



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE-CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



CRESCIMENTO DE VARIEDADES RB DE CANA-DE- AÇÚCAR IRRIGADAS E FOTOSSÍNTESE MODELADA PELA RADIAÇÃO SOLAR

Ricardo Araujo Ferreira Junior

RIO LARGO, AL
2010

RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR

**CRESCIMENTO DE VARIEDADES RB DE CANA-DE-
AÇÚCAR IRRIGADAS E FOTOSSÍNTESE MODELADA
PELA RADIAÇÃO SOLAR**

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso de Pós-graduação em Agronomia - Produção vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração Produção Vegetal.

Orientação: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza

RIO LARGO, AL
2010

Catlogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

F385c Ferreira Junior, Ricardo Araujo.

 Crescimento de variedades RB de cana-de-açúcar irrigadas e fotossíntese
 modelada pela radiação solar / Ricardo Araujo Ferreira Junior, 2010.
 68f. : grafs., tabs.

 Orientador: José Leonaldo de Souza.

 Dissertação (mestrado em Agronomia: Proteção de Plantas) – Universidade
 Federal de Alagoas. Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2010.

 Bibliografia: f. 60-66.

 Apêndices. f. 67-68.

 1. Cana-de-açúcar. 2. *Saccharum* spp. 3. Radiação fotossintética. 4. Simulação
 (Cultivo). I. Título.

CDU: 633.61

TERMO DE APROVAÇÃO

RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR
0810M09

CRESCIMENTO DE VARIEDADES RB DE CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADAS E FOTOSSÍNTESE MODELADA PELA RADIAÇÃO SOLAR

Esta dissertação foi submetida a julgamento como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Agronomia, outorgado pela Universidade Federal de Alagoas.

A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.



Aprovado em 04 de Fevereiro de 2010.

A Piettra e a minha filha Clara pela
alegria e motivação que me
proporcionaram durante o percorrer do
curso.

DEDICO

Aos que respeitam a Natureza, não
porque admiram sua beleza, mas sim por
ter a consciência que é parte dela.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Dr. José Leonaldo de Souza, pelos ensinamentos científicos e moral ao longo desses quase seis anos de convivência;

Ao professor Iêdo Teodoro pelos ensinamentos, coordenação do experimento de campo e amizade;

Ao professor Gustavo Lyra pelas sugestões e contribuições da pesquisa.

Aos colegas Lucas Holanda e Givaldo Sampaio Neto, pelo empenho das atividades de campo.

Aos colegas de laboratório Rui Palmeira, José Edmilson, Marcos Alex, Mercel José, Anthony Carlos, André Luiz, Franklin dos Anjos, Eduardo Cabral e Maurício Bruno, pelo sempre agradável ambiente de trabalho.

Aos colegas de turma de mestrado: Renan Cantalice, Tiago Tibola, Pedro Bento, Sihélio Júlio, Carlos Jorge, Silvia e aos demais, pelo companheirismo nas disciplinas;

Ao corpo docente do curso de Mestrado em Agronomia-Produção Vegetal da UFAL, em especial aqueles com os quais convivi: Prof^a Dr^a Vilma Marques Ferreira, Prof. Dr. Gaus Silvestre de Andrade Lima, Prof. Dr. Laurício Endres, Prof. Dr. Paulo Vanderley Ferreira, Prof. Dr. José Vieira Silva, Prof. Dr. José Paulo Vieira, Prof. Dr. Gilson Moura Filho, Prof. Dr. José Calazans e Prof. Dr. Leila pelos ensinamentos;

Ao Professor Geraldo Veríssimo em nome do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar - PMGCA/CECA/UFAL, pelo apoio ao Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar.

A todos os funcionários que contribuíram para realização deste trabalho.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação Geraldo Lima e Marcos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa.

Meus sinceros agradecimentos

BIOGRAFIA DO AUTOR

Ricardo Araujo Ferreira Junior, filho de Ricardo Araujo Ferreira e Denise Monteiro de Carvalho, nasceu na cidade de Maceió, Estado de Alagoas, em 21 de outubro de 1981 e, como toda criança curiosa sempre se perguntava sobre algum fenômeno da natureza, quando estudando para ingressar na universidade, um amigo (Agnus Bahia) citou quais as áreas de estudo do curso de agronomia, uma vez que ele já estava cursando há um ano.

Ingressou no Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), para cursar Agronomia no primeiro semestre do ano de 2003, durante sua graduação a partir de 2005 desenvolveu a atividade de bolsista de iniciação científica orientado pelo Professor Doutor José Leonaldo de Souza no Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar até meados de 2007 quando passou a ser bolsista do projeto Atlas Solarimétrico preliminar para o Estado de Alagoas e disseminação da tecnologia solar até fevereiro de 2008.

Em dezembro do ano de 2007 foi graduado Engenheiro Agrônomo.

No próprio CECA, em março de 2008 iniciou o Curso de Mestrado em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, na linha de pesquisa em Agrometeorologia com a orientação do Professor Doutor José Leonaldo de Souza.

"O amor é paciente, o amor é prestativo;
não é invejoso, não se ostenta, não se
incha de orgulho. Tudo desculpa, tudo crê,
tudo espera, tudo suporta."

(1 Cor 13)

RESUMO

Modelos de crescimento para a cultura da cana-de-açúcar expressam o crescimento das plantas baseados na fotossíntese líquida (fotossíntese bruta menos respiração). Determinações da fotossíntese bruta (FB) podem ser feitas em função da radiação solar interceptada através de uma equação hiperbólica retangular. Assim, objetivou-se com o presente trabalho, realizado no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, avaliar variedades RB (RB92579, RB863129, RB931003, RB93509, RB72454, RB867515, RB951541, RB971755 e RB98710) de canas-de-açúcar irrigadas em relação à radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{INT}) e a estimativa da FB acumulada, entre fevereiro de 2008 a fevereiro de 2009. Para isso, foram realizadas medidas biométricas (área foliar e número de perfilhos) e variáveis de produção (toneladas de colmos por hectare (TCH) e toneladas de açúcar por hectare (TPH)), em delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições. A irradiância fotossintética (RFA) foi estimada como 44 % da irradiância solar (R_g) e a RFA_{INT} como diferença entre RFA e RFA transmitida (RFA_T). A RFA_T foi determinada utilizando a Lei de Beer ($RFA_T = RFA \exp^{(-K IAF)}$), com o valor do coeficiente de atenuação da luz (K) igual a 0,58. Na estimativa da FB diária, usou-se uma integração numérica com abordagem trapezoidal. Também foi feita a análise temporal do crescimento, através de simulações do índice de área foliar (IAF) em função dos graus-dia (GD). Considero-se o início do cultivo (365 dias de duração) no 1º dia de cada mês de quatro anos (2004-2007). O TCH e o TPH tiveram correlações com a RFA_{INT} acumulada e com a FB acumulada durante o ciclo. A média da irradiância solar do período chuvoso da região, maio - agosto, (71 - 193 dias após o corte), foi $14,9 \text{ MJ m}^{-2}$. A variedade RB92579 foi a que teve maiores TCH e TPH, com também maiores valores das estimativas da RFA_{INT} e FB acumuladas no longo do ciclo. Nas simulações de crescimento, para as variedades RB de cana-de-açúcar, os meses de março e fevereiro tiveram maiores acúmulo RFA_{INT} e FB.

Palavras-chave: Radiação fotossintética, Simulação de cultivo, *Saccharum spp.*

ABSTRACT

Growth models for the sugarcane crop express plant growth based on the net photosynthesis (gross photosynthesis less respiration). Determination of gross photosynthesis (GP) can be made according to the intercepted solar radiation by a rectangular hyperbolic equation. Therefore, this work, conducted at the Center for Agrarian Sciences, Federal University of Alagoas, aimed to evaluate RB varieties (RB92579, RB863129, RB931003, RB93509, RB72454, RB867515, RB951541, RB971755 and RB98710) of irrigated sugarcane in relation to the intercepted photosynthetic active radiation (PAR_{INT}) and the estimation of accumulated GP from February 2008 to February 2009. To achieve this, biometric measurements (leaf area and number of tillers) and production variables: tons of cane per hectare (TCH) and tons of sugar per hectare (TSH) were performed in a randomized outline with four repetitions. The photosynthetic irradiance (PAR) was estimated as 44% of the solar irradiation (R_g), and PAR_{INT} as the difference between PAR and transmitted PAR (PAR_T). The PAR_T was determined using the Beer law ($RFA_T = RFA \exp^{(-K \cdot IAF)}$), with the coefficient of light attenuation (K) equal to 0.58. The estimation of daily GP was obtained by a numerical integration with trapezoidal approach. It was also made a temporal analysis of growth through simulations of leaf area index (LAI) according to degree-days (GD). The start of the cultivation (365 days duration) was considered the 1st day of each month for the four years (2004-2007). The TCH and TSH had correlations with the accumulated PAR_{INT} and GP during the cycle. The average solar radiation of the region's rainy season, from May to August, (71 to 193 days after ratooning) was 14.9 MJ m^{-2} . The RB92579 variety had the highest values TCH and TSH as the highest estimates of accumulative PAR_{INT} and GP during the cycle. In simulations of growth for the RB varieties of sugarcane, the months of March and February had the highest accumulation PAR_{INT} and GP.

Keywords: Photosynthetic radiation, Crop simulation, *Saccharum spp*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros da equação Log-Normal do ajuste entre o índice de área foliar (IAF) e os graus-dia acumulados ao longo do cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar, irrigada por gotejamento, em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.....	44
Tabela 2. Índice de área foliar médio de variedades RB de cana-de-açúcar, irrigada por gotejamento, em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.....	44
Tabela 3. Produtividade de colmos (TCH), produtividade de açúcar (TPH), irradiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{INT}), e fotossíntese bruta (FB) para as variedades RB de cana-de-açúcar em cultivo irrigado por gotejamento em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Percentagem de luz absorvida, refletida e transmitida de uma folha em função do comprimento de onda (adaptado de Taiz & Zeiger, 1991). ..	26
Figura 2. Esquema dos espaçamentos entre linhas e posicionamento das mangueiras de gotejamento.....	30
Figura 3. Vista aérea do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, com destaque da área localizada a Estação Agrometeorológica (retângulo amarelo) e da área experimental (retângulo vermelho).	32
Figura 4. Entrada (precipitação pluvial + irrigação) e saída (evapotranspiração da cultura, ETC) de água no cultivo (2º folha) de cana-de-açúcar, em Rio Largo – AL, entre os anos 2008-2009.....	40
Figura 5. Déficit (DEF) e excesso hídrico (EXC) no cultivo de cana irrigada (2º folha) pelo método de Thornthwaite e Mather (1957), em Rio Largo - AL, entre os anos 2008-2009.	40
Figura 6. Temperatura média, mínima e máxima do ar em função ao dias após o corte (DAC) durante o ciclo cultura da cana-de-açúcar em Rio Largo - AL.....	41
Figura 7. Ajuste de curva Log-Normal, com 4 parâmetros entre o Índice de área foliar (IAF) de variedades RB de cana-de-açúcar e os graus-dia (GD) acumulados em cultivo (2º folha) irrigado por gotej amento, entre os anos 2008-2009.....	43
Figura 8. Índice de claridade (Kt) em função ao dias após o corte (DAC) durante o ciclo cultura da cana-de-açúcar em Rio Largo - AL, entre os anos 2008-2009.	46
Figura 9. Irradiação solar global diária (H_g) e fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{INT}) da variedade RB92579 em função ao dias após o corte (DAC) durante o ciclo cultura da cana-de-açúcar em Rio Largo - AL, entre 2008 e 2009.	46
Figura 10. Correlação entre a produtividade de colmos (TCH) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{INT}) acumulada no cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar (2º folha) irrigado por gotejamento em Rio Largo - AL, entre 2008 e 2009.	49

Figura 11. Correlação entre a produtividade de colmos (TCH) e a fotossíntese bruta (FB) acumulada no cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar (2° folha) irrigado por gotejamento em Rio Largo - AL, entre 2008 e 2009.	50
Figura 12. Correlações entre produtividade de açúcar (TPH) e a radiação fotossintética interceptada (RFA_{INT}) acumulada no cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar (2° folha) irrigado por gotejamento em Rio Largo - AL, entre 2008 e 2009.	50
Figura 13. Correlações entre produtividade de açúcar (TPH) e a fotossíntese bruta (FB) acumulada no cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar irrigado por gotejamento em Rio Largo - AL, entre 2008 e 2009.	51
Figura 14. Irradiância fotossintética (RFA) medida e estimada em função da irradiação diária e o fotoperíodo para: A) dia com índice de claridade (K_t) = 0,29 (17/07/2008), B) dia com K_t = 0,52 (03/07/2008) e C) dia com K_t = 0,66 (12/12/2008).	52
Figura 15. Fotossíntese bruta (FB) diária: A) com dados de irradiância fotossintética medida, B) com dados de irradiância fotossintética estimada pela irradiação em função dos dias após o corte de um cultivo de cana-de-açúcar e C) desvio entre FB com irradiância medida e estimada.....	54
Figura 16. Plotagem de Bland e Altman para os limites de concordância entre os valores de fotossíntese bruta com dados de irradiância fotossintética medida (FB_d RFA_{medido}) e com dados de irradiância fotossintética estimada pela irradiação (FB_d $RFA_{estimado}$) de um cultivo de cana-de-açúcar irrigado em Rio Largo, entre 2008-2009. DM = desvio médio e DP = desvio padrão.....	55
Figura 17. Radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{INT}) acumulada na simulações de cultivo de cana-de-açúcar (Variedade RB92578) em relação ao mês de corte, nos anos 2004, 2005, 2006 e 2007.....	56
Figura 18. Fotossíntese Bruta (FB) acumulada nas simulações de cultivo de cana-de-açúcar (Variedade RB92578) em relação ao mês de corte, nos anos 2004, 2005, 2006 e 2007.	57
Figura 19. Média mensal da irradiação solar global (H_g) da região de Rio Largo, Alagoas.	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	- Inclinação da curva da pressão de vapor saturado versus temperatura, kPa °C ⁻¹
γ	- Coeficiente psicrométrico, kPa °C ⁻¹
α	- Eficiência fotossintética, kg J ⁻¹ de CO ₂
a, b, c, d	- Coeficientes de regressão do modelo Log-Nomal
AF	- Área foliar
AFD	- Água facilmente disponível, mm
AS	- Área ocupada pela planta, m ²
C	- Comprimento da folha +3, cm
CAD	- Capacidade de água disponível, mm
CC	- Capacidade de campo, mm
CECA	- Centro de Ciências Agrárias
CL	- Dia Claro
DAC	- Dias após o corte
DEF	- Déficit hídrico, mm
e	- Pressão do vapor d'água do ar, kPa
e _s	- Pressão de saturação do vapor d'água do ar, kPa
ET	- Evapotranspiração, mm
ETc	- Evapotranspiração da cultura, mm
ETo	- Evapotranspiração de referência, mm
EUR	- Eficiência do uso da radiação, g MJ ⁻¹
EXC	- Excesso hídrico, mm
f	- Fator de depleção
FB _d	- Fotossíntese bruta diária, kg m ⁻² de CO ₂
FB _{INST}	- Fotossíntese bruta instantânea, kg m ⁻² s ⁻¹ de CO ₂
F _{MAX}	- Fotossíntese máxima, kg m ⁻² s ⁻¹ de CO ₂
G	- Fluxo de calor no solo, MJ m ⁻²
GD	- Graus-dia, °C d
GD _{a_j}	- Efeito adverso da alta temperatura no desenvolvimento da cultura, para cada j dia, °C

GD _{g_j}	- Graus-dia nas condições de temperaturas sub-ótimas, para cada j dia, °C
GD _j	- Graus-dia para cada j dia, °C d.
GD _t	- Graus-dia para completar um período, °C d
H _g	- irradiação solar, J m ⁻²
H _o	- irradiação solar no topo da atmosfera, J m ⁻²
IAF	- Índice de área foliar
k	- Coeficiente de extinção
Kc	- Coeficiente da cultura
Kt	- Índice de claridade
L	- Largura da folha +3, cm
N	- Fotoperíodo, s
NB	- Dia nublado
PMP	- Ponto de murcha permanente, mm
PN	- Dia parcialmente nublado
Q10	- Coeficiente de temperatura
RFA	- Radiação fotossinteticamente ativa
RFA _{INST}	- irradiância fotossinteticamente ativa, J m ⁻² s ⁻¹
Rg	- irradiância solar, J m ⁻² s ⁻¹
Rn	- Saldo de radiação, MJ m ⁻²
T	- Temperatura do ar, °C
Tb	- Temperatura-base, °C
TCC	- Taxa de crescimento da cultura
TCH	- Produtividade de colmos, t ha ⁻¹
Tmax _j	- Temperatura máxima do ar do dia, °C
Tmin _j	- Temperatura mínima do ar do dia, °C
To	- Temperatura ótima para o desenvolvimento, °C
TPH	- Produtividade de açúcar, t ha ⁻¹
Ts	- Temperatura de saturação, °C
u ₂	- Velocidade do vento a 2 m de altura, m s ⁻¹
UFAL	- Universidade Federal de Alagoas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Origem e Cenário Atual da Cana-de-açúcar.....	18
2.2 Influências dos Fatores Ambientais na Produção de Biomassa.	19
2.2.1 Disponibilidade de Água.....	19
2.2.2 Temperatura do Ar	22
2.2.3 Radiação Solar	24
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 Características da Área Experimental e Manejo da Cultura	29
3.2 Medidas Biométricas, Produtividades e Agrometeorológicas	30
3.3 Análise Ambiental	33
3.4 Fotossíntese Bruta e Análise Temporal de Crescimento	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Condições Hídricas e Térmicas	39
4.2 Índice de Área Foliar e Graus-Dia	42
4.3 Irradiação Solar, Fotossíntese e Produtividade.	45
4.4 Distribuição Diária da RFA para Cálculos de Fotossíntese Bruta	51
4.5 Análise Temporal do Crescimento de Cana-de-açúcar.....	55
5 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICES	67

1 INTRODUÇÃO

O crescente incentivo pela utilização de energias de fontes renováveis eleva à demanda de combustíveis provenientes de biomassa vegetal (biocombustíveis), destacando-se o etanol da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). Além disso, as recentes tecnologias industriais para o setor sucroalcooleiro estão maximizando a geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana. Assim, as usinas se tornam fonte energética alternativa no período da safra. Dependendo da região, esse período varia de seis a oito meses, porém confiável em complementação as hidroelétricas. Outros produtos dessa cultura são salientados, tais como, aguardente, vinhaça (aplicada como fertilizante), plástico, o papel e o açúcar que é o principal subproduto. A geração de energia pelo cultivo de cana-de-açúcar tem possibilidade de ser convertida em créditos de carbono no mercado internacional, pelo seqüestro de carbono da atmosfera. Desta forma, a área cultivada com cana-de-açúcar se expande a cada ano. Entretanto, em regiões canavieiras tradicionais, cujas áreas são restritas para expansão, é imprescindível o manejo adequado da cultura para alcançar valores de produção potencial.

Pesquisas, que visam elevar a produtividade de uma cultura em determinada localidade, priorizam a avaliação de padrões genéticos, manejo hídrico, nutricional e fitossanitário. Porém, o entendimento da influência dos fatores ambientais no desenvolvimento e crescimento de uma cultura é fundamental, uma vez que estão diretamente ligados a vários processos metabólicos. Assim, diversas vezes, as pesquisas direcionadas a fatores ambientais interagem ou complementam as demais linhas de pesquisas ligadas à produção vegetal. O melhoramento genético de plantas é uma dessas linhas de pesquisas que analisa os efeitos dos fatores ambientais nas diferentes características morfológicas e fisiológicas de genótipos previamente selecionados, visando definir as variedades mais adequadas para uma localidade.

Estudos são dirigidos para a elaboração de modelos matemáticos para estimar o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento das culturas. (Pereira & Machado, 1985; Jones & Kiniry, 1986, etc). Em geral, esses modelos correlacionam os elementos ambientais com processos fisiológicos e com a

produção das culturas. Isto é possível devido à evolução do conhecimento dos processos fisiológicos vegetais e dos sistemas computacionais.

A maioria dos modelos de crescimento considera a radiação solar como variável de entrada primordial (Inman-Bamber, 1991; Keating *et al*, 1999; Liu & Bull, 2001), uma vez que é a fonte de energia para a fixação do carbono atmosférico e, conseqüentemente, para o crescimento das culturas. Porém, apenas uma porcentagem da radiação solar é utilizada na fotossíntese, que corresponde à parte da energia da faixa do espectro solar entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nanômetros. Essa energia radiante é denominada de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), ou simplesmente de luz. Nesses modelos, a radiação fotossintética interceptada em uma cultura geralmente é função da radiação solar incidente nas plantas, do índice de área foliar (IAF) e do coeficiente de extinção da luz (k), que expressa a influência das propriedades óticas das folhas e da geometria do dossel na atenuação da luz (Varlet-Grancher *et al*, 1989).

Pelo exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a produtividade de colmos e a de açúcar de variedades RB de cana-de-açúcar irrigada por sistema de gotejamento subsuperficial em relação à radiação fotossinteticamente ativa interceptada e a estimativa da fotossíntese bruta acumulada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Origem e Cenário Atual da Cana-de-açúcar

A literatura sobre a origem da cana-de-açúcar é escassa de informações e com pouca concordância sobre o assunto. Na literatura Indiana, entre 1400 e 1000 antes de Cristo, a cultura da cana é mencionada, o que indica que a cana-de-açúcar pode ter se originado nessa região. A ausência de citações em documentos como, por exemplo, na Bíblia e em outros trabalhos de países como Egito e China, fortalece a hipótese da origem da cultura na Índia. Por outro lado, análises detalhadas de vários registros conduziam que a procedência da cana-de-açúcar poderia ser na Oceania, mais provavelmente na Nova Guiné. Vários tipos de cana de colmos grossos foram achados em jardins de nativos desse País (Biswas, 1988).

Considerações botânicas indicam que variedades de colmos finos poderiam ter suas origens na Índia, enquanto as variedades com maior circunferências dos colmos e altura poderiam ter evoluído na Nova Guiné. Essas variedades diferem significativamente da cana moderna em relação às características morfológicas (Biswas, 1988). A cultura da cana-de-açúcar chegou à Espanha aproximadamente no ano 600 e de lá se difundiu para os outros Países Europeus. No Brasil, a cultura foi introduzida em torno de 1500, pelos os Portugueses e, em 1526, ocorria exportação de açúcar de cana-de-açúcar para Lisboa.

O Brasil produziu no ano de 2008 (safra 2008-2009) aproximadamente 570 milhões de toneladas de colmos de cana-de-açúcar destinados ao setor sucroalcooleiro, ocupando a primeira posição mundial (CONAB, 2009). No Estado de Alagoas, na mesma safra, a produção de colmos industrializados foi cerca de 27 milhões de toneladas. Apesar de essa produção representar menos que 5% da nacional, o Estado foi o quinto maior produto do País, atrás apenas dos estados de São Paulo (68%), Paraná (9,6%), Minas Gerais (8,4%) e Goiás (5,7%).

2.2 Influências dos Fatores Ambientais na Produção de Biomassa.

A cultura da cana-de-açúcar é objeto de diversas pesquisas ao longo de sua exploração, com o objetivo de aumentar a eficiência no acúmulo de massa e sacarose. Porém, apenas após a metade do século XX, a influência dos fatores ambientais foi incluída nos estudos. A compreensão de como os processos fisiológicos e bioquímicos de determinada espécie vegetal respondem as variações dos elementos ambientais, de uma localidade, é fundamental para adequar o manejo agrícola, de forma a definir condições para que a espécie possa expressar sua potencialidade de produção por área (produtividade). Nesse contexto, os elementos meteorológicos que mais influenciam no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar são a radiação solar, a temperatura do ar e a precipitação pluvial (Muchow *et al*, 1994).

2.2.1 Disponibilidade de Água

Menos de um por cento da água absorvida pelo sistema radicular de uma planta é utilizada quimicamente no processo fotossintético. Todavia, a falta de água para as plantas afeta a fotossíntese através de meios indiretos, como o fechamento estomático, que ocasiona maior resistência a difusão de CO₂ entre a atmosfera e os cloroplastos, e ainda diminui o fluxo de vapor d'água das folhas para o ambiente prejudicando os processos de translocação de seiva bruta (água e sais minerais).

Há condição na qual uma planta sofre efeitos negativos devido à restrição de água é denominada de estresse hídrico. Esse é associado com períodos secos - períodos sem precipitação pluvial significativa, no qual o conteúdo de água no solo é reduzido, de forma que as plantas sofrem com a ausência de água disponível (Larcher, 2000). A capacidade de água disponível (CAD) é a parte do total de água armazenada no solo que as plantas conseguem absorver, porém a partir de determinada fração da CAD, as plantas consomem energia para absorver a água, e comprometem o crescimento. A fração da água dita como sem gasto energético é conhecida com água facilmente disponível (AFD). Essa é definida pela diferença entre o teor de água do solo correspondente a capacidade de campo (CC) e de ponto de murcha permanente (PMP), multiplicada por um

fator de depleção (f). A CC é a teor de água máxima que um solo armazena após ter perdido a água gravitacional (água drenável). Isto ocorre por que neste momento a força da gravidade entra em equilíbrio com as forças de capilaridade dos poros. O PMP é característico do solo e conceituado como o teor de água de um solo no qual as folhas de uma planta, que nele cresce, atingem, pela primeira vez, murchamento irreversível, a teor de água no PMP equivale à teor sob tensão de -1,5 MPa (Reichardt & Timm, 2004).

Na cultura da cana-de-açúcar, a limitação de água devido aos períodos secos tem efeito negativo no desenvolvimento do dossel, pelo retardamento da produção de novos brotos e folhas, e pela aceleração da senescência foliar (Inman-Bamber, 2004). Os conhecimentos atuais de resposta da cana-de-açúcar ao estresse hídrico são incorporados em modelos de crescimento, tais como: o CANEGRO (Inman-Bamber, 1991) e o APSIM-Sugarcane (Agricultural Production Systems SIMulator) (Keating *et al*, 1999). No CANEGRO, por exemplo, os componentes de expansão do crescimento (comprimento da foliar, área foliar e área de folhas maduras) sofrem redução em função da falta de água. No modelo APSIM, o efeito negativo do estresse hídrico sobre o dossel é representado de forma geral, com a penalização do índice de área foliar (Inman-Bamber, 2004). Esses efeitos levam a reduções na radiação interceptada pelo dossel, no uso de água e fotossíntese.

A redução da radiação interceptada é simplesmente devido à diminuição da área foliar, que conseqüentemente aumenta a radiação transmitida pelo dossel. A redução no uso da água está associada ao estresse hídrico, e esse é induzido por dois caminhos: i) pela falta de disponibilidade de água no solo para absorção radicular, determinado pelo status de água no solo; e, ou ii) pela excessiva demanda de água das folhas para atmosfera (fluxo transpiratório), determinado pelo status de água na atmosfera. Porém, nos modelos de crescimento, o estresse hídrico desenvolve-se como função do sistema solo-raiz, uma vez que o mesmo não consegue entender a demanda atmosférica por água (Inman-Bamber, 2004).

Alguns mecanismos da planta para evitar períodos de estiagem são fundamentais para sua sobrevivência em determinadas regiões, como por exemplo, as estratégias de fechamento estomático e de redução da área foliar - através de retardamento do crescimento, enrolamento foliar e desprendimento de

folhas. Porém, as plantas geralmente convivem com a dualidade da conservação de água e da assimilação de CO₂.

Em muitos ambientes de cultivo de cana-de-açúcar a água é o principal fator limitante da produção. Em regiões tropicais essa limitação por água é mais acentuada quando comparada as regiões subtropicais, onde a temperatura do ar também se destaca (Pimentel, 1998; Inman-Bamber & Smith, 2005). É importante ressaltar, que o déficit de água no solo para as culturas não é limitado apenas às regiões áridas e semi-áridas do mundo, já que mesmo em regiões úmidas, a distribuição irregular das chuvas pode, em alguns períodos, limitar o crescimento (Taiz & Zeiger, 1991).

A zona úmida litorânea do Nordeste brasileiro apresenta precipitação pluvial média superior a 1.500 mm anual e, apesar da má distribuição ao longo do ano é uma das grandes regiões produtoras de cana-de-açúcar do Brasil. A necessidade hídrica da cana-de-açúcar difere, com a fase fenológica e também com a variedade, sendo entre 1.500 a 2.500 mm por ciclo vegetativo.

A precipitação pluvial não é fator limitante da produtividade da cana-de-açúcar onde existem condições de realizar irrigação. Mas, o excesso de chuva pode ser prejudicial nesses locais, isso acontece quando causa encharcamento (saturação com água) e má drenagem dos solos. Assim, como nem sempre as chuvas atendem a real ou potencial necessidade hídrica de uma cultura, surge à necessidade de irrigar, que bem planejada, tem retorno econômico significantes.

O manejo de cana-de-açúcar irrigada necessita da suspensão da água antes da colheita, para reduzir a compactação do solo através das máquinas na operação de colheita e para aumentar a concentração de sacarose (Robertson & Donaldson, 1998). Este procedimento é denominado, na língua inglesa, de *drying off*. Este, não é providência para economizar água, mas, pode reduzir quantidade significativa de água, bem como aumentar o teor de sacarose, se não prejudicar o rendimento de sacarose (Inman-Bamber, 2004). Em alguns sistemas de produção, o intervalo de rega é estendido gradualmente ao longo da segunda metade do ciclo para aumentar o teor de sacarose, enquanto que em outros sistemas, como por exemplo, na Austrália e África do Sul, a irrigação é cessada completamente antes da colheita (Robertson & Donaldson, 1998). Em várias localidades canavieiras o pagamento de cana é baseado na produção de

sacarose por hectare, assim o estresse hídrico antes colheita (*drying off*) pode produzir benefício se o rendimento de sacarose aumentar.

Existem diversos métodos para a estimativa do uso da água pelas culturas. Entretanto, a abordagem usual, deriva do conceito de evapotranspiração (ET). Esse é resultado da combinação dos processos de evaporação da água do solo ou de superfícies de água livre e da transpiração das plantas, através, principalmente, dos estômatos. A ET potencial de uma cultura (ET_c) é determinada pela multiplicação da ET de referência (ET_o) e um coeficiente da cultura (K_c). A ET_o é a taxa de evatranspiração de um cultivo de referência, com características similares a grama, sem restrição de água e nutrientes e livres de pragas e doenças. Baseado na ET_o é possível avaliar o poder evaporativo da atmosfera, uma vez que independe do tipo de cultura, do estágio de desenvolvimento e práticas de manejos (Allen *et al*, 1998). ET_c é específica de determinada cultura, em que as características que diferenciam essa cultura da cultura de referência estão inclusas no K_c. Assim, é necessário previamente definir a ET de cada cultura e de suas fases de desenvolvimento, visto que o K_c é uma relação entre ET_c e ET_o. Valores de K_c variam de acordo com as fases fenológicas de determinada cultura e com as condições climáticas observadas durante essas fases e com as características edáficas do local. Na cultura de cana-de-açúcar K_c varia de 0,4 - 1,3 do início do cultivo até o máximo desenvolvimento do dossel e diminui para 0,7 no final do ciclo vegetativo (colheita) (Doorenbos & Kassan, 1979; Allen *et al*, 1998).

Existem inúmeros métodos para estimar ET_o, sendo o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (Penman-Monteith FAO), o que apresenta melhores estimativas em diferentes tipos de climas, e por isso, é recomendado como método padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (Allen *et al*, 1998).

2.2.2 Temperatura do Ar

Vários processos fisiológicos dos vegetais são diretamente influenciados pela temperatura do ar, já que esse elemento meteorológico é indicador da energia térmica disponível no ambiente para o crescimento e desenvolvimentos dos seres vivos. Assim, a maioria das reações metabólicas é influenciada pela

temperatura de ar (Jones, 1992). A dependência da temperatura aumenta em processos que as moléculas envolvidas necessitam de quantidade mínima de energia para iniciar (energia de ativação). No geral, quanto mais alta for a energia de ativação do processo maior será a sensibilidade a temperatura.

Ambientes com altas temperaturas do ar provocam nas plantas com mecanismo de fixação de CO_2 “tipo C3” aumento da fixação de O_2 ao invés de CO_2 . Esse mecanismo de assimilação de O_2 é conhecido com fotorespiração. Isto ocorre porque a enzima responsável pela fixação do CO_2 (rubisco) também tem a capacidade de assimilar O_2 presente na atmosfera. Com o aumento da temperatura, a difusibilidade do O_2 aumenta em relação à do CO_2 (Taiz & Zeiger, 1991), logo diminui a razão entre as concentrações de CO_2 e O_2 dentro do sítio de atuação da rubisco. Assim a atividade oxigenase da rubisco torna-se proporcionalmente maior com o aumento da temperatura, o que reduz a assimilação de CO_2 (Pimentel, 1998). A diminuição da atividade fotossintética em plantas C3 a altas temperaturas (apesar de ser devido principalmente ao aumento da fotorespiração) também está associada à destruição de estruturas cloroplásticas (Pimentel, 1998).

Alguns grupos de plantas desenvolveram mecanismos alternativos de fixação fotossintética, através da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEP-case), que não apresenta afinidade ao oxigênio atmosférico. Assim, as plantas desses grupos não sofrem o efeito da oxigenação (fotorespiração), sendo mais eficientes em altas temperaturas. Um grupo de plantas que apresenta esse mecanismo é denominado de C4, como por exemplo, a cana-de-açúcar. Essa denominação é devida os primeiros intermediários estáveis no processo serem compostos de quatro carbonos (malato ou aspartato).

A respiração tipicamente aumenta com temperatura do ar. A relação da velocidade de reação com a temperatura (relação de Van't Hoff) mostra aumento exponencial (Larcher, 2000). A aceleração das reações causada pelo aumento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ na temperatura do ar é expressa por um coeficiente de temperatura, conhecido como Q_{10} . Esse coeficiente de temperatura é comumente usado em estudos de modelagem na determinação da respiração. Entre 0 e $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, o aumento na taxa respiração para cada $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de aumento é aproximadamente de 2, ou seja, a taxa de respiração dobra a cada aumento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Acima de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a taxa de respiração freqüentemente aumenta mais lentamente, chegando a um

platô entre 40 a 50°C, e, decrescendo em temperaturas superiores. Sob elevadas temperaturas, a velocidade dos processos bioquímicos é tão alta que a disponibilidade de substrato e metabólitos (por exemplo, ADP), como também o transporte de energia e material, não acompanha essa velocidade. Logo, a intensidade da respiração cai rapidamente (Larcher, 2000). As altas temperaturas noturnas são associadas às altas taxas de respiração de plantas tropicais (Teh, 2006).

Uma aplicação prática da temperatura do ar na tomada de algumas decisões na agricultura é o uso de um índice bioclimático denominado graus-dia (GD), também conhecido como unidades de calor ou sistema de unidades térmicas. Em 1735, o físico Reaumur foi o primeiro a mostrar que o somatório das temperaturas médias diárias do ar necessário para uma espécie vegetal qualquer apresenta determinado estágio de desenvolvimento era similar. Os graus-dia são usados como guia para a determinação da data aproximada de quando a cultura vai apresentar determinada etapa de desenvolvimento como, por exemplo, a floração ou a própria colheita. A determinação dos GD, comumente usado, é através da subtração da temperatura média do ar e uma temperatura de referência, também denominada de temperatura base. O conceito de GD assume que a ocorrência de temperatura abaixo da temperatura basal, a planta não tem crescimento ou desenvolvimento. Então, por exemplo, se a média da temperatura do ar de um dia for 20 °C, o resultado da expressão, caso a temperatura base fosse 10°C (cultura do milho) seria 10 GD nesse dia. Um novo método para calcular os graus-dia para a cultura da cana-de-açúcar foi proposto por Liu *et al.* (1998). Essa nova técnica inclui o efeito da alta temperatura do ar no desenvolvimento da cultura, através da aplicação de uma faixa ideal de desenvolvimento (temperatura ótima) e uma temperatura de saturação.

2.2.3 Radiação Solar

A radiação proveniente do Sol, que incide na superfície terrestre, é fonte primária de energia para vários processos físicos e químicos que possibilitam a vida vegetal. Essa variável destaca-se entre os elementos meteorológicos por ser fonte de energia para fixação de carbono atmosférico pelos vegetais, logo é a fonte básica de energia do planeta. O processo de fixação de carbono através da

transformação de energia pelas plantas é denominado de fotossíntese. Na fotossíntese, parte da energia solar é convertida em energia química, que será utilizada na fixação do CO₂ presente na atmosfera, para formar fotoassimilados (carboítrados). A radiação solar é o elemento meteorológico com maior influência na evapotranspiração (Allen *et al.*, 1998). Cerca de 60 - 90% da energia radiante disponível em uma superfície (saldo de radiação - R_n) é utilizado nesse processo de transferência de água da superfície para atmosfera. Todavia, a radiação solar também influencia sobremaneira vários processos fundamentais para o desenvolvimento de uma planta, tais como: a fotomorfogênese e as trocas gasosas. Na fotomorfogênese, a luz induz mudanças morfológicas (principalmente em plântulas) e crescimento em sua direção (fototropismo). Nas trocas gasosas, a luz azul funciona como o sinal ambiental para a abertura estomática (Taiz & Zeiger, 1991).

O processo fotossintético necessita de energia na faixa de comprimento de onda entre 400 a 700 nm, que freqüentemente é denominada de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) ou simplesmente luz. A sigla PAR oriunda da grafia da língua inglesa *Photosynthetically Active Radiation* também é comumente usada na literatura. Segundo Monteith (1972) a radiação difusa (fótons que foram espalhados na atmosfera e chegaram à superfície) contém, proporcionalmente, maior fração de RFA que a radiação direta (fótons que chegam diretamente do feixe solar). Logo, a RFA incidente no topo da copa de uma cultura depende das condições atmosféricas (grau de nebulosidade) e da época do ano, e pode apresentar variações entre 44 e 58 % de radiação solar total (Britton & Dodd, 1976; Pinto & Sá, 1989). Dessa porcentagem de RFA, as folhas vegetais sadias utilizam cerca de 92 % na faixa do azul (400 a 500 nm), 71 % no verde (500 a 600 nm) e 84 % no vermelho (600 a 700 nm) (Loomis, 1965), ou seja, absorvem preferencialmente na faixa do azul e vermelho do espectro, tanto que a luz refletida e transmitida pelas folhas é predominantemente verde (Figura 1).

A absorção de fótons está associada, principalmente, à energia que os mesmos têm para causar excitação de um elétron, ou seja, a sua transição de um determinado nível energético para um nível maior. Nos pigmentos envolvidos na fotossíntese, como as clorofilas a e b e os carotenóides, cujas estruturas químicas das moléculas são complexas e contêm duplas ligações, ocorrem os elétrons π

(elétrons em orbitais π). Esses níveis energéticos dos orbitais π permitem que os elétrons absorvam fótons em comprimentos de onda na banda do visível (Angelocci, 2002).

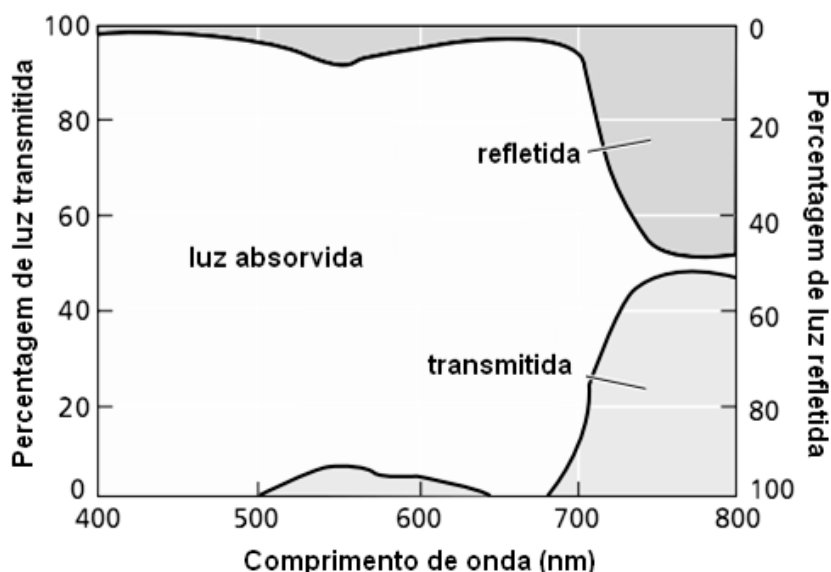


Figura 1. Percentagem de luz absorvida, refletida e transmitida de uma folha em função do comprimento de onda (adaptado de Taiz & Zeiger, 1991).

A densidade de luz (fótons por unidade de área por unidade de tempo) interceptada tem influência direta no crescimento vegetal (Sinclair & Muchow, 1999) e, conseqüentemente, sobre a produtividade das culturas agrícolas. A determinação da radiação interceptada, pelo dossel vegetativo, é simplesmente subtrair da componente de radiação incidente a componente transmitida pelo dossel. Esta energia interceptada é dito como potencialmente disponível para a fotossíntese e transpiração e a fração da radiação solar transmitida é disponível para a evaporação de água do solo (Teh, 2006). Todavia, inúmeros modelos de crescimento consideram a radiação interceptada para estimar a taxa de crescimento da cultura em determinado intervalo de tempo e a eficiência de conversão dessa luz interceptada em biomassa.

A porcentagem de luz interceptada em uma cultura depende principalmente da densidade da folhagem, do ângulo das folhas, arquitetura do dossel e arranjo das plantas (Varlet-Grancher *et al*, 1989). A densidade de folhas em uma vegetação pode ser expressa quantitativamente por meio do índice de área foliar (IAF), que é usualmente definido como a razão entre a área das folhas verdes da planta e a área útil da superfície do solo ocupado pela mesma.

A radiação solar no trajeto através da copa atravessa camadas de folhas sobrepostas, e sofre atenuação exponencialmente com o aumento do IAF (Larcher, 2000). Porém, o conceito de IAF considera que todas as folhas estão na posição horizontal. A folha na horizontal, independentemente da orientação dos raios solar, terá a área sombreada sempre igual a sua área foliar. Já em folhas com posição não horizontal a sombra é maior ou menor que sua área. Em dosséis reais, as folhas ocupam orientações diversas, daí a forma $\exp(-IAF)$ é insuficiente para descrever a radiação transmitida. Assim deve-se incluir um índice chamado de coeficiente de extinção (k) resultando na expressão $\exp(-IAF k)$ (Teh, 2006).

Nesse contexto, a radiação solar sofre uma atenuação exponencial ao atravessar um dossel vegetal, similar ao descrito pela lei de Beer-Lambert-Bouguer, conhecida simplesmente como lei de Beer. Sendo k uma constante adimensional dependente das propriedades óticas das folhas e da geometria do dossel (Caron *et al.*, 2002; Rosenthal & Gerik, 1991) e um importante parâmetro para determinação do grau de transmissão pelo dossel. O coeficiente de extinção é definido por alguns autores como a área sombreada pelo dossel em uma superfície horizontal dividida pela área foliar (Monteith, 1973; Campbell, 1986).

Em diversos modelos de simulação de crescimento de cultura, a influência da radiação solar é representada por um parâmetro conhecido como eficiência do uso da radiação (EUR), ou RUE (*Radiation Use Efficiency*), em que a espécie vegetal precisa ser cultivada sem limitações hídricas e/ou minerais. Nessas condições, considera-se uma relação linear entre o acúmulo de matéria seca e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura (Monteith, 1977; Tei *et al.*, 1996). Na literatura comumente encontram-se diferenças entre os valores de EUR de plantas do tipo C3 e C4. De maneira geral, plantas C3 têm valores de 2,0 a 3,0 g MJ⁻¹ de RFA interceptada (Rosenthal & Gerik, 1991), por outro lado na planta do tipo C4, os valores variam de 3,0 a 4,0 g MJ⁻¹ (Kiniry *et al.*, 1989).

Um método proposto por Monteith (1977) para estimar a taxa de crescimento da cultura (TCC) diária através da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada (RFA_{INT}) e da EUR é de comprovada utilização, particularmente quando as condições ambientais são favoráveis ao crescimento potencial da cultura (Lizaso *et al.*, 2005), ou seja, quando a cultura se encontra principalmente sem restrições térmicas (temperatura do ar e do solo) e hídricas

(disponibilidade hídrica do solo) (Monteith, 1977; Tei *et al*, 1996). Modelo como o CANEGRO e as primeiras versões do CERES-Maize usam esse método para estimar a TCC diária.

Esse método, baseado no parâmetro EUR, para representa o crescimento, têm limitações, já que alguns dos principais processos fisiológicos que influenciam no crescimento das culturas (fotossíntese e a respiração) respondem diferentemente as variações das condições ambientais (Loomis & Amthor, 1999; Lizaso *et al*, 2005). Alguns modelos, como exemplo, o QCANE (Liu & Bull, 2001), tem mais preocupação com a relação dos fatores ambientais com os processos fisiológicos. Nesse modelo o processo de crescimento da cultura inclui estimativas da fotossíntese e a respiração, e são funções do desenvolvimento da cultura e das variações dos elementos ambientes.

Segundo Goudriaan (1986), para a computação da fotossíntese bruta de uma folha considera-se a curva de resposta da assimilação de CO₂ em função da RFA absorvida ou interceptada expressa a forma hiperbólica. Nos modelos existentes, a fotossíntese é simulada após a contabilização da variação de luz diária e da atenuação da luz dentro do dossel, ou seja, da luz interceptada, mais alguns parâmetros fotossintéticos da cultura, tais como a eficiência fotossintética e a fotossíntese máxima. Esses últimos parâmetros expressam o caráter assintótico da taxa fotossintética em função de uma crescente densidade de fluxo de luz até a saturação. A mais comum equação usada para descrever esta relação é uma hiperbólica retangular, e, é base de muitos modelos de crescimento de cultura (Thornley, 1976). Além da necessidade de mensurar os parâmetros fisiológicos, a grande dificuldade em estimar a fotossíntese é a contabilização da variação de luz ao longo do dia, uma vez que medidas de irradiância solar (R_g - densidade de fluxo de energia solar que chega em uma superfície por unidade de tempo e unidade de área, em $J\ m^{-2}\ s^{-1}$) são escassas. Porém, existem algumas equações na literatura que modelam a variação da irradiância no decurso do dia através da irradiação solar (H_g - quantidade de energia solar que chega a uma superfície durante certo período de tempo, em $J\ m^{-2}$) total diária (Anisimov & Fukshansky, 1997; Liu, 1996).

As equações dos modelos, de um modo geral, assumem que a produção de biomassa é apenas função da radiação solar interceptada, e consideram a ausência de estresse ambiental.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Características da Área Experimental e Manejo da Cultura

A pesquisa foi conduzida na área experimental do Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus Delza Gitaí (09°28'02"S; 35°49'43"W; 127m) em Rio Largo, Alagoas. A área total de cultivo foi de 5.292 m². O solo local foi classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso argissólico, de textura média/argilosa. As avaliações foram realizadas no período de 02/2008 a 02/2009, na primeira soca (segunda folha) de nove variedades de cana-de-açúcar (RB92579, RB863129, RB931003, RB93509, RB72454, RB867515, RB951541, RB971755 e RB98710).

O cultivo foi irrigado por um sistema de gotejamento subsuperficial, funcionando com fitas gotejadoras de 22 mm, com gotejadores de vazão de 1 L h⁻¹, espaçado a cada 0,5 metros, a uma pressão de 1,4 kg cm⁻².

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições. As parcelas foram constituídas de nove linhas de 15 m, conforme croqui da área experimental (Figura 1 do Anexo). As plantas foram distribuídas em espaçamento combinado de 1,40 e 0,40 m (média de 0,9m), conforme ilustrado na Figura 2, e toletes distribuídos de maneira que o arranjo fosse em média 18 gemas por metro linear.

A adubação realizada em fundação, antes do plantio no fundo dos sulcos, foi de 50 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), 145 kg ha⁻¹ de pentóxido de fósforo (P₂O₅), 100 kg ha⁻¹ de óxido de potássio (K₂O). As adubações ditas de coberturas foram feitas por meio de fertirrigação. A adubação feita no primeiro ano (primeira folha - cana planta) foi de 100 kg ha⁻¹ de N e os micronutrientes aplicados foram sulfato de zinco (7 kg ha⁻¹), sulfato de cobre (5 kg ha⁻¹), sulfato de manganês (12 kg ha⁻¹) e HB (6,5 kg ha⁻¹). No segundo ano (segunda folha - cana soca) foi feita adubação com 233 kg ha⁻¹ de uréia, 152 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio, 138 kg ha⁻¹ de sulfato de potássio, o que equivale a 104 kg ha⁻¹ de N, 91 e 69 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente. As doses de micronutrientes utilizadas foram 9,25 Kg ha⁻¹ de polifol G5 (4,5% de Mg, 6% de S, 6% de B, 2% de Cu, 0,1% de Mo, 4% de Zn) e 6 Kg ha⁻¹ de polifol Mn (22% de Mn).

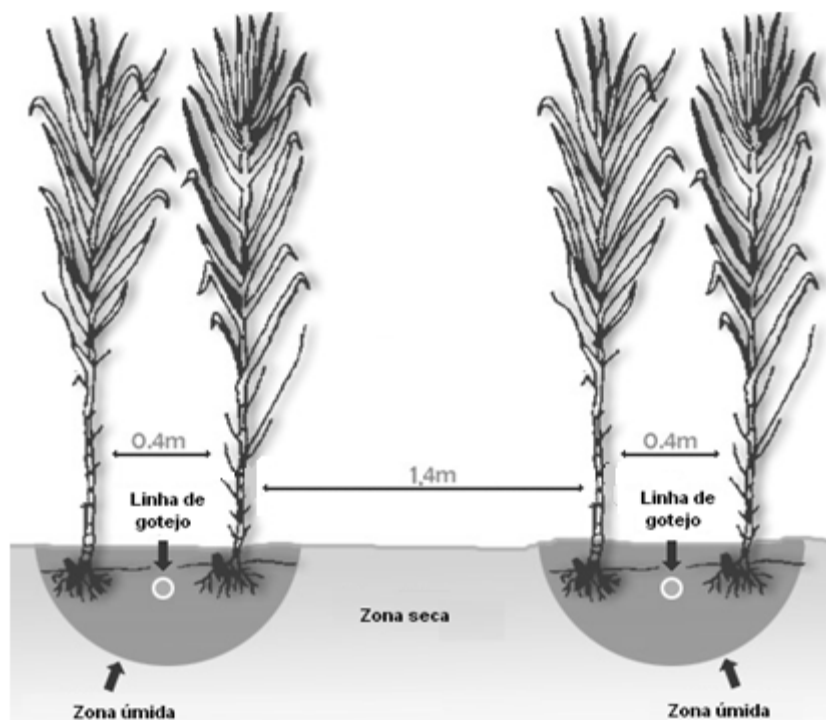


Figura 2. Esquema dos espaçamentos entre linhas e posicionamento das mangueiras de gotejamento.

3.2 Medidas Biométricas, Produtividades e Agrometeorológicas

As medidas biométricas (comprimento e largura das folhas), para a determinação da área foliar (AF) da cultura, foram realizadas em 12 plantas por variedades, nos seguintes dias após o corte (DAC) da cana planta (20/02/08): 90, 128, 146, 176, 203, 245, 266, 299 e 336 dias. Nos mesmos dias avaliou-se o perfilhamento (número de plantas por metro), utilizando-se de três metros lineares da mesma linha no qual estavam as plantas consideradas na determinação do comprimento e largura das folhas, em cada parcela.

O índice de área foliar (IAF) foi obtido como a razão entre a AF e a área ocupada pela planta (AS), conforme a seguinte equação:

$$IAF = AF / AS \quad (1)$$

em que AF foi determinada segundo a metodologia descrita por Hermann e Câmara (1999), pela seguinte equação:

$$AF = (C \cdot L \cdot 0,75)(n+2) \quad (2)$$

em que, C é o comprimento da folha +3 (cm), L é a largura da folha +3 (cm), 0,75 é o fator de forma para área foliar para a cultura do milho (Francis *et al*, 1969), também utilizado para a cultura da cana-de-açúcar e n é o número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde, dois (2) é um fator de ponderação para folhas que ainda não estão expandidas completamente. Já AS foi obtido em relação ao espaçamento (E, 90 cm) do cultivo e um metro linear (H, 100 cm), pois a AF média das plantas determinada por parcela era multiplicada pelo número de perfilhos (NP) (colmos viáveis) médios em um metro linear. Assim, o IAF (adimensional) foi calculado como:

$$IAF = \frac{(C \cdot L \cdot 0,75) \cdot (n + 2) \cdot NP}{E \cdot H} \quad (3)$$

Para o cálculo do IAF diário no decorrer do cultivo, tomaram-se os valores medidos e efetuaram-se ajustes de funções matemáticas em relação aos graus-dia acumulado no longo do cultivo através de programa computacional. A equação utilizada foi a da distribuição Log-Normal, com quatro parâmetros.

$$y = a + b \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln(x/c)}{d} \right)^2 \right] \quad (4)$$

em que, “a” é mínimo de y, “b” é a amplitude de y (IAF), “c” é o valor de x (GD) no qual y é máximo e “d” indica o grau de decaimento da variável y.

A produtividade agrícola ou toneladas de colmos por hectare (TCH) foi determinada com auxílio de um dinamômetro, com capacidade para 1.000 kg, acoplado a uma carregadeira, as duas linhas centrais de cada parcela (30 metros lineares). As análises da variável agroindustrial foram feitas no Laboratório da Usina Santa Clotilde, localizada em Rio Largo - AL. A produtividade de açúcar ou toneladas de açúcar por hectare (TPH) foi obtida através do produto entre a TCH e a POL de cana correspondente de cada parcela, dividido por cem. O TCH e o

TPH das variedades foram submetidas à análise de variância, através do programa estatístico SISVAR 4.0 (Ferreira, 2000).

Os dados agrometeorológicos usados no estudo foram obtidos na estação agrometeorológica do CECA localizada, próxima da área experimental (Figura 3). A precipitação pluvial foi medida por um pluviômetro automático (TB3, *Hydrological Services PTY. LTD.*, Sydney, Austrália) instalado a 1,5 m acima da superfície do solo. A temperatura e umidade relativa do ar foram mensuradas por um termohigrômetro automático (HMP45C, *Campbell Scientific*, Logan, Utah), instalado a 2,0 m acima da superfície do solo. A irradiância solar global (R_g , $W\ m^{-2}$) foi obtida por um piranômetro (CM5, *Kipp and Zonen*, , Delft, *The Netherlands*) e faixa espectral de 305-2800 nm. A velocidade do vento a 2 m foi obtida por anemômetros automáticos (Modelo RM Young, *Campbell Scientific*). Os sensores estavam interligados a um sistema de aquisição de dados (*Microllogger 21XL*, *Campbell Scientific*), realizando medidas a cada 10 segundos e armazenando médias a cada 10 minutos.



Figura 3. Vista aérea do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, com destaque da área localizada a Estação Agrometeorológica (retângulo amarelo) e da área experimental (retângulo vermelho).

3.3 Análise Ambiental

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO (Allen *et al*, 1998) conforme a equação:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \left(\gamma \frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e)}{\Delta + \left[\gamma (1 + 0,34 u_2) \right]} \quad (5)$$

em que, R_n é o saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹), G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹), foi considerado igual a 0 (zero), u₂ é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹), e_s é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa), e é a pressão do vapor d'água do ar (kPa), T é a temperatura do ar (°C), Δ = inclinação da curva da pressão de vapor saturado versus temperatura (kPa °C⁻¹) e γ = coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹). A R_n foi obtida como fração da H_g (R_n = 0,572 H_g; com coeficiente de determinação (r²) igual a 0,927), feita com medições em grama com condições padrões (Allen *et al*, 1998), realizadas pelo Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (LARAS) da UFAL.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi calculada multiplicando-se a ET_o pelo coeficiente de cultura (K_c):

$$ET_c = ET_o K_c \quad (6)$$

em que, a variação do K_c nas fases de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar foi definida através de observações de cultivo (cobertura foliar e altura de planta) e da estação do ano, seguindo a metodologia indicada por Doorenbos & Kassan (1979).

O balanço hídrico em escala decendial (dez dias) foi feito pelo método de Thornthwaite & Mather (1957). Foi considerada uma capacidade de armazenamento água disponível (CAD) no solo de 60,0 mm, em uma profundidade efetiva do sistema radicular em torno de 0,60 m, conforme dados físico-hídricos do solo da área da pesquisa, determinada no Laboratório de Solo, Água e Energia - CECA/UFAL. Foi considerada com entrada de água no sistema

a precipitação pluvial mais a irrigação e a saída a evapotranspiração da cultura (ETc). Os cálculos foram realizados através de uma planilha no Microsoft Excel.

Os cálculos dos graus-dia foram realizados seguindo a metodologia de Liu *et al.* (1998), considerando os valores da temperatura média do ar, da temperatura-base e as temperaturas ótima, sub-ótimas e supra-ótimas, para a cana-de-açúcar, de acordo com as seguintes considerações:

$$GD_t = \sum_{j=1}^n GD_j \quad (7)$$

em que, GD_t é o graus-dia para completar o ciclo ou período considerado ($^{\circ}\text{C d}$); n é o número de dias do período, GD_j é o graus-dia para cada j dia ($^{\circ}\text{C d}$).

$$GD_j = GDg_j - GDa_j - Tb \quad (8)$$

em que, GDg_j é o graus-dia nas condições de temperaturas sub-ótimas, para cada j dia ($^{\circ}\text{C}$); GDa_j é o efeito adverso da alta temperatura no desenvolvimento da cultura, no dia j considerado ($^{\circ}\text{C}$); Tb é o temperatura-base (20°C), que foi baseada em pesquisas de Bachi & Souza (1978) e Liu *et al.* (1998), que na fase de alongamento dos colmos (fase de maior tempo de duração) utilizaram essa temperatura.

$$GDg_j = \begin{cases} \frac{Tmin_j + Tmax_j}{2}, & Tb \leq Tmin_j \\ \frac{Tmin_j + Tmax_j}{2} + \frac{(Tb - Tmin_j)^2}{2(Tmax_j - Tmin_j)}, & Tmin_j < Tb < Tmax_j \\ Tb, & Tb \geq Tmax_j \end{cases} \quad (9)$$

em que, $Tmin_j$ é a temperatura mínima do ar do dia ($^{\circ}\text{C}$); $Tmax_j$ é a temperatura máxima do ar do dia ($^{\circ}\text{C}$).

$$GDa_j = \begin{cases} 0, & T_{max_j} < T_o \\ \frac{(T_s - T_b)(T_{max_j} - T_o)^2}{2(T_s - T_o)(T_{max_j} - T_{min_j})}, & T_o > T_{min_j}, \quad T_{max_j} < T_s \\ \frac{T_{max_j}(T_{max_j} - 2T_b) - T_o(T_s - T_b) + T_s T_b}{2(T_s - T_o)}, & T_o > T_{min_j}, \quad T_{max_j} \geq T_s \\ \frac{(T_s - T_b)(T_{max_j} + T_{min_j} - 2T_o)}{2(T_{max_j} - T_{min_j})}, & T_o \leq T_{min_j} < T_s, \quad T_{max_j} < T_s \\ \frac{T_{max_j} + T_{min_j}}{2} - T_b - \frac{(T_o - T_b)(T_s - T_{min_j})^2}{2(T_s - T_o)(T_{max_j} - T_{min_j})}, & T_o \leq T_{min_j} < T_s, \quad T_{max_j} \geq T_s \\ \frac{T_{max_j} + T_{min_j}}{2} - T_b, & T_{min_j} > T_s \end{cases} \quad (10)$$

em que, T_s é a temperatura de saturação (40 °C); T_o é a temperatura ótima para o desenvolvimento da cana (30 °C).

A RFA foi estimada como 44 % da H_g . Essa relação representa o valor médio determinado para a região de estudo (Souza *et al*, 2003a). A RFA_{INT} foi calculada por diferença, pela seguinte relação (Varlet-Grancher *et al*, 1989):

$$RFA_{INT} = RFA - RFA_T \quad (11)$$

em que, RFA_T é a radiação fotossinteticamente ativa transmitida, estimada usando a equação similar a Lei de Beer :

$$RFA_T = RFA \exp(-kIAF) \quad (12)$$

em que, k é o coeficiente de extinção da luz pelo dossel (adimensional). O coeficiente de extinção utilizado foi obtido de Inman-Bamber (1994), com valor igual a 0,58.

Caracterizaram-se as condições diárias de nebulosidade pelo o índice de claridade (K_t). Quando $K_t \leq 0,3$ o dia foi definido como nublado (NB), $0,3 < K_t < 0,7$ parcialmente nublado (PN) e $K_t \geq 0,7$ céu claro (CL). O K_t foi determinado pela razão entre a irradiação (integral da irradiância) solar diária (H_g) e a irradiação solar esperada numa superfície horizontal no topo da atmosfera (H_o):

$$Kt = \frac{H_g}{H_o} \quad (13)$$

em que H_o foi obtido em função da latitude local, declinação solar e o ângulo horário (Iqbal, 1983; Souza *et al*, 2005).

3.4 Fotossíntese Bruta e Análise Temporal de Crescimento

A estimativa da fotossíntese bruta diária (FB_d , kg m^{-2} de CO_2) foi através de uma solução numérica, baseada em uma abordagem trapezoidal, conforme metodologia de Liu (1996):

$$FB_d = \frac{N}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{FB_{INST} [RFA_{INST}(t_i)] + FB_{INST} [RFA_{INST}(t_{i+1})]}{2} \right] \quad (14)$$

em que, taxa fotossintética bruta instantânea (FB_{INST} , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de CO_2) é obtida por:

$$FB_{INST} = \left[\frac{F_{MAX}}{k} \text{Ln} \left(\frac{\alpha k RFA_{INST}(t_i) + (1-\tau) F_{MAX}}{\alpha k RFA_{INST}(t_i) e^{-k IAF} + (1-\tau) F_{MAX}} \right) \right] \quad (15)$$

em que, α (kg J^{-1} de CO_2) é a eficiência fotossintética, RFA_{INST} é a irradiância fotossinteticamente ativa (W m^{-2}), F_{MAX} ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de CO_2) é a fotossíntese máxima, ou seja, é o valor assintótico da taxa fotossintética em densidade de fluxo de luz saturante, N é o fotoperíodo calculado em função do dia do ano e a latitude, n é o numero de trapézios. Os valores de α e F_{MAX} para cana-de-açúcar foram respectivamente, $10,88 \text{ kg J}^{-1}$ de CO_2 e $1,57 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de CO_2 (Liu, 1996; Hartt & Burr, 1967).

A FB_d também foi calculada com a RFA_{INST} estimada pela irradiação diária fotossintética e pelo fotoperíodo. Assumiu-se que a variação diária de RFA_{INST} é simétrica, similar a uma curva-seno. Através de uma equação usada por Monteith (1965), conforme foi mostrado por Liu (1996).

$$RFA_{INST}(t_i) = \frac{\pi RFA}{2N} \text{sen}\left(\frac{\pi i}{n}\right) \quad (16)$$

A análise de concordância da FB calculada com a irradiância estimada pela irradiação e o fotoperíodo, em comparação a FB determinada com a irradiância medida, foi feita com base no índice de concordância “d” (Willmontt, 1982), que indica em termos relativos, a concordância entre métodos e medidas. O índice “d” foi obtido pela expressão:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| - |O'_i|)^2} \right], \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (17)$$

em que, O_i é os resultados obtidos da FB com irradiância medida, P_i é os resultados obtidos da FB com irradiância estimada pela irradiação e fotoperíodo, $P'_i = P_i - \bar{O}$, $O'_i = O_i - \bar{O}$, $\bar{O}$ é a média dos resultados obtidos da FB com irradiância medida e n é o número de dados analisados. Os limites de concordância e distribuição individual entre as dois métodos foram avaliados através da técnica de plotagem proposta por Bland & Altman (1986). Onde, os limites de concordância são determinados como as diferenças média dos dois métodos $\pm$ o produto de 1,96 pelo desvio padrão das diferenças (média $\pm$ 1,96 DP).

As correlações de produtividade agrícola com RFA_{INT} e FB acumuladas no ciclo e as de TPH com a RFA_{INT} e FB acumuladas no ciclo das variedades pesquisadas foram feitas através do software Microcal (TM) Origin® versão 6.0.

Para realização das análises temporal de crescimento da cultura, (IAF e os conseqüentes acúmulos de RFA_{INT} e FB em diferentes épocas de início de cultivos) considerou-se que a cultura foi cortada no primeiro dia de cada mês do ano e tinha um ciclo de 365 dias. O IAF usado nessa análise foi referente ao da variedade RB93579 (Variedade com maior produtividade). Primeiramente foram estimados os IAF, na escala diária, em função dos graus-dia acumulados. Posteriormente, considerando que a dinâmica do IAF representa o cultivo

simulado, calculo-se as diárias RFA_{INT} e FB, conforme as equações 11 e 14, respectivamente. Por fim, foram integradas as RFA_{INT} e FB diárias ao longo do ciclo para a obtenção dos valores acumulados dessas variáveis. As análises foram realizadas para quatro anos, utilizando os dados meteorológicos de cinco anos consecutivos (2004 – 2008). Os meses de início das simulações foram plotados com os seus correspondentes valores acumulados de RFA_{INT} e FB dos quatro anos, e foram submetidos a análise de regressão por um modelo polinomial de terceiro grau, através do software SigmaPlot versão 10.0 para Windows.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condições Hídricas e Térmicas

A precipitação pluvial durante os 12 meses de cultivo foi de 1.923 mm (Figura 4). Esse total superou o consumo hídrico potencial ou evapotranspiração da cultura que, no mesmo período, foi de 1.510 mm. Porém, devido à irregular distribuição da chuva, foi necessário aplicar uma lâmina bruta de irrigação de 699 mm. A ET_c média diária foi de 4,3 mm, valor próximo ao encontrado por Lyra *et al.* (2007), para a mesma região de estudo, que foi de 4,6 mm d⁻¹.

Na Figura 4, notou-se que em vários decêndios ocorreu elevada precipitação pluvial, o que resultou na aplicação de apenas 61 mm de irrigação, entre os decêndios 5 (11-20/02/2008) e 25 (01-10/09/2008). Porém, a partir do decêndio 26 (11-20/09/08), quando inicia a estação seca da região (Souza *et al.*, 2003b), até o 1º decêndio de 2009 (01-10/01/2009), ocorreu maior consumo de água pela cultura que a precipitação pluvial, sendo necessária a aplicação de 637 mm via irrigação. No segundo decêndio do ano de 2009 (11-20/01/2009), após ser suspensa a irrigação (07/01/2009), para aumentar a concentração de sacarose nos colmos e reduzir a compactação do solo pelas máquinas de colheita, ocorreu precipitação (40,6 mm), e, nos dois decêndios subsequentes (21/01-10/02/2009) houve também precipitação de 106,1 mm, que praticamente ocorreu (102,1 mm) em um dia (349 DAC). Assim, após essa chuva a colheita foi realizada depois de apenas quinze dias, pressupondo que a concentração de sacarose sofreu interferência.

O balanço hídrico da cultura no decorrer do ciclo de cultivo mostrou déficit hídrico de apenas 92 mm (Figura 5), uma vez que a área do cultivo foi irrigada. Desse total, 67 mm ocorreu após o primeiro decêndio de 2009, ou seja, no decêndio que foi programada a suspensão da irrigação. Logo, de maneira geral, o cultivo não teve restrição hídrica que desfavorecessem os processos fisiológicos de crescimento e desenvolvimento.

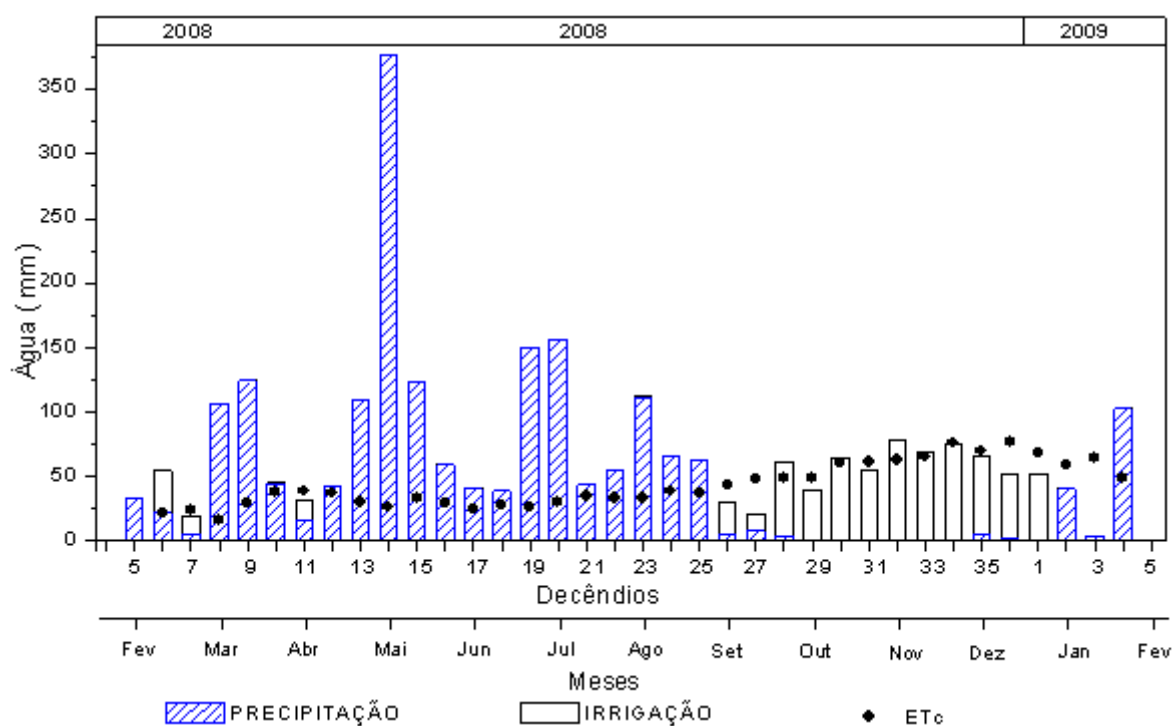


Figura 4. Entrada (precipitação pluvial + irrigação) e saída (evapotranspiração da cultura, ETc) de água no cultivo (2ª folha) de cana-de-açúcar, em Rio Largo – AL, entre os anos 2008-2009.

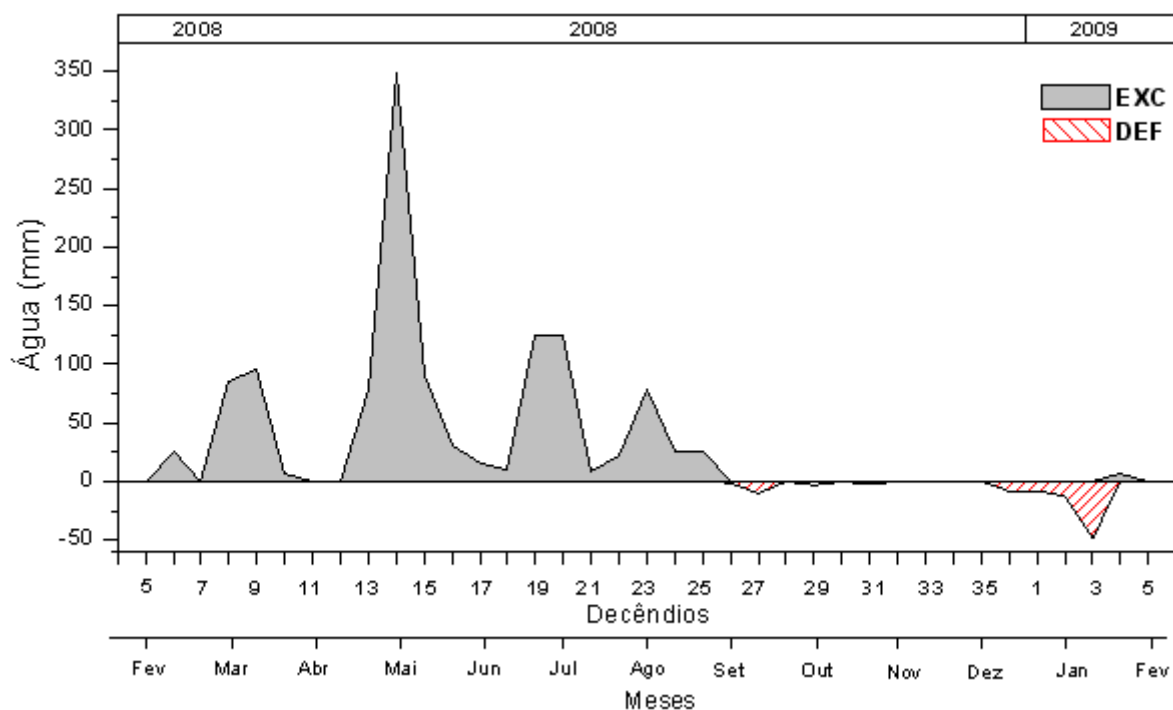


Figura 5. Déficit (DEF) e excesso hídrico (EXC) no cultivo de cana irrigada (2ª folha) pelo método de Thornthwaite e Mather (1957), em Rio Largo - AL, entre os anos 2008-2009.

Durante o ciclo da cultura, a temperatura média diária do ar variou entre 20,1 e 28,2 °C (Figura 6), não ocorrendo limitação térmica para o desenvolvimento das plantas, visto que, quando a temperatura ultrapassa 20 °C, há aumento na taxa de crescimento da cultura, sendo que o intervalo entre 25 °C e 33 °C é considerado ótimo ao desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar (Almeida *et al.*, 2008). As temperaturas do ar inferior a 20 °C que ocorreram durante o ciclo da cultura (Figura 6), não ocasionaram perda de eficiência dos processos de crescimento, tal como a fotossíntese, uma vez que foram observados no período noturno. Assim, pressupõe-se que as baixas temperaturas do ar ocorridas durante a noite ao invés de causar perdas proporcionaram ganhos, já que a diminuição do metabolismo (respiração) (Teh, 2006).

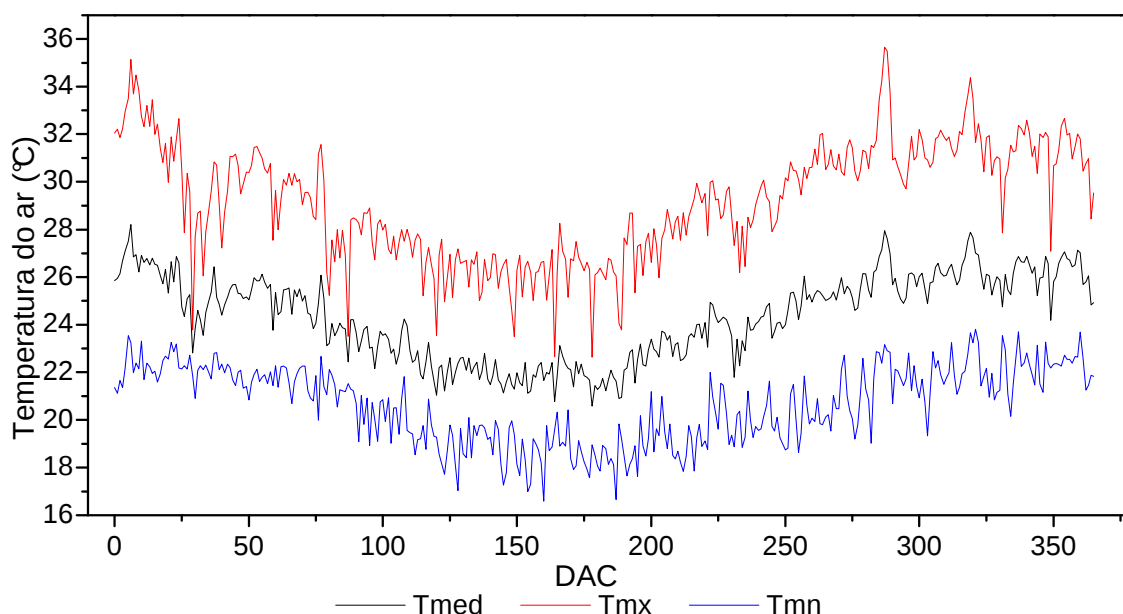


Figura 6. Temperatura média, mínima e máxima do ar em função ao dias após o corte (DAC) durante o ciclo cultura da cana-de-açúcar em Rio Largo - AL.

A temperatura do ar do início do cultivo (fevereiro) até o 175 DAC (agosto), teve tendência de decréscimo. Essa tendência está, principalmente, associada à maior nebulosidade. Na metade final do ciclo ocorreu o oposto, ou seja, o padrão foi de aumento da temperatura, devido ao fim da estação chuvosa, com redução da nebulosidade, o que resultou em maior disponibilidade de radiação e aumento da partição da energia para o aquecimento do ar.

4.2 Índice de Área Foliar e Graus-dia

Os valores de IAF das variedades RB de cana-de-açúcar ao longo do ciclo quando correlacionados com os graus-dia acumulados (GD) (Figura 7), apresentaram elevados r^2 entre 0,81 - 0,96 (Tabela 1). As correlações entre o IAF e GD são primordiais para a estimação dos valores de IAF diários ao longo do cultivo, e possibilitam a estimativa dos componentes do balanço de radiação em escala diária, já que a área foliar, representada pelo IAF, é variável da planta que causa a atenuação da radiação solar incidente. A radiação interceptada é o componente de maior interesse em estudos relacionados com a eficiência de conversão de energia solar em biomassa para determinada cultura, pois é a energia radiante disponível ao processo fotossintético.

A variedade RB93590 foi a que apresentou o maior valor de IAF (IAF Máximo), estimado pelo ajuste com os GD, seguida da variedade RB98710 com IAF de 5,04 (930,685 °C d) e 4,84 (976,331°C d), respectivamente (Figura 7). Porém, essas variedades apresentaram diminuição dos valores máximos de IAF até a colheita, com taxa de variação superior a das demais variedades. Esse comportamento pode ser observado pelo parâmetro d da equação Log-Normal, quanto menor for o valor de d , maior é o grau de decréscimo do IAF após o máximo (Tabela 1). Assim, foi possível que as outras variedades, relativamente, tenham ao final do cultivo interceptado quantidades similares de radiação fotossintética acumulada, tais como as variedades RB931003 e RB92579. No entanto, a variedade RB92579, apesar do IAF máximo (3,84) inferior as variedades RB98710 e RB93509, destacou-se pela maior interceptação de luz acumulada no final do ciclo. Esse desempenho ocorreu devido às elevadas taxas de crescimento do IAF no início do cultivo.

Após o corte da cana-planta, a variedade RB92579 apresentou a melhor capacidade de rebrota, com cerca de 23 % a mais de brotos que as variedades com melhor rebrota após essa variedade (RB92710 e RB867515) no 13 DAC. Esses maiores valores de IAF da variedade RB92579 no início do ciclo coincidem com altos fluxos de radiação solar, o que teoricamente aumenta a diferença da radiação interceptada dessa variedade em relação às demais.

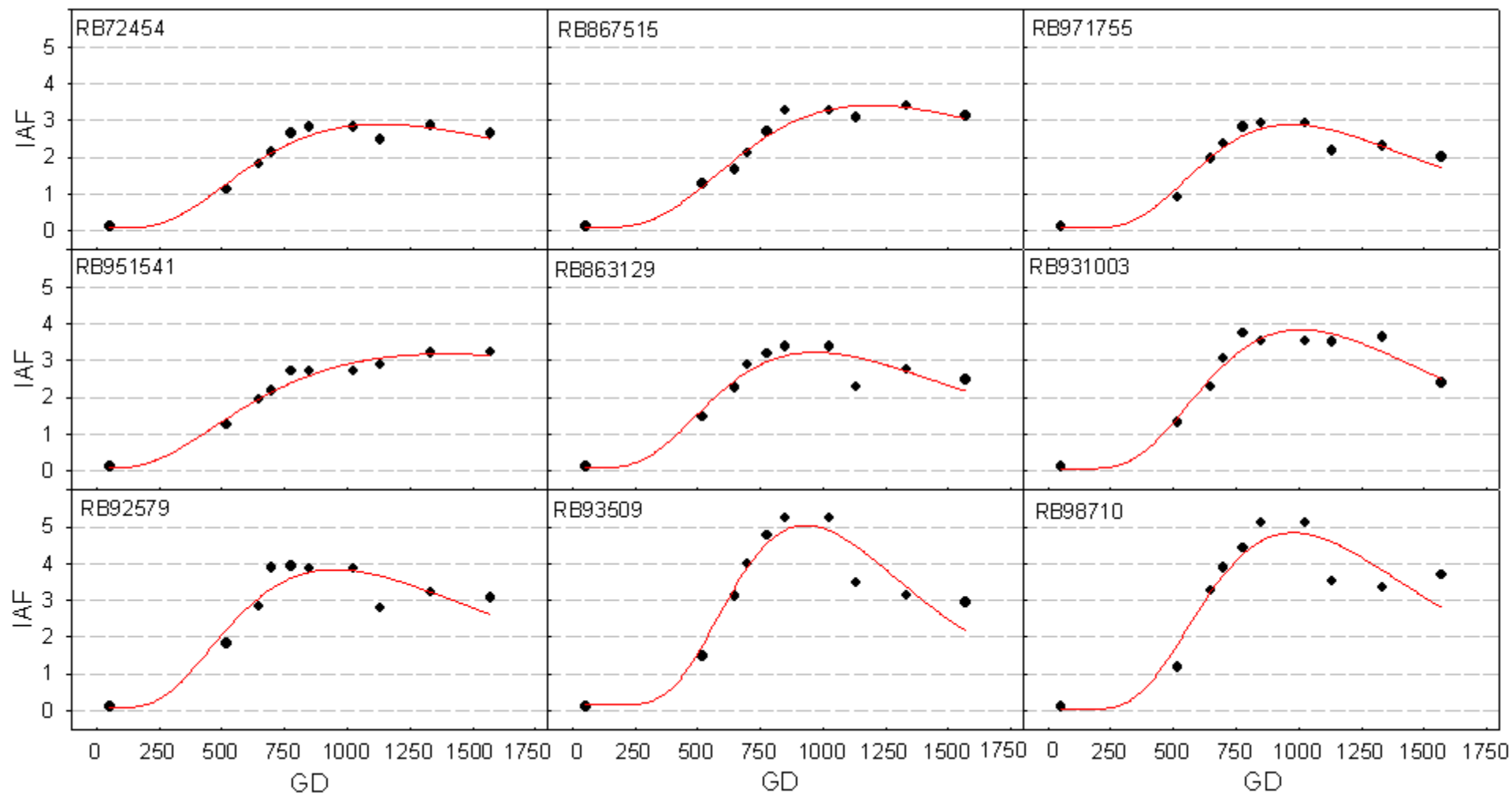


Figura 7. Ajuste de curva Log-Normal, com 4 parâmetros entre o Índice de área foliar (IAF) de variedades RB de cana-de-açúcar e os graus-dia (GD) acumulados em cultivo (2ª folha) irrigado por gotejamento, entre os anos 2008-2009.

Tabela 1. Parâmetros da equação Log-Normal do ajuste entre o índice de área foliar (IAF) e os graus-dia acumulados ao longo do cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar, irrigada por gotejamento, em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

Variedades	a	b	C	D	r²
RB971755	0,0662	2,8231	969,8769	0,4616	0,8832
RB72454	0,0680	2,8291	1132,2123	0,5993	0,9272
RB951541	0,0742	3,1022	1391,2756	0,7634	0,9591
RB863129	0,0863	3,1373	967,2700	0,5328	0,8348
RB867515	0,0903	3,3220	1194,7634	0,5625	0,9456
RB931003	0,0544	3,7827	1007,8375	0,4736	0,9267
RB92579	0,0825	3,7573	950,3443	0,5663	0,8172
RB98710	0,0266	4,8147	976,3309	0,4508	0,8055
RB93509	0,1520	4,8926	930,6848	0,3920	0,8693

A análise de variância do IAF, ao nível de 5% de probabilidade, apresentou diferença significativa entre as variedades (Tabela 1 do Anexo). E, de acordo com os resultados do teste de Tukey, as variedades RB93509, RB931003, RB98710 e RB92579 não tiveram diferenças significativas (0,05) (Tabela 2), essas variedades foram as de maiores produtividades agrícolas, respectivamente.

Tabela 2. Índice de área foliar médio de variedades RB de cana-de-açúcar, irrigada por gotejamento, em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

Variedades	IAF
RB971755	2.234 a
RB72454	2.345 ab
RB951541	2.585 abc
RB863129	2.610 abc
RB867515	2.639 abc
RB931003	3.030 bcd
RB92579	3.239 cd
RB98710	3.657 d
RB93509	3.679 d

Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey (0,05).

4.3 Irradiação Solar, Fotossíntese e Produtividade.

A média diária da H_g foi de $20,9 \text{ MJ m}^{-2}$ do corte da cultura até 70 DAC (fevereiro - abril), período em que ocorreu a brotação (8 DAC) e iniciou o crescimento da área foliar. Por conta disso, a média diária da RFA_{INT} da variedade RB92579 (variedade de maior interceptação no ciclo) nessa fase inicial foi baixa ($1,9 \text{ MJ m}^{-2}$). No dia 30/04/2009 (70 DAC), quando o IAF dessa variedade apresentou valor igual a 1,45, e acumulou até esse dia $121,28 \text{ MJ m}^{-2}$ de RFA_{INT} . Nessa ocasião, a variedade RB92579 apresentou a maior fração de RFA_{INT} ($fRFA_{INT}$) que foi de 0,57 entretanto a variedade RB971755 mostrou a menor $fRFA_{INT}$ (0,31).

Apesar da baixa interceptação de luz, de fevereiro a abril (70 DAC), em relação aos valores posteriores do ciclo, a média da H_g diária foi elevada quando comparada com a do período chuvoso da região, maio - agosto (71 - 193 DAC), que apresentou valor médio de $14,9 \text{ MJ m}^{-2}$ (Figura 8). Os menores valores de H_g nos meses chuvosos foram devidos, principalmente, a elevada nebulosidade (K_t média de 0,48) (Figura 9) e pequena diminuição da radiação extraterrestre, esse último, devido o aumento do ângulo zenital dessa época do ano. Com isso, no período de alta demanda energética da cultura (fase de crescimento vegetativo intenso), a interceptação absoluta de luz pela plantas não é maximizada por conta da redução da radiação solar incidente. Já que o aparato interceptador (área foliar) apresentou continuo crescimento ao longo deste período. A variedade RB93509 apresentou o maior valor de IAF (4,79) e as variedades RB951541 e RB72454 os menores (2,51). Durante o período chuvoso a amplitude da RFA interceptada das variedades foi 0,42 a 0,84, sendo que a variedades RB98710, interceptou no final desse período (193 DAC) 95 % da RFA . Essa porcentagem é considerada como o completo fechamento da cobertura vegetal. Pesquisa realizada por Robertson *et al.* (1996), em Queensland, Australia ($18,7^{\circ}\text{S}$; $146,2^{\circ}\text{E}$), reportaram o completo fechamento do dossel ($> 0,95$ de radiação interceptada) foi alcançada em 150 DAC, sem limitação de água. Indicando que, essa variedade Australiana tem elevado potencial de interceptação da radiação solar.

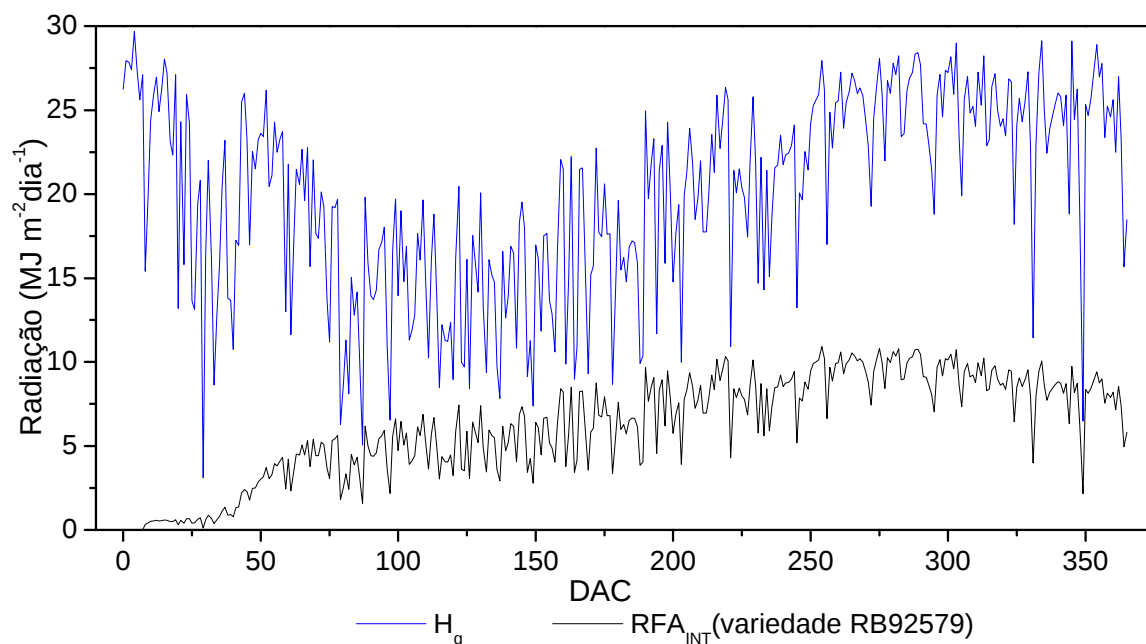


Figura 8. Irradiação solar global diária (H_g) e fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{INT}) da variedade RB92579 em função ao dias após o corte (DAC) durante o ciclo cultura da cana-de-açúcar em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

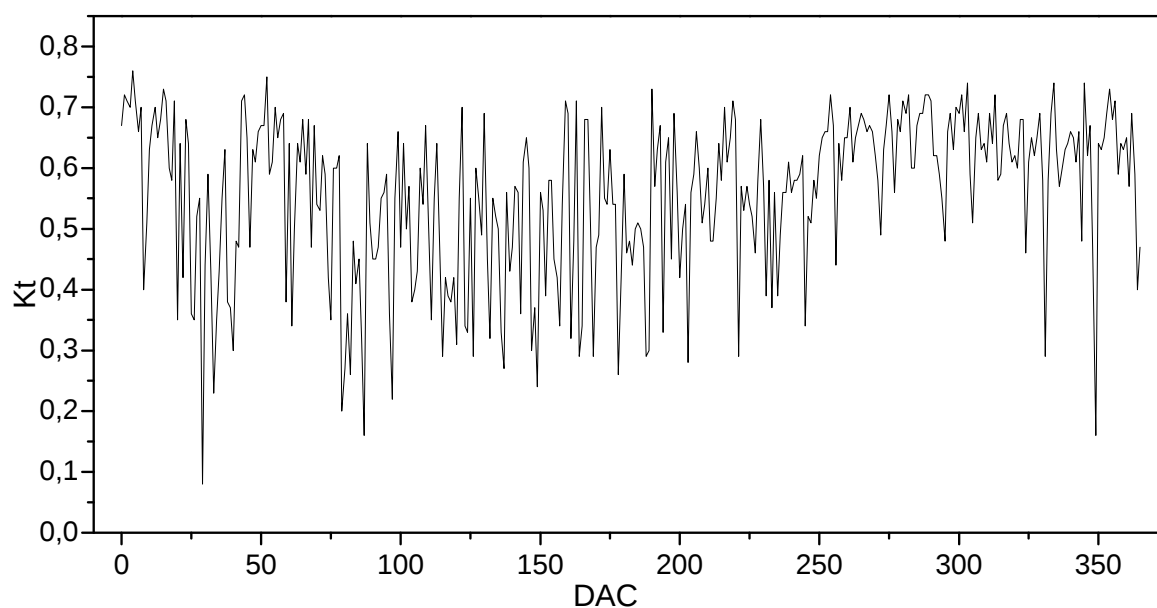


Figura 9. Índice de claridade (K_t) em função ao dias após o corte (DAC) durante o ciclo cultura da cana-de-açúcar em Rio Largo - AL, entre os anos 2008-2009.

A média diária de RFA_{INT} do período chuvoso, das variedades, variou de 4,28 (RB72454) a 5,33 MJ m^{-2} (RB92579 e RB93509). A variedade RB92579 continuou sendo a que mais interceptou luz, com uma acumulo de 776,5 MJ m^{-2}

de RFA_{INT} e a variedade RB971755 a que menor acumulo do início do cultivo até o período (193 DAC) somando $587,7 \text{ MJ m}^{-2}$. O período do ciclo da cultura com maior média diária de RFA_{INT} ($7,49$ a $9,02 \text{ MJ m}^{-2}$) ocorreu entre 194 DAC e 365 DAC (colheita), essa alta média foi resultante da elevada média diária de H_g ($23,3 \text{ MJ m}^{-2}$) e da maior fração de RFA_{INT} média, variou de $0,73$ (RB971755) a $0,88$ (RB98710).

As variedades RB92579 e RB98710 foram as que tiveram maior matéria fresca de colmos industrializados (produtividade agrícola) com médias de $154,63 (\pm 10,13)$ e $139,81 (\pm 10,12)$ toneladas por hectare, respectivamente (Tabela 3). Porém, entre as variedades avaliadas não existiu diferença significativa, pela ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade. O quadro da análise de variância para a produtividade de colmos industrializados pode ser observado na Tabela 2 do Anexo.

Na avaliação da produtividade de açúcar houve uma considerável amplitude entre as variedades ($9,60 \text{ t ha}^{-1}$), onde a variedade RB863129 teve o menor valor ($16,61 \text{ t ha}^{-1}$), entretanto a RB92579 destacou-se com $26,21$ toneladas de açúcar por hectares (Tabela 3). Todavia, a análise de variância, ao nível de 5% de probabilidade, não apresentou diferença significativa entre as variedades em estudo. O quadro da análise de variância para a produtividade de açúcar pode ser observado na Tabela 3 do Anexo.

A variedade RB92579 também foi a que obteve a maior estimativa da fotossíntese bruta ($17,46 \text{ kg m}^{-2}$ de CO_2) seguida, novamente, da variedade RB98710, que teve fixação bruta de CO_2 de $17,26 \text{ kg m}^{-2}$. Entretanto, a radiação fotossinteticamente ativa acumulada nos ciclos dessas variedades foram similares, com diferença menor que $2,0 \text{ MJ m}^{-2}$ (Tabela 3). Do início do cultivo até o 115 dias após o corte, período que as plantas da variedade RB92579 tinham valores de IAF superior aos apresentados pela RB98710, o dossel da RB92579 interceptou $81,76 \text{ MJ m}^{-2}$ a mais que o da RB98710. Em relação à FB acumulada teve diferença de $426,02$ gramas por metro quadrado entre as mesmas variedades, sendo maior na RB92579. A média da H_g nesse período foi elevada com valor de $18,42 \text{ MJ m}^{-2}$. A partir do dia 116 após o corte, a variedade RB98710 interceptou mais RFA que a RB92579, o que resultou em acumulo de RFA_{INT} similar para as duas variedades ao final do ciclo. Todavia, o total de FB e a

produtividade agrícola da variedade RB92579 foram superiores aos obtidos pela RB98710.

Como a densidade de fluxo de luz interceptado pelo dossel é maior quando as plantas têm elevados IAF, a eficiência fotossintética e a fotossíntese máxima (saturação da fotossíntese) minimizaram a diferença da estimativa de FB após o 116 DAC até o fim do ciclo, período que a RB98710 teve IAF e RFA_{INT} superiores a RB92579, e conseqüentemente maior FB. Entretanto, não foi suficiente para superar a diferença que a RB92579 obteve no inicial do ciclo. Assim, mesmo as variedades interceptando valores totais de luz próximos, a variedade RB92579 teve acentuada vantagem de fixação bruta de CO_2 total, que esta relacionada principalmente com a capacidade de rebrotamento inicial.

Tabela 3. Produtividade de colmos (TCH), produtividade de açúcar (TPH), irradiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{INT}), e fotossíntese bruta (FB) para as variedades RB de cana-de-açúcar em cultivo irrigado por gotejamento em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

	TCH (t ha⁻¹)	TPH (t ha⁻¹)	RFA_{INT} (MJ m⁻²)	FB (kg m⁻²)
RB863129	109,88 ± 4,37	16,61	2.075,07	16,30
RB951541	114,81 ± 6,65	18,62	2.098,24	16,46
RB72454	116,67 ± 9,07	18,42	1.995,55	15,22
RB971755	120,99 ± 10,43	18,72	1.875,97	14,98
RB867515	124,69 ± 8,60	20,29	2.080,21	16,32
RB93509	133,33 ± 10,25	21,54	2.223,42	17,13
RB931003	134,57 ± 6,76	21,66	2.128,47	16,53
RB98710	139,81 ± 10,12	23,59	2.260,75	17,26
RB92579	154,63 ± 10,13	26,21	2.262,21	17,47

± erro padrão de quatro repetições.

A estimativa da produtividade de colmos, considerando todas as variedades, em função da RFA_{INT} acumulada, através de uma regressão linear passando pela origem, apresentou um coeficiente de determinação de 0,52 e um coeficiente angular de 0,061 (± 0,002) (Figura 10). Porém, quando foi excluída da análise a variedade RB971755 o r^2 foi de 0,71 e o b de 0,060 (± 0,002). A variedade RB971755 apresentou comportamento diferenciado, uma vez que, mesmo com a menor RFA_{INT} , a variedade teve a produtividade superior a de três variedades que tiveram maior interceptação de luz (RB863126, RB951541 e

RB72454). Isto pode evidenciar que a variedade RB97175 tenha melhor eficiência de conversão da radiação solar em biomassa.

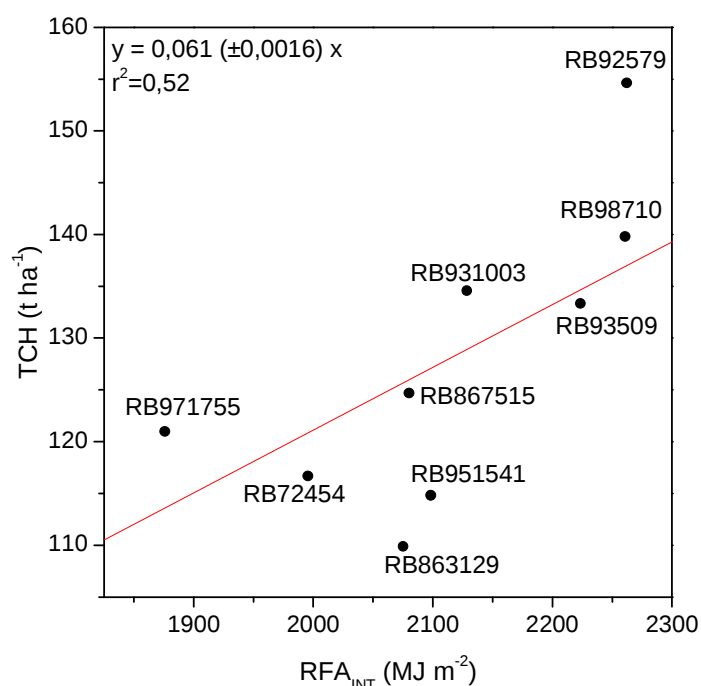


Figura 8. Correlação entre a produtividade de colmos (TCH) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{INT}) acumulada no cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar (2ª folha) irrigado por gotejamento em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

A regressão linear, forçada a passar pela origem, entre a produtividade de colmos e a fotossíntese bruta acumulada ao longo do ciclo, teve um r^2 de 0,49 e um coeficiente angular de 7,764 ($\pm 0,220$) (Figura 11). Porém houve algumas variedades (RB863129, RB72454 e RB971755) que apresentaram comportamentos diferenciados das demais. Assim, quando a análise foi feita sem as variedades RB863129, RB72454 e RB971755 o r^2 apresentou acréscimo, com o valor igual a 0,72 e coeficiente angular similar (7,732). A análise feita por modelo linear passando pela origem, parece ser o mais adequado quando se relaciona fenômenos biológicos. A estimativa da produtividade de açúcar (TPH) das variedades RB em função da RFA_{INT} acumulada, através de uma regressão linear forçada a passar pela origem, apresentou um r^2 de 0,57 e um coeficiente angular de 0,0098 ($\pm 0,0003$) (Figura 12). A TPH também pode ser estimada pela FB acumulada, por um fator de 1,2555 ($\pm 0,0475$) e um r^2 de 0,55 (Figura 13).

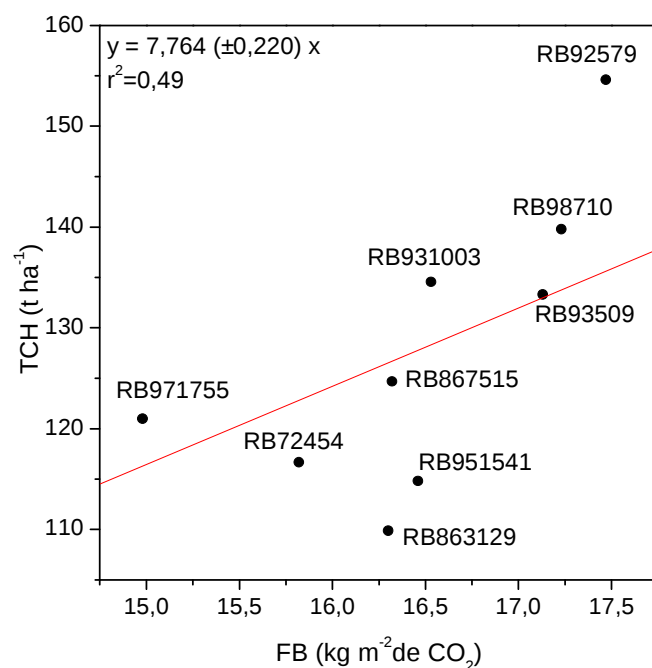


Figura 9. Correlação entre a produtividade de colmos (TCH) e a fotossíntese bruta (FB) acumulada no cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar (2ª folha) irrigado por gotejamento em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

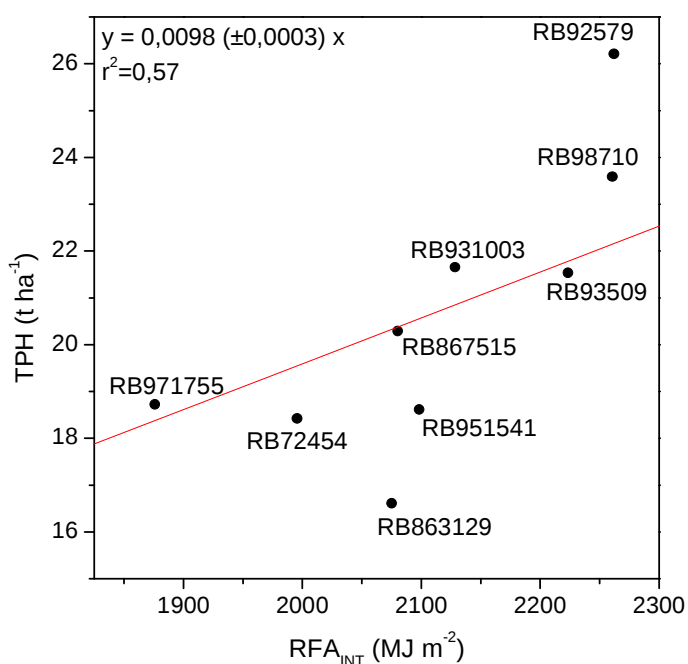


Figura 10. Correlações entre produtividade de açúcar (TPH) e a radiação fotossintética interceptada (RFA_{INT}) acumulada no cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar (2ª folha) irrigado por gotejamento em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

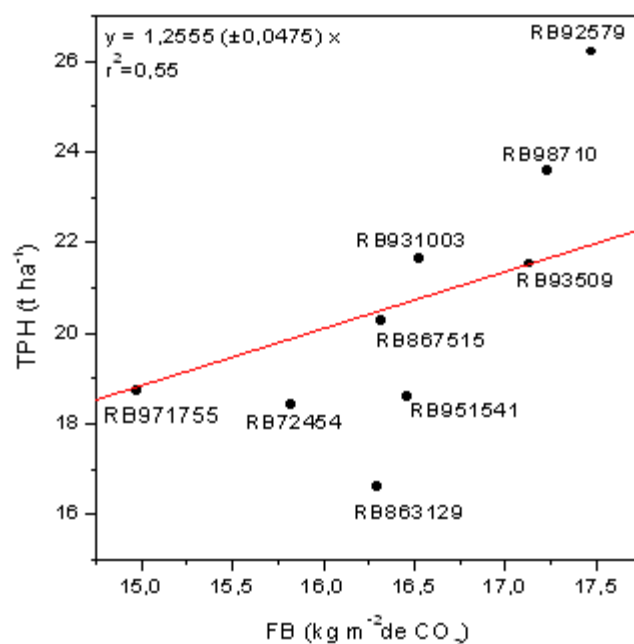


Figura 11. Correlações entre produtividade de açúcar (TPH) e a fotossíntese bruta (FB) acumulada no cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar (2ª folha) irrigado por gotejamento em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

4.4 Distribuição Diária da RFA para Cálculos de Fotossíntese Bruta

A variação da irradiância solar incidente na superfície terrestre é dependente da condição de nebulosidade (índice de claridade, Kt), do ângulo de elevação do sol e da sazonalidade (variação do ângulo zenital) em função do movimento de translação da terra. A curva de distribuição da RFA ao longo do dia é diretamente proporcional a da irradiância solar global. Porém, existe variação na fração entre essas variáveis (RFA_{INST}/R_g) em função do índice de claridade da atmosfera, com valores de 0,435 para condição de céu limpo (CL), 0,445 para parcialmente nublado (PN) e 0,460 para nublado (NB) baseado em medidas realizadas por SOUZA *et al.* (2003a) para a região de estudo.

A equação (16) usada para estimar a variação da irradiância fotossintética pela irradiação diária e o fotoperíodo tem notadamente falta de conformidade com a curva medida nas condições reais. Pois, a curva de distribuição estimada pela irradiação apresenta simetria entre o período da manhã e o da tarde, e considera que não existisse atenuação das nuvens. Assim, sempre haverá diferença entre os valores de irradiância medidos e estimados como mostra dos dias plotados na Figura 14.

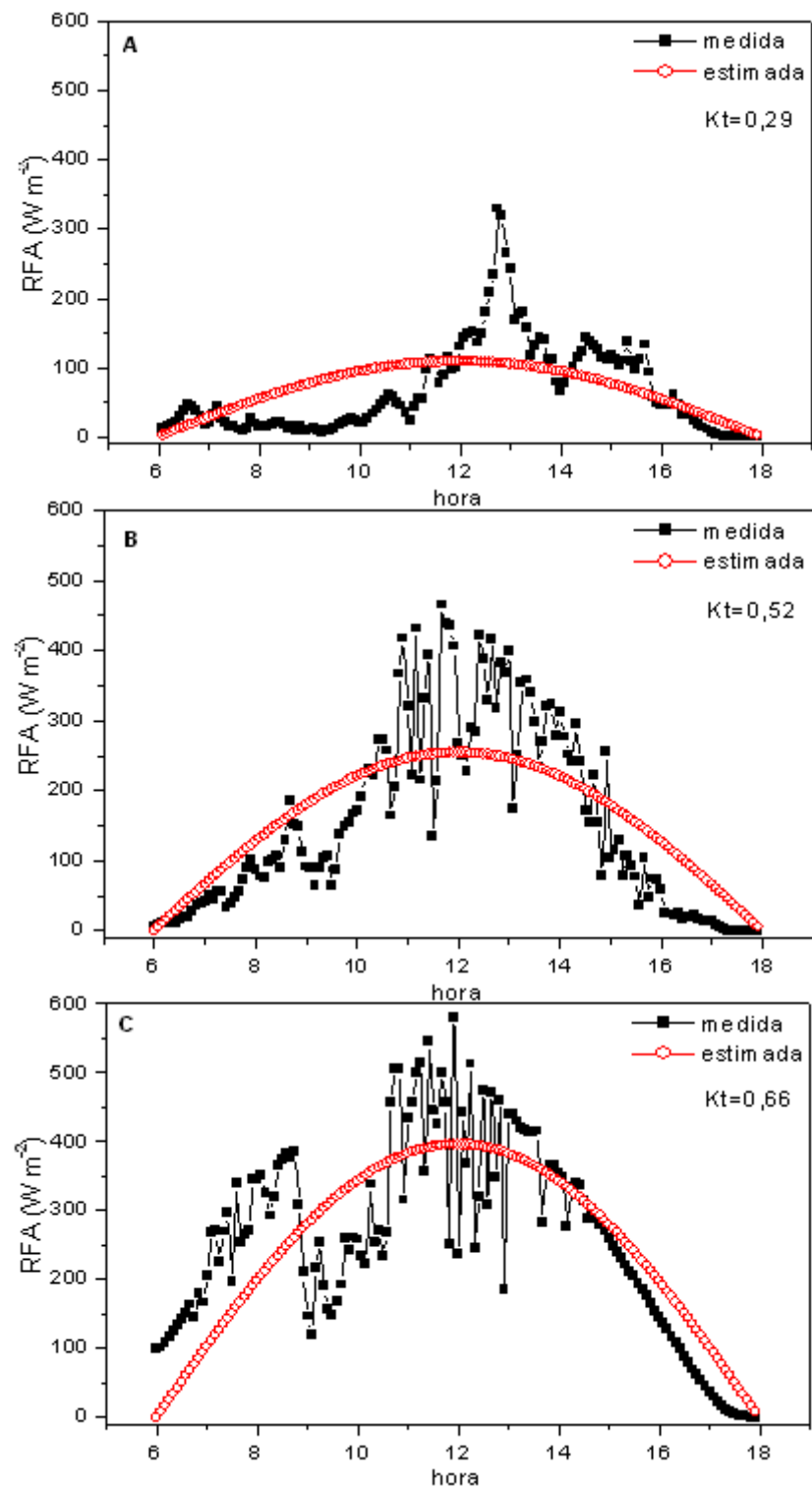


Figura 12. Irradiância fotossintética (RFA) medida e estimada em função da irradiação diária e o fotoperíodo para: A) dia com índice de claridade (K_t) = 0,29 (17/07/2008), B) dia com K_t = 0,52 (03/07/2008) e C) dia com K_t = 0,66 (12/12/2008).

Em todos os dias avaliados, nas diferentes condições de nebulosidade, os picos de irradiância fotossintética foram subestimados. Porém, como essa estimativa da irradiância fotossintética é para ser usada em cálculos de fotossíntese bruta diária, há compensação entre os picos e as depressões. Os resultados das FB diárias calculada através dos dados oriundos da equação (16), que estima a distribuição de luz foram satisfatórias, uma vez que, apresentaram elevada concordância ($d = 0,997$) e também alto coeficiente de determinação ($R^2=0,992$) quando relacionadas com as FB diárias calculadas com os valores de RFA_{INST} medidos. A análise de regressão linear dessa relação resultou na seguinte equação: $y = 0,973 x$, na qual, y é a FB com a variação diária da radiação medida e x é a FB com a variação diária radiação estimada. Na Figura 16, a plotagem de Bland e Altman mostra com maior sensibilidade a concordância entre os métodos. O desvio médio (DM) das diferenças foi de -1,68, o que indica uma proximidade entre os métodos, e que os valores da FB com a radiação estimada foram maiores que os com a radiação medida. As maiorias dos dados encontraram-se dentro dos limites de concordância, que apresentaram baixos valores (2,04 e -5,40).

A Figura 15-A e B mostram a FB diária com a RFA medida e estimada em função dos DAC. Os desvios entre as duas curvas (Figura 15-C) mostra que ocorreu variação entre os cálculos de FB em função da irradiância usada com entrada (medida ou estimada). Notadamente, observou-se através dos desvios, que antes de 252 DAC, os dias tiveram as FB calculada com a irradiância estimada superiores em relação às FB com irradiância medida. Os dias que os desvios foram negativos (FB com irradiância estimada maior) apresentaram K_t médio igual a 0,52. Todavia, o período com dias de desvios positivos (FB com irradiância estimada menor) tiveram média de K_t mais elevada, com valor igual a 0,66. Todas as vezes que o K_t mostrou-se inferior a 0,55 o desvio foi negativo. O maior desvio negativo (-5,8) ocorreu no dia 03/07/2008, no qual o K_t foi igual a 0,52 (Figura 14-B). Dias com K_t inferior a 0,3 (dia de céu nublado) a tendência é de a diferença diminuir, mas do desvio continua negativo, como por exemplo, no dia 17/07/08 (Figura 14-A), que apresentou desvio de -2,9. Nos dias que o K_t foi superior a 0,66, os desvios foram positivos. Porém, o máximo desvio positivo ocorreu no dia 12/12/08 (Figura 14-C) e o K_t foi 0,66.

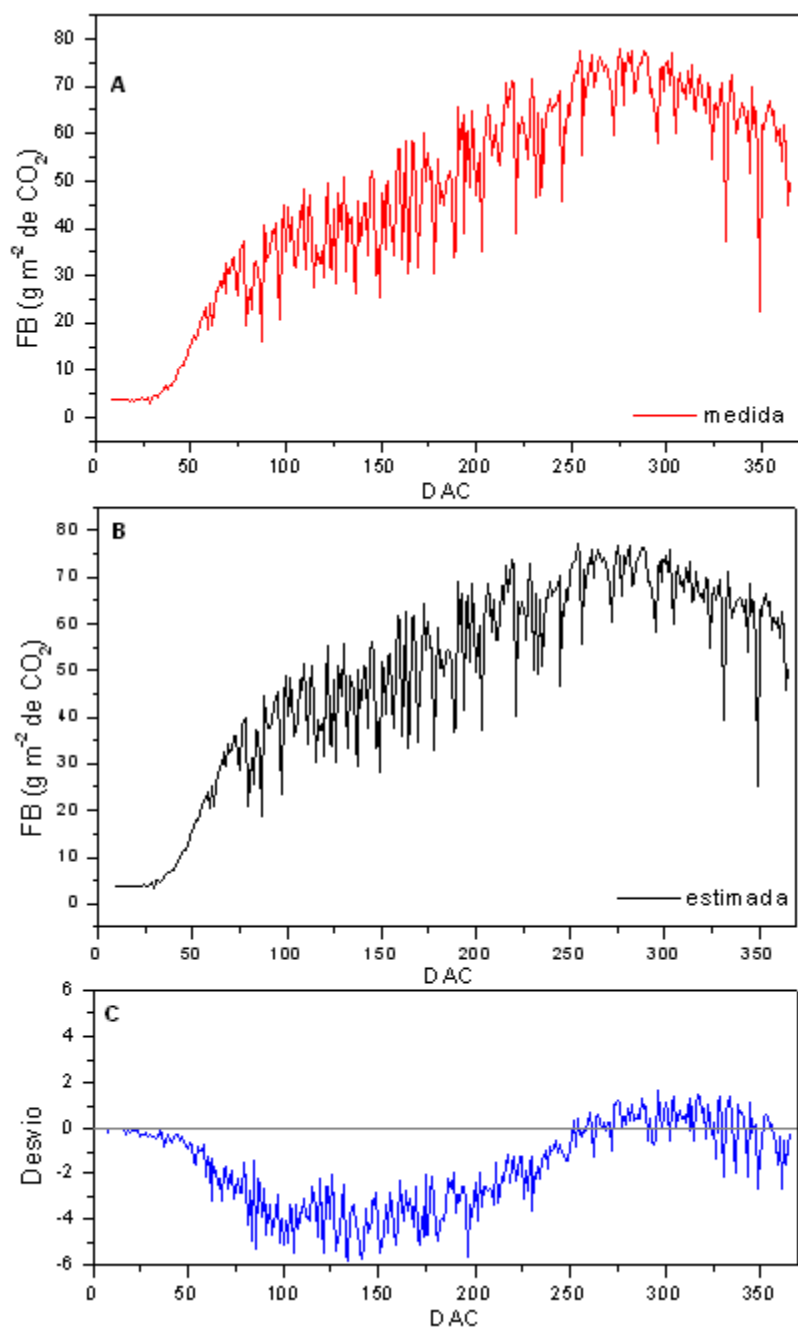


Figura 13. Fotossíntese bruta (FB) diária: A) com dados de irradiância fotossintética medida, B) com dados de irradiância fotossintética estimada pela irradiação em função dos dias após o corte de um cultivo de cana-de-açúcar e C) desvio entre FB com irradiância medida e estimada.

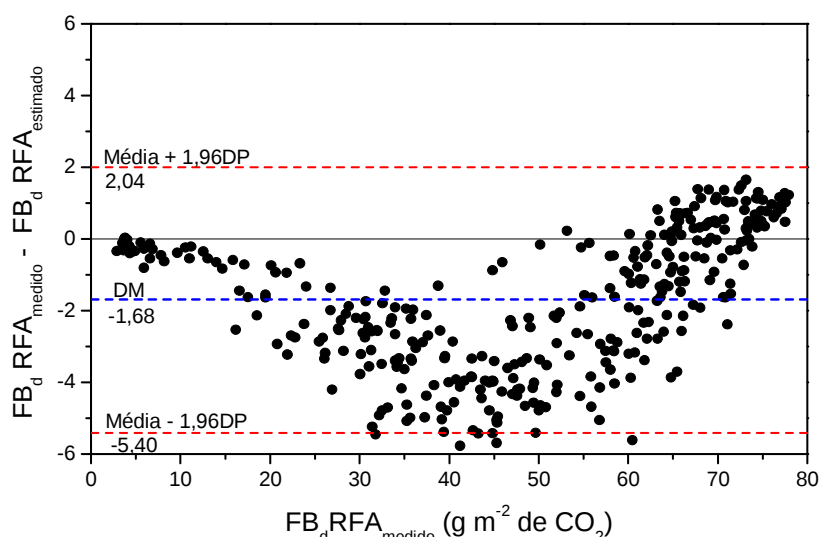


Figura 14. Plotagem de Bland e Altman para os limites de concordância entre os valores de fotossíntese bruta com dados de irradiância fotossintética medida ($FB_d RFA_{medido}$) e com dados de irradiância fotossintética estimada pela irradiação ($FB_d RFA_{estimado}$) de um cultivo de cana-de-açúcar irrigado em Rio Largo, entre 2008-2009. DM = desvio médio e DP = desvio padrão.

4.5 Análise Temporal do Crescimento de Cana-de-açúcar

Nas análises de crescimento baseadas no IAF simulado em função dos GD, em diferentes épocas de cultivos, a RFA_{INT} acumulada foi mais (menos) acentuada quando o início da simulação de cultivo (corte da folha passada) ocorreu nos meses de maior (menor) densidade de fluxo de radiação solar incidente, o que correspondeu à estação seca (chuvosa) da região. Como na estação seca (chuvosa), a temperatura do ar é mais (menos) elevada, por conta da maior (menor) disponibilidade de radiação e aumento (diminuição) da partição energia para o aquecimento do ar. Os índice de área foliares das simulações de cultivos apresentaram dinâmicas diferentes nos meses do ano, uma vez que foram estimados em função dos graus-dia acumulados. Assim, nos meses de início das simulações, que têm elevadas temperatura do ar, o acumulo térmico é mais expressivo, proporcionando maiores taxas de crescimento do IAF e conseqüentemente maior radiação fotossintética ativa acumulada pelo dossel na fase inicial de crescimento. Entre os meses da estação seca, destacaram-se fevereiro e março, com as maiores médias de temperatura do ar durante os anos (2004-2008) utilizados para a realização das simulações de crescimento, com

valor de 26,4 e 26,0 °C, respectivamente. Os meses com menor média de temperatura do ar ocorrem na estação chuvosa da região, onde julho (22,38 °C) e agosto (22,4 °C) apresentaram as menores médias de temperatura do ar durante os anos de simulações.

A simulação do cultivo (variedade RB92579) com início em março teve a maior RFA_{INT} acumulada (2327,546 MJ m⁻²) estimada pelo ajuste e quando iniciada em agosto teve o menor acúmulo (2079,140 MJ m⁻²). Conforme a Figura 17, a RFA_{INT} acumulada das simulações de cultivos nos meses do ano apresentou diferença significativa ($F = 37,148$ e $P < 0,0001$) e um coeficiente de determinação ($r^2 = 0,717$).

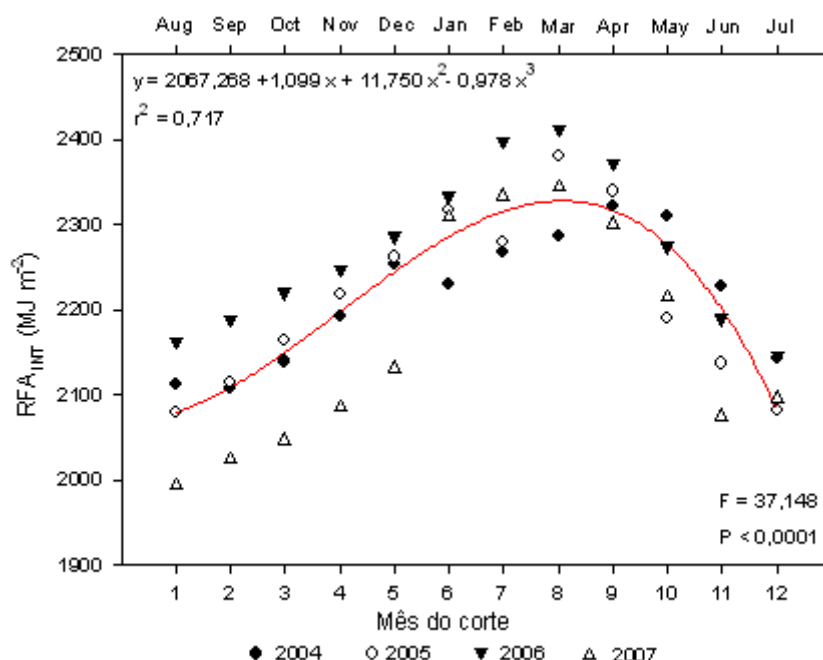


Figura 15. Radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{INT}) acumulada na simulações de cultivo de cana-de-açúcar (Variedade RB92578) em relação ao mês de corte, nos anos 2004, 2005, 2006 e 2007.

Conforme apresentado, a RFA_{INT} mostrou correlação como a produtividade agrícola. Assim, o início do cultivo de cana-de-açúcar no mês que a temperatura do ar for elevada e conseqüentemente a interceptação de luz do dossel maximizada, em virtude do rápido crescimento da área foliar proporcionará ganho de produção. Logo, o planejamento para que o plantio e/ou corte da cultura (em

sistema irrigado) ocorra entre os meses que proporcionem maior luz interceptada ao longo do ciclo é essencial para o aumento de produtividade.

Em relação à fotossíntese bruta acumulada, as simulações de cultivo (Variedade RB92579), iniciadas nos diferentes meses do ano, mostraram aspectos similares para a RFA_{INT} . Aqui também a simulação que iniciou no mês de março teve a maior fixação bruta de CO_2 ($17,907 \text{ kg m}^{-2}$) estimada pelo ajuste. Porém o mês de início da simulação com menor FB acumulada foi julho ($16,339 \text{ kg m}^{-2}$), não coincidindo com o mês de menor RFA_{INT} acumulada. A FB acumulada das simulações dos cultivos nos meses do ano apresentou diferença significativa, com $F = 27,696$ e $P < 0,0001$. O ajuste polinomial de 3º grau apresentou um coeficiente de determinação ($r^2 = 0,654$) (Figura 18).

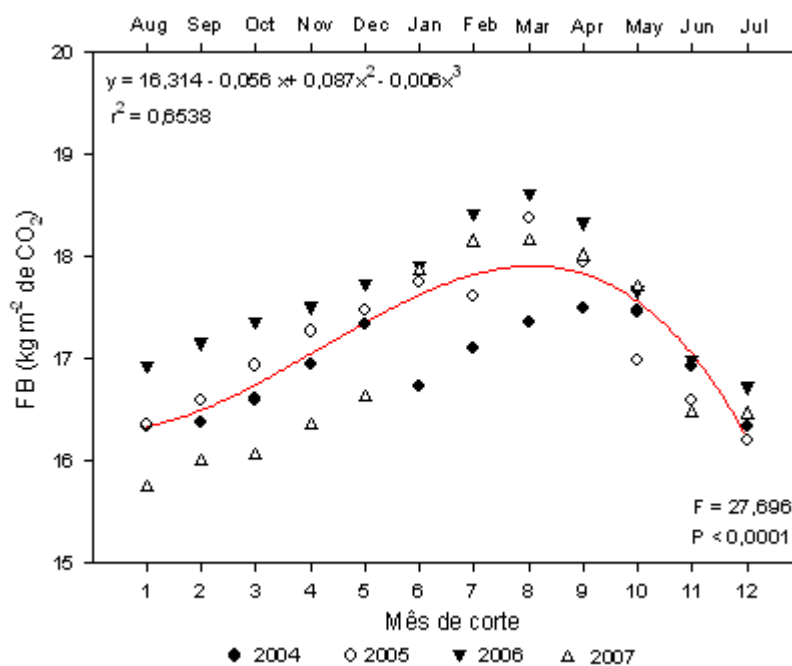


Figura 16. Fotossíntese Bruta (FB) acumulada nas simulações de cultivo de cana-de-açúcar (Variedade RB92578) em relação ao mês de corte, nos anos 2004, 2005, 2006 e 2007.

A variabilidade anual da irradiação solar global dos anos usados para as simulações de cultivo (Figura 19) influenciaram nas quantidades de RFA_{INT} e FB acumuladas. Pode-se observar nas Figuras 17 e 18 que ocorreu diferença significativa entre as RFA_{INT} e FB acumuladas de um mês específico de início de simulação. Essas variações estão relacionadas com a variabilidade dos

elementos meteorológicos usados nas estimativas, com destaque para a radiação solar, pois é o fator ambiental que influencia fortemente nos demais.

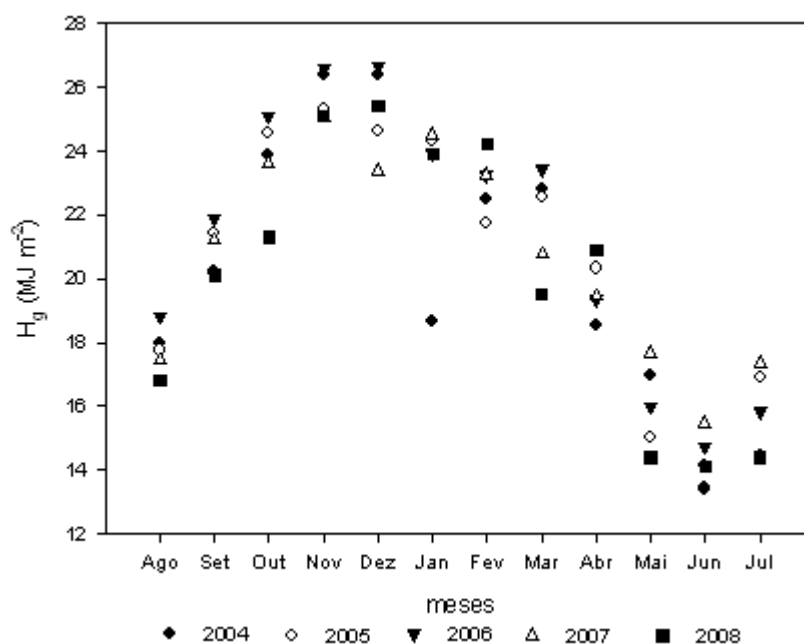


Figura 17. Média mensal da irradiação solar global (H_g) da região de Rio Largo, Alagoas.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que no cultivo de variedades RB de cana-de-açúcar irrigada nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas apresenta correlações entre as produtividades (de colmos e de açúcar) e a radiação fotossinteticamente ativa acumulada e com a fotossíntese bruta acumulada durante o ciclo.

A variedade RB92579 é a que tem maiores rendimentos de colmos e de açúcar, com também maiores valores das estimativas da RFA_{INT} e FB acumuladas no longo do ciclo, em cultivo irrigado por gotejamento subsuperficial.

O cálculo da fotossíntese bruta diária usando a variação da irradiância fotossintética estimada, através da irradiação (faixa do visível) e o fotoperíodo, tem alto grau de concordância com o calculado com a irradiância medida.

Nas simulações de crescimento, para cana-de-açúcar (variedade RB92579), os meses de março e fevereiro têm maior interceptação de radiação fotossintética e fotossíntese bruta acumulada para os anos avaliados (2004-2008).

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO.1998. 300p. (FAO. Irrigation end Drainage Paper, 56).

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JUNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p.1441-1448, 2008.

ANISIMOV, O; FUKSHANSKY, L., Optics of vegetation: implications for the radiation balance and photosynthetic performance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.85 (1/2), p. 33-49, 1997.

ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera-introdução ao tratamento biofísico**. 1. ed. Piracicaba, SP: 2002. v.1. 272 p.

BACHI, O.O.S.; SOUZA, J.A.G.C. Minimum threshold temperature for sugar cane growth. In: **International Society of Sugar Cane Technologists**. Proceedings, São Paulo, Impress, v.2, p.1733-1741, 1978.

BISWAS, B. C. 1988. **Agroclimatology of the sugar cane crop. world meteorological organization**. Technical note. 193 WMO. Nº 703 Geneva Switzerland.

BLAND, JM; ALTMAN, DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. In: **Lancet**, v.1, n. 8476, p.307-310, 1986.

BRITTON, C. M.; DODD. J. D. Relationship of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. **Agricultural Meteorology**, v.17, p.1-7, 1976.

CAMPBELL, G.S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.36, p.317-321, 1986

CARON, B. O.; SCHMIDT, D.; MADEIROS, SW. L. P.; HELDWEIN, A. B.; MANFRON, P. A. Eficiência de convenção da radiação solar fotossinteticamente ativa e distribuição de fitomassa produzida no meloeiro cultivado em estufa plástica na primavera. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n 2, p. 215-219, 2002

CONAB, 2009. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, Safra 2008/2009 – segundo levantamento setembro de 2009. **Companhia Nacional de Abastecimento**. – Brasília: Conab, 2009

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

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para o Windows versão 4.0. In: 45 Reunião **Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria**. USFCAR, São Carlos-São Paulo, p.255-258, 2000.

FRANCIS, C. A.; RUTGER, J. N.; PALMER, A. F. E. A rapid method for leaf plant area estimation in maize (*Zea mays* L.). **Crop Science**, Madison, v.9, p.537-539, 1969.

GOUDRIAAN, J. A simple and fast numerical method for the computation of daily total photosynthesis. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.38, p.249-254, 1986.

HARTT, C.E. & BURR, G.O. Factors affecting photosynthesis in sugar cane. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v.12, p.590-609, 1967.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Stab. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.17, n.5, p.32-34, 1999.

INMAN-BAMBER, N. G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal Plant and Soil**, v.8 n.2, p.93-99, 1991.

_____. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**. V.89, p.107–122, 2004.

_____. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.36, p.41-51, 1994.

_____; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p.185-202, 2005.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York, Academic press, 1983, 416 p.

JONES, C. A.; KINIRY, J.R..CERES-Maize.Asimulationmodel of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station, 1986

JONES, H.G. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. Cambridge University Press, 1992, 85 p.

KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling sugarcane production systems I: development and performace of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.48, p.27-36, 1999.

KIRINY, J. R.; JONES, C. A.; O'TOOLE, J. C.; BLANCHET, R.; CABELGUENNE, M.; 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.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000. 531p.

LIU, D.L. Incorporating diurnal light variation and canopy light attenuation into analytical equations for calculating daily gross. **Ecology Modelling**. v.93, p.175-189, 1996.

_____; BULL, T.A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. *Ecological Modelling*. V.144, p. 181–211, 2001.

_____.; KINGSTON, G.; BULL, T. A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including sub-optimum and supra-optimum temperature regimes. **Agricultural And Forest Meteorology**. v.90, p.119-139, 1998.

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**, v.97, p.722–733, 2005.

LOOMIS, W. E. Absorption of radiant energy by leaves. **Ecology**, v.46, p.14-17, 1965.

LOOMIS, R. S.; AMTHOR, J. S. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. **Crop Science**, v.39, p1584-1596, 1999.

LYRA, G. B.; SEDIYAMA, G. C.; LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; SOUZA, E. F. de. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de tabuleiros costeiros do estado de Alagoas: coeficiente de cultura “único” padrão boletim FAO – 56. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil - STAB**. v.25, n. 4, p.40-43, 2007.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. Royal London*. London, v.281, p.277-294, 1977.

_____. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Ann. Bot.*, v.29, p.17-37, 1965.

_____. **Principles of Environmental Physics**. Edward Arnold, London, 1973, 291p.

_____. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *The journal of applied ecology*. v.9, n.3, p.747-766, 1972.

MUCHOW, R.C.; SPILLMAN, M.F.; WOOD, A.W.; THOMAS, M.R. Radiation interception and biomass accumulation in sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*, v.45, p.37-49, 1994.

PEREIRA, A. R; MACHADO, E. C. Um simulador dinâmico do crescimento de uma cultura de cana-de-açúcar. *Bragantia*, Campinas, v.45; p.107-122, 1986

PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Seropédica: Edur, 1998, 159 p

PINTO, H. S.; SÁ, T. D. Fluxo de energia e eficiência de conversão na produção de forragem. **Simpósio sobre ecossistema de pastagens**, Jaboticabal – SP. Anais, v.1, p.2-27, 1989.

REICHARDT, K; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004, 478p.

ROBERTSON, M.J., DONALDSON, R.A. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying off before harvest. *Field Crops Research*. v.55, p.201-208, 1998.

_____; WOOD, A. W.; MUCHOW, R. C. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia: I. radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.48, p.11-25, 1996.

ROSENTHAL, W. D.; GERIK, T. J. Radiation Use Efficiency among Cotton cultivars. **Agronomy Journal**. v.83, p.655-658, 1991.

SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. Radiation Use Efficiency. **Advances in Agronomy**, v.65, p.215- 265, 1999.

SOUZA, J. L. **Avaliação agroclimática de quatro microrregiões do estado de Minas Gerais para alguns cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris*)**.

Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Universidade Federal de Viçosa/ MG.1989. p.70.

_____; MOURA FILHO, G.; LYRA, R.F.F.; TEODORO, I., SANTOS, E.A.; SILVA, J.L. SILVA, P.R.T.; CARDIM, A.H.; AMORIM, C.A. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL, período 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, p.131-141, 2003.

_____; NICACIO, R. M.; MOURA, M. A. Global Solar radiation measurements in Maceio, Brazil, **Renewable energy**, v. 30, p.1203-1220, 2005.

_____; TAVARES, P. S.; TEODORO, I.; SILVA, P. R. T.; SILVA NETO, J. L. Irradiância solar global e radiação fotossinteticamente ativa em Maceió, ano 2003. In: **XIV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Campinas, SP. Agrometeorologia, Agroclimatologia e Agronegócio. Campinas; SBA/UNICAMP. CD-RW.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Califórnia: The Benjamin/Cummings Publishings Company, 1991. 565p.

TEH, C.B.S. 2006. **Introduction to mathematical modeling of crop growth: How the equations are derived and assembled into a computer program.** BrownWalker Press, Boca Raton, Florida, 2006, 256p.

TEI, F.; SCAIFEI, A.; AIKMAN. D. P. Growth of lettuce, onion, and red beet. 1. growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. **Annals of botany**, v.78: 633-643, 1996.

THORNLEY, J. H. M. **Mathematical Models in Plant Physiology.** In: Academic Press, London, 1976, 318p.

THORNTWAITE, C.W. MATHER, J.R. **Instructions and tables for computing potencial evapotranspiration and the water balance.** Ceterton, NJ: rexel institute of technology-Laboratory, 1957, 311p.

VARLET-GRANCHER, C.; GOSSE, G.; CHARTIER, M.; SINOQUET, H.; BONHOMME, R.; ALLIRAND, J. M. Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v.9, p.419-439, 1989.

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorology Soc**, v.63, p.1309-1313. 1982.

APÊNDICES

Tabela 1. Quadro da Análise de Variância do índice de área foliar de variedades RB de cana-de-açúcar em cultivo irrigado por gotejamento em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

Causa de Variação	GL	SQ	QM	F
Variedades	8	83.290	10.411	9.188**
Blocos	3	17.953	5.984	5.281**
Erro	312	353.537	1.133	
Total corr.	35	454.780		
CV (%)	20,81			

NOTA: (**) Não significativo no nível de 5% de probabilidade

Tabela 2. Quadro da Análise de Variância da produtividade de colmos industrializados de variedades RB de cana-de-açúcar em cultivo irrigado por gotejamento em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

Causa de Variação	GL	SQ	QM	F
Variedades	8	6.483,000	810,375	1,148 ^{ns}
Blocos	3	2.936,000	978,667	1,386 ^{ns}
Erro	24	16.941,000	705,875	
Total corr.	35	26.360,000		
CV (%)	20,81			

NOTA: (ns) Não significativo no nível de 5% de probabilidade.

Tabela 3. Quadro da Análise de Variância da produtividade de açúcar (TPH) de variedades RB de cana-de-açúcar em cultivo irrigado por gotejamento em Rio Largo – AL, entre 2008 e 2009.

Causa de Variação	GL	SQ	QM	F
Variedades	8	282.537	35.317	1.987 ns
Blocos	3	86.234	28.745	1.617 ns
Erro	24	426.626	17.776	
Total corr.	35	795.397		
CV (%)	7,91			

NOTA: (ns) Não significativo no nível de 5% de probabilidade.

