{AP} foram adotadas de acordo com a revisão de literatura; R_{adc} foi ajustado por método iterativo em função da produtividade de grãos observada; DJ é escolhido pelo usuário (a época de semeadura); Φ e Alt são fixadas em função do local; e as variáveis D_{sem} e S_e são também definidas pelo usuário em relação à população de plantas desejada.

As variáveis aleatórias contínuas R_g e T são amostradas do histórico de clima, em pares de 10000, através de distribuição normal bivariada e com correlação entre as variáveis. Em caso de inexistência de um histórico climatológico, recorre-se à opção pela distribuição triangular, não havendo entretanto a correlação entre as variáveis pelo próprio fato de não haver histórico que as represente. Supõe-se que uma forma de minimizar esse aspecto é utilizar o mesmo número pseudo-aleatório gerado para amostrar ambas as variáveis (R_g e T), para cada iteração.

Já o índice de colheita (IC) é “amostrado” conforme distribuição triangular. Para tanto, a média dos valores observados (através do experimento de campo) de IC foi adotada como valor modal, e os valores mínimo e máximo como limites inferior e superior, respectivamente. O tamanho da amostra para IC é 10000, tal como para R_g e T .

Como consequência, todos os atributos que dependerem de R_g e/ou T são calculados também em número de 10000, inclusive a produtividade final de grãos. Logo após, são prontamente obtidos 10000 valores para os requerimentos de água e de nitrogênio, de acordo com a eq. (124) e com a eq. (110), respectivamente. A eq. (124) depende da entrada com os valores de K_c , os quais foram obtidos e modelados neste trabalho.

Uma alternativa para eliminar IC do modelo seria explicitá-lo na eq. (110), para posteriormente substituí-lo na eq. (122). Duas limitações surgiriam, contudo, se W_g fosse concebido como função de Q_N . A primeira seria devido à alta sensibilidade de W_g aos fatores $E_{f_{AN}}$ e N_s , os quais são também de difícil experimentação agrícola. A segunda, de menor importância, seria que RUE devesse ser expressa à base de fitomassa seca total, ao invés de à base de fitomassa seca da parte aérea. Ainda, Q_N tem fortes relações com RUE, k e $AF(T)$. Isso justifica a opção pelo uso de um modelo que calculasse Q_N *a posteriori*, levando assim à pergunta: “Qual a Q_N necessária para um determinado W_g ?”.

Para que haja a distribuição de todos os valores de W_g simulados, é necessário antes classificá-los; em outras palavras, verificar a “categoria” ou classe de frequência à qual cada valor simulado é pertencente. O primeiro passo para executar essa verificação é calcular a amplitude total da produtividade de grãos (AW_g), o que se resume à diferença entre o maior valor simulado ($W_{g_{máx}}$) e o menor ($W_{g_{mín}}$) de produtividade de grãos:

$$AW_g = W_{g_{máx}} - W_{g_{mín}} \quad (125)$$

Não há regras absolutas para a determinação do número de classes de frequência (NC) ou para a escolha da classe em si (DEVORE, 2006; p.16). Neste trabalho, adotou-se:

$$NC = 2,5 \cdot Ni^{0,25} \quad (126)$$

em que Ni se refere ao número de valores de Wg simulados.

Em caso de NC resultar em um valor não inteiro, NC é arredondado para o valor inteiro imediatamente superior. Do contrário, alguns valores simulados de Wg podem ser excluídos do histograma final de frequência. Este, por sua vez, deve ser configurado com as barras “unidas”, pois Wg se trata de variável aleatória contínua.

A amplitude de cada classe ($ACWg$), igual para todas, é imediatamente calculada:

$$ACWg = \frac{AWg}{NC} \quad (127)$$

Cada classe terá, portanto, um limite inferior (LI) e outro superior (LS), com o número de classes variando de 1 a NC . Diantes das restrições:

$$LI_0 = Wg_{\min} \quad (128)$$

$$LI_i = LS_{i-1} \quad (129)$$

$$LS_{NC} = Wg_{\max} \quad (130)$$

Calcula-se o valor do limite superior da i -ésima classe de frequência:

$$LS_i = LI_i + ACWg \quad (131)$$

E o ponto médio da i -ésima classe de frequência (CA_i) é assim obtido:

$$CA_i = \frac{LS_i - LS_{i-1}}{2} \quad (132)$$

Logo, os pontos médios da primeira e da última classe de frequência serão:

$$CA_1 = \frac{LS_1 - Wg_{\min}}{2} \quad (133)$$

$$CA_{NC} = \frac{Wg_{\max} - LS_{NC-1}}{2} \quad (134)$$

Em uma iteração qualquer, se um determinado valor de produtividade de grãos simulado (Wg) e for igual ao limite superior de uma classe de frequência, então esse valor pertencerá à classe seguinte, exceto se o limite superior for o da última classe (NC). Logo:

$$\text{Se } Wg = LS_i \text{ então } Wg \in CA_{i+1} \quad (135)$$

$$\text{Se } Wg = LS_{NC} \text{ então } Wg \in CA_{NC} \quad (136)$$

A frequência observada (FO_i) para a i -ésima classe de frequência será simplesmente o número de valores simulados que pertencem à essa i -ésima classe ($N_{Wg \in CA_i}$), ou seja:

$$FO_i = N_{Wg \in CA_i} \quad (137)$$

E a probabilidade observada (PO_i) da i -ésima classe de frequência é a fração que $N_{Wg \in CA_i}$ representa do número total de valores simulados (N_i):

$$PO_i = \frac{FO_i}{N_i} \quad (138)$$

As condições de ocorrência para FO e PO são verificadas por:

$$\sum_{i=1}^{NC} FO_i = N_i \quad (139)$$

$$\sum_{i=1}^{NC} PO_i = 1 \quad (140)$$

O valor modal da produtividade de grãos (Mo_{Wg}) necessariamente pertencerá à classe de frequências que apresentar o maior número de observações (o maior FO), ou melhor, o maior $N_{Wg \in CA_i}$. Essa classe passa a ser denominada classe modal (CMo), ou seja, quando $i = CMo$. A equação que permite descrever o valor de Mo_{Wg} é:

$$Mo_{Wg} = LI_{CMo} + \frac{FO_{CMo} - FO_{CMo-1}}{(FO_{CMo} - FO_{CMo-1}) + (FO_{CMo} - FO_{CMo+1})} \cdot ACWg \quad (141)$$

em que FO_{CMo} se refere à maior frequência observada por classe; e LI_{CMo} é o limite inferior da classe que apresentar a maior FO, ou seja, FO_{CMo} .

As seguintes equações poderia ainda ser utilizadas para os cálculos da média geral e do desvio-padrão de todas as classes de frequência dos valores de produtividade (Wg), respectivamente:

$$\mu_{Wg} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{NC} (CA_i \cdot FO_i) \quad (142)$$

$$\delta_{Wg} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \left\{ \left[\sum_{i=1}^{NC} (CA_i^2 \cdot FO_i) \right] - \frac{1}{n} \cdot \left[\sum_{i=1}^{NC} (CA_i \cdot FO_i) \right]^2 \right\}} \quad (143)$$

Cabe lembrar que cada valor de taxa de produtividade de fitomassa seca da parte aérea [eq. (118)] gerada para um dia do ciclo da cultura, de acordo com a i -ésima iteração referente a esse dia, é somado à taxa de produtividade de fitomassa seca da parte aérea gerada para o dia anterior, para a mesma i -ésima iteração do dia anterior. Há um erro associado a esse procedimento, porém tal erro é minimizado quanto maior for o número de iterações, de acordo com a eq. (1).

3.2 Experimentação de campo e obtenção de parâmetros

A experimentação de campo foi realizada visando a obtenção de alguns parâmetros de entrada do modelo, tal como o coeficiente de extinção e a eficiência do uso da luz, bem como visando ajustar o parâmetro que relaciona a taxa de assimilação de carbono em dias muito claros com a de dias muito nublados. O experimento serviu também para caracterizar uma relação de dependência entre área foliar e desenvolvimento relativo. Ainda, a verificação dos valores observados de produtividade, de consumo hídrico e de nitrogênio servirá como alicerce de comparação com os valores simulados, de produtividade de grãos com os correspondentes requerimentos de água e nitrogênio, em função das condições verificadas de população (espaçamento e densidade de semeadura), de clima (radiação solar e temperatura), da época do ano combinada à latitude (dia do ano e coeficientes de Angstrom-Prescott) e de altitude.

3.2.1 Base física e material genético empregado

O experimento foi instalado no pivô central experimental sob a égide do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP, situado no município de Piracicaba - SP (22° 41' 30" S, 47° 38' 30" W, 546 m de altitude), e foi conduzido entre os meses de novembro de 2005 a abril de 2006. O clima do local é do tipo Cwah – tropical de altitude com estiagem de inverno, conforme a classificação de KÖPPEN. Nesta região, a precipitação média anual é de 1257 mm, e a temperatura média anual gira em torno de 21,4°C.

O solo é classificado como Nitossolo Eutroférico típico, de alta fertilidade, de topografia suave (1,5%), com 65% de argila. A análise química, feita no Laboratório de Solos e Nutrição de plantas da ESALQ/USP, apresenta os seguintes resultados na camada superficial (0 – 20 cm): $\text{pH}_{(\text{CaCl}_2)} = 5,4$; Matéria Orgânica = 26 g dm^{-3} ; P = 23 mg dm^{-3} ; S = 38 mg dm^{-3} ; K = 2,5 mmol_c dm^{-3} ; Ca = 51 mmol_c dm^{-3} ; Mg = 14 mmol_c dm^{-3} ; Al = 0; CTC = 98,5 mmol_c dm^{-3} e V = 0,69 mmol_c mmol_c⁻¹ (amostragem de solo executada em 10/11/2005).

O material genético de *Zea mays* L. empregado foi o híbrido semi-precoce DKB-390, estando espaçado em 90 cm, com população final por volta de 66666 plantas ha^{-1} . Os estádios fenológicos adotados para análise foram aqueles sugeridos por FANCELLI (1986), adaptado de de Hanway (1966), e de Nel e Smit (1978), conforme a Figura 3.

Embora sejam descritos 10 estádios fenológicos para a cultura do milho, optou-se, na presente descrição, por agrupá-los em: i) fase vegetativa, período compreendido entre a emissão da segunda folha e o início do florescimento; ii) fase de florescimento, período compreendido entre o início da polinização e o início da frutificação; e iii) fase de enchimento de grãos, período compreendido desde a fecundação até o enchimento completo dos grãos e, na seqüência, ao ponto de maturidade fisiológica dos mesmos (com o aparecimento da camada negra).

Os estádios de crescimento e desenvolvimento anteriores ao aparecimento das espigas foram identificados pela avaliação do número de folhas plenamente expandidas ou desdobradas. Assim, a folha do milho pode ser considerada desdobrada quando a mesma apresentar o “colar”(linha de união entre a lâmina e a bainha da folha) facilmente visível. Para os estádios posteriores à emissão da espiga, a identificação foi efetuada com base no desenvolvimento e consistência dos grãos (FANCELLI, 1986).

Figura 3 – Estádios fenológicos da cultura do milho (FANCELLI, 1986; adaptado de Hanway (1966), e de Nel e Smit, 1978)

A presente descrição utilizou a escala fenológica para observações de ocorrências e execução dos tratamentos no campo experimental; a escala temporal para tratar os fatores e elementos do clima; e a escala de desenvolvimento relativo para a composição do modelo.

3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

Os dados de produtividade de grãos, de fitomassa seca total e das diferentes partições, do índice de área foliar, do consumo de água e da interceptação de luz, dentre outros atributos, foram extraídos de um experimento cujos tratamentos eram referentes à aplicação ou não de nitrogênio na segunda cobertura, associado ou não à aplicação de fungicidas para o controle de fungos quando a população estivesse em pendoamento predominante (tendo isso ocorrido 56 dias após a emergência, ou 56 DAE). O delineamento experimental foi um fatorial 4x2 arranjado em blocos casualizados, combinando a aplicação (de 3 fungicidas) ou não (testemunha) a 2 doses de nitrogênio (60 kg ha⁻¹ e 90 kg ha⁻¹), resultando em 8 tratamentos com 4 repetições, totalizando 32 parcelas (Figura 4) de 7 x 4,5 m com 5 linhas de semeadura cada. Caso a aplicação de fungicidas e a interação fungicida versus nitrogênio não sejam significativos para interferir na produtividade de grãos, os dados serão separados em dois grupos de tratamentos: N60 – que receberam cobertura de 30 kg (N) ha⁻¹ no estádio 1 (E1); e N90 – que receberam cobertura de 30 kg (N) ha⁻¹ no estádio 2 (E1) mais 30 kg (N) ha⁻¹ no estádio 2 (E2).

Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4
T5	T1	T6	T8
T2	T4	T3	T1
T3	T7	T8	T5
T8	T2	T4	T7
T1	T5	T7	T2
T6	T8	T1	T4
T7	T3	T5	T6
T4	T6	T2	T3

Figura 4 – Croqui esquemático do delineamento experimental utilizado

Um outro experimento identicamente delineado havia sido implantado visando obter dados sob condições de déficit hídrico, porém este experimento foi cancelado devido à aplicação de herbicida pós-emergente contendo resíduo de herbicida inibidor de crescimento, tendo interrompido assim o desenvolvimento vegetativo do estande no estádio 1 (com 4 folhas).

3.2.3 Manejo e proteção da cultura durante a experimentação

Após preparo de solo convencional, a semeadura foi realizada em 24/11/2005, a 2 cm de profundidade, com uma adubação de 400 kg (08-28-16) ha⁻¹, e a colheita, com os grãos maduros, após o vento de 150 km h⁻¹ ocorrido em 29/03/2006. A emergência ocorreu em 29/11/2005, e o desbaste, aspecto de controle experimental da população de plantas, foi realizado 19 dias após a emergência (DAE). As adubações de cobertura foram realizadas 18 e 37 dias após a emergência (estádios E1 e E2, respectivamente), contemplando 50 kg ha⁻¹ de N e 25 kg de K via 30-00-20 misturado com cloreto de potássio na primeira cobertura, e 50 kg ha⁻¹ de N via sulfato de amônio na segunda. Considerou-se, portanto, uma eficiência de adubação nitrogenada equivalente a 60% para resultar nos 30 kg (N) ha⁻¹ das duas coberturas.

Visando o controle de lagartas do cartucho, quatro aplicações foram necessárias, sendo: 0,6 L (Clorpirifos) ha⁻¹ (11 e 15 DAE); 150 mL (teflubenzuron) ha⁻¹ para lagartas de primeiro instar (23 DAE); e 150 mL (Spinosad) ha⁻¹ (38 DAE), visando uma aplicação final. Os danos provocados pelas lagartas foram desprezíveis, minimizando o erro experimental. Duas capinas associadas a controle manual de daninhas na linha de semeadura foram feitas aos 16 e 39 DAE.

Por questões operacionais do local e pelos propósitos do experimento, a irrigação por pivô central foi acionada sempre em dias não chuvosos, com lâmina máxima de 12 mm dia⁻¹. O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) do sistema de irrigação foi assim calculado:

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ r_i \cdot \left[L_i - \frac{\sum_{i=1}^n (r_i \cdot L_i)}{\sum_{i=1}^n r_i} \right] \right\}}{\sum_{i=1}^n (r_i \cdot L_i)} \quad (144)$$

em que r_i se refere à distância (m) entre o ponto do pivô e o i -ésimo coletor.

Para a conversão de volume d'água do i -ésimo coletor (V_{c_i} , mL), de diâmetro d_c (cm), para lâmina d'água neste coletor (L_i , mm), a seguinte expressão foi utilizada:

$$L_i = \frac{40 \cdot V_{c_i}}{\pi \cdot d_c^2} \quad (145)$$

O CUC foi calculado em 85,27%, considerado tolerável para pivô. A lâmina média do quartil inferior foi definida em relação à 25% da área que recebe as menores lâminas de água, permitindo calcular uma uniformidade de distribuição de água de 80,12%.

3.2.4 Fitomassa seca e área foliar

Para totalizar a fitomassa seca, foram medidas a fitomassa seca dos seguintes componentes: haste, limbo foliar, pendão, material senescente e espiga. Após a aplicação dos tratamentos, coletou-se uma planta por parcela, semanalmente, levando-se o material para estufa de ventilação forçada à 65 °C por 72 horas. Como material senescente, considerou-se apenas àquele ainda conectado à planta. Após a separação das folhas (Figura 5a) e do restante das partições, a área foliar foi medida através do equipamento LAI 3000 (LICOR; Figura 5b). As medidas contemplaram o limbo foliar, desprovido de bainhas.

(a)

(b)

Figura 5 – (a) Separação do limbo foliar e das demais partições para mensuração de fitomassa seca; e (b) Integrador de área foliar LAI 3000

Os dados de área foliar em função do desenvolvimento relativo foram ajustados ao modelo de Gauss, dispondo-se um aplicativo computacional. A eq. (112) foi utilizada para o cálculo do IAF referente a cada coleta. A análise de variância foi feita pelo programa GenStat. O índice de colheita (IC) foi calculado, para a última coleta, dividindo-se a massa seca de grãos pelo restante da massa de parte aérea (brácteas, sabugo, colmos, folhas).

A produtividade de grãos foi obtida da amostragens de seis espigas por linha, resultando em 30 espigas por parcela. As análises de massa de 1000 grãos e a umidade dos mesmos foram determinadas no laboratório de sementes da ESALQ/USP, de acordo com as regras de análises de sementes (BRASIL, 1992). Para cada parcela, quatorze espigas foram aleatoriamente selecionadas para análise do número de grãos por fileira (N_{gf}) e, de cada espiga, quatro fileiras para o número de fileiras por espiga (N_{fe}). Pelos valores observados, obteve-se a frequência observada de N_{gf} e N_{fe} , possibilitando a escolha dos valores modais dessas variáveis.

3.2.5 Umidade do solo e balanço hídrico

Semanalmente, a umidade do solo foi estimada a partir de valores de contagem relativa de uma sonda de nêutrons (CPN) nas profundidades de 20, 30, 40, 50 e 60 cm abaixo da superfície do solo. Para o cálculo do armazenamento de água no solo, a umidade do solo na superfície foi assumida como a mesma que aquela encontrada a 20 cm. Em função dos valores de contagem relativa encontrados, a umidade na i -ésima profundidade (${}^i\theta$), em função da leitura na i -ésima profundidade (${}^i\text{LSN}$) e da leitura-padrão (CPSN), foi computada no final do experimento através da equação de calibração do aparelho:

$${}^i\theta = 0,2495 \cdot \frac{{}^i\text{LSN}}{\text{CPSN}} - 0,0451 \quad (146)$$

Instalou-se um tubo de alumínio (1 m de comprimento e 50,8 mm de diâmetro interno) na porção central de cada parcela, a 25 cm da linha de semeadura (Figura 7a), fazendo permanecer 80% do comprimento do tubo enterrado no solo. O tubo foi vedado na extremidade inferior. A Figura 7b e a Figura 7c mostram o procedimento adotado para a utilização da sonda de nêutrons como metodologia para avaliação do conteúdo de água no solo. A calibração foi feita coletando-se anéis volumétricos, em várias profundidades e locais, e ao longo do ciclo da cultura, contendo massa de solo. O solo foi assumido como meio homogêneo em termos horizontais (espaço do experimento) e verticais (até a profundidade adotada para o balanço hídrico).

Para cada semana, os dados de consumo hídrico foram obtidos e integrados para o período entre amostragens (geralmente correspondentes a 7 dias), já que os valores de precipitação (PP, mm), de irrigação (L, mm), de variação de armazenamento e de drenagem (D, mm) ou ascensão capilar (AC, mm) foram também assim computados. Os valores de deflúvio superficial e subsuperficial foram ignorados, já que o solo local apresenta topografia suave e textura argilosa, de baixa condutividade hidráulica. Os valores periódicos de consumo hídrico foram somados, em módulo, até o final do ciclo, quando se obteve o consumo hídrico total.

Toda a precipitação diária foi computada como entrada de água no sistema considerado, apesar de que Dardanelli et al. (1992) ajustaram uma equação-potência empírica para corrigir, para menos, precipitações diárias superiores a 15 mm. Todavia, não havendo negligência dos fluxos de água existentes por ascensão capilar ou drenagem, a precipitação efetiva pode ser considerada 100% se a ausência de deflúvios for assumida e se os fluxos forem estimados, como no presente trabalho, mediante o uso das equações (43), (44), (45), (46) e (47).

Figura 6 – (a) tubos de acesso para a sonda de nêutrons; (b) posicionamento dos tubos

A eficiência de aplicação da lâmina de irrigação, definida como a razão entre a lâmina armazenada na zona radicular e a lâmina aplicada à parcela, foi assumida igual a 70%. A fração que é explicada pela ineficiência é decorrente do somatório das perdas por deriva (vento), evaporação e percolação abaixo da zona radicular considerada. Essa eficiência é característica do manejo da irrigação (ex.: há mais perda por evaporação se o pivô for ligado em horários mais quentes), embora guarde consequências da uniformidade de aplicação e de distribuição de água, os quais são características inerentes ao sistema de irrigação (e não ao manejo).

Figura 7 – Realização da contagem (a) padrão (CPSN); e (b) no campo (LSN)

Segundo Andrade et al. (1996, p.51), em geral as raízes do milho são da magnitude de 25% da parte aérea, em termos de massa, no período da floração. Simulando os dados do experimento pelo programa APSIM, obteve-se uma média de 26,24% da fitomassa seca total sendo representada por raízes, e um valor um pouco mais baixo quando considerada apenas a fase

de florescimento (25,21%). As simulações mostraram também que não houve déficit hídrico para a cultura, de acordo com os dados de entrada de solo, clima, planta, e manejo.

A máxima profundidade de sistema radicular simulada foi da ordem de 1,4 m. Segundo Andrade et al. (1996, p.51), as raízes de milho podem alcançar até 2 m de profundidade, embora 90% da fitomassa radicular se concentre nos primeiros 30 cm, concordando com os resultados de Mengel e Barber (1974). Em condições tropicais, Fancelli e Dourado Neto (2000, p.29) reforçam que a profundidade efetiva das raízes dificilmente ultrapassa os 30 cm. Os valores simulados pelo APSIM (APSRU, 2007) mostram que os 60 cm de profundidade efetiva, assumidos para o balanço hídrico do experimento, foram atingidos já aos 20 dias após a emergência (Figura 8).

Figura 8 – Simulação da profundidade atingida pelo sistema radicular

De posse das equações (36), (37), (38) e (41), o balanço hídrico experimental iniciou-se a partir de 12/12/2005 (13 DAE), e foi finalizado em 19/março/2006 (110 DAE), data na qual se verificou o ponto de maturidade fisiológica da cultura. Do dia da emergência até 13 DAE, a evapotranspiração (ET , mm dia^{-1}) foi estimada em função dos valores da evapotranspiração de referência e dos de K_c propostos por Fancelli e Dourado Neto (2000, p.168) para as condições brasileiras, ponderados pela umidade relativa do ar e a velocidade do vento.

3.2.6 Intercepção de radiação solar

A fração de radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela vegetação (λ_i) foi medida com o ceptômetro (Delta T *devices*), tomando-se a média de 6 sub-amostras, dentro de uma mesma entre-linha central de cada parcela (SINCLAIR; MUCHOW, 1999). Cada sub-amostra abaixo do dossel foi coletada atravessando-se o ceptômetro de forma diagonal, procurando-se obter um ângulo de 45° entre o ceptômetro e a linha de semeadura (Figura 9a), simultaneamente à coleta da radiação fotossinteticamente ativa incidente acima do dossel (Figura 9b). As coletas foram realizadas uma vez por semana, a partir das 11h00, visando minimizar o ângulo zenital.

Figura 9 – Sensores quânticos (a): barra para mensuração da radiação fotossinteticamente ativa abaixo do dossel; (b) acima do dossel

Assim, para cada parcela experimental em cada data de coleta, a transmitância foi obtida da razão entre a medida de baixo e a de cima do dossel, e o coeficiente de extinção de acordo com a eq. (49). O ceptômetro estima a quantidade de fótons que atinge a vegetação, sendo necessário converter esta estimativa para uma dimensão baseada em Joules caso se almeje comparar os dados do ceptômetro, de radiação fotossinteticamente ativa incidente, com aqueles do posto meteorológico. A conversão de $\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ pelo seguinte procedimento:

$$E_{\lambda} = \frac{K_p \cdot v_c}{\lambda} \quad (147)$$

em que E_{λ} se refere à energia (J fóton^{-1}) associada a um fóton em um determinado comprimento de onda (λ , nm); K_p à constante de Planck ($6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J s fóton}^{-1}$); e v_c à velocidade de propagação de radiação ($3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$).

Assim, para um comprimento de onda representativo entre 400 e 700 nm, a energia associada a 1 fóton no comprimento de onda igual a 555 nm seria:

$$E_{555} = \left(6,6256 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{fóton}} \right) \cdot \left(3 \cdot 10^{18} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot \frac{1}{555 \cdot n \cdot \text{m} \cdot \frac{10^{-9}}{n}} \therefore E_{555} = 3,581 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{fóton}} \quad (148)$$

Para 1 mol de fótons (quando $\lambda = 555$ nm), portanto:

$$E_{555} = 3,581 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{\text{J}}{\text{fóton}} \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot \text{fóton}}{\text{mol}_{\text{fóton}}} \therefore E_{555} = 21,56 \cdot 10^4 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol}_{\text{fóton}}} \quad (149)$$

Assim, para se transformar os valores medidos pelo sensor quântico ($\text{RFA}_{\text{fóton}}$, $\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para energia de radiação fotossinteticamente ativa (RFA, $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), procede-se com a seguinte análise dimensional:

$$\text{RFA} = \text{RFA}_{\text{fóton}} \cdot \frac{\mu \cdot \text{mol}_{\text{fóton}}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot \frac{10^{-6}}{\mu} \cdot \frac{21,56 \cdot 10^4 \cdot \text{J}}{\text{mol}_{\text{fóton}}} \cdot \frac{\text{M}}{10^6} \cdot \frac{60 \cdot \text{s}}{\text{min}} \cdot \frac{60 \cdot \text{min}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \cdot \text{h}}{\text{dia}} \quad (150)$$

$$\text{RFA} = 0,01862784 \cdot \text{RFA}_{\text{fóton}} \quad \text{ou} \quad \text{RFA}_{\text{fóton}} = 53,681357 \cdot \text{RFA} \quad (151)$$

Para a obtenção da eficiência de uso da luz (RUE), os pares de dados de fitomassa seca de parte aérea versus radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (RFA_{ac} , MJ m^{-2}) foram ajustados a uma reta através do método dos mínimos quadrados ordinários; sendo RUE representado pelo coeficiente angular dessa reta. O atributo RFA_{ac} foi obtido pela somatória das radiações fotossinteticamente ativas incidentes corrigido pela fração interceptada (λ_I):

$$\text{RFA}_{\text{ac}} = \lambda_I \cdot \sum_{j=0}^n \text{RFA}_0 \therefore \text{RFA}_{\text{ac}} = (1 - \tau) \cdot \sum_{j=0}^n \text{RFA}_0 \quad (152)$$

Analogamente à eq. (49), o coeficiente de extinção de luz médio (k) no ciclo foi obtido após o cálculo da τ e de IAF médios, ambos obtidos pelas integrais das funções que expressam a relação de dependência destes com Dr , nos limites de 0 a 1, ou seja:

$$\bar{k} = \frac{-\ln\left(\int_0^1 \tau(\text{Dr}) \cdot d\text{Dr}\right)}{\int_0^1 \text{IAF}(\text{Dr}) \cdot d\text{Dr}} \quad (153)$$

Os dados de transmitância em função de Dr foram ajustados, por aplicativo computacional, aos modelos logístico, o qual requer solução numérica para a integração. Para tanto, utilizou-se o método numérico de Simpson, assumindo pequenos incrementos de $\Delta\text{Dr} = 0,01$.

3.2.7 Densidade do solo, curva de retenção e condutividade hidráulica sob saturação

A densidade do solo foi avaliada coletando-se anéis volumétricos, os mesmos utilizados para a coleta de material destinado à obtenção da curva de retenção de água no solo. A densidade média para o perfil e para a área foi determinada em $1220,56 \text{ g cm}^{-3}$. A condutividade hidráulica em condições de saturação foi determinada pelo método do permeâmetro de carga decrescente, conforme preconizado em Libardi (2005), em $4,91 \text{ mm h}^{-1}$, que foi considerado representativo para o perfil do solo e para toda a área experimental.

Na área experimental, as amostras foram coletadas nas profundidades de 20, 40 e 60 cm, com três repetições para cada profundidade, sendo posteriormente submetidas às pressões de 10, 20, 30, 100, 300, 1000, 8000 e 15000 cm, na câmara de Richards. Os dados de tensão versus umidade foram ajustados ao modelo de Genuchten (1980) através do algoritmo do aplicativo Solver® do Excel, levando à seguinte curva de retenção (Figura 10) para as condições homogêneas (de área e profundidade) do experimento:

$$\theta = 0,26 + \frac{0,27}{\left(1 + |1,6465 \cdot \phi_m|^{2,1754}\right)^{0,5403}} \quad (154)$$

A forma funcional da eq. (154) advém da combinação da inversa da eq. (45) com a eq. (46). Apenas os parâmetros α e ν foram ajustados; m foi calculado pela relação $m = 1 - 1/\nu$; e θ_s e θ_r determinados no laboratório às tensões 0 (amostra saturada) e 15000 cm, respectivamente.

Figura 10 – Curva de retenção do solo do experimento

3.2.8 Elementos e fatores do clima

Os dados de radiação solar global, temperatura do ar, precipitação, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram obtidos do Posto Meteorológico Automático da ESALQ/USP, situado a cerca de 1260 m do local do experimento. Foram observados ainda dados de brilho solar e radiação solar fotossinteticamente ativa.

Em um trabalho realizado na área da ESALQ/USP, Reichardt et al. (1995) relatam que um ponto de observação de chuva pode apresentar tanto alta como baixa correlação com outro ponto de observação afastado, ou seja, que a variabilidade espacial de chuva é um processo aleatório, pelo menos para a escala estudada. Por outro lado, os autores revelaram também que áreas que distam de 1000 a 2500 m, de um ponto de observação de chuva, não são bem representadas por esse ponto. Porém, um ponto afastado a 2500 m apresentou maior correlação que um a 2000 m.

Visando possibilitar a simulação determinística e estocástica da taxa de desenvolvimento diária da cultura e da produtividade acumulada de fitomassa de parte aérea, os seguintes valores foram assumidos: $\lambda_{PAR} = 0,5$; $\lambda_{ab} = 0,85$; e $\lambda_r = 0,23$. Ainda, assumindo que $GD_{max} = 25$ °C dia, e que TD_{max} , T_{op} e TD_{min} são equivalentes a 44, 35 e 0 °C, respectivamente, a função descritora do tempo térmico em função da temperatura do ar (ver Figura 11) ficou particularizada para:

$$GD = 0,0793 \cdot (44 - T) \cdot T^{3,89} \quad (155)$$

Figura 11 – Relação entre temperatura média diária do ar e graus-dia, modelada pela função beta

3.3 Programa computacional para a verificação do modelo estocástico

Para implementar do modelo proposto e torná-lo aplicável, um programa computacional foi elaborado em linguagem Visual Studio 2005 (C#), contemplando-se métodos computacionalmente intensivos para a geração de números pseudo-aleatórios. A tela principal do programa é mostrada na Figura 12.

Alguns parâmetros são obrigatórios como dados de entrada, tais como data de semeadura, latitude (e hemisfério), altitude, espaçamento, densidade de semeadura, massa de 1000 sementes, coeficientes de Angstrom-Prescott (o programa sugere valores), método de cálculo para a evapotranspiração e seleção da base de dados climatológicos. Como facultativo, dispõe-se dos “Parâmetros gerais”, nos quais a maioria são atributos relacionados à planta, tais como graus-dia para o florescimento, coeficiente de extinção, índice de área foliar máximo, etc.

Há a possibilidade de tradução dos campos da língua Portuguesa para a Inglesa e vice-verso. Os resultados gerados se referem às produções mínima provável, máxima provável e mais provável. Conseqüentemente, são calculados os correspondentes requerimentos hídricos e de nitrogênio mínimo provável, máximo provável e mais provável. O histograma de frequência de produtividades de grãos é também visualizado, podendo este cenário ser salvo como figura.

Figura 12 – Tela do programa computacional gerado

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Elementos e fatores do clima

O ciclo do genótipo DKB-390 levou, da emergência ao ponto de maturidade fisiológica 111 dias para finalizar seu ciclo; e as três grandes etapas, quer seja vegetativa, florescimento e enchimento de grãos, duraram aproximadamente 51, 12 e 47 dias, respectivamente. Constatou-se a plena emergência das plântulas no sexto dia após a semeadura (este dia considerado como “zero”). Em termos de dias do ano, a fase vegetativa ocorreu entre 333 (de 2005) e 17 (de 2006); a fase de florescimento após este último e o dia 32 de 2006; e a fase de enchimento de grãos entre os dias 33 e 78 de 2006. A Figura 13 apresenta o comprimento astronômico do dia (H) e o brilho solar, em função do dia do ano, ocorrentes entre a semeadura e a colheita.

Figura 13 – Comprimento astronômico do dia e brilho solar em função do dia do ano

A razão de insolação, obtida dividindo-se o brilho solar pelo comprimento astronômico do dia, foi em média 0,43 ao longo do ciclo, valor que pode ser considerado baixo, de uma forma geral. A fase vegetativa ocorreu diante da menor razão de insolação média (0,42), número verificado em função de coincidir maiores valores de H (dias mais longos) com um número de dias

nublados relativamente maior. A razão de insolação foi mais elevada (em média, 0,46) na fase de florescimento da cultura em decorrência da proporção de dias ensolarados ter sido proporcionalmente maior. A fase de enchimento de grãos também apresentou a mesma média que a do ciclo todo (0,43), tendo isto sido resultado principalmente da ocorrência de dias mais curtos.

Confrontando-se os dados observados de brilho solar ocorridos durante o experimento (Figura 13) com os dados estimados através da eq. (56), observa-se na Figura 14 que os últimos tendem a ser sub-estimados em aproximadamente 8,73%, havendo no entanto boa correlação geral de valores. O pequeno erro pode ser atribuído ao uso dos coeficientes fixos de Angstron-Prescott para Piracicaba, pois, a rigor, eles variam com o tempo (DALLACORT et al., 2004). Assim, para culturas anuais de ciclos não muito longos, como a do milho, presume-se que a eq. (76), que estima um fator de nebulosidade, seja apta para uso em simulações que a envolvam.

Figura 14 – Valores observados e calculados de brilho solar

A temperatura do ar, bem como seus valores diários máximos e mínimos durante o ciclo, apresentou oscilações normais para o período, para a região. Mais oscilante, a radiação solar global e suas variantes fotossinteticamente ativa e líquida são também mostradas na Figura 15.

(a)

(b)

Figura 15 – Variação, em função do dia do ano e ao longo do ciclo do genótipo DKB-390 (a) da radiação solar global, líquida e fotossinteticamente ativa; e (b) das temperaturas mínima, média e máxima do ar

A Tabela 2 apresenta um sumário do regime médio de radiação incidente ao longo do ciclo da cultura (considerando-se entre a emergência e o ponto de maturidade fisiológica) bem como no decorrer das principais etapas (vegetativa, de florescimento e de enchimento de grãos). Uma maior disponibilidade de energia ocorreu durante a fase crítica da cultura (a de florescimento), fator esse possivelmente responsável pelas temperaturas mais elevadas e, conseqüentemente, também pela maior capacidade de absorção de água pela atmosfera (demanda hídrica do ambiente) na mencionada fase.

No geral, a radiação fotossinteticamente ativa mensurada foi cerca de 39% da radiação solar global, valor este menor que o encontrado por Schöffel e Volpe (2001), que reportaram uma diferença média de 44,35% para o município de Jaboticabal. Se o considerado fosse a radiação fotossinteticamente ativa estimada em 50% da global (SINCLAIR; MUCHOW, 1999), a radiação fotossinteticamente ativa acumulada seria maior no final do ciclo da cultura, o que implicaria na redução do valor de eficiência de uso da radiação para o genótipo, pois a mesma fitomassa teria sido produzida por um maior valor de radiação interceptada. Em comunicação pessoal com Luiz Roberto Angelocci, em 2006, elaborou-se a suposição de que os valores observados da ESALQ estavam sendo subestimados em 19%, quando comparados com os valores disponibilizados pelo INMET. Ao adicionar esse percentual nos valores observados, a média (de todo o ciclo) da fração fotossinteticamente ativa seria aumentada para 43%.

Tabela 2 – Média das radiações ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) global (R_g), fotossinteticamente ativa mensurada (RFA), fotossinteticamente ativa estimada (RFA estimada) e líquida (R_n) ocorrentes ao longo do ciclo e nos principais períodos do genótipo DKB-390

Atributo	Média	Estádio da cultura		
		Vegetativo	Florescimento	Enchimento de grãos
R_g	18,08	18,77	19,16	16,99
RFA	6,34	6,69	7,23	5,98
RFA estimada	8,84	9,39	9,58	8,50
R_n	10,84	10,91	11,65	10,51

Para as principais etapas da cultura, a Tabela 3 mostra as médias das temperaturas médias, máximas e mínimas para os períodos que compreenderam as principais etapas da cultura. A amplitude térmica foi maior na fase de florescimento, denotando em termos práticos que a cultura esteve sob uma atmosfera mais seca nesse estágio. Não se verificou temperaturas elevadas

prevalecentes no período noturno (por exemplo, superior a 24°C), as quais poderiam promover um consumo energético exacerbado, em função do incremento da respiração celular, e ocasionar um menor saldo de fotoassimilados, com conseqüente queda no rendimento da cultura (DOURADO NETO, 1999; p.21).

A temperatura média entre a emergência e o florescimento esteve em torno de 23,7 °C, observando-se durante o florescimento, apenas alguns dias com temperaturas médias acima de 26 °C. Por apresentar o hábito de florescimento do tipo determinado (ou seja, o crescimento vegetativo cessa em definitivo quando ocorre o florescimento) e pela sensibilidade à temperaturas na fase de emissão do pendão e de polinização, o híbrido empregado pode ter tido seu potencial de produção levemente afetado em função de condições esporádicas e não-ótimas de temperatura, mas não a ponto de interferir significativamente na produtividade final de grãos, já que esse acréscimo de temperatura pode ter sido compensado pelo maior comprimento astronômico dos dias na fase vegetativa, conforme discutido no item reportando a variação do comprimento astronômico do dia ao longo do ciclo.

Tabela 3 – Médias das temperaturas (°C) médias, máximas e mínimas, e amplitude térmica, durante os períodos referentes aos estádios vegetativos, de florescimento e de enchimento de grãos

Média das temperaturas (°C)	Estádio da cultura		
	Vegetativo	Florescimento	Enchimento de grãos
Média	22,7	25,5	23,9
Máxima	28,9	32,6	30,1
Mínima	18,1	19,7	19,5
Amplitude térmica	10,7	12,8	10,6

A análise dos valores diários de temperatura média do ar determinando os graus-dia, de acordo com modelo beta particularizado pela eq. (155), revelou valores de GDA_i da emergência até o pleno florescimento (55 DAE) e até o ponto de maturidade fisiológica (110 DAE) da magnitude de 688,29 °C dia (contra 746,48, pelo método tradicional) e 1392,82 °C dia (contra 1515,09, pelo método tradicional), respectivamente. O híbrido DKB-390 é considerado precoce, com florescimento previsto para 870 graus-dia. Para regiões entre 500 e 700 m de altitude situadas

na região geoclimática denominada “norte”, na qual está Piracicaba, esse material genético é recomendado para semeadura normal no máximo até 15/11 (DEKALB, 2008).

A umidade relativa média ao longo do ciclo foi de 86,92%, valor este próximo àquele verificado para a fase de florescimento (85%). As médias observadas nas fases vegetativas foram 84,51 e 90,18%, respectivamente. A Figura 16 mostra a variação temporal, com base em dias após emergência, das pressões de vapor d'água real e no ponto de saturação, bem como do déficit de pressão de vapor d'água ao longo do experimento. Embora o déficit de pressão de vapor (*DPV*, kPa) tenha sido em média 1,38 kPa ao longo do ciclo, verifica-se que na fase de florescimento a média foi 23,9% superior (1,71 kPa), demonstrando maior poder evaporante pela atmosfera, o que é fruto das temperaturas médias do ar também terem sido mais elevadas nessa etapa. As médias de déficit de pressão de vapor nas fases vegetativas e de enchimento de grãos foram praticamente iguais, por volta de 1,32 kPa.

Figura 16 – Déficit de saturação de vapor do ar e pressões de vapor real e de vapor no ponto de saturação

As mudanças do teor de água na atmosfera desempenham papel importantíssimo em vários processos, tais como o transporte e a distribuição de calor na atmosfera, bem como a absorção de diversos comprimentos de onda da radiação solar e a evapotranspiração (PEREIRA et al, 2002; p.130). Dessa forma, faz-se necessário descrever os principais eventos ocorrentes ao longo da cultura em termos de vapor d'água, cujo *status* pode ser caracterizado pela pressão real de vapor d'água (LOOMIS; CONNOR, 1992; p.148). Já o déficit de saturação de vapor d'água pode ser um importante atributo para explicar eventuais diferenças na eficiência de uso da água pelas plantas (ABBATE et al., 2004).

Ao longo do ciclo, houve predominância de ventos considerados quase calmos – a segunda categoria mais branda (PEREIRA et al., 2002; p.174), cuja velocidade média deve ser inferior a 5 km h⁻¹. Analisando-se por etapas, apenas na fase vegetativa a média ultrapassou essa categoria (5,04 km h⁻¹, classificado como brisa amena, com agitação das folhas), sendo as demais, equivalentes a 3,70 e 3,42 km h⁻¹ para a fase de florescimento e de enchimento de grãos, respectivamente.

Embora a velocidade do vento seja computada no cálculo da evapotranspiração de referência, pode-se inferir que não houve influência marcante deste elemento do clima na produtividade final de grãos, a não ser especificamente em alguns dias durante a fase vegetativa. Fancelli e Dourado Neto (2000, p.27) argumentam que plantas de milho apresentando de quatro a 10 folhas podem ser prejudicadas em crescimento e desenvolvimento, pelo vento, quando houver folhas apresentando bordas esbranquiçadas (e secas) e enrolamento; eventos não constatados no experimento. Fato raro para o padrão do histórico de Piracicaba, um vento de 165 km h⁻¹ (ciclone) atingiu a cidade no dia 29 de Março de 2006 (12 dias após a constatação do ponto de maturidade fisiológica), provocando o acamamento quase total das parcelas experimentais. Estas foram então colhidas e analisadas rapidamente, nos três dias seguintes.

A evapotranspiração de referência (ET₀), calculada diariamente pela equação de Penman-Monteith, apresentou valores elevados próximo à fase de florescimento da cultura, demandando entre 8 e 9 mm dia⁻¹, por exemplo (Figura 17), elevando consequentemente o valor da média nessa fase para 6,97 mm dia⁻¹, valor este substancialmente maior que as médias observadas ao longo das fases vegetativas e de enchimento de grãos, as quais foram 5,30 mm dia⁻¹ e 4,72 mm dia⁻¹, respectivamente. A média de todo o ciclo foi 5,20 mm dia⁻¹, e a soma de todos os valores de ET₀, entre a emergência e o ponto de maturidade fisiológica, foi de 458,10 mm.

Já o suprimento hídrico (chuva somada à irrigação) médio ao longo do ciclo foi de 8,2 mm dia⁻¹. Na fase vegetativa, a média foi 9,2 mm dia⁻¹, valor substancialmente maior que nas demais fases em função de precipitações mais elevadas nessa etapa, como por exemplo a mais forte de todo o ciclo (51,9 mm), ocorrente 3 dias antes do florescimento. Assim, embora este valor seja computado na fase vegetativa, para efeitos de manejo experimental ele foi considerado inicialmente como sendo água armazenada para a fase de florescimento. As fases de florescimento e enchimento de grãos receberam em média 7,8 e 7,4 mm dia⁻¹, respectivamente.

Figura 17 – Variação da evapotranspiração de referência (equação de Penman-Monteith) e do suprimento de água ao longo do ciclo do genótipo DKB-390

Portanto, dado que o suprimento hídrico médio na etapa do florescimento foi apenas 11,9% superior à evapotranspiração média no mesmo período, e que a exigência em água da cultura é máxima tanto pela polinização quanto pelo índice de área foliar ser máximo nessa etapa, suspeita-se que possa ter ocorrido um pequeno déficit hídrico na fase de florescimento. Pela Figura 17, observa-se que alguns dias da fase de enchimento de grãos não foram adequadamente supridos com água. No cômputo final do suprimento hídrico, foram disponibilizados por volta de 967 mm de água para a cultura, dos quais aproximadamente 35% foram oriundos de irrigação.

4.2 Fitomassa seca

De acordo com a análise de variância (Tabela 4), verificou-se que os tratamentos aplicados (fungicidas associados a doses de nitrogênio) não provocaram diferenças significativas na produtividade de grãos de milho; não se constatando também a interação entre as duas doses de nitrogênio (60 e 90 kg ha⁻¹) e os fungicidas. As doses de nitrogênio, porém, provocaram diferenças na produtividade de grãos de milho, conforme os dados do experimento conduzido.

Portanto, não se rejeita a hipótese de que os diferentes fungicidas tenham sido iguais para afetar a produtividade de grãos de milho; ou ainda, a hipótese de que os fungicidas aplicados venham a provocar diferentes produtividades de grãos de milho pode ser rejeitada, de acordo com os dados do experimento. Analogamente, a hipótese de que haja uma interação entre os fungicidas e as doses de nitrogênio utilizadas no sentido de afetar a produtividade de grãos de milho pode ser também rejeitada. Por outro lado, a hipótese de que as duas doses de nitrogênio empregadas afetem a produtividade não podem ser rejeitadas.

Tabela 4 – Análise de variância referente à produtividade de grãos de milho (kg ha⁻¹) em função das doses de nitrogênio, dos fungicidas e da casualização dos blocos

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F calculado	P
Fungicidas	3	519600	173200	0,27	0,845
Nitrogênio	1	3100523	3100523	4,86*	0,039
Fungicida vs. Nitrogênio	3	624243	208081	0,33	0,806
Blocos	3	880037	293346	0,46	
Resíduos	21	13384618	637363		
Total	31	18509021			

*Significativo ao nível de 5%.

Diante da análise de variância obtida para a produtividade de grãos, pode-se proceder com a análise de crescimento e de desenvolvimento vegetal contemplando-se duas situações: produtividade de milho com nível reduzido de adubação nitrogenada (60 kg ha⁻¹: a partir de então denominado como N60), e produtividade de milho com nível intermediário de adubação nitrogenada (90 kg ha⁻¹: N90). Ao simular os dados do experimento no programa APSIM

(APSRU, 2007), verificou-se leve deficiência de nitrogênio apenas para o grupo de tratamentos N60, apesar de não ser caracterizada para todas as fases do ciclo.

Em ordem decrescente, a Tabela 5 apresenta as produtividades de grãos de milho em função da média dos tratamentos empregados. Em geral, as maiores produtividades foram obtidas em função da aplicação adicional de 30 kg de N na segunda cobertura. O grupo de tratamentos N90 apresentou uma média de produtividade de grãos 6,32% superior à de N60. Considerando-se a separação dos tratamentos em duas categorias de níveis de N empregados, apenas T5 foi inferior ao seu respectivo testemunha (T1). Os índices de colheita médios por tratamento e por grupos de tratamentos são também apresentados. Considerando-se todas as parcelas, valores máximos de IC foram da ordem de 0,4584 e 0,4335 para N60 e N90, respectivamente, e valores mínimos de IC da ordem de 0,3856 e 0,3778.

Tabela 5 – Médias das produtividades de grãos do genótipo DKB-390 (kg ha^{-1}) obtidas em função dos tratamentos, em ordem decrescente

Tratamento	Produtividade de grãos (kg ha^{-1})*	Média de produtividade por grupo (kg ha^{-1})	Índice de colheita**** (kg kg^{-1})*	Média de índice de colheita**** por grupo (kg kg^{-1})
T6	10676,54	10472,50**	0,3960	0,4010**
T8	10617,99		0,3999	
T4	10335,69		0,4080	
T2	10259,80		0,4002	
T7	10053,56	9849,96***	0,4156	0,4179***
T3	10040,35		0,4202	
T1	9697,02		0,4114	
T5	9608,89		0,4244	

* Média das parcelas de cada tratamento; ** N90; *** N60; **** Relação entre fitomassa seca de grãos e fitomassa de parte aérea.

Os dados de fitomassa seca de parte aérea (W_{pa} , g m^{-2}) foram ajustados, em função do tempo (t, dias) a um modelo logístico com 3 parâmetros. A Tabela 6 e a Tabela 7 mostram, respectivamente, a análise estatística deste modelo explanatório para os grupos de tratamento

submetidos apenas à primeira cobertura (N60) e também à segunda cobertura (N90), o qual é descrito pela seguinte forma funcional:

$$W_{pa} = \frac{\varpi_1}{1 + \varpi_2^{-\varpi_3} \cdot t^{\varpi_3}} \quad (156)$$

em que ϖ_1 , ϖ_2 e ϖ_3 são os parâmetros empíricos do modelo (ver Tabela 6 e Tabela 7).

A taxa constante de desenvolvimento de parte aérea é obtida pela derivada da eq. (156):

$$\frac{dW_{pa}}{dt} = \frac{-\varpi_1 \cdot \varpi_3 \cdot t^{\varpi_3-1}}{\varpi_2^{\varpi_3} \cdot (1 + \varpi_2^{-\varpi_3} \cdot t^{\varpi_3})^2} \quad (157)$$

De acordo com a eq. (157), as máximas taxas de desenvolvimento de parte aérea foram verificadas logo entre a polinização e o início da fase de enchimento de grãos, tendo os tratamentos N90 apresentado maiores valores (34,92 g m⁻² por volta de 62 DAE) que os de N60 (32,71 g m⁻² por volta de 57 DAE). A partir do ponto de máximo, os valores foram sempre declinantes. Em condições próximas às ótimas, valores da ordem de 85 g (CO₂) m⁻² dia⁻¹ (~ 57,8 g CH₂O – ou menor ainda, da ordem de 41 g m⁻² dia⁻¹ se considerados à base de fitomassa) para a cultura do milho (PENNING DE VRIES, 1982), taxas essas associadas a transpirações entre 10 e 15 mm dia⁻¹. Isso confirma que elevadas taxas de produtividade de fitomassa estão naturalmente relacionadas a um elevado consumo de água.

Segundo Blackman (1919), dividindo-se a eq. (157) por W_{pa} :

$$\frac{1}{W_{pa}} \cdot \frac{dW_{pa}}{dt} = \frac{1}{W_{pa}} \cdot \frac{-\varpi_1 \cdot \varpi_3 \cdot t^{\varpi_3-1}}{\varpi_2^{\varpi_3} \cdot (1 + \varpi_2^{-\varpi_3} \cdot t^{\varpi_3})^2} \quad (158)$$

A taxa de desenvolvimento relativo (RGR, g g⁻¹ dia⁻¹) é:

$$RGR = \frac{1}{W_{pa}} \cdot \frac{dW_{pa}}{dt} \quad (159)$$

Substituindo a inversa da eq. (156), a eq. (157) e eq. (159) na equação (158), obtém-se RGR (considerando parte aérea, apenas), ao longo do tempo, especificamente para o experimento:

$$RGR = \frac{-\varpi_3 \cdot t^{\varpi_3-1}}{\varpi_2^{\varpi_3} + t^{\varpi_3}} \quad (160)$$

A eq. (160) explica que a fitomassa seca de parte aérea do experimento se desenvolveu cada vez menos, em relação à fitomassa seca que existia previamente; ou seja, representa a eficiência produtiva da planta em relação à planta total com o tempo, e não em relação à área foliar. A concorrência pelos recursos naturais fica cada vez maior com o tempo (MONTEITH,

2000), pelo menos usando como referência o modelo logístico. O atributo RGR é também relacionada com a taxa de respiração específica (GIFFORD, 2003).

Tabela 6 – Parâmetros do modelo estatístico que descreve a variação temporal de fitomassa seca de parte aérea dos tratamentos submetidos a 60 kg (N) ha⁻¹

Parâmetro	60 kg N ha ⁻¹				
	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)	
				Limite inferior	Limite superior
ω_1	3339,176579	180,0137092	18,54956822	2983,214246	3695,138912
ω_2	78,09736575	3,499336153	22,31776610	71,17771576	85,01701575
ω_3	-2,64303742	0,142737252	-18,5168019	-2,92528862	-2,36078622
Geral: Valor-F = 3395,36; r ² = 0,9801					

*Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 7 – Parâmetros do modelo estatístico que descreve a variação temporal de fitomassa seca de parte aérea dos tratamentos submetidos a 90 kg (N) ha⁻¹

Parâmetro	90 kg N ha ⁻¹				
	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)	
				Limite inferior	Limite superior
ω_1	4032,988085	227,3328442	17,74045497	3583,456047	4482,520124
ω_2	86,22633415	4,034619069	21,37161717	78,24820613	94,20446217
ω_3	-2,55077865	0,117492003	-21,7102321	-2,78310945	-2,31844786
Geral: Valor-F = 5083,07; r ² = 0,9866					

*Significativo a 1% de probabilidade.

A relação entre os parâmetros e o eventual significado físico-biológico dos mesmos não foi apurada. Por serem meramente estatísticos, a eq. (156), visualizada na Figura 18 para os tratamentos N60 e N90, representa apenas os fatos ocorridos no experimento, não servindo para efeitos de extrapolação. A principal justificativa para isso é que os parâmetros da equação devam ser variáveis em função dos atributos climáticos, principalmente, levado a taxas de acúmulo de

fitomassa também variáveis, podendo ser relativamente grande em um dia e pequena no dia seguinte, ou vice-verso. As tentativas de correlacionar o conceito de RGR, da análise de crescimento, com elementos climáticos como precipitação, temperatura e radiação, não foram geralmente conclusivas, principalmente porque as amostragens de fitomassa ao longo do ciclo da cultura são passíveis de erros muito grandes (MONTEITH, 1981).

Figura 18 – Variação temporal da fitomassa seca de parte aérea da cultura

Na Figura 18, a diferença de fitomassa seca de parte aérea observada entre N90 e N60 foi resultante principalmente da menor massa foliar apresentada por N60, o que resultou supostamente em menor translocação de nitrogênio para os grãos e a queda de produtividade de aproximadamente 5,95% para N60. O índice de colheita deste grupo de tratamentos foi, no entanto, 4,21% maior que o de N90, mostrando que, embora IC seja objeto de melhoramento genético, IC dependerá principalmente das relações fonte-dreno que decorrerem do suprimento de nitrogênio empregado, para uma mesma situação de ambiente a que a cultura é submetida.

No que diz respeito aos componentes que determinam a produtividade, quer seja, o número de fileiras por espiga (N_{fe}), o número de grãos por fileira (N_{gf}), a massa (g) de 1000 grãos à base seca (M_{1000}), apenas o nitrogênio foi significativo (a 99%) para N_{gf} e para M_{1000} . Os outros componentes, população de plantas (Pop, plantas ha^{-1}) e N_{ep} (número de espigas por planta), foram assumidos constantes, sendo Pop = 66666 e $N_{ep} = 1$ (valor modal observado).

Tais componentes descrevem a produtividade de grãos (W_g , kg ha^{-1}) a partir de:

$$W_g = 10^{-6} \cdot \text{Pop} \cdot N_{ep} \cdot N_{fe} \cdot N_{gf} \cdot M_{1000} \quad (161)$$

A Tabela 8 mostra as medidas de alguns dos componentes de produção e produtividades estimadas, em função desses componentes, para os diversos tratamentos do genótipo DKB-390.

Tabela 8 – Componentes de produtividade e produtividades estimadas (kg ha^{-1}), em função dos componentes, para os diversos tratamentos do genótipo DKB-390

Tratamento	Número de fileiras por espiga (N_{fe}) *	Número de grãos por fileira (N_{gf}) *	Massa (g) de 1000 grãos (M_{1000}) **	Produtividade estimada (kg ha^{-1}) pela eq. (161) ***	Produtividade estimada (kg ha^{-1}), por grupo, pela eq. (161) ****
T6	16	33	324,44	12427,97	
T8	16	33	335,59	11877,75	11896,55 *****
T4	18	31	328,53	11875,42	
T2	18	32	323,43	11405,03	
T7	18	32	315,73	11274,31	
T3	16	30	321,17	11010,66	11154,33 *****
T1	16	32	320,01	11129,13	
T5	18	30	320,09	11203,23	

* Moda de todas as amostras de cada tratamento; ** Média de todas as amostras de cada tratamento; *** Média das estimativas, à base seca, dos blocos; ***** N90; ***** N60.

Pela eq. (161), as estimativas de produtividade dos grupos de tratamentos N60 e N90 foram todas superiores às observações resultantes da amostragem das parcelas (Tabela 5), mas apresentaram praticamente a mesma diferença entre si, ou seja, a estimativa da produtividade de N90 pela eq. (161) foi 6,65% superior à de N60. Outro fato, a ordem decrescente de valores de produtividades mostrada na Tabela 8 ($T6 > T8 > T4 > T2$) foi a mesma apenas para os tratamentos N90, repetindo-se a ordem apenas para T7 e T1 quanto aos tratamentos N60. Alguns erros podem estar contidos nos resultados da aplicação da eq. (161). Exemplificando esta sensibilidade, para cada unidade de grão a menos na moda de N_{gf} , quase 400 kg de grãos por hectare são diminuídos como consequência, em geral.

As observações e as modas de N_{fe} foram semelhantes para todos os tratamentos, conforme esperado, pois a planta define esse atributo na fase vegetativa (RITCHIE; HANWAY, 1989), a qual foi praticamente a mesma para todas as parcelas até antes da aplicação da segunda cobertura no estágio E2, em algumas metade das parcelas. Para alguns híbridos de grão-amarelo, resultados semelhantes sobre o número de fileiras por espiga foram encontrados por Sadek et al. (2006). O genótipo DKB-390 é considerado como semiduro amarelo-alaranjado (DEKALB, 2008).

As modas de N_{gf} foram ligeiramente superiores, no contexto geral, para os tratamentos que receberam a segunda cobertura em E2. O componente N_{gf} é definido na fase de florescimento, já que o número de grãos em cada fileira é viabilizado mediante condições ambientais favoráveis à polinização. Paponov et al. (2005) reportaram aumento do número de grãos por planta após o suprimento de nitrogênio durante a fase de crescimento dos estilo-estigmas, fato este não relacionado ao maior desenvolvimento vegetal, mas sim à maior partição de fotoassimilados, tanto para os genótipos eficientes quanto para os não-eficientes em relação ao uso do nitrogênio.

Já o componente M_{1000} de todos os tratamentos N60 foram inferiores aos de N90. A variável M_{1000} é definida na fase de enchimento de grãos, principalmente em função dos níveis de senescência foliar que ocorrer nesse período, já que as folhas verdes remanescentes, por não comprometerem a eficiência ecofisiológica e bioquímica, deverão garantir aporte mais prolongado de assimilados e nitrogênio para os grãos (RAJCAN; TOLLENAAR, 1999). Ainda, a maior disponibilidade de nitrogênio favorece uma relação equilibrada entre sistema radicular e parte aérea (UHART; ANDRADE, 1995), permitindo que se crie melhores condições de tolerância à escassez moderada de água no solo.

Observa-se que o conjunto das modas de N_{fe} e de N_{gf} de T7 foi maior que nos demais tratamentos N60. Talvez por esse motivo a M_{1000} de T7 tenha sido penalizada, embora a produtividade final parece não ter sido afetada por essa redução na massa de grãos de T7, mostrando que o aumento relativo da massa de grãos pode não ser capaz de compensar uma deficiência relativa de N durante o enchimento de grãos. Para Magalhães (2003), é entre os estádios de quatro folhas ao pendoamento que o potencial produtivo é definido, pois há a contínua diferenciação dos tecidos meristemáticos da espiga em estruturas reprodutivas, em primórdios de ovários. Porém, como grande limitante para a produtividade de grãos, a temperatura do ar consiste também em um dos principais fatores, pois pode encurtar ou prolongar o ciclo, reduzindo ou ampliando a oportunidade de realização de fotossíntese, após definido o potencial produtivo.

4.3 Área foliar, transmitância e eficiência de uso da radiação

Para todo o ciclo da cultura, a Figura 19 mostra a variação temporal da área foliar e da transmitância para os dois grupos de tratamentos, sendo um deles não submetido à segunda cobertura em E2, correspondente a adicionais 30 kg (N) ha⁻¹, já considerando uma eficiência de 60%. Observa-se um curso natural do rápido desenvolvimento do índice de área foliar (IAF) entre o estágio E1 (19 DAE) e o pleno florescimento (55 DAE), concomitantemente a um rápido declínio na transmitância nesse período. Os maiores valores de IAF foram iguais a 5,55 e 5,73 (média das parcelas) para N60 e N90, respectivamente, e foram observados aos 46 (três dias após a emissão do pendão). A aplicação de fungicidas, assim como a interação entre estes e o nitrogênio, não resultou em diferenças nos padrões de variação de IAF entre N60 e N90 (Tabela 11). Apenas o fator nitrogênio, de forma isolada, promoveu diferenças marcantes nos valores de área foliar observados em 81 e 95 DAE. A segunda cobertura pode ter favorecido os padrões de alocação de N nos tratamentos N90 (YIN et al., 2003), promovendo melhor manutenção do IAF e alterando levemente o valor de k.

Figura 19 – Variação temporal da área foliar e da transmitância ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, para N60 e N90

Para ambos os grupos de tratamentos considerados (submetidos ou não à segunda cobertura, ou seja, N90 e N60, respectivamente), os dados de área foliar por planta (AF , cm^2 folha verde) em função do desenvolvimento relativo foram ajustados ao modelo de Gauss:

$$AF(Dr) = \gamma_1 \cdot e^{-0,5 \left(\frac{Dr - \gamma_2}{\gamma_3} \right)^2} \quad (162)$$

em que γ_1 , γ_2 e γ_3 são os parâmetros empíricos do modelo. As análises estatísticas dos modelos explanatórios de AF em função de Dr são apresentadas na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9 – Parâmetros do modelo estatístico obtido para a área foliar em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos não submetidos à segunda cobertura

Parâmetro	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)	
				Limite inferior	Limite superior
γ_1	8341,531663	152,5498242	54,68070322*	8039,876908	8643,186418
γ_2	0,557157616	0,006090377	91,48163120*	0,545114396	0,569200837
γ_3	0,236025013	0,005924399	39,83948904*	0,224310002	0,247740025
Geral: Valor-F = 552,44966955; $r^2 = 0,8889$.					

*Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 10 – Parâmetros do modelo estatístico obtido para a área foliar em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos submetidos à segunda cobertura

Parâmetro	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)	
				Limite inferior	Limite superior
γ_1	8654,915764	173,2159791	49,96603551*	8312,395384	8997,436144
γ_2	0,575835117	0,007205427	79,91686257*	0,561586977	0,590083257
γ_3	0,243721625	0,006973879	34,94778581*	0,229931352	0,257511898
Geral: Valor-F = 422,00913469; $r^2 = 0,8594$.					

*Significativo a 1% de probabilidade.

O modelo explanatório de Gauss superestima a área foliar entre a emergência e E1, e a subestima entre este e o florescimento, além de revelar a ocorrência da área foliar máxima

(representada pelo parâmetro γ_1) em um momento mais avançado do desenvolvimento relativo (representado pelo parâmetro γ_2), quando comparado com a ocorrência original. Este modelo serve para a obtenção da duração relativa de área foliar (DAF), que visa quantificar a vitalidade do aparelho fotossintético e toda a oportunidade de assimilação da cultura mediante o quanto de área foliar se desenvolveu associado à sua duração, denotando a área foliar por estação de cultivo. Integrando-se a eq. (162) e levando-se em consideração a eq. (112) do desenvolvimento relativo inicial até o final ($Dr = 1$):

$$DAF = 10^{-4} \cdot \frac{D_{sem}}{S_e} \cdot \int_0^1 \gamma_1 \cdot e^{-0,5 \left(\frac{Dr - \gamma_2}{\gamma_3} \right)^2} \cdot dDr \quad (163)$$

A vantagem de usar como referência o desenvolvimento relativo é que as integrais serão sempre resolvidas sem o denominador, que será sempre igual a 1 (referente ao comprimento total do ciclo ser $Dr = 1$). Se a eq. (163) é dividida pelo ciclo total da cultura ($Dr = 1$), obtém-se o IAF médio (IAF_m) ao longo do ciclo, fazendo com que DAF, quando baseado em Dr , represente-o diretamente, pois:

$$IAF_m = \frac{DAF}{1} \quad (164)$$

Pelo método numérico de Simpson para a resolução da eq. (164):

$$IAF_m = IAF_{m\acute{a}x} \cdot \left(\frac{\Delta_{Dr}}{3} \right) \cdot (f_0 + 4 \cdot f_1 + 2 \cdot f_2 + \dots + 2 \cdot f_{n-2} + 4 \cdot f_{n-1} + f_n) \quad (165)$$

Em que:

$$f_i = e^{-0,5 \cdot \gamma_3^{-2} \cdot (i \cdot Dr_i - \gamma_2)^2} \quad (166)$$

Ao assumir que $\Delta_{Dr} = 0,01$ obtém-se 10000 incrementos, fazendo com que a eq. (165) resulte em um IAF médio de 3,1603 para N60, e de 3,3488 para N90; ou seja, o IAF médio ao longo do ciclo foi aproximadamente 5,97% maior para as parcelas que receberam a segunda cobertura. De acordo com os dados observados, a maior área foliar após 81 DAE (grãos pastosos – farináceos, ou em formação dos “dentes”) nos tratamentos com maior nível de adubação nitrogenada pode ter sido decisiva na constatação das diferenças existentes entre os tratamentos com 60 e 90 kg N ha⁻¹, em termos de produtividade final de grãos (ver Tabela 5), já que a deposição de amido na fase grãos pastosos é bastante acentuada, e que no início da formação de “dentes” o endosperma ainda experimenta acentuado acréscimo de volume (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000; p.42).

Tabela 11 – Análise de variância referente ao índice de área foliar em função das doses de nitrogênio, dos fungicidas, da interação fungicida vs. nitrogênio e da casualização dos blocos, em cinco datas de amostragem

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F calculado	P
60 dias após emergência					
Fungicidas	3	0,1791	0,0597	1,09	0,375
Nitrogênio	1	0,1766	0,1766	3,22	0,087
Fungicida vs. Nitrogênio	3	0,0877	0,0292	0,53	0,664
Blocos	3	0,2103	0,0701	1,28	
Resíduos	21	1,1506	0,0547		
Total	31	1,8045			
67 dias após emergência					
Fungicidas	3	0,1318	0,0439	0,41	0,745
Nitrogênio	1	0,1365	0,1365	1,28	0,270
Fungicida vs. Nitrogênio	3	0,3545	0,1182	1,11	0,366
Blocos	3	0,5225	0,1742	1,64	
Resíduos	21	2,2312	0,1062		
Total	31	3,3765			
74 dias após emergência					
Fungicidas	3	0,1053	0,0351	0,26	0,853
Nitrogênio	1	0,4513	0,4513	3,34	0,082
Fungicida vs. Nitrogênio	3	0,0724	0,0241	0,18	0,910
Blocos	3	0,2738	0,0913	0,68	
Resíduos	21	2,8346	0,1350		
Total	31	3,7374			
81 dias após emergência					
Fungicidas	3	0,3565	0,1188	2,13	0,126
Nitrogênio	1	3,6046	3,6046	64,75**	<0,001
Fungicida vs. Nitrogênio	3	0,4010	0,1336	2,40	0,096
Blocos	3	0,0437	0,0145	0,26	
Resíduos	21	1,1691	0,0556		
Total	31	5,5750			
95 dias após emergência					
Fungicidas	3	0,3776	0,1258	1,81	0,177
Nitrogênio	1	4,3660	4,3660	62,65**	<0,001
Fungicida vs. Nitrogênio	3	0,0714	0,0238	0,34	0,795
Blocos	3	0,0276	0,0092	0,13	
Resíduos	21	1,4634	0,0696		
Total	31	6,3061			

**Significativo ao nível de 1%.

Tanto para o grupo submetido à segunda cobertura quanto para o não submetido, os dados de transmitância em função do desenvolvimento relativo foram ajustados ao modelo sigmóidal:

$$\tau(Dr) = \beta_1 + \frac{\beta_2}{1 + e^{\left(\frac{Dr - \beta_3}{\beta_4}\right)}} \quad (167)$$

em que β_1 , β_2 , β_3 e β_4 são os parâmetros empíricos do modelo. Para as duas situações de adubação nitrogenada, as análises estatísticas dos modelos explanatórios de τ em função de Dr são apresentadas na Tabela 12 e na Tabela 13.

Tabela 12 – Parâmetros do modelo estatístico obtido para a transmitância em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos não submetidos à segunda cobertura

Parâmetro	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)	
				Limite inferior	Limite superior
β_1	0,053963403	0,001895541	28,46860926*	0,050214889	0,057711917
β_2	0,958123614	0,009774216	98,02561868*	0,938794675	0,977452554
β_3	0,193493636	0,001567412	123,4478531*	0,190394011	0,196593262
β_4	-0,04343900	0,001160813	-37,4211728*	-0,04573456	-0,04114344
Geral: Valor-F = 9697,1241916; $r^2 = 0,9953$.					

*Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 13 – Parâmetros do modelo estatístico obtido para a transmitância em função do desenvolvimento relativo dos tratamentos submetidos à segunda cobertura

Parâmetro	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)	
				Limite inferior	Limite superior
β_1	0,045883967	0,001823323	25,16502879	0,042278267	0,049489667
β_2	0,968964757	0,09525704	101,7210689	0,950127263	0,987802252
β_3	0,194191774	0,001525084	127,3318131	0,191175853	0,197207695
β_4	-0,04432698	0,001127364	-39,3191291	-0,04655639	-0,04209757
Geral: Valor-F = 10728,055611; $r^2 = 0,9957$.					

*Significativo a 1% de probabilidade.

O parâmetro β_1 representa o valor de transmitância mínima, ocorrente quando o aparato fotossintético encontra-se interceptando quase toda a radiação incidente no topo da vegetação. Já o parâmetro β_3 se refere ao valor de desenvolvimento relativo no qual a transmitância por unidade de desenvolvimento, função caracterizada pela primeira derivada da eq. (167), é mínima, tendo isso ocorrido logo após o estágio E1. Não foi encontrado significado físico-biológico para os demais parâmetros, embora a diferença ($\beta_3 - \beta_4$) tenha resultado num valor muito próximo àquele da interceptação média do ciclo, calculada como sendo igual a 0,2345 para o caso dos tratamentos submetidos à segunda cobertura.

Os cálculos obtidos para o coeficiente de extinção ao longo do desenvolvimento foram muito variáveis para ambos os grupos de tratamentos de adubação nitrogenada, não tendo sido encontrada uma relação de dependência característica entre k e D_r ou IAF; em contraste aos resultados de Meinke (1996), o qual obteve um decréscimo de k em função do ciclo da cultura do trigo, muito acentuado nos estádios iniciais (por exemplo, para $IAF < 1$) e tendendo a ser constante após isso. Sem que houvesse muitas diferenças em relação ao uso de k variável, este fato reforçou a possibilidade de uso de um valor médio de k para simular a produção de trigo em condições de suprimento hídrico adequado, já que o rápido desenvolvimento da área foliar dos estádios subsequentes veio a compensar a produção de biomassa e o rendimento final de grãos.

Ao integrar a eq. (167), de maneira análoga ao feito para a eq. (162), e posteriormente dividir o valor encontrado pelo desta última, obteve-se, para o genótipo DKB-390, os valores dos coeficientes de extinção médios de 0,4470 e 0,4267 para N60 e N90, respectivamente. Esses valores são úteis como variáveis de entrada em modelos de simulação, principalmente o valor encontrado para N90, já que esta situação de suprimento de nitrogênio é condizente com a realidade de lavouras conduzidas sob elevadas populações e com adequado suprimento hídrico.

Durante o experimento, a não remoção de material foliar senescente ao longo do ciclo pode ter colaborado com a variabilidade inconsistente (tendendo ao aumento) nos valores de k nas fases posteriores ao florescimento, pois o conceito de interceptação leva em conta apenas a área foliar verde, que é ativa para a produção de fotoassimilados. Lindquist et al. (2005) constataram um processo semelhante, tendo calculado para a cultura do milho, utilizando a eq. (153), valores médios de k iguais a 0,49 entre emergência e antese, mas elevados para 0,67 durante a fase de enchimento de grãos. Para trabalhos futuros para a cultura do milho, sugere-se a remoção do material morto anteriormente à mensuração da transmitância, na tentativa de minimizar a

variabilidade de k , principalmente após o início do florescimento. Devendo o valor de k ser considerado em qualquer modelo de simulação (MONTEITH, 1965; JONES; KINIRY, 1986; MEINKE et al., 1997), o programa computacional APSIM 5.2 (APSRU, 2007) assume um valor fixo de $k = 0,45$ para a cultura do milho.

O maior valor de coeficiente de extinção médio encontrado para a situação de suprimento sub-ótimo de nitrogênio é consistente com a menor produtividade de grãos correspondente, haja visto que menores valores de k resultam numa distribuição da radiação incidente por maior área foliar, o que proporciona maiores taxas de fotossíntese, conforme abordado por Bernardes (1987). Os tratamentos que receberam a segunda cobertura produziram em média 10472,50 kg (grãos) ha^{-1} , contra 9849,96 dos que não receberam. Novamente, apenas o fator isolado “nitrogênio” resultou em diferenças significativas na produtividade. Yin et al. (2003) fornecem subsídios que evidenciam a existência de relações consistentes entre IAF e o conteúdo de nitrogênio nas folhas, dependendo do grau de cobertura da vegetação, principalmente nos estádios em que esta cobertura é ainda pequena ou então já bem fechada, relatando que, nos estádios intermediários, os padrões de alocação dependem adicionalmente do regime de adubação nitrogenada.

Por ter proporcionado maior manutenção da área foliar verde durante a fase de enchimento de grãos, os tratamentos que receberam a segunda cobertura puderam permanecer por mais tempo com maiores inclinações no ângulo foliar, conferindo menor valor para k , e conseqüentemente maior produtividade de carboidrato bruto. Allen et al. (1964) demonstraram que a fotossíntese potencial diminui conforme aprofunda-se verticalmente no dossel. Assim, mesmo pouco ativas, as folhas inferiores em senescência, mais “planófilas” e levando a um k maior, podem também ter contribuído (mas em menor proporção) em termos de interceptação de luz para a quebra de produtividade nos tratamentos que não receberam a segunda cobertura.

Independente do valor de k , que é uma conseqüência da inclinação angular de cada folha e da distribuição dessas inclinações, híbridos mais erectófilos podem permitir que uma maior população de plantas (em relação à agricultura de sequeiro) seja adotada na semeadura, vindo a exigir, por definição, também um adequado suprimento hídrico para atender à maior demanda de água. Independente do híbrido, este deve ser posicionado corretamente em relação à época de semeadura, em uma determinada região com seu particular regime de temperaturas, para que a definição do aparato fotossintético não seja antecipada ou postergada e altere os valores de k , além de substancialmente a produtividade de grãos.

Utilizando a equação ajustada da transmitância em função dos dados medidos de k e de IAF, e dispondo também dos dados medidos de fitomassa seca e de radiação fotossinteticamente ativa incidente no topo do dossel, as eficiências de uso da radiação (RUE) foram computadas para os tratamentos não submetidos e submetidos à segunda cobertura com N, conforme Figura 20. Apesar do ajuste linear, nota-se que houve tendência de aumento da RUE na medida em que a cultura se desenvolveu, o que pode não condizer com o esperado (SINCLAIR; MUCHOW, 1999).

(a)

(b)

Figura 20 – Eficiência de uso da radiação (a) para os tratamentos que receberam apenas a primeira cobertura; (b) para os tratamentos que receberam também a segunda cobertura

A segunda cobertura promoveu um aumento de 6,07% na RUE de N90, em relação aos tratamentos N60. As eficiências de uso da radiação para N60 e N90 foram calculadas em, respectivamente, 3,3233 e 3,5253. Para Caviglia e Sadras (2001), se a eficiência de uso da radiação é o quociente entre fitomassa de parte aérea acumulada e interceptação de radiação acumulada, e se a eficiência de uso da água é o quociente entre fitomassa de parte aérea acumulada e consumo hídrico, então as RUE e EUA são diretamente relacionadas, porém através de mecanismos diferentes. Assim, o grupo de tratamentos N60 apresentou menor RUE pelo fato do elemento N ter auxiliado tanto na questão da expansão foliar com posterior aumento da interceptação luminosa, quanto nas reações bioquímicas responsáveis por promover aumentos nas taxas fotossintéticas. Já a EUA poderia ser substancialmente alterada em função de um regime hídrico de déficit (ABBATE et al., 2005), caso fosse conduzido o experimento alternativo, e levemente pelo regime de nitrogênio, como será visto no próximo sub-item.

Kiniry et al. (1989) revisaram diversos trabalhos abordando a eficiência de uso da radiação (RFA) para a cultura do milho, chegando em valor médio de 3,5 g (fitomassa seca de parte aérea) MJ^{-1} (RFA interceptada). Em seus próprios experimentos, porém, os autores encontraram valores de RUE variando de 2,1 a 3,9 para as fases que antecede a de enchimento de grãos; não havendo efeitos aparentes da temperatura do ar nestes valores. Andrade et al. (1993) afirmaram que temperaturas médias abaixo de 20 °C (não ocorrido no presente experimento, conforme a Tabela 3) reduzem a eficiência de uso da radiação. Elabora-se a hipótese, porém, de que o aumento de temperatura possa ter reduzido o tempo de ciclo da cultura e elevado assim o valor da RUE nas fases de florescimento e de enchimento de grãos (bem como no todo), as quais experimentaram aumentos consideráveis nas médias das temperaturas médias, mínimas e máximas.

Caso isso não ocorresse, os valores de RUE obtidos poderiam estar mais próximos daqueles encontrados por Westgate et al. (1997). A cultura do milho não exhibe saturação de luz mesmo sob regime de brilho solar completo (HESKETH; MOSS, 1963), levando a crer que maiores fluxos de radiação também não venham a promover diferenças na RUE. Trabalhando em condições de campo quase ótimas, Lindquist et al. (2005) recomendam os valores mínimos equivalentes a 3,7 g MJ^{-1} para modelos de simulação que necessitem da RUE como variável de entrada, em modelos de produtividade de grãos de milho. A adoção do valor de RUE = 3,52 encontrado neste experimento para o híbrido DKB-390 parece ser razoavelmente adequada para adoção de uso em modelos que simulem produtividade potencial.

4.4 Consumo hídrico e coeficientes de cultura

De acordo com os critérios estabelecidos em “MATERIAL E MÉTODOS”, as evapotranspirações diárias dos sete primeiros dias foram estimadas utilizando-se $K_c = 0,2$; e a do sétimo ao décimo quarto dia utilizando-se $K_c = 0,3$. O consumo hídrico resultante até o décimo quarto dia (13 DAE) foi 16,6 mm. O valor de $K_c = 0,2$ foi utilizado para a estimativa das evapotranspirações diárias ocorrentes entre a última data de mensuração (102 DAE) até o ponto de maturidade fisiológica (110 DAE), resultando em um consumo hídrico de 8,4 mm nos oito últimos dias do ciclo. Para os demais períodos, o consumo hídrico total até um determinado tempo foi obtido pela soma do consumo hídrico existente no período vigente com o consumo hídrico total existente até o tempo anterior ao início desse período, conforme apresentado na Tabela 14. A coleta aos 39 DAE foi feita antes da segunda cobertura com os 30 kg (N) ha⁻¹ adicionais para N90. Por intermédio do programa APSIM (APSRU, 2007), não se verificou déficit hídrico (para N60 ou N90) ao simular os dados do experimento naquele modelo, permitindo que $CH_a = CH$.

Tabela 14 – Consumo hídrico (mm) observado em função dos dias após a emergência (DAE) para os tratamentos submetidos a 60 e 90 kg (N) ha⁻¹

Dias após a emergência (DAE)	Consumo hídrico (mm)*	
	60 kg (N) ha ⁻¹	90 kg (N) ha ⁻¹
0		0,76
13		16,63
20		43,14
27		79,30
35		128,91
39		172,66
46	253,45	253,62
53	328,23	331,55
60	393,00	397,60
67	446,85	454,40
74	490,02	500,86
81	521,99	535,49
88	545,85	561,62
95	562,18	579,41
102	574,54	593,63
110	582,91	602,00

* Os valores se referem às médias das parcelas experimentais.

Os valores de umidade do solo, os quais geraram os de armazenamento de água e suas variações, foram necessários para se obter os consumos hídricos ao longo do tempo, e são apresentados na Figura 21. Armazenamentos da ordem de 230 mm foram observados, o que pode ser justificado pela classe textural do solo e pelas condições de suprimento hídrico empregadas.

(a)

(b)

Figura 21 – Umidade do solo em função do perfil para as diferentes datas: (a) N60; e (b) N90

Tanto para o grupo de tratamentos submetido à segunda cobertura (N90) quanto para o não submetido (N60), os dados de consumo hídrico em função do tempo foram ajustados a um modelo explanatório semelhante ao de Gauss:

$$CH = \eta_1 \cdot e^{-0,5 \left(\frac{t - \eta_2}{\eta_3} \right)^2} \quad (168)$$

em que η_1 , η_2 , η_3 e η_4 são os parâmetros empíricos do modelo.

As análises estatísticas dos modelos explanatórios para os casos separados de N60 e de N90 são apresentadas na Tabela 15 e na Tabela 16, respectivamente.

Tabela 15 – Parâmetros do modelo explanatório, para o consumo hídrico em função do tempo, para os tratamentos não submetidos à segunda cobertura

Parâmetro	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)	
				Limite inferior	Limite superior
η_1	586,597600	5,991374937	97,90701770*	573,5219266	599,6733773
η_2	176,013484	31,15929248	5,659577517*	108,3456179	244,3512444
η_3	120,009559	30,90724662	3,885146416*	52,62643629	187,5319206
η_4	6,548340	1,503740197	4,311551946*	3,201654043	9,765253901
Geral: Valor-F = 11670,52; $r^2 = 0,9985$.					

*Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 16 – Parâmetros do modelo explanatório obtido, para o consumo hídrico em função do tempo, para os tratamentos submetidos à segunda cobertura

Parâmetro	valor	Erro padrão	Valor-t	Intervalo de confiança (95%)	
				Limite inferior	Limite superior
η_1	607,6309893	6,320942810	96,12980334*	593,8360068	621,4259718
η_2	178,3065374	30,65762466	5,816058465*	111,3985764	245,2144984
η_3	121,1143578	30,38439133	3,986071548*	54,80270799	187,4260076
η_4	6,434402049	1,448441098	4,442294586*	3,273288245	9,595515852
Geral: Valor-F = 12806,36; $r^2 = 0,9921$.					

*Significativo a 1% de probabilidade.

O significado e a interpretação físico-biológica dos parâmetros da eq. (168) não foram estudados. Pelo modelo explanatório dos dados, o consumo hídrico de N90 foi totalizado em 600,9 mm, tendo sido acumulados 267,2 mm na fase vegetativa (duração de 46 dias), 174,9 mm na de florescimento (18 dias) e 158,9 mm na de enchimento de grãos (46 dias). Assumindo a mesma duração (em dias) para N60, consumos hídricos levemente inferiores foram observados para as fases vegetativa e de florescimento, e uma diferença de 12 mm a menos na fase de enchimento de grãos.

Dividindo-se a eq. (168) pela eq. (156), obtém a eficiência de uso da água (EUA, $\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$) ao longo do tempo da cultura, interpretada para como sendo o coeficiente angular da reta ajustada entre biomassa de parte aérea e consumo hídrico acumulados no ciclo (Figura 22), mas, por outro lado, variável dentre deste ciclo (Figura 23) principalmente em razão das relações fonte-dreno que se modificam durante o ciclo e também com o regime de nitrogênio empregado (CAVIGLIA; SADRAS, 2001). A Figura 23 revela maiores valores de EUA para a fase de enchimento de grãos, tendendo ser constante durante a de florescimento e menor durante a vegetativa, embora nesta a EUA seja cada vez mais crescente com o tempo.

Figura 22 – Relação empírica entre biomassa de parte aérea e consumo hídrico para os grupos de tratamento N60 e N90

Figura 23 – Variação temporal da eficiência de uso da água para N60 e N90

Os tratamentos que receberam a segunda cobertura (N90) produziram 10472,50 kg (grãos) ha^{-1} , em média, contra 9849,96 kg (grãos) ha^{-1} dos que não receberam. O menor valor de EUA para a situação de suprimento sub-ótimo de nitrogênio é consistente com a menor produtividade de grãos correspondente, haja visto que a segunda cobertura pode ter favorecido os padrões de alocação de N para N90, conforme a abordagem de Yin et al. (2003), permitindo promover melhor manutenção do IAF (Figura 19) e da condição erectófila das folhas, devido à menor senescência, o que leva a uma melhor distribuição da radiação incidente por área foliar ativa e proporciona maiores taxas de fotossíntese. Por outro lado, isso esteve associado também ao maior consumo hídrico verificado para N90. Mishra et al. (2001) encontraram uma relação oposta entre EUA e CH, embora tenham trabalhado com a cultura do milho fora da estação principal de cultivo e variado os tratamentos quanto à irrigação. No presente trabalho, reconhece-se a importância da EUA como um parâmetro de avaliação do desempenho da cultura *a posteriori*, mas não se identifica nenhuma aplicação para fins de planejamento (ex.: das necessidades de água) ou de gerenciamento (ex.: manejo da irrigação).

Hammer e Muchow (1994) propõem uma equação que permite derivar a transpiração diária ocorrente durante o ciclo, com base no VPD, na variação de desenvolvimento da cultura de

um dia para o outro (ΔW_{pa}), e ainda em um coeficiente de transpiração, o qual assume a grandeza de 0,009 kPa para a cultura do milho. Este mesmo valor é adotado pelo programa computacional APSIM 5.2 (APSRU, 2007), tendo sido explicado com maiores detalhes por Tanner e Sinclair (1983). Utilizando a eq. (157) na tentativa de substituir ΔW_{pa} , a transpiração acumulada para todo o ciclo foi de 348 e 382 mm para os grupos de tratamentos N60 e N90, respectivamente, ambos considerados baixos em relação ao consumo de água total obtido do modelo explanatório da eq. (168) aplicado aos 110 DAE. Para a cultura do milho, aproximadamente 70% de todo o consumo hídrico advém da transpiração das plantas (PAYERO et al., 2006).

A grande desvantagem do uso da eq. (157) é que esta, empírica e infinitesimal, capta apenas a tendência de aumento ou diminuição constante de dW_{pa}/dt em função do tempo, mas nunca uma variação diária qualquer de variação finita de fitomassa, que pode ocorrer principalmente em função das oscilações normais do clima durante o ciclo da cultura. Isso leva a crer que, para cada dia, a evapotranspiração da cultura possa ser grosseiramente estimada ou subestimada, fazendo com que a equação mencionada em Hammer e Muchow (1994) possa ser válida apenas para modelos de acúmulo de biomassa que captem as variações diárias do clima, tal como o mecanístico proposto por Verdoodt et al. (2004).

De forma oportuna, obteve-se os valores de coeficiente de cultura (K_c) para diversas etapas da cultura (Tabela 17), aplicáveis ao grupo de tratamentos submetidos à segunda cobertura com N (N90). Tal procedimento não foi feito para N60 porque, na prática, lavouras de milho irrigadas e com elevadas populações operam, no mínimo, com 90 kg (N) ha^{-1} , e ainda pelo fato de o K_c representar um conceito de “produtividade potencial”. O K_c pode ser ainda representado como função da cobertura do dossel. Entretanto, se os valores de coeficiente de extinção são assumidos constantes, isso faz com que os valores de ET estimados no início do ciclo sejam muito pequenos, pois λ_I é muito pequeno quando IAF é pequeno, ao passo que a evaporação sempre existe e é supostamente maior nesta etapa.

Elevados valores normalizados de K_c foram obtidos já a partir do momento em que a cultura apresentava 6 folhas completamente expandidas, chegando à média de 1,5 nas fases de elevado IAF, e decrescendo (mas ainda alto) até a fase de grãos pastosos. Em concordância com Tyagi et al. (2003), que também encontraram elevados valores de K_c para o milho (das magnitudes de 1,36 e 1,23 em algumas etapas críticas de desenvolvimento), os valores aqui encontrados são maiores que aqueles genéricos apresentados por Allen et al. (2006).

Tabela 17 – Valores de coeficiente de cultura (Kc) em função de diferentes fases de desenvolvimento da cultura do milho irrigado

Estádio (intervalo de DAE*)	Kc
Até 4 folhas visíveis (0 – 18)	0,32
4 a 8 folhas visíveis visíveis e ainda ligadas à haste (19 – 37)	1,07
8 a 12 folhas visíveis e ainda ligadas à haste (37 – 50)	1,50
Pendoamento, florescimento e polinização (51 – 64)	1,43
Final da polinização à grãos pastosos (64 – 77)	1,25
Grãos pastosos à grãos denteados ou farináceos (78 – 89)	1,01
Grãos farináceos à grãos duros (90 – 99)	0,39
Grãos duros ao ponto de maturidade fisiológica (100 – 110)	0,23

*Os valores entre parênteses são válidos especificamente para o grupo de tratamentos N90.

Por depender do coeficiente de extinção e do IAF, a transmitância será variável com o tempo. Assim, pelo fato do Kc estar relacionado com o IAF e com a porcentagem de cobertura do solo (PEREIRA et al., 2002; p.270), modelou-se Kc de acordo com a seguinte expressão:

$$Kc = Kc_0 + Kc_{m\acute{a}x} \cdot (1 - \tau) \quad (169)$$

em que Kc_0 é o coeficiente de cultura inicial (ex.: $Kc_0 = 0,32$; ver Tabela 17); e $Kc_{m\acute{a}x}$ o coeficiente de cultura máximo (ex.: $Kc_{m\acute{a}x} = 1,50$).

Para um valor fixo de ET_0 (ex.: 5 mm dia^{-1}) associado à eq. (169), a evapotranspiração da cultura (ET) configura o formato da curva do índice de área foliar com o tempo, o que habilita a eq. (169) a representar de forma conveniente o processo da ET ao longo do ciclo. O valor de Kc_0 , como intercepto, contorna a suposição do coeficiente de extinção constante. Duas fontes de erro podem estar embutidas no cálculo do Kc da Tabela 17: i) o processo descontínuo de leituras de umidades do solo pela sonda de neutrôns (que pode conferir diferenças nas variações diárias de armazenamento) e os próprios erros inerentes ao uso do equipamento; e/ou, principalmente, ii) os valores de radiação líquida medidos. Ao comparar a radiação líquida medida com a estimada pelo método FAO (ALLEN et al., 2006), conclui-se que a segunda tenha superestimado levemente os valores observados. Por exemplo, pressupondo que o saldo radiômetro estivesse operando adequadamente, a subestimação dos valores de R_n implica também na subestimação de ET_0 , fazendo elevar os valores de Kc.

4.5 Simulações determinísticas

Antes que a simulação das taxa de acúmulo e do acúmulo de fitomassa, bem como a produtividade de grãos (à base de fitomassa seca) e os requerimentos hídricos e de nitrogênio fossem feitos, fez-se necessário ajustar a relação entre taxa de assimilação de dióxido de carbono sob condições de dias muito claros e taxa de assimilação de dióxido de carbono sob condições de dias extremamente nublados, ou seja, R_{adc} , conforme a eq. (62), que é requisitada pela eq. (64), que por sua vez é um dos atributos do modelo geral (Figura 2). Como realizado por Detomini et al. (2006), ajustou-se por método iterativo um valor de $R_{adc} = 0,26$ com base nos valores de grãos observados para o grupo de tratamentos N60. Interpolando-se os valores encontrados em Heemst (1986), essa relação estaria em torno de 0,34. Para casos de materiais genéticos específicos, contudo, esses valores são de difícil obtenção na literatura.

Modelos são representações simplificadas de um sistema, os quais são uma parte da realidade, contendo componentes interrelacionados, com limites definidos, e afetado pelo meio, mas sem afetá-lo significativamente. Fato importante é a definição da escala. As conclusões sobre um sistema, numa dada escala de organização, é embasada no desempenho dos componentes da escala inferior. Os principais papéis dos modelos são: i) organizar as informações; ii) mostrar as deficiências das diversas áreas do conhecimento; e iii) simular situações “impossíveis” ou de difícil exequibilidade (ex.: injetar CO_2 na terra, biologia de insetos, etc.).

A existência de uma coincidência não implica necessariamente em uma relação causa-efeito. Um modelo nunca é validado, mas sim continuamente avaliado. Podendo ser determinísticos ou estocásticos, os primeiros são limitados pelo fato de proverem apenas um único resultado possível, não contemplando portanto as incertezas e as externalidades dos segundos, que são também chamados modelos probabilísticos, já que apresentam uma faixa de possíveis resultados e com suas correspondentes probabilidades.

Utilizando-se o valor ajustado de R_{adc} para N60, os valores encontrados de RUE, k , IC e AF(T) para grupo de tratamentos N90, bem como as condições de local (latitude), data (coeficientes de Angstrom-Prescott) e população observados no experimento conduzido em Piracicaba, as taxas de acúmulo de fitomassa seca de parte aérea, o acúmulo de fitomassa seca de parte aérea, e a produtividade de grãos de milho, as equações (118), (120) e (121), respectivamente, foram utilizadas para a realização de simulações determinísticas para o grupo de tratamentos N90, sem déficit hídrico ($F_d = 1$).

Obteve-se resultados muito semelhantes ao observados. O modelo superestimou a produtividade de grãos observada em 1,4% ($10620,13 \text{ kg ha}^{-1}$), mostrando que o ajuste de R_{adc} pode ser adotado para uso no modelo de simulação. Ao invés de N90, se os valores de RUE, k, IC e AF(T) do grupo de tratamentos N90 são utilizados, os valores de produtividade de grãos simulados são praticamente iguais aos observados porque R_{adc} foi ajustado para tal. Cabe lembrar que se fez a opção de se trabalhar com o índice de colheita à base de parte aérea, ao invés de à base de planta inteira, pelo fato de conferir ao modelo maior possibilidade de uso, já que a maioria dos experimentos contemplam amostragens apenas de parte aérea.

Obteve-se taxas de acúmulo diárias bastante elevadas para alguns dias do ciclo (Figura 24a), chegando a ultrapassar o valor de $600 \text{ kg ha dia}^{-1}$, apesar de que baixos valores dessa taxa tornaram-se evidentes no início do ciclo (ex.: até 40 DAE), conforme esperado, já que os baixos valores de IAF e a baixa interceptação de luz até este período são peculiares. As taxas de acúmulos tendem decrescer a partir do florescimento, fato natural devido aos processos crescentes de senescência, porém levando a acúmulos ainda crescentes até a maturidade fisiológica. A curva de acúmulo de fitomassa da Figura 24 apresenta um padrão de variação (tipo “sigmóide”) semelhante àquele constante na Figura 18, referente ao modelo explanatório dos dados observados no experimento desta descrição. Loomis e Connor (1992, p.41) apresentam taxas da ordem de $520 \text{ kg (fitomassa seca) ha dia}^{-1}$, porém para híbridos menos eficientes quanto ao uso da radiação.

Os valores elevados de taxa de acúmulo podem ser justificados pela coincidência de elevadas temperaturas associadas ao elevado índice de área foliar nesses dias, e diante de uma condição ambiental favorável de radiação solar incidente e de boas disponibilidades de água e nutrientes no solo. Comprovando isso, o resultado da simulação demonstrou também que, mesmo sob elevado IAF, o dossel pode sofrer uma queda abrupta (Figura 24a, próximo aos 60 DAE) na taxa de acúmulo se as condições não forem favoráveis, principalmente as atmosféricas. Valores tão elevados de taxa de acúmulo não são freqüentes na prática das produções agrícolas, pois nem sempre a combinação desejada é possível, seja por si, seja pela ação do gerenciamento (ex.: correto manejo da irrigação na quantidade e tempo certos), e representam apenas as condições de produtividade potencial para uma determinada situação, já que diferentes situações podem promover também diferentes potenciais de produção (DOBERMANN et al., 2003). Se houvesse um déficit hídrico de 25% (ou seja, $F_d = 0,69$) uniformemente distribuído no ciclo, haveria uma quebra de produção de 30,26% (Figura 24b), pois a produtividade de grãos seria 7303 kg ha^{-1} .

(a)

(b)

Figura 24 – Variação das taxas de produtividade de biomassa (simulada) de parte aérea e da produtividade de biomassa acumulada com o tempo para (a) $D_h = 1$; (b) $D_h = 0,75$

Conseqüentemente, os requerimentos hídricos e de nitrogênio foram obtidos pelas equações (124) e (110), respectivamente. Foram utilizados os valores K_c presentes na Tabela 17, que por definição ocorrem quando $F_d = 1$. Para situações de déficit hídrico, o K_c é corrigido pelo valor de K_y , que para o milho é 1,25 (considerando o ciclo inteiro). Utilizando as equações (124), (169) e (27), assumindo ausência de déficit hídrico ($F_d = 1$), a equação empírica de AF para N90, assim como $IC = 0,401$; $k = 0,4267$; $K_{c0} = 0,32$; $K_{c_{max}} = 1,50$ e as variáveis climáticas observadas durante o experimento; comparou-se as estimativas de evapotranspiração, ao longo do ciclo da cultura, obtidas em função dos métodos de Thornthwaite e de Penman-Monteith, melhor visualizável na Figura 25a. O primeiro superestimou o consumo hídrico medido em 10,81% (667,28 mm), ao passo que o segundo subestimou em 1,22% (595,24 mm) o CH observado no experimento, considerando a média dos tratamentos submetidos a N90.

Observa-se que a evapotranspiração estimada pelo método de Thornthwaite não sofre oscilações bruscas ao longo do tempo, como ocorre com aquela estimada pelo método FAO, mais preciso. As diferenças ocorrem pelo fato de o método de Thornthwaite depender apenas da temperatura e do comprimento do dia, variáveis que não sensibilizam muito a variação de ET, como fazem a radiação líquida e o VPD. Na Figura 23a, o ponto no qual as retas cruzam o eixo das abscissas poderia ser interpretado empiricamente como a evaporação existente durante o ciclo, sendo geralmente maior para culturas irrigadas e com alta frequência (TANNER; SINCLAIR, 1983). Por esta ótica, os valores de evaporação total do ciclo encontrados neste trabalho podem ser considerados baixos (< 50 mm). Já a metodologia clássica proposta por Ritchie (1972), baseada em princípios físicos envolvendo transmitância, radiação líquida e evapotranspiração potencial [ver a combinação das eq. (48), (53), (27) ou (33), e (123)], permitiu obter 154,82 mm de evaporação para N90, que equivalem a 26,03% do consumo hídrico total, sendo o restante naturalmente atribuível à transpiração.

Ao utilizar as equações (169) para a simulação do consumo hídrico a 75% do ótimo de suprimento de água ($D_h = 0,75$; $F_d = 0,69$), obteve-se um consumo hídrico final de 445,98 mm, valor este 25,91% menor que o consumo observado ótimo, quando $F_d = 1$. A evaporação, 116,11 mm, manteve-se em 26,03% da evapotranspiração, pois, se a interceptação luminosa é a mesma, trata-se de uma relação linear [eq. (53)]. Já o método de Thornthwaite gerou um consumo hídrico final de 500,46 mm. A relação entre os consumos foi a mesma, ou seja, o método de Thornthwaite superestimou da FAO em 12%.

(a)

(b)

Figura 25 – Variação das taxas de produtividade de biomassa (simulada) de parte aérea e da produtividade de biomassa acumulada com o tempo para (a) $D_h = 1$; (b) $D_h = 75\%$

Presume-se que o modelo seja suficientemente adequado para estimar o requerimento hídrico para todo o ciclo da cultura, em condições de déficit ou não. Porém, considerando apenas a fase de florescimento na simulação, o híbrido consumiria 144 mm nesta fase, 82% a menos que o observado. É provável que essa lâmina não seja caracterizada como segura para o orçamento hídrico de toda a fase, que pode levar até 15 dias para se encerrar. Restaria ainda saber se, no caso de $D_h = 75\%$, os 105,96 mm simulados para o consumo de água durante a fase de florescimento (60,5% menor que o observado) não viria a interferir nas taxas de acúmulo da fase subsequente.

Na prática do manejo da irrigação, embora possa implicar em um maior uso da água, a adoção de valores supostamente maiores de K_c (que os da literatura) pode ser mais segura no sentido de prevenção da cultura ao estresse hídrico. Para populações elevadas (ex.: entre 60 e 70 mil plantas ha^{-1}) do híbrido DKB-390, conduzido sob um adequado suprimento de nitrogênio, espera-se também um consumo elevado de água, da ordem de 600 mm por ciclo, principalmente se houver coincidência de uma elevada demanda hídrica pela atmosfera com a ocorrência de maior demanda pela cultura, o que é ditado em termos absolutos pelo índice de área foliar.

O evento da precipitação, variável discreta, não é certo de ocorrência, tal como são a radiação solar e a temperatura. A primeira etapa seria modelar a ocorrência ou não (variável discreta) da precipitação; a segunda seria estimar a magnitude (variável contínua) da mesma (GENNEVILLE; BOOCK; 1983). Ao aplicarem cadeias não-homogêneas de Markov de terceira ordem para zonas pluviometricamente homogêneas, Keller Filho et al. (2006) demonstram ainda que as probabilidades diárias de transição entre dias secos e chuvosos, com base nos três dias anteriores ao de interesse, podem ser obtidas por interpolação das probabilidades de transição, estimadas com dados agregados temporalmente, mediante o uso de uma função sinusoidal.

Na prática do planejamento do uso da água, uma alternativa seria o uso da distribuição gama ou outra ajustante, ou ainda uma distribuição empírica, para períodos de 2 semanas (ANDRADE JUNIOR et al., 2001), por exemplo, para se estimar os valores modais para esses períodos dentro do ciclo da cultura. A necessidade de irrigação para esses períodos (corrigido pela eficiência de aplicação de água do sistema) seria então a diferença entre o requerimento da cultura e o valor modal de precipitação do período analisado. Se a distribuição não admitir probabilidade de valores nulos, tal como a gama, pode-se recorrer, como fizeram Fonseca e Albuquerque (1978) para a Gama, à uma distribuição “mista”, que contemple ao mesmo tempo a probabilidade de valores nulos e sua oposta.

4.6 Simulações estocásticas

A produtividade de grãos pode variar como decorrência das possíveis variações que podem acontecer com o clima em um determinado dia, já que poderão conduzir mudanças abruptas nas taxas de produtividade de fases importantes da cultura, conforme mostra-se na Figura 24a, para a fase de florescimento. Um procedimento estocástico contemplaria essa variabilidade. A geração de muitos números pseudo-aleatórios (ex.: 10000), necessário para o início da simulação com esse procedimento, promoveria um número de 10000 curvas de taxa de produtividade de fitomassa, ao invés de simplesmente uma única, tal como ocorre na simulação determinística.

Selecionando-se o histórico climático de Rockhampton (Austrália), município localizado próximo ao trópico de Capricórnio, realizou-se a simulação estocástica da produtividade de grãos de milho com o programa computacional elaborado, para a mesma data de semeadura e população de plantas do experimento conduzido, optando-se pela distribuição normal bivariada para a produtividade de grãos e pelo método de Thornthwaite para a estimação do consumo hídrico final. Para este caso, foram adotadas também os valores encontrados nesta descrição, referentes a N90, para RUE, k, R_{adc} , AF(T), IC (moda, máximo e mínimo), $\tau(Dr)$ e Kc. Ainda, os seguintes valores foram utilizados para a eq. (110): $T_{Nop} = 0,005$; $Ef_{AN} = 0,6$; $N_s = 0,58$; $T_N = 0,16$; e $T_{PB} = 0,08$. A fração de parte aérea vegetal, em relação ao todo, foi simulada pelo APSIM em torno de 81%.

À base seca, a produtividade mais provável (11,53%) foi de 10604 kg ha⁻¹ (Figura 26a), valor este superior à média observada em apenas 1,26%. Probabilidades menores (0,02%) foram verificadas para as máximas e mínimas produções de grãos médias, as quais foram simuladas à magnitude de 12673 e 8634 kg ha⁻¹, respectivamente. Em simulação imediatamente depois, às mesmas condições, revelou um aumento de 100 kg (grãos) ha⁻¹, mostrando que o modelo não é tão sensível à geração dos números pseudo-aleatórios (Figura 26b). As necessidades hídricas e de nitrogênio para os valores mais prováveis de produtividade de grãos seriam 555 mm e 143 kg (N) ha⁻¹, 7,80% inferior e 8,33% superior aos valores observados, respectivamente. Seriam necessários adicionais 25 kg (N) ha⁻¹ para se obter as menos prováveis máximas produtividades.

Variando-se uma unidade a menos na densidade de semeadura, levando portanto a uma população de 55555 plantas ha⁻¹, os resultados mostraram a redução mais provável, na produtividade (Figura 26c), de 2191 kg ha⁻¹ (20,66% a menos que o ótimo), reduzindo também a necessidade de N correspondente a essa produtividade, que caiu para 113 kg ha⁻¹. Se, por outro lado, a condição anterior (de população) é simulada mas com o nível de suprimento hídrico a 75%

do ótimo ($D_h = 0,75$ e $F_d = 0,69$), o modelo simula 7576 kg ha^{-1} como valor mais provável (11,97%) para a produtividade deplecionada (Figura 26d). Para se obtê-lo, seriam necessários $101 \text{ kg (N) ha}^{-1}$, representando 70% da necessidade de N quando da condição ótima de água.

De acordo com os histogramas lançados pelo programa, observa-se que uma redução na população de plantas (Figura 26c), mediante a redução de uma unidade na densidade de semeadura, leva a uma quebra de safra menos acentuada que a uma elevada população de plantas submetidas a um déficit hídrico de 25% (ou seja, o nível de suprimento hídrico equivalente a 75%, conforme a Figura 26d). Isso significa que, quando a disponibilidade de água na propriedade não é abundante, a opção pela redução da população de plantas pode se tornar um aspecto indispensável para a cultura do milho. Restaria saber o que seria mais vantajoso do ponto de vista econômico, e é justamente nesse sentido, dentre outros igualmente importantes, que os modelos de simulação têm grande valia: o quanto uma variável qualquer sensibiliza a resposta de interesse, para que a tomada de decisão seja assertiva. Bontkes e Keulen (2003) envolveram também os aspectos sociais e agroecológicos em seus modelos multiobjetivos.

Mesmo que os valores de índice de colheita (IC) tenham sido simulados pela distribuição triangular, observa-se que os histogramas referentes às classes de frequência da produtividade de grãos (Figura 26) prevaleceram em uma configuração semelhante à da distribuição normal, ressaltando que este foi um critério prévio de simulação das variáveis climáticas (radiação solar e temperatura - distribuição normal bivariada) que dirigem a produtividade (W_g). Por outro lado, quanto menor a amplitude da variável IC (ou seja, valor máximo menos o valor mínimo atribuído), menor tende a ser também a amplitude da gama de resultados para a variável W_g .

Os valores extremos de produções elevadas de grãos podem ocorrer devido à combinação menos provável, por exemplo, entre temperaturas próximas às ótimas do desenvolvimento vegetal, regimes radiativos favoráveis (mais intensos) e índices de colheita elevados. Do contrário, obtém-se a outra extremidade do histograma. Como valores modais de produtividade, contudo, obtém-se aqueles de maior probabilidade de ocorrência como sendo representados naturalmente pela porção central do histograma, sendo isto decorrente, para a maioria dos dias, dos valores modais de temperatura do ar, radiação solar. Haveria a possibilidade de simular um elevado valor de temperatura para um determinado dia, e um baixíssimo valor no dia seguinte, o que fisicamente nem sempre faz sentido. Porém, este erro é contornado mediante o número de iterações: quanto maior o número delas, menor o erro, conforme a eq. (1).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 26 – Histogramas de produtividade de grãos de milho elaborados a partir da distribuição normal bivariada para radiação solar e temperatura, para as situações de suprimento adequado de nitrogênio, bem como de (a) condições hídricas ótimas; (b) condições hídricas ótimas; (c) condições hídricas ótimas e com densidade de semeadura de 5 plantas m^{-1} ; e (d) $D_h = 0,75$

As características do modelo gerador dos histogramas (frutos da associação entre a Figura 2 e os procedimentos estocásticos) se assemelham às aquelas da família dos modelos de crescimento genéricos holandeses, tais como o SUCROS, WOSFOT e INTERCOM (ITTERSUM et al., 2003), quando o primeiro traz à luz a assimilação de dióxido de carbono e a não predição de eventos fenológicos, mas se assemelham com os modelos específicos, tais como o CERES-Maize (KINIRY; JONES, 1986), quando da omissão da respiração (“substituindo” esta pela RUE) no cálculo da produtividade de fitomassa, e quando da dependência da temperatura como principal variável no cálculo da área foliar. Nos modelos genéricos, os parâmetros são poucos, porém com significado físico-biológico mais esclarecido, e por esse motivo não são específicos para um genótipo que apresente, por exemplo, sensibilidade ao fotoperíodo e diferentes potenciais quanto ao número de grãos por fileira e ao enchimento de grãos, tal como é feito empiricamente pelos modelos específicos (DOBERMANN et al., 2003). Em termos de números de parâmetros, pode-se dizer que o modelo aqui apresentado apresenta certo equilíbrio entre as duas escolas.

Cabe ressaltar que o fator de depleção calculado por intermédio de K_y se trata apenas de uma simplificação para expressar a redução da produtividade em função do déficit hídrico. A rigor, se a disponibilidade de água no solo é limitante, a expansão foliar fica prejudicada e resulta em uma interceptação luminosa diferenciada, fazendo com que as taxas de produtividade diárias de fitomassa sejam conseqüentemente diferentes. Para aplicar este tipo de situação, melhor seria modelar uma função envolvendo a variação de área foliar em função da condição hídrica (REYMOND et al., 2003), e outra que contemplasse os elevados valores de coeficiente de extinção existentes, já que o fato de o dossel levar mais tempo para se “fechar”, numa condição de baixo suprimento hídrico, pode resultar em maiores erros na simulação (MEINKE, 1996).

A necessidade de testar a hipótese de normalidade multivariada torna-se explícita quando o pesquisador pretende avaliar se as condições pressupostas para a validade da inferência que irá realizar foram atendidas. A existência de um teste adequado, com propriedades ótimas, sempre foi questionada (CANTELMO; FERREIRA, 2007). Cita-se aqui o teste baseado nos desvios de assimetria e curtose (MARDIA, 1975), e a generalização do teste de Shapiro-Wilk (ROYSTON, 1983). Porém, conforme a extensa revisão acerca destes e de outros métodos, Mecklin e Mundfrom (2004) reiteram que um único método não é suficiente para abordar a questão da multinormalidade, e que uma mescla de métodos seria o mais apropriado e útil sob a perspectiva da estatística aplicada.

A existência de uma distribuição normal multivariada implica em distribuições marginais normalmente distribuídas, mas não há garantia de que a distribuição conjunta das duas variáveis normais univariadas sejam uma normal multivariada (SANTOS; FERREIRA, 2003). Segundo Hair et al. (2005), caso o pressuposto da normalidade univariada não seja ferido, isso não necessariamente resultará no aceite da normalidade multivariada, embora auxiliará na obtenção desta última. No entanto, a normalidade multivariada implica necessariamente que as variáveis individuais são normais no sentido univariado, e que suas combinações também são normais. Logo se uma variável é normal multivariada, também é normal univariada. Assim, a simulação dos dados climatológicos por intermédio da distribuição normal bivariada favorece a não-rejeição da normalidade multivariada.

Analogamente ao primeiro caso de simulação (dados de Rockhampton, mesma data de semeadura e população de plantas, distribuição normal bivariada), realizou-se a simulação estocástica da produtividade de grãos de milho, mas agora em função dos valores de N60 para RUE, k , R_{adc} , AF(T) e IC (moda, máximo e mínimo) encontrados nesta descrição, para conferência sobre a capacidade de previsão do modelo quanto à produtividade final. À base seca, a produtividade média mais provável (11,53% de probabilidade) foi da ordem de 9947 kg ha⁻¹ (Figura 27a), superior à média observada em apenas 1,02%. Probabilidades menores foram verificadas para as máximas (0,08%) e mínimas (0,05%) produtividades médias, as quais foram simuladas à magnitude de 120323 e 8184 kg ha⁻¹, respectivamente. Uma simulação realizada logo depois, às mesmas condições “N60”, não revelou um aumento (Figura 27b). As necessidades hídricas e de nitrogênio para os valores mais prováveis de produtividade seriam, respectivamente, 543 mm e 131 kg (N) ha⁻¹, 7,02% inferior e 29,77% superior aos valores observados. Seriam necessários adicionais 20 kg (N) ha⁻¹ para se obter as menos esperadas máximas produtividades.

Com a população reduzida para 55555 plantas ha⁻¹, os resultados mostraram a redução mais provável, na produtividade (Figura 27c), de 1979 kg ha⁻¹ (19,89% a menos que o ótimo). A necessidade de N correspondente a essa produtividade caiu para 104 kg ha⁻¹. Voltando à população anterior e simulando a produtividade desta com o nível de suprimento hídrico a 75% do ótimo ($D_h = 0,75$ e $F_d = 0,69$), o modelo simula 7073 kg ha⁻¹ como valor mais provável (12,52%) para a produtividade deplecionada (Figura 26d). Para se obter tal valor, seriam necessários 92 kg (N) ha⁻¹, representando 69% da necessidade de N para a condição ótima de água. Em síntese, nota-se que os percentuais foram muito parecidos entre as simulações N90 e N60.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 27 – Histogramas de produtividade de grãos de milho elaborados da distribuição normal bivariada para radiação solar e temperatura, para situações de suprimento sub-ótimo de nitrogênio, bem como de (a) condições hídricas ótimas; (b) condições hídricas ótimas; (c) condições hídricas ótimas e com densidade de semeadura de 5 plantas m^{-1} ; e (d) $D_h = 0,75$

Excluindo-se o uso de séries históricas de dados climatológicos, recorre-se à distribuição triangular para a geração das variáveis referentes à radiação solar e temperatura, bastando que informações de caráter prático sejam atribuídas para a moda (valor mais freqüente), o máximo e o mínimo dos atributos climáticos mencionados. Estes três valores são considerados constantes para todo o ciclo, o que não representa fielmente a sazonalidade do tempo. Nessa distribuição, a correlação entre as radiação solar e temperatura é desconhecida, em princípio, pelo fato de não haver o histórico. Também por essa razão, não se fez o teste de aderência (ex.: Komogorov-Smirnov, Qui-quadrado, etc.), apesar da recíproca ser verdadeira. Com um histórico, é eventualmente possível ajustar uma distribuição triangular e fazer esse teste. A distribuição triangular para simulações na pesquisa agrícola tem sido utilizada por diversos autores (SOUZA e FRIZZONE, 1997; DETOMINI et al., 2006; FIGUEIREDO et al., 2007).

No programa computacional elaborado, um mesmo número pseudo-aleatório gerado é utilizado para a simulação tanto da radiação solar quanto da temperatura. Adotou-se como “valores de suposição” as modas, do histórico geral de Rockhampton, de radiação solar e temperatura os valores $18 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente, bem como os valores máximos de $32 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$, e os mínimos de $6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (todos relativos à média do dia), dentro do período correspondente ao observado para o experimento. Novamente, a probabilidade de ocorrer uma temperatura (ou radiação) muito diferente da moda será tão maior quanto maior for os valores extremos, o que ratifica a importância de se atribuir cautelosamente os valores de modas, máximos e mínimos. Face ao exposto, regiões de menor amplitude térmica, ao longo de dia e para o mesmo ciclo, adequam-se mais facilmente aos pressupostos da distribuição triangular.

Para uma situação de condições hídricas ótimas e suprimento adequado de nitrogênio, os resultados da simulação triangular revelam a moda de produtividade de grãos inferior à da simulação bivariada (Figura 28a) em 2,18%, o oposto ocorrendo quando condições hídricas ótimas e suprimento sub-ótimo de nitrogênio (ex.: ao atribuir os valores das variáveis de N60) são objetivadas para análise (Figura 28b). Já a comparação entre as simulações bivariada e triangular para condições hídricas ótimas, suprimento adequado de nitrogênio e densidade de semeadura de 5 plantas m^{-1} , resultou em uma diferença ainda menor (1,61%), na produtividade de grãos (Figura 28c), para a normal bivariada, e um pouco maior (3,73%) desta distribuição, em relação à triangular, quando se simula a produtividade de grãos (Figura 28d) suprimento hídrico a 75% do ótimo e suprimento adequado de nitrogênio.

Figura 28 – Histogramas de produtividade de grãos de milho elaborados a partir da distribuição triangular para radiação solar e temperatura, para situações de (a) condições hídricas ótimas e suprimento adequado de nitrogênio; (b) condições hídricas ótimas e suprimento sub-ótimo de nitrogênio; (c) condições hídricas ótimas, suprimento adequado de nitrogênio e densidade de semeadura de 5 plantas m⁻²; e (d) suprimento hídrico a 75% do ótimo e suprimento adequado de nitrogênio

No geral, os histogramas apresentados na Figura 28 se revelaram com assimetria “visual” menos normal que os apresentados anteriormente, de forma a deslocar as modas mais para a direita. Os valores menos prováveis, os quais podem ser localizados nas extremidades dos histogramas, tendem a apresentar probabilidades cada vez mais diferentes, uns dos outros, na medida em que há um afastamento da moda. Essa constatação pode ser resultante da combinação do valores de IC gerados (também por distribuição triangular) com os das variáveis climáticas, que não necessariamente particularizam uma distribuição triangular simétrica.

Aparentemente, para qualquer situação contemplando as variáveis observadas, os resultados trazidos pela distribuição triangular revelaram certa paridade com aqueles trazidos pela distribuição normal bivariada, fato que é provavelmente explicado pela condição inicial consciente em relação aos valores modais, máximos e mínimos. Estes foram propositadamente extraídos com base no estudo prévio do histórico climatológico, e não de suposições de caráter prático. Visando corroborar este contexto, simulações foram realizadas posteriormente com valores quaisquer e resultaram em histogramas com modas de produtividade de grãos mais pessimistas em relação à simulação bivariada, assim como aos dados observados.

Independente da opção relacionada às distribuições bivariada ou triangular, constatou-se que o modelo estocástico tende claramente a subestimar as necessidades hídricas e superestimar as de nitrogênio, necessitando portanto ser melhorado quanto à capacidade de previsão destes atributos. Salienta-se que o programa computacional utiliza apenas o método de Thornthwaite para o cálculo da evapotranspiração diária da cultura. O método de Penman-Monteith necessitaria de que fossem encontradas correlações também para as variáveis como umidade relativa do ar e velocidade do vento, o que requereria uma distribuição multivariada, com maior complexidade quanto à análise da matriz de covariância e quanto ao procedimento computacional.

Presume-se que os principais erros associados à estimação das necessidades hídricas tenham sido a não aplicação do fator de correção ao método de Thornthwaite, às condições da época de análise (manutenção de valores fixos) e da região simulada (de Rockhampton), conforme sugeriram Amatya et al. (1995), e Borges e Mediondo (2007), além da não contemplação de outras variáveis climáticas. Erros associados à estimação das necessidades de nitrogênio seriam decorrentes da ausência de estudos sobre as relações que supostamente podem ocorrer, entre as variáveis climáticas e as que compõem a equação de adubação nitrogenada, na medida em que o dossel é submetido às condições que determinam os valores extremos dos histogramas.

4.7 Considerações finais

Diante da importância da cultura de milho quanto às diversas finalidades dos produtos dela oriundos, o interesse de se conhecer a potencialidade de uso dos principais materiais genéticos disponíveis, em relação aos ambientes em que serão inseridos, torna-se evidente. Com o objetivo central de caracterizar os principais atributos ecofisiológicos como área foliar, RUE, coeficiente de extinção, coeficientes de cultura, consumo hídrico e componentes de espiga; um experimento de campo irrigado foi conduzido para o híbrido DKB-390. Informações generalizadas da literatura foram revisadas, levantadas e organizadas para conceitualizar modelos norteadores de manejo e de planejamento, no intuito de obter a produtividade de grãos contemplada pelas incertezas climáticas diárias dos principais elementos do clima e suas correlações, para posteriormente se obter as correspondentes necessidades de água e de nitrogênio pela cultura.

Os resultados das diversas simulações (determinísticas ou estocásticas) realizadas levam a crer que os modelos propostos são aparentemente adequados para a simulação da produtividade de grãos de milho, sugerindo ainda que diversas relações devem ser estudadas para se melhorar a performance para previsão das necessidades de água e nitrogênio, quando a simulação for estocástica. Diante do princípio de que não há sofisma quanto aos modelos elaborados, o valor para a relação entre taxa de assimilação de CO₂ potencial e não potencial foi oportunamente obtido à ordem de 26%, para o genótipo DKB-390. Tais constatações *per se* corroboram a justificativa de uso dos modelos para a simulação de diversos processos e para a identificação de necessidade de pesquisas nas diversas áreas do conhecimento.

Em suma, a principal vantagem do uso dos resultados provenientes da modelagem estocástica, para uma determinada finalidade, é que eles concedem ao planejador uma gama de valores associados às suas correspondentes possibilidades de ocorrência. O nível de exatidão deverá ser tão melhor quanto maior for número de iterações geradas, que por sua vez dependerá essencialmente do método computacional empregado e da performance do computador para que não haja morosidade na simulação. Não obstante, previamente a este aspecto operacional a conceitualização e a organização dos modelos devem ser avaliados. Trabalhos futuros podem ainda ser realizados com o propósito de associar, ao modelo sugerido nesta descrição, uma estocasticidade em termos de variáveis regionalizadas e de séries temporais que contemplem o efeito dos principais atributos de solo e clima no desenvolvimento e na produtividade da cultura do milho; o que levaria a um detalhamento mais apropriado para fins de zoneamento climático.

5 CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa, bem como os resultados oriundos de algumas simulações realizadas, conclui-se que: (i) o genótipo (híbrido DKB-390) necessitou da magnitude de 602 mm de água, durante seu ciclo, para responder adequadamente em termos de produtividade de grãos. Conseqüentemente, a cultura requereu por volta de 573 litros de água por kg de grão produzido; (ii) o genótipo respondeu significativamente à segunda cobertura com nitrogênio, em E2, no caso desta ter sido adicional (e não em parcelamento) e a cultura ter sido conduzida sob elevada população de plantas e adequado suprimento hídrico; (iii) em função da segunda cobertura com nitrogênio, a área foliar do material genético se manteve mais ativa durante a fase de enchimento de grãos; (iv) o incremento da segunda cobertura de nitrogênio promoveu maior eficiência de uso da água pela cultura, bem como um leve aumento nos valores modais do número de grãos por fileira (da espiga) e da massa de 1000 grãos; (v) sob condições de adequado suprimento hídrico, o coeficiente de extinção médio, generalizado para todo o ciclo, foi da ordem de 0,4267; valor maior na medida em que o suprimento de nitrogênio foi menor; (vi) a eficiência de uso da radiação foi calculada em 3,52 g (fitomassa seca de parte aérea) MJ⁻¹ (radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada), tendo sido menor em função do emprego do regime de nitrogênio mais restritivo; (vii) os coeficientes de cultura obtidos do experimento, para os principais subperíodos, podem ser utilizados para o manejo da irrigação do híbrido DKB-390, para que a produtividade não seja penalizada por déficit hídrico; (viii) o índice de colheita (expresso em relação à parte aérea) foi da ordem de 40% (variando entre 37% e 43%) sob condições de suprimento adequado de água e nitrogênio, valores que tenderam a ser maiores quando da restrição da segunda cobertura; (ix) o modelo determinístico proposto simulou adequadamente a evolução da produtividade de fitomassa de parte aérea do híbrido empregado, bem como sua produtividade de grãos sob condições de suprimento hídrico e de nitrogênio adequados; (x) o modelo determinístico simulou adequadamente as evapotranspirações diárias através do método de Penman-Monteith; (xi) o modelo estocástico sugerido mostrou-se satisfatório, mediante o uso da distribuição normal bivariada das variáveis radiação solar e temperatura média do ar, para simular a produtividade de grãos sob condições de suprimento hídrico adequado e sob déficit moderado; e (xii) aparentemente, o modelo estocástico necessita ser melhorado quanto à capacidade de previsão das necessidades hídricas e de nitrogênio, pois tende claramente a subestimar as primeiras e superestimar as segundas.

REFERÊNCIAS

- ABBATE, P.E.; DARDANELLI, J.L.; CANTARERO, M.G.; MATURANO, M.; MELCHIORI, R.J.M.; SUERO, E.E. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. **Crop Science**, Madison, v.44, p.474-483, 2004.
- ALLEN, L.H.; YOCUM, C.S.; LEMON, E.R. Photosynthesis under field conditions. VII. Radiant energy exchanges within a corn canopy and implications in water use efficiency. **Agronomy Journal**, Madison, v.56, p.253-259, 1964.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo** – guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 323p. (Riego y Drenaje, Paper 56).
- AMATYA, D.M.; SKAGGS, R.W.; GREGORY, J.D. Comparison of methods for comparing REF-ET. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.121, n.6, 427-435, 1995.
- AMTHOR, J.S. The The McCree-de Wit-Penning de Vries-Thornley respiration paradigms: 30 years later. **Annals of Botany**, Oxford, v.86, p.1-20, 2000.
- ANDRADE, F.; UHART, S.A.; CIRILO, A. Temperature affects radiation use efficiency in maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.32, p.17-25, 1993.
- ANDRADE, F.; CIRILO, A.; UHART, S.; OTEGUI, M. **Ecofisiología del cultivo de maíz**. Balcarce; Buenos Aires,: Dekalb press, 1996. 292p.
- ANDRADE JUNIOR, A.; FRIZZONE, J.A.; SENTELHAS, P.C. Simulação da precipitação diária para Parnaíba e Teresina, PI, em planilha eletrônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.2, p.271-278, 2001.
- ANNANDALE, J.G.; CAMPBELL, G.S.; OLIVIER, F.C. ; JOVANOVIĆ, N.Z. Predicting crop water uptake under full and deficit irrigation: An example using pea (*Pisum sativum* L. cv. Puget). **Irrigation Science**, Berlin, v.19, p.65-72, 2000.
- APSRU (Agricultural Production Systems Research Unit, Toowoomba, Australia). Disponível em: <http://www.apsim.info/apsim/Publish/apsim/maize/docs/maize_science.htm>. Acesso em 10 jul. 2007.
- ARKEBAUER, T.J.; WEISS, A.; SINCLAIR, T.R.; BLUMM, A. In defense of radiation use efficiency: a response to Demetriades-Shah et al. (1992). **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v.68, p.221-227, 1994.
- ASSIS, J.P.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K.; MANFRON, P.A.; MARTIN, T.N.; BONECARRERE, R.A.G. Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.5, p.731-737, 2006.

BERNARDES, M.S. Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: CASTRO, P.R.C. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Potafós, 1987. cap. 2, p.13-48

BLACKMAN, V.H. The compound interest law and plant growth. **Annals of Botany**, Oxford, v.33, p.353-360, 1919.

BLAD, B.L., BAKER, D.G. Reflected radiation from a soybean crop. **Agronomy Journal**, Madison, v.64, p.277-280, 1972

BOARDMAN, N.K.; BJÖRKMAN, O.; ANDERSON, J.M.; GOODCHILD, D.J.; THORNE, S.W. Photosynthetic adaptation of higher plants to light intensity: relationship between chloroplast structure, composition of the photosystems and photosynthetic rates. AVRON, M. (Ed.). In: INTERNATIONAL CONGRESS ON PHOTOSYNTHESIS, 3., 1975 Amsterdam. **Proceedings....** Amsterdam , 1975. p.1809-1827.

BONHOMME, R. Basis and limits to using 'degree-days' units. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.13, p.1-10, 2000a.

BONHOMME, R. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.68, p.247-252, 2000b.

BONTKES, T.S.; KEULEN, H. Modelling the dynamics of agricultural development at farm and regional level. **Agricultural Systems**, Barking Essex, v.76, p.379-396, 2003

BORGES, A.C.; MEDIONDO, E.M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.3, p.293-300, 2007.

BORUDU, R. Bases physiologiques de l'action des températures. In: GALLAIS, A. (Ed.), **Physiologie du maïs** Paris: INRA, 1984. p. 389-424.

BOX, G.E.P.; MULLER, M.E. A note on the generation of random normal deviates. **The Annals of Mathematical Statistics**, Baltimore, v.29, n.2, p.610-611, 1958.

BOYER, J.S. Photosynthesis at low water potentials. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, Londres, v.273, p.501-512, 1976.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Regras para análise de sementes**. Brasília: snad/clav, 1992. 1v.

BRESSAN, G. **Modelagem e simulação de sistemas computacionais**. São Paulo: Larc-PCS; EPUSP; IME/USP; 2002. 12p. (Notas de Aula).

CANTELMO, J.F.; FERREIRA, D.F. Desempenho de testes de normalidade multivariados avaliado por simulação Monte Carlo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.6, p.1630-1636, nov./dez., 2007.

CARNAHAN, B.; LUTHER, H.A.; WILKES, J.O. **Applied numerical methods**. New York: John Willey, 1969. 604p.

- CAVIGLIA, O.P.; SADRAS, V.O. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water- and radiation-use efficiency of wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.69, p.259-266, 2001.
- CHOUDURY, B.J. Modeling radiation- and carbon-use efficiencies of maize, sorghum, and rice **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.106, p.317-330, 2001.
- CODY, M.L. General theory of dutch size. **Evolution**, Lancaster, v.20, p.174-184, 1966.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Produtos agrícolas, Brasil – Série histórica de produtividade (1990 – 2007). Disponível em: <http://www.conab.gov.br/download/safra/BrasilProdutoSerieHist.xls>. Acesso em 21 Jan. 2008.
- CONNOR, D.J.; JONES, T.J.; PALTA, J.A. Response of sunflower to strategies of irrigation. I. Growth, yield and efficiency of water use. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.10, p.15-26, 1985.
- COOK, M.G.; EVANS, L.T. Nutrient responses of seedlings of wild and cultivated *Oryza* species. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.6, p.205-218, 1983.
- COOPER, R.L. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.82, p.27-35, 2003.
- DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; GONÇALVES, A.C.A.; REZENDE, R., BERTHONHA, A.; SILVA, F.F.; TRINTINALHA, M. Determinação dos coeficientes da equação de Angstron para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.26, n.3, p.329-336, 2004.
- DARDANELLI, J.L.; DE La CASA, A.C.; ATECA, M.R.; ZANVETOR, R.; NUÑES VAZQUEZ, F.; SALAS, H.P.. Validación del balance hidrológico versátil para la sucesión sorgo-soja bajo dos sistemas de labranza. **Revista Agrícola Manfredi y Marcos Juárez**, Córdoba, v.7, p.20-29, 1992.
- DEKALB Desafiando os limites de produtividade, milho. Disponível em: http://www.dekalb.com.br/produto_milho_safrinha.aspx?id=34. Acesso em 18 jan. 2008.
- DEMETRIADES-SHAW, T.H.; FUCHS, M.; KANEMASU, E.T.; FLITCROFT, I. Further discussions on the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v.68, p.231-242, 1994.
- DETOMINI, E.R.; DOURADO NETO, D. Variação temporal de fitomassa seca relativa de *Brachiaria brizantha* cultivares Marandu e Xaraés. **Pasturas Tropicais**, Cali, v.27, n.3, p.13-21, 2005.
- DETOMINI, E.R.; DOURADO NETO, D.; BARIONI, L.G.; SAINZ, R.D. Fundamentos do programa PPBB_MX para a simulação da produtividade potencial de *Brachiaria brizantha* (cultivares Marandu e Xaraés). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.14, n.1, p.127-131, 2006.

DEVORE, J.L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. Tradução de Joaquim Pinheiro Nunes da Silva. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006. 692p.

De WIT, C.T. de Making predictions about farming. In: FSE – Foundation Scientific Europe (Eds.) **Scientific Europe, Research and Technology in 20 countries**. Nature & Technology Scientific Publishers Ltd.: Masstricht, The Netherlands, 1990. p.188-191.

DOBERMANN, A.; ARKEBAUER, T.; CASSMAN, K.; DRIJBER, R.; LINDQUIST, J.; SPECHT, J.; WALTERS, D.; YANG, H.; MILLER, D.; BINDER, D.; TEICHMEIER, G.; FERGUNSON, R.; WORTMANN, C. **Understanding corn yield potential in different environments**. Annual Report to the Fluid Fertilizer Foundation on grant “Yield potential and optimal soil productivity in irrigated corn systems of the north-central USA, 2003. 16p.

DONALD, C.M.; HAMBLIN, J. The biological yield and harvest index of cereal as agronomic and plant breeding criteria. **Advances in Agronomy**, Madison, v.28, p.361-405, 1976.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Food and Agriculture Organization of the United Nations, (**FAO-Irrigation and Drainage Paper n. 33**), Roma: 1979. 193p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, 1975. 179p. (Irrigation and drainage – **Paper 24**).

DORNELAS, K.D.S.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S. Coeficientes médios da equação de Angstrom-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.8, p.1213-1219, 2006.

DOURADO NETO, D. Modelos fitotécnicos referentes à cultura do milho. Piracicaba, 1999. 227p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

DOURADO NETO, D.; DETOMINI, E.R. Modelo de adubação nitrogenada aplicável a rebrota de pastagens submetidas a sistemas de desfolha intermitente. **Pasturas Tropicais**, v.27, n.2, p.18-25, 2005.

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A.F. **Produção de feijão**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 405p.

DROUET, J.L.; BONHOMME, R. Effect of 3D nitrogen, dry mass per area and local irradiance on canopy photosynthesis within leaves of contrasted heterogeneous maize crops. **Annals of Botany**, Oxford, v.93, n.6, p.699-710, 2004.

DURÃES, F.O.M.; MAGALHÃES, P.C.; OLIVERIA, A.C.; FANCELLI, A.L.; COSTA, J.D. Partições de fitomassa e limitações de rendimento de milho (*Zea mays* L.) relacionados com a fonte-dreno. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.5, n.1, p.1-120, 1993.

DWYER, L.M.; STEWART, D.W. Leaf area development in field-grown maize. **Agronomy Journal**, Madison, v.78, p.334-343, 1986.

- EHLERINGER, J.; BJÖRKMAN, O. Quantum yields for CO₂ uptake in C₃ and C₄ plants. **Plant Physiology**, Rockville, v.59, p.86-90, 1977.
- ELINGS, A. Estimation of leaf area in tropical maize. **Agronomy Journal**, Madison, v.92, p.436-434, 2000.
- EVANS, L.T. **Crop Physiology**. some case histories. Londres: Cambridge University Press, 1975. 374p.
- EVANS, L.T. **Crop evolution, adaptation and yield**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 500p.
- EVETT, S.R.; STEINER, J.L. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. **Soil Society of America Journal**, Madison, v.59, n.4, p.961-968, 1995.
- FANCELLI, A.L. **Plantas Alimentícias**: guia para aula, estudo e discussão. Piracicaba, SP: Centro Acadêmico “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, 1986. 131p.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba, SP: FEALQ/Departamento de Produção Vegetal, ESALQ/USP, 1999.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360p.
- FERRAZ, E.C. Fisiologia do milho. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE POTASSA (Ed). **Cultura e adubação do milho**. São Paulo: Potafós, 1966. p.369-379.
- FIGUEIREDO, M.G.; PITELLI, M.M.; FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R. Lâmina ótima de irrigação para o feijoeiro considerando restrição de terra e aversão ao risco. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.29, p.593-598, 2007.
- FONSECA, V.O.; ALBUQUERQUE, J.A.S. Estimativa dos parâmetros da distribuição gama de probabilidades para totais de precipitação em uma região de Pelotas, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.13, n.3. p. 47-58, 1978.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION (FAO) Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/340/DesktopDefault.aspx?PageID=340>>. Acesso em 3 dez. 2007.
- FRÈRE, M.; POPOV, G.F. **Agrometeorological crop monitoring and forecasting**. Rome: FAO, 1979. 64p. (Plant production and protection, 17).
- FRIZZONE, J.A. **Análise de decisão econômica em irrigação**. Piracicaba: USP/ESALQ/LER, 2005. 371p. (Série Didática, 17).
- GENNEVILLE, M.S.; BOOCK, A. Modelo estocástico para simulação da precipitação pluviométrica diária de uma região. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.18, n.9, p.959-966, 1983.

- GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 44, p.892-898, 1980.
- GHAHRAMAN, B.; SEPASKHAH, A. Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. **Irrigation and Drainage**, Hoboken, v.53, n.1, p.39-54, 2004.
- GIFFORD, R.M. Plant respiration in productivity models: conceptualism, representations and issues for global terrestrial carbon-cycle research. **Functional Plant Biology**, Victoria, v.30, p.171-186, 2003.
- GOLDSWORTHY, P.R.; COLEGROVE, M. Growth and yield of highland maize in Mexico. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.83, p.223-330, 1974.
- GOUDRIAN, J.; KEULEN, H. The direct and indirect effects of nitrogen shortage on photosynthesis and transpiration in maize and sunflower. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.27, p.227-234, 1978.
- HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. trad. Sant'Anna, A.S. Chaves Neto, A. **Análise multivariada de dados**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 600p.
- HAMMER, G.L.; MUCHOW, R.C. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments I. Development and testing of a simulation model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.36, p.221-234, 1994.
- HANWAY, J.J. Defoliation effects on different corn (*Zea mays* L.) hybrids as influenced by plant population and stay of development. **Agronomy Journal**, Madison, v.61, p.534-538, 1966.
- HATCH, M.D.; SLACK, C.R. Photosynthesis by sugarcane leaves. A new carboxylation reaction and the pathway of sugar formation. **Biochemistry Journal**, Washington, v.101, p.103-111, 1966.
- HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M.; VACHAUD, G. Error analysis in estimating soil-water content from neutron probe measurements: 1. Local stand point. **Soil Science**, New Brunswick, v.137, n.2, p.78-90, 1984.
- HESKETH, J.; MOSS, D.N. Variation in the response of photosynthesis to light. **Crop Science**, Madison, v.3, p.107-110, 1963.
- HEEMST, H.D.J. van. Physiological principles. In: KEULEN, H. van; WOLF, J. **Modeling of agricultural production: weather, soils and crops**. Wageningen: Pudoc, 1986. p.13-26.
- HINRICHSSEN, K. The Ångström formula with coefficients having a physical meaning. **Solar Energy**, Kidlington, v.52, p.491-495, 1994.
- HOGG, R.V.; CRAIG, A.T. **Introduction to mathematical statistics**, 4th ed. New York: Macmillan, 1978. 438p.
- ITTERSUM, M.K.; LEFFELAAR, P.A.; KEULEN, H.; KROPFF, M.J.; BASTIAANS, L.; GOUDRIAAN, J. On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.18, p.201-234, 2003.

- JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1968. v.2. 324p.
- JONES, H.G. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 428p
- JONES, C.A.; KINIRY, J.R. **CERES-Maize**: a simulation model of maize growth and development. Houston, EUA: Texas A&M University Press, 1986. 194p.
- KAISER, W.M. Effects of water deficit on photosynthetic capacity. **Physiologia Plantarum**, Kobenhavn, v.71, p.142-149, 1987.
- KEATING, B.A.; WAFULA, B.M. Modelling the fully expanded leaf area of maize leaves. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.29, p.163-176, 1992.
- KELLER FILHO, T.; ZULLO JUNIOR, J.; LIMA, P.R.S.R. Análise da transição entre dias secos e chuvosos por meio da cadeia de Markov de terceira ordem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.9, p.1341-1349, 2006.
- KINIRY, J.R.; JONES, C.A.; O'TOOLE, J.C.; BLANCHET, R.; CABELGUENNE, N.; SPANEL, D.A. 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.
- LAAR, H.H. van; GOUDRIAAN, J.J.; KEULEN, H. van. **Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations (as applied to spring wheat)**. Wageningen: CABO-DLO, 1992. 196p. (Simulation Reports, 27).
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005. 323p.
- LINDQUIST, J.L.; ARKEBAUER, T.J.; WALTERS, D.T.; CASSMAN, K.G.; DOBERMAN, A. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, p.72-78, 2005.
- LIZASO, J.I.; BATCHELOR, W.D.; BOOTE, K.J.; WESTGATE, M.E. Development of a Leaf-Level Canopy Assimilation Model for CERES-Maize. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, p.722-733, 2005.
- LOOMIS, R.S.; CONNOR, D.J. **Crop ecology**: productivity and management in agricultural systems. Cambridge: University Press, 1992. 538p.
- LOOMIS, R.S., AMTHOR, J.S. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. **Crop Sciences**, Madison, v.39, p.1584-1596, 1999.
- KELLER FILHO, T.; ZULLO JUNIOR, J.; LIMA, P.R.S.R. Análise da transição entre dias secos e chuvosos por meio da cadeia de Markov de terceira ordem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.9, p.1341-1349, 2006.
- KEULEN, H. **Simulation of water use and herbage growth in arid regions**. Pudoc: Simulation Monographs. Wageningen, 1975. 164p.

KEULEN, H.; GOUDRIAAN, J.; SELIGMAN, N.G. Modelling the effects of nitrogen on canopy development and crop growth. In: RUSSEL, G.; MARSHALL, B.; JARVIS, P.G. (Ed.) **Plant canopies: their growth, form and function**. Cambridge: University Press, 1989. p. 23-104. (Society for Experimental Biology, Seminar Series 31).

KRAMER, Th. Yield-protein relationship in cereal varieties. In: KRAMER, Th.; SPIERTZ, J.H.J **Crop physiology and cereal breeding**. Wageningen: Pudoc, 1979. p.161-165.

MAGALHÃES, P.C. Aspectos fisiológicos do milho irrigado. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P.E.P.; COUTO, L. (Ed.) **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 317p.

MAGALHÃES, A.C.N.; SILVA, W.J. Determinantes genético-fisiológicos da produtividade do milho. In: PATERNIANI, E. **Melhoramento e produção de milho no Brasil**. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1987. p.346-379.

MALKIN, S.; FORK, D.C. Photosynthetic units of sun and shade plants. **Plant Physiology**, Rockville, v.67, p.580-583, 1981.

MARDIA, K.V. Assessment of multinormality and the robustness of Hotelling's T^2 test. **Applied Statistics**, Londres, v.24, n.2, p.163-171, 1975.

MARSAGLIA, G.; ZAMAN, A. Some portable very-long-period random number generators. **Computers in Physics**, Woodbury, v.8, p.117-121, 1994.

MARTIN, T.N.; DOURADO NETO, D.; STORCK, L. Simulação estocástica da radiação fotossinteticamente ativa e da temperatura do ar por diferentes métodos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.9, p.1211-1219, 2007.

MATSUMOTO, M. NISHIMURA, T. Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. **ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation**, Baltimore, v.8, p.3-30, 1998.

MECKLIN, C.J.; MUNDFROM, D.J. An appraisal and bibliography of tests for multivariate normality. **International Statistical Review**, London, v.72, n.1, p.123-138, 2004.

MEINKE, H. **Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping perspective**, 1996. 270p. Thesis - (Ph.D.). The Netherlands: Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1996.

MEINKE, H.; HAMMER, G.L.; van KEULEN, H.; RABBINGE, R.; KEATING, B.A. Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping systems perspective: water and nitrogen effects on spring wheat in a semi-arid environment. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.7, p.75-88, 1997.

MENGEL, D.B.; BARBER, S.A. Development and distribution of corn root system under field conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v.66, p.341-344, 1974.

MESDAG, J. Genetic variation in grain yield and protein content of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). In: KRAMER, Th.; SPIERTZ, J.H.J **Crop physiology and cereal breeding**. Wageningen: Pudoc, 1979. p.166-167.

MIRSHA, H.S.; RATHORE, T.R.; SAVITA, U.S. Water use efficiency of irrigated winter maize under cool weather conditions of India. **Irrigation Science**, Berlin, v.21, p.27-33, 2001.

MONSI, M.; SAEKI, T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany**, Tokyo, v.14, p.22-52, 1953.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. In: SYMPOSIA OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19., 1964. Cambridge: **Proceedings....** Cambridge: University Press, v.19, p.205-234, 1964.

MONTEITH, J.L. Light distribution and photosynthesis in field crops. **Annals of Botany**, Oxford, v.29, p.17- 37, 1965.

MONTEITH, J.L. Does light limit crop production? In: JOHNSON, C. B. (Ed.). **Physiological process limiting crop productivity**. London: Butterworths, 1981. p.23-38.

MONTEITH, J.L. Fundamental equations for growth in uniform stands of vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.104, p.5-11, 2000.

MOORE, D.S. **The basis practice of statistics**. New York: W. H. Freeman, 1995. 680p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v.12, p.513-522, 1976.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC) Committee on Animal Nutrition. **United States-Canadian tables of feed composition** (3rd revision). Washington, DC, USA: National Academy of Sciences, 1982. 148p.

NEL, P.C.; SMIT, N.S.H. Growth and development stages in the growing maize plant. **Farming in South Africa**, Pretoria, v.1, p.1-7, 1978.

NOBEL, P.S.; ZARAGOZA, L.J.; SMITH, W.K. Relation between mesophyll surface area, photosynthetic rate and illumination during development of leaves of *Plectranthus parviflorus* Henckel. **Plant Physiology**, Rockville, v.55, p.1067-1070, 1975.

OCHOLA, W.O.; KERKIDES, P. A Markov chain simulation model for predicting critical wet and dry spells in Kenya: analysing rainfall events in the Kano plains. **Irrigation and Drainage**, Hoboken, v.52, p.327-342, 2003.

OGUNTUNDE, P.G.; van de GIESEN, N. Crop growth and development effects on surface albedo for maize and cowpea fields in Ghana, west Africa. **International Journal of Biometeorology**, Heidelberg, v.49, n.2, p.106-112, 2004.

- PACHEPSKY, L.B.; HASKETT, J.D.; ACOCK, B. An adequate model of photosynthesis – parameterization, validation and comparison of models. **Agricultural Systems**, Barking Essex, v.50, p.209-225, 1996.
- PAPONOV, I.A.; I.A.; SAMBO, P.; SCHULTE AUF’M ERLEY, G.; PRESTERL, T.; GEIGER, H.H.; ENGELS, C. Kernel set in maize genotypes differing in nitrogen use efficiency in response to resource availability around flowering. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.272, p.101-110, 2005.
- PARSONS, A.J. The effects of season and management on the growth of grass swards. In: JONES, M.B.; LAZEMBY A. (Ed.). **The grass crop: the physiological basis of production**. London: Chapman & Hall, 1988. p.129-177.
- PAYERO, J.O. ; MELVIN, S.R.; IRMAK, S.; TARKALSON, D. Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.84, p.101-112, 2006.
- PENNING DE VRIES, F.W.T. Le potentiel physiologique des pâturages e des cultures agricoles. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; DJITEYE, M.A. (Ed.). **La productivité des pâturages Sahéliens**. Wageningen: Pudoc, 1982. p.87-98. (**Agricultural Research Report** 918).
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C.S. **Agrometeorologia – fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
- PROJECTWARE Disponível em: <<http://www.projectware.com.au/pw040.html>>. Acesso em 18 dez. 2007.
- RAJCAN, I.; TOLLENAAR, M. Source-sink ratio and leaf senescence in maize: II. Nitrogen metabolism during grain filling. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.60, p.255-265, 1999.
- RAO, N.H., SARMA, P.B.S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.13, p.25–32, 1988.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera**. Conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478p.
- REICHARDT, K.; ANGELOCCI, L.R.; BACCHI, O.O.S.; PILOTTO, J.E. Daily rainfall variability at a local scale (1000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n.1, p.43-49, 1995.
- REYMOND, M.; MULLER, B.; LEONARDI, A.; CHARCOSSET, A.; TARDIEU, F. Combining quantitative trait loci analysis and an ecophysiological model to analyze the genetic variability of the responses of maize leaf growth to temperature and water deficit. **Plant Physiology**, Rockville, v.131, p.664-675, 2003.
- RITCHIE, J.T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v.8, p.1204-1213, 1972.

RITCHIE, S.; HANWAY, J.J. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Sciences and Technologies/Cooperative Extension Service, 1989. 21p. (Special Report, 48).

ROBSON, M.J. Potential production – What is it and can we increase it? In: WRIGHT, C.E. (Ed.) **Plant physiology and herbage production**. Nottingham, 1981. p.1-18.

ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B. **Microclimate**: The biological environment. New York: John Wiley, 1983. 495p.

ROYSTON, J. B. Some techniques for assessing multivariate based on the Shapiro-Wilk W. **Applied Statistics**, London, v.32, n.2, p.121-133, 1983.

RUSSEL, G.; JARVIS, P.G.; MONTEITH, J.L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: RUSSEL, G.; MARSHALL, B.; JARVIS, P.G. (Ed.). **Plant canopies**: their growth, form and function. Cambridge: University Press, 1989, cap 2 p.21-39. (Seminar Series 31).

SADEK, S.E.; AHMED, M.A.; ABDAHLLAH, T.A.E. Growth and yield analysis of nine different yellow maize genotypes grown in Egypt. **Journal of Applied Sciences Research**, v.2, n.3, p.136-141, 2006.

SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. **Plant physiology**. Los Angeles: Wadsworth Publishing, 1991. 682p.

SANTOS, A.C.; FERREIRA, D.F. Definição do tamanho amostral usando simulação Monte Carlo para o teste de normalidade baseado em assimetria e curtose. II. Abordagem multivariada. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.27, n.1, p.62-69, 2003.

SCHÖFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para a produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.2, p.241-249, 2001.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, New York, v.65, p.215-265, 1999.

SOUZA, S.A.V.; FRIZZONE, J.A. Comparação entre a função normal e triangular para a simulação do déficit de evapotranspiração. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.2, p.255-263, 1997.

SPIEGEL, M.R. **Manual de fórmulas, métodos e tabelas de matemática**. 2 ed. (tradução de Roberto Chioccarello; revisão e ampliação de José Maria Lemes da Silva). São Paulo: Makron Books, 1992. 420p.

STEWART, D.W.; DWYER, L.M.; CARRIGAN, L.L. Phenological temperature response of maize. **Agronomy Journal**, Madison, v.90, p.73-79, 1998.

TAIZ, L.; ZIEGER, E. **Fisiologia vegetal**. Trad. SANTARÉM, E. R. et al., 3 ed. Porto Alegre: Artemed, 2006. p.719.

TANNER, C.B.; LEMON, E.R. Radiant energy utilized in evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.54, p.207-212, 1962.

TANNER, C.B.; SINCLAIR, T.R. Efficient water use in crop production: Research or re-search? In: TAYLOR, H.M.J.; SINCLAIR, T.R. (Ed.). **Limitations to efficient water use in crop production**. Madison: American Society of Agriculture, 1983. p.1-27.

TARDIEU, F.; REYMOND, M.; HAMARD, P.; GRANIER, C.; MULLER, B. Spatial distributions of expansion rate, cell division rate and cell size in maize leaves: a synthesis of the effects of soil water status, evaporative demand and temperature. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.51, n.350, p.1505-1514.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling** – a mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford: Clarendon Press, 1990. 669p.

THORNTON, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

TIMM, L.C.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; CASSARO, F.A.M.; TOMINAGA, T.T.; BACCHI, O.O.S.; DOURADO NETO, D. Sugar cane production evaluated by the state-space approach. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.272, p.226-237, 2003.

TOJO SOLER, C.M.; SENTELHAS, P.C.; HOOGENBOON, G. Thermal time for phenological development of four maize hybrids grown off-season in a subtropical environment. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.143, p.169-182, 2005.

TYAGI, N.K.; SHARMA, D.K.; LUTHRA, S.K. Determination of evapotranspiration for maize and berseem clover. **Irrigation Science**, Berlin, v.21, n.4, p.173-181, 2003.

UHART, S.A.; ANDRADE, F.H. Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source/sink ratios. **Crop Science**, Madison, v.35, p.183-190, 1995.

VALENTINUZ, O.M.; TOLLENAAR, M. Effect of Genotype, Nitrogen, Plant Density, and Row Spacing on the Area-per-Leaf Profile in Maize. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, p.94-99, 2006.

VERDOODT, A.; VANST, E.; YE, L. Daily Simulation of potential dry matter production of annual field crops in tropical environments. **Agronomy Journal**, Madison, v.96, p.1739-1756, 2004.

VIETS Jr., F.G. Fertilizers and the efficient use of water. **Advances in Agronomy**, New York, v.14, p.223-264, 1962.

VILLA NOVA, N.A.; DETOMINI, E.R.; DOURADO NETO, D.; PILAU, F.G.; PEDREIRA, C.G. Avaliação da produtividade potencial de *Brachiaria ruziziensis* (Germain & Evard) em função de unidade fototérmicas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13, n.3, p.443-449, 2005.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area. **Annals of Botany**, Oxford, v.11, p.41-76, 1947.

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**, Amsterdam, v.49, p.249-258, 1997.

WIKIPEDIA, 2007. Albedo - Dicionário Livre de Geociências. Disponível em (<http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php?title=Albedo>). Acesso em 12 fev.2007.

WILSON, J.R. Influence of temperature and nitrogen on growth, photosynthesis and accumulation of non-structural carbohydrate in a tropical grass *Panicum maximum* var. trichoglume. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.23, p.48-61, 1975.

WIRCHMANN, B.A.; HILL, I.D. Algorithm AS 183: An efficient and portable pseudo-random number generator. **Applied Statistics**, London, v.31, p.188-190, 1982.

WOLSCHICK, D.; CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; JADOSKI, S.O. Adubação nitrogenada na cultura do milho no sistema plantio direto em ano com precipitação pluvial normal e com “El niño”. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.27, p.461-468, 2003.

WONNACOTT, R.; WONNACOTT, T. **Introductory statistics**. 4th ed. New York: John Willey, 1985. 642p.

WRIGHT, A.D.; KEENER, M.E. A test of maize growth and development model, CORNF. **Agricultural Systems**, Barking Essex, v.9, p.181-197, 1982.

YAN, W; HUNT, L.A. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. **Annals of Botany**, Oxford, v.84, p.607-614, 1999.

YANG, J; ALLEY, M. A mechanistic model for describing corn plant leaf area distribution. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, p.41-48, 2005.

YIN, X.; KROPFF, M.J.; McLAREN, G.; VISPERAS, R.M. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. **Agricultural Forest Meteorology**, v.77, p. 1-16, 1995.

YIN, X.; LATINGA, E.A.; SCHAPENDONK, A.D.H.C.M.; ZHONG, X. Some quantitative relationships between leaf area index and canopy nitrogen content and distribution. **Annals of Botany**, Oxford, v.91, p.893-903, 2003.

ZADOKS, J.C.; RABBINGE, R. Modelling to a purpose. **Advances in Plant Pathology**, v.3, p.231-244, 1985.

ZAPATA, F. Isotope techniques in soil fertility and plant nutrition studies. In: ZAPATA, F. (Ed.). **Use of nuclear Techniques in Studies of Soil-Plant Relationships**. Austria: International Atomic Energy Agency.. 1990. p. 61-127. (Training Course Series, 2)

APÊNDICE

APÊNDICE A. Alfabeto grego

Caractere grego	Símbolo minúsculo	Símbolo maiúsculo
Alfa	α	A
Beta	β	B
Gama	γ	Γ
Delta	δ	Δ
Épsilon	ϵ	E
Zeta	ζ	Z
Eta	η	H
Teta	θ	Θ
Iota	ι	I
Capa	κ	K
Lambda	λ	Λ
Mu	μ	M
Nu	ν	N
Csi	ξ	Ξ
Ômicron	$\omicron$	O
Pi	π	Π
Ro	ρ	P
Sigma	σ	Σ
Tau	τ	T
Upsilon	υ	Y
Fi	ϕ	Φ
Chi	χ	X
Psi	ψ	Ψ
Ômega	ω	Ω