

EFEITOS DA APLICAÇÃO DIFERENCIAL DE ÁGUA NO
SUBSTRATO SOBRE A CAPACIDADE FOTOSSINTÉTICA,
RELAÇÕES HÍDRICAS E CRESCIMENTO INICIAL EM CANA-DE-
AÇÚCAR

MARCELO SIQUEIRA RIBEIRO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL – 2012

EFEITOS DA APLICAÇÃO DIFERENCIAL DE ÁGUA NO
SUBSTRATO SOBRE A CAPACIDADE FOTOSSINTÉTICA,
RELAÇÕES HÍDRICAS E CRESCIMENTO INICIAL EM CANA-DE-
AÇÚCAR

MARCELO SIQUEIRA RIBEIRO

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Eliemar Campostrini

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
ABRIL – 2012

EFEITOS DA APLICAÇÃO DIFERENCIAL DE ÁGUA NO
SUBSTRATO SOBRE A CAPACIDADE FOTOSSINTÉTICA,
RELAÇÕES HÍDRICAS E CRESCIMENTO INICIAL EM CANA-DE-
AÇÚCAR

MARCELO SIQUEIRA RIBEIRO

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Aprovada em 04 de Abril de 2012

Comissão Examinadora:

Prof. Carlos Frederico de Menezes Veiga (D.Sc. Produção Vegetal) – UFRRJ

Pesquisadora Dr^a Mara de Menezes de Assis Gomes (D.Sc. Biologia Vegetal) -
UENF/CCTA

Prof^a. Rejane Jurema Mansur Custódio Nogueira (D. Sc. Ecologia e Recursos
Naturais) - UFRPE
(Coorientador)

Prof. Eliemar Campostrini (D.Sc. Produção Vegetal) - UENF
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus;

A CAPES pelo apoio financeiro fundamental para realização da pesquisa;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro pela confiança e oportunidade ímpar de realizar mais um objetivo;

A Usina Santa Tereza – PE, pela cessão dos minitoletes que foram fundamentais na realização do trabalho;

Ao Prof. Eliemar Campostrini pela oportunidade, ensinamentos, disponibilidade e orientação fundamental para concretização dessa conquista;

À Professora Rejane J. M. C. Nogueira por toda minha formação acadêmica e apoio irrestrito;

Ao Professor Carlos Frederico de Menezes e todos os demais professores que fizeram parte dessa conquista e de alguma forma contribuíram para a minha formação;

À Professora Mara de Menezes de Assis Gomes pelos esclarecimentos, disponibilidade e contribuição na construção da dissertação;

À Dra. Alena Torres Netto, pela amizade e incansável ajuda em todas as etapas de execução do trabalho;

Ao Professor/Pesquisador Odemar Reis do IPA pela grande contribuição na análise dos dados;

Ao Setor de Fisiologia Vegetal do Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal por ter me recebido de braços abertos e permitido que realizasse meu trabalho;

Aos amigos Cássia Roberta, Daniel Pinheiro, Jefferson Rangel e Tarcisio Couto pela constante companhia, contribuição no trabalho e pela amizade conquistada ao longo desse período;

Aos amigos do Setor de Fisiologia Vegetal que fizeram parte do meu dia-dia e sempre contribuíram na realização do trabalho;

Ao amigo Jorge Romero e todos os outros que sempre me ajudaram e incentivaram nos momentos difíceis;

Ao Luiz José Tavares pela constante disponibilidade e contribuição fundamental na realização do trabalho;

A Tássia Mélo pelos momentos de ajuda, companhia, carinho e amor em grande parte do período;

Agradeço também à minha família por todo incentivo, compreensão e apoio incondicional para que eu realizasse esse sonho;

Finalmente agradeço aos meus pais pelo amor incondicional.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	04
2.1. Cana-de-açúcar	04
2.1.1. Aspectos botânicos	06
2.1.2. Aspectos fisiológicos	09
2.1.3. Aspectos fitotécnicos	14
2.1.3. Condições climáticas ideais para o cultivo	15
2.1.4. Características da variedade RB867515	17
2.2. Importância econômica	19
2.3. Estado do Rio de Janeiro	21

2.4. Importância da água.....	24
2.4.1. Água x cana-de-açúcar	26
2.5. Irrigação parcial do sistema radicular	31
2.6. Estresse hídrico.....	35
2.6.1. Efeitos na cana-de-açúcar	38
2.6.2. Estimativa do teor de clorofila	39
2.6.3. Fluorescência da clorofila a	41
2.6.4. Potencial hídrico	44
2.6.5. Termografia por infravermelho	47
3. MATERIAL E MÉTODOS	50
3.1. Localização	50
3.2. Material Vegetal	50
3.3. Condições de cultivo.....	51
3.4. Aplicação dos tratamentos	54
3.5. Características avaliadas	55
3.5.1. Avaliações Biométricas	55
3.5.2. Capacidade fotossintética	58
3.5.3. Potencial hídrico antemanhã	59
3.5.4. Termografia por infravermelho	60
3.5.5. Eficiência (EUA), eficiência intrínseca (EIUA) e eficiência agronômica do uso da água (EAUA)	60
3.6. Delineamento experimental	61
3.7. Análise estatística	61

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1. Avaliações Biométricas	62
4.2. Capacidade fotossintética	73
4.3. Potencial hídrico antemanhã	92
4.4. Termografia por infravermelho	94
4.5. Eficiência do uso da água (EUA), eficiência intrínseca do uso da água (EIUA), eficiência agronômica do uso da água (EAUA)	97
5. RESUMO E CONCLUSÕES	103
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

LISTA DE SÍMBOLOS

3-PGA: Gliceraldeído 3-fosfato

Ψ_w : Potencial hídrico

Ψ_{pd} : Potencial hídrico antemanhã

Ψ_s : Potencial osmótico

Ψ_p : Potencial de pressão

Ψ_m : Potencial matricial

A: Taxa fotossintética líquida

ABA: Ácido abscísico

AC: Altura do colmo

AF: Área Foliar

ANA: Agência Nacional de Águas

AP: Altura da Planta

ATP: Adenosina trifosfato

C: Controle

CCV: Capacidade de Campo do Vaso

C/N: Relação Carbono/Nitrogênio

CNI: Confederação Nacional da Indústria

CO₂: Dióxido de carbono

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

Copersucar: Cooperativa de Produtores de Cana-de-Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo

CP: Cana planta
CRA: Conteúdo relativo de água
CS: Cana soca
CTC: Centro de Tecnologia Canavieira
DAIT: Dias após o início dos tratamentos
DAP: Dias após o plantio
DC: Diâmetro do colmo
DI: Déficit de irrigação
DIC: Delineamento inteiramente casualizado
DPV: Déficit de pressão de vapor
DPV_{folha-ar}: Déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar
E: Transpiração
EARC: Economia de água em relação ao controle
EAUA: Eficiência agrônômica do uso da água
EIUA: Eficiência intrínseca do uso da água
EUA: Eficiência do uso da água
FAO: Food and Agriculture Organization
FAOSTAT: Food and Agriculture Organization Statistical Database
FFF: Fluxo de fótons fotossintéticos
 F_v/F_m : Rendimento quântico máximo do fotossistema II
 g_s : Condutância estomática
IAA: Instituto do Açúcar e do Alcool
IAC: Instituto Agrônômico de Campinas
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPSR: Irrigação parcial do sistema radicular
IRGA: Analisador de gás a infravermelho
 N_2 : Nitrogênio
NADP⁺: Nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato
NADPH: Nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato desidrogenase
NF: Número de Folhas
NI: Não irrigado
NP: Número do perfilhos
MPC: Medidor portátil de clorofila
MSPA: Massa seca da parte aérea

MSR: Massa seca das raízes
MSPA/MSR: Relação massa seca da parte aérea / massa seca das raízes
O₂: Oxigênio
ONU: Organização das Nações Unidas
PCK ou PEPCK: Phosphoenolpyruvate carboxkinase
PEA: Plant Efficiency Analyser[
PEP: Fosfoenol-piruvato
PEPc: Fosfoenol-piruvato carboxilase
PI: Índice fotossintético (do inglês, “*Photosynthetic index*”)
PIB: Produto Interno Bruto
Planalsucar: Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar
Proálcool: Programa Nacional do Álcool
PSII: Fotossistema II
PVC: Cloreto de polvinila
QA: Quinona A
RAF: Razão de área foliar
RIDESA: Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor
Sucroalcooleiro
RMC: Razão de massa do colmo
RMR: Razão de massa das raízes
RMF: Razão de massa foliar
Rubisco: Ribulose-1,5-Bifosfato Carboxilase-Oxigenase
RuBP: Ribulose 1,5 Bisfosfato
V: fitocromo vermelho
V_{distante}: fitocromo vermelho distante
Vol_{raiz}: Volume de raiz
T0: Início dos tratamentos
T°: Temperatura em graus Celsius
TCH: Toneladas de cana por hectare
TPH: Toneladas de pool por hectare
Trioses-P: Trioses fosfato
UNIS: United Nations Legislative Series
UNICA: União da Indústria de Cana-de-açúcar
UR: Umidade relativa

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Vasos unidos para indução da divisão do sistema radicular (A) e detalhe da união dos vasos e do sistema radicular dividido em *Saccharum* spp.511
- Figura 2. Fluxo de fótons fotossintéticos (FFF), temperatura (T°), umidade relativa (UR%) e déficit de pressão de vapor (DPV) no ambiente de cultivo de *Saccharum* spp. As setas indicam o início dos tratamentos.533
- Figura 3. Comparativo entre a tensão de água e temperatura do substrato de cultivo nos lados “irrigado” e “seco” do vaso de *Saccharum* spp. sob o tratamento irrigação parcial do sistema radicular. As setas indicam o momento da reirrigação.....54
4
- Figura 4. Esquema dos tratamentos aplicados [controle (1), irrigação parcial do sistema radicular (2) e não irrigado (3)] em *Saccharum* spp.....555
- Figura 5. Esquema de denominação das folhas de cana-de-açúcar, segundo classificação de Kujiper (Dilejwin, 1952; Gallo et al., 1962).566
- Figura 6. Detalhe da lavagem das raízes em cada lado do vaso (A) e medição do volume das raízes (B) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato577
- Figura 7. Altura da planta (A) e altura do colmo (B) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....633
- Figura 8. Número de folhas de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições.

Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....644

Figura 9. Área foliar de *Saccharum* spp. 22 dias após início dos tratamentos (DAIT) sob aplicação diferencial de água no substrato. Cada barra representa o valor médio de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade..... **Erro! Indicador não definido.**6

Figura 10. Massa seca da parte aérea (A), Massa seca das raízes (B) e Relação massa seca da parte aérea / Massa seca das raízes (C) de *Saccharum* spp. 22 dias após início dos tratamentos (DAIT) sob aplicação diferencial de água no substrato. Cada barra representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....69

Figura 11. Razão de massa foliar (A), razão de massa do colmo (B), razão de massa de raiz (C) e razão de área foliar (D) de *Saccharum* spp. 22 dias após início dos tratamentos (DAIT) sob aplicação diferencial de água no substrato. Cada barra representa a média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. 691

Figura 12. Volume de raiz (A) e volume de raiz do tratamento IPSR (B) de *Saccharum* spp. aos 22 dias após início dos tratamentos (DAIT) sob aplicação diferencial de água no substrato. Cada barra representa a média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....713

Figura 13. Leituras do medidor portátil de clorofila (MPC) em *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. A seta indica o momento da reirrigação.735

Figura 14. Curva de fotossíntese *versus* Luz de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato em três épocas: T0 (A), A = 0 (B) e 2 dias após a reirrigação (C). Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....758

Figura 15. Taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (B), transpiração (C) e déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar (D) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. As setas indicam o momento da reirrigação.....781

Figura 16. Eficiência quântica máxima do fotossistema II (A) e Índice fotossintético “*photosynthetic index*” (B) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições.

Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. As setas indicam o momento da reirrigação ..815

Figura 17. Dispersão da taxa fotossintética líquida *versus* eficiência quântica máxima do fotossistema II de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato, para os tratamentos Controle, IPSR e Não irrigado. Cada ponto representa 1 dado coletado ao longo do período experimental.857

Figura 18. Dispersão da taxa fotossintética líquida *versus* índice fotossintético “*photosynthetic index*” de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato, para os tratamentos Controle, IPSR e Não irrigado. Cada ponto representa 1 dado coletado ao longo do período experimental.887

Figura 19. %fotoinibição (F_v/F_m) (A) e %fotoinibição (PI) (B) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. As setas indicam o momento da reirrigação. Tracejado explica tendência a valores negativos na última avaliação de %fotoinibição (PI).....891

Figura 20. Potencial hídrico foliar antemanhã (A) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato, em três épocas: T0, A = 0 e 2 dias após a reirrigação. Cada barra representa a média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. (B) Tensão de água no substrato do tratamento IPSR ao longo do período experimental. Seta indica momento de reirrigação.....94

Figura 21. Termografia por infravermelho de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato em três épocas: T0 (A), A = 0 (B) e 2 dias após a reirrigação (C). Cada fotografia representa a média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade946

Figura 22. Dispersão da taxa fotossintética líquida (A) *versus* transpiração (E) (Eficiência do uso da água - EUA) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato para os tratamentos Controle, IPSR e Não irrigado. Cada ponto representa 1 dado coletado ao longo do período experimental968

Figura 23. Dispersão da taxa fotossintética líquida (A) *versus* condutância estomática (g_s) (Eficiência intrínseca do uso da água - EIUA) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato para os tratamentos Controle, IPSR e Não irrigado. Cada ponto representa 1 dado coletado ao longo do período experimental100

RESUMO

RIBEIRO, Marcelo Siqueira; M.Sc.. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Abril de 2012. Efeitos da aplicação diferencial de água no substrato sobre a capacidade fotossintética, relações hídricas e crescimento inicial em cana-de-açúcar. Orientador: Prof. D. Sc. Eliemar Campostrini. Coorientador: Profª D. Sc. Rejane Jurema Mansur Custódio Nogueira

Essa pesquisa tenta mostrar com bases científicas a utilização racional da água, por meio da aplicação da irrigação parcial do sistema radicular (IPSR) na cana-de-açúcar. A IPSR baseia-se na divisão do sistema radicular, em que uma parte é mantida úmida e a outra seca. O funcionamento dessa técnica baseia-se em que o lado úmido do sistema radicular é suficiente para que a planta mantenha o status hídrico e o crescimento. O objetivo desse trabalho foi avaliar as características biométricas, a capacidade fotossintética, a eficiência fotoquímica, as relações hídricas, a termografia por infravermelho e a eficiência do uso da água de plantas de cana-de-açúcar da variedade RB867515, em resposta à aplicação diferencial de água no substrato. O experimento foi realizado entre janeiro e abril de 2011 em casa de vegetação localizada no campus da UENF. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com 3 tratamentos (Controle – C, Irrigação parcial do sistema radicular - IPSR e não irrigado - NI) e 7 repetições. Após a aplicação dos tratamentos, as avaliações

biométricas e da capacidade fotossintética foram realizadas a cada dois dias, até que a taxa fotossintética (A) do tratamento NI fosse igual a zero. Posteriormente, as plantas foram reirrigadas para avaliar uma possível recuperação. O potencial hídrico foliar antemanhã, a curva de luz da fotossíntese e a termografia por infravermelho foram realizadas em três períodos distintos, quais sejam: T0 – início dos tratamentos, A = 0 – quando a taxa fotossintética nas plantas NI foi igual a zero, e Reirrigação. Ao final do experimento, foram avaliados os valores de massa seca e as relações entre elas, a área foliar e o volume de raiz. Também foi possível calcular as eficiências intrínseca, agronômica e do uso da água, e foi quantificado o total de água consumido nos tratamentos. Exceto para as razões de massa da folha, caule e raiz, a restrição total de água provocou o comprometimento do crescimento da planta. Após a reirrigação, a condutância estomática do tratamento NI se igualou às demais, no entanto, a taxa fotossintética não foi recuperada. Este resultado foi comprovado com o comprometimento da eficiência quântica do fotossistema II, do índice fotossintético e da leitura do medidor portátil de clorofila, variáveis que comprovaram a ocorrência de efeitos não-estomáticos no comprometimento da A por ação do estresse hídrico. Por outro lado, a IPSR mostrou-se eficiente para a cultura da cana-de-açúcar. As características de crescimento, fluorescência da clorofila, potencial hídrico foliar antemanhã e termografia por infravermelho apresentaram resultados similares nas plantas dos tratamentos C e IPSR, assim como a taxa fotossintética. A partir do 13º dia após o início dos tratamentos (DAIT), a condutância estomática do tratamento IPSR manteve-se estatisticamente igual à das plantas controle, no entanto, com valores médios menores. Isso corrobora para maior eficiência da utilização da água pelo tratamento. Essas informações vão de acordo com os dados encontrados para a variável eficiência agronômica do uso da água, em que as plantas do tratamento IPSR produziram 12,85 gMS/L contra 7,48 gMS/L do tratamento controle, representando uma economia de 38,5% da água aplicada.

Termos de indexação: Irrigação parcial do sistema radicular, avaliações biométricas, capacidade fotossintética, fluorescência da clorofila, potencial hídrico foliar antemanhã, termografia, eficiência agronômica do uso da água.

ABSTRACT

RIBEIRO, Marcelo Siqueira; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. April, 2012. Effects of differential water application in the substrate on the photosynthetic capacity, water relations and initial growth in sugarcane. Advisor: D. Sc. Eliemar Campostrini. Co-advisor: D. Sc. Rejane Jurema Mansur Custódio Nogueira

This research attempts to show, scientifically based, the rational use of water through the application of partial rootzone irrigation (PRI) in sugarcane. PRI is based on the division of the the root system, in which a portion is kept wet and the other is kept in dry. The operation of this technique is based on the wet side of the root system is sufficient to keep the water status and growth of the plant. The aim of this study was to evaluate biometric characteristics, the photosynthetic capacity, photochemical efficiency, water relations, infrared thermography and water use efficiency of sugarcane variety RB867515, in response to differential application of water on the substrate. The experiment was conducted between January and April 2011 in a greenhouse located on the campus of UENF. The experimental design was completely randomized with three treatments (control - C, partial rootzone irrigation – PRI and not irrigated - NI) and seven replicates. After treatment application, the biometric evaluations and photosynthetic capacity were performed every two days until the photosynthetic rate (A) in NI treatment was equal to zero. Subsequently, the plants were reirrigated to evaluate a possible recovery. The predawn leaf water potential, the light curve of photosynthesis and infrared thermography were performed at three distinct periods, namely: T0 - beginning of

treatment, $A = 0$ - when the photosynthetic rate in NI plants was zero, and Reirrigation. At the end of the experiment were examined the values of dry matter and the relationships between them, the leaf area and root volume. It was also possible to calculate the intrinsic, agronomic and water use efficiency, and was quantified the total water consumed in the treatments. Except for the mass ratios of the leaf, stem and root, the total restriction of water caused the impairment of plant growth. After reirrigation, stomatal conductance treatment in NI equaled to the others, however, the photosynthetic rate was not recovered. This result was confirmed by the compromising of the quantum efficiency of photosystem II, the photosynthetic rate and the reading of portable chlorophyll meter, variables that proved the occurrence of non-stomatal effects of the commitment by the action of water stress. On the other hand, IPSR was efficient for the cultivation of sugarcane. The growth characteristics, chlorophyll fluorescence, predawn leaf water potential and infrared thermography showed similar results in plants of treatments C and IPSR, as well as the photosynthetic rate. From the 13th day after the start of treatments (DAST), stomatal conductance in IPSR remained statistically equal to that of control plants, however, with lower mean values. This confirms for greater water use efficiency. This information will in accordance with these data to the variable agronomic water use efficiency in the IPSR treatment, that produced 12.85 gMS / L against 7.48 gMS/L for the control treatment, representing a saving of 38, 5% of water applied.

Keywords: Partial rootzone irrigation, biometrics avaliations, photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, predawn leaf water potential, thermography, agronomic water use efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, que é uma espécie representante da família Poaceae, é plantada na região subtropical, e em função da grande importância na agricultura mundial, vem se expandindo para novos territórios. Além de ser uma importante fonte de alimento e de bioenergia, esta espécie é um componente significativo da economia em muitos países. Nos 100 países em que é cultivada, onde representa cerca de 0,5% da área total do mundo utilizada para a agricultura, a cana-de-açúcar ocupa uma área de 22 milhões de hectares (FAOSTAT, 2008).

No Brasil, as contas do agronegócio da cana-de-açúcar estão na faixa dos \$20 bilhões ao ano. O país produz 25% de açúcar de cana do mundo, sendo o maior produtor (31 milhões de toneladas ano⁻¹) e exportador (19,5 milhões de toneladas ano⁻¹) (UNICA, 2009), tendo o estado de São Paulo como o principal representante deste montante.

No estado do Rio de Janeiro, a cana-de-açúcar já foi destaque, principalmente no município de Campos dos Goytacazes, região Norte Fluminense. No entanto, devido à agricultura não ser muito expressiva no estado, a cana-de-açúcar vem perdendo espaço, e o estado, que na safra 2004/2005 obteve o recorde de produção no estado do Rio de Janeiro na década (Veiga, 2006), não acompanhou o desenvolvimento tecnológico de outras regiões produtoras e vem obtendo baixas produções ao longo das últimas safras.

Como salientado, a necessidade de expandir a área de cultivo da cana, força a otimização dessas e das antigas áreas de cultivo. A meta é atingir o máximo potencial produtivo da cultura, mas para isso é preciso conhecer profundamente as necessidades de manejo da planta, passando, principalmente, pelo conhecimento do processo fisiológico da espécie.

Dentre os diversos fatores do ambiente que afetam o cultivo da cana-de-açúcar, como a temperatura, a luminosidade e a disponibilidade de nutrientes, a disponibilidade de água é o principal (Alfonsi et al., 1987). Não adianta escolher a melhor variedade, o solo mais fértil e as condições climáticas ideais, se o suprimento hídrico da cultura não é suficiente para que ela maximize o potencial fotossintético e conseqüentemente produtivo.

A deficiência hídrica é, talvez, a limitação mais comum para o crescimento das plantas, constituindo a maior pressão seletiva na evolução destes organismos. Assim, a capacidade de superar situações de déficit hídrico é determinante na distribuição natural das espécies e na produtividade dos cultivos (Larcher, 2006). Dentre as tantas respostas dadas pela planta em decorrência ao estresse hídrico, a primeira e mais sensível é a diminuição da turgescência, associada a esse evento, a diminuição do processo de crescimento, com significativa limitação do metabolismo das proteínas e dos aminoácidos (Chaves et al., 2003), ou seja, em condição de limitação hídrica, ocorre um comprometimento geral do processo fisiológico da planta, o que causa taxas fotossintéticas reduzidas, que potencializam perdas de produtividade, que, no momento atual, é algo impensável em uma agricultura tecnificada.

A maior parte da cana-de-açúcar produzida no Brasil ainda é cultivada em sequeiro. Sabe-se que uma irrigação de qualidade e bem projetada pode gerar aumentos significativos de produtividade. No entanto, o alto investimento necessário para a implantação pode afastar essa possibilidade do produtor. Visando o futuro, e no cenário econômico mundial, a atual conjuntura da cultura de cana-de-açúcar força aumentos de produtividade para suprir, principalmente, a demanda de biocombustíveis. Dessa forma, garantir elevadas produtividades independente das condições climáticas é a alternativa mais segura. Esse fato é importante desde que seja respeitada a utilização dos recursos naturais relacionados ao meio ambiente. Tal segurança na produção somente pode ser alcançada com a agricultura irrigada (Morinson et al., 2008).

A agricultura irrigada é responsável pelo uso de 69% da água consumida no mundo, e a tendência de escassez dos recursos hídricos no contexto do aquecimento global faz com que se torne necessário o aumento da eficiência do uso da água (EUA) pelas culturas, bem como a otimização dos sistemas de irrigação (Sampaio et al., 2010).

Uma das alternativas para aumentar a EUA é a irrigação parcial do sistema radicular (IPSR). Esta técnica é baseada na irrigação de somente um lado do sistema radicular, ou seja, enquanto uma parte das raízes é irrigada, a outra parte é exposta a uma limitação hídrica, podendo esse esquema de irrigação ser fixo ou com alternância dos lados seco e molhado das raízes.

Essa técnica tem mostrado que é possível aumentar a eficiência de uso da água, com redução do crescimento vegetativo, mantendo-se a produção, embora menor, em um patamar satisfatório, como estudado por Dry e Loveys (1998) em videira. A base teórica da técnica é a de que o sistema radicular passa a produzir uma quantidade maior de ácido abscísico (ABA), e esse fitormônio transloca via xilema para a parte aérea, e ocasiona o fechamento parcial dos estômatos. Este fato resulta em menor perda de água para a atmosfera (Davies e Zhang, 1991; Davies et al., 2002). Essa redução na abertura estomática pode diminuir a perda de água, com um mínimo de efeito sobre a absorção de CO₂, não comprometendo de maneira acentuada o processo fotossintético da planta (Jones, 1992).

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi estudar o crescimento inicial, a resposta fotossintética, a eficiência fotoquímica, as relações hídricas, o potencial hídrico foliar antemanhã, a termografia por infravermelho e a eficiência do uso da água em cana-de-açúcar em resposta à aplicação diferencial de água no substrato. Tal investigação visa encontrar respostas fisiológicas da espécie a IPSR, que sirvam de base para estudos avançados, os quais possam viabilizar o uso da técnica em cultivos comerciais, de modo que se tenha elevada eficiência agrônômica no uso da água, sem o comprometimento na produtividade da cultura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cana-de-açúcar: um breve histórico

A cana-de-açúcar pertence ao gênero *Saccharum*, que abrange várias espécies. O centro de origem dessas espécies tem sido reportado por diversos autores, sendo as ilhas do Arquipélago da Polinésia, a Nova Guiné e a Índia as regiões mais citadas. Dessa forma, acredita-se que a cana-de-açúcar seja nativa do sudeste da Ásia, embora o exato local seja incerto (Figueiredo, 2008). As informações divergem quanto aos países de origem. No entanto, não há contradições quanto a Ásia ser o centro de origem (Roach e Daniels, 1987).

No continente americano, a introdução da cana-de-açúcar ocorreu em 1493, na segunda viagem de Cristóvão Colombo, que levou colmos provenientes da Ilha da Madeira para a região da atual República Dominicana (Figueiredo, 2008). Segundo os historiadores, essa introdução perdeu-se, e somente em 1509 foram novamente introduzidas canas em São Domingos (Stevenson, 1965). A partir disso, o movimento colonizador as levou para o México, em 1520, de onde ela foi disseminada por toda a América.

Os relatos mostram que as primeiras canas foram introduzidas no Brasil em 1502 (Corrêa, 1926 citado por Figueiredo, 2008). No entanto, o cultivo permaneceu estagnado, pois havia pouca mão de obra, e os moradores da época preocupavam-se mais com o extrativismo da madeira e a descoberta de minas de ouro e prata (Corrêa, 1935; Costa, 1958).

Após a ameaça de invasão das terras portuguesas e do aumento da demanda por açúcar no mercado europeu, D. João III formulou um projeto de povoação da costa brasileira distribuindo as capitanias hereditárias (Figueiredo, 2008). A partir dessa medida, a primeira iniciativa para produzir cana-de-açúcar efetivou-se com Martin Afonso de Souza, em 1532, sendo “oficiosamente” o primeiro a trazer mudas da Ilha da Madeira, as precursoras do cultivo comercial em São Vicente – SP. Tão logo tomou posse da capitania de Pernambuco, Duarte Coelho desenvolveu a plantação de cana-de-açúcar e foi o responsável pela construção dos primeiros engenhos do Brasil (Costa, 1958).

Na época, a cana contribuía com o desenvolvimento do país com grande relevância econômica no campo da produção de açúcar, melado, rapadura, cachaça, dentre outros produtos. As capitanias onde se cultivava a espécie passaram a se desenvolver mais rapidamente que as demais (Corrêa, 1935; Figueiredo, 2008), sendo o período áureo até 1630.

O aparecimento de problemas fitossanitários nas lavouras de cana-de-açúcar começou em 1840, com a epifítia de podridão de raízes da cana nas Ilhas Maurício. Em 1863, ocorreu no Brasil o ataque de gomose em canaviais da Bahia, Pernambuco e na região de Campos, no Rio de Janeiro. A fim de reestruturar os canaviais atacados e impedir a ampliação da área infestada, decidiu-se pelo plantio de outras variedades que sucederam à Caina. Dentre essas, notabilizaram-se por resistência à gomose as seguintes variedades: a Roxa, Rosa, Salangor, Lousier, Bois Rouge Cavangirie, Ubá e Cristalina (Dantas, 1960). Devido aos prejuízos causados pela gomose e outras doenças importantes (sereh e mosaico), a busca pelo controle desses males começou em diversas áreas, mas foi por meio da hibridação que se chegou a resultados eficientes.

Com o passar do tempo, era visível a necessidade da realização de alguma medida que impulsionasse o setor canavieiro no Brasil. A princípio, lideranças científicas foram convidadas a debater e uma das indicativas foi a criação de um programa de melhoramento financiado pela agroindústria canavieira (Figueiredo, 2008). Com o objetivo de gerar inovações tecnológicas para as áreas agrícolas, melhoramento genético, sistema de produção, colheita, transporte, industrial e de comercialização, foi criada a Copersucar (Mangelsdorf, 1966; Antunes Filho, 1969). Simultaneamente, em âmbito federal, o Instituto do Açúcar e do Alcool – IAA, criado em 1933, estabeleceu o Planalsucar – Programa

Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar e do Programa de Racionalização da Agroindústria Açucareira (Mangelsdorf, 1966; Planalsucar, 1971). Esse programa viria a ter ampla atuação, atingindo todos os estados produtores até ser extinto em 1990. Em 1991, o patrimônio desta estrutura foi incorporado às universidades federais, criando uma ligação de pesquisas em cana-de-açúcar por meio da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro – RIDESA.

A modernização do setor sucroalcooleiro brasileiro deu-se pelo movimento iniciado na década de 60, impulsionado por um momento favorável devido à alta de preço do açúcar no mercado internacional. Na área agrícola, as criações da Coopersucar e Planalsucar fortaleceram as ações no campo e promoveram o desenvolvimento tecnológico, tanto no âmbito do melhoramento genético, quanto no sistema de produção (Figueiredo, 2008).

Em 1973, o Brasil importava 79% de suas necessidades em petróleo. Com a expressiva alta dos preços e o acentuado desembolso de divisas com a importação, o governo brasileiro lançou o Proálcool em 14 de novembro de 1975, pelo Decreto nº 76.593, objetivando estimular a produção de etanol para atender às necessidades do mercado e da política de combustíveis automotivos. (Beauclair, 2009).

Atualmente, a expansão da cultura da cana, em razão dos novos cenários, é uma assertiva incontestável, principalmente, devido ao aumento do mercado mundial de etanol. Ainda, as discussões que envolvem a questão ambiental, a situação do petróleo *versus* etanol, a co-geração de energia via queima do bagaço, palha, e ainda o surgimento de novas tecnologias, como o etanol celulósico são ações promissoras para os futuros cenários da cultura.

2.1.1 Aspectos botânicos

A cana-de-açúcar era conhecida como membro da família das gramíneas pela classificação taxonômica de Engler (1887). No entanto, os estudos de Cronquist (1981) determinaram a cana como uma representante da família Poaceae, mantendo-se todas as demais denominações taxonômicas: tribo Andropogoneae; subtribo: Saccharininae; Gênero: *Saccharum*; Espécies:

Saccharum officinarum, *Saccharum barberi*, *Saccharum robustum*, *Saccharum spontaneum*, *Saccharum sinensis* e *Saccharum edule* (Scarpi e Beauclair, 2008).

Atualmente, a cana cultivada no Brasil e no mundo são híbridos das espécies citadas. Por apresentar altos níveis de sacarose no colmo, boa pureza de caldo, teor de fibra adequado para moagem, alta exigência em solo e clima, a espécie *S. officinarum* tem sido a base dos programas de melhoramento (Scarpi e Beauclair, 2008). Entretanto, essa espécie apresenta susceptibilidade a doenças. Essa alta susceptibilidade da *S. officinarum* às doenças, como a do sereh, gomose e o mosaico (Landell et al., 2006), motivou os produtores a iniciar programas de melhoramento por meio da hibridação entre as espécies do gênero *Saccharum*, como dito anteriormente. Dessa forma, a terminologia taxonômica atual dos cultivares de cana é *Saccharum* spp. (Scarpi e Beauclair, 2008). Atualmente, os programas de melhoramento genético desenvolvem híbridos resistentes aos estresses bióticos e adaptados às diversas condições ambientais, favorecendo a expansão da cultura no Brasil e no mundo (Queiroz, 2006).

Ao discutir os aspectos botânicos da cana-de-açúcar, se faz necessário enfatizar que a cana é uma planta que perfilha, e esta característica influencia todo o seu manejo. Esse perfilhamento afeta as práticas de plantio, definindo o número de gemas por metro. O perfilhamento define ainda a capacidade que cada variedade tem de rebrota por meio das gemas dos colmos. Cada perfilho comporta-se como uma planta independente, pois possui órgãos próprios, mas todos aqueles que compõem a touceira continuam tendo ligações entre si e podem trocar alguns nutrientes e água (Scarpi e Beauclair, 2008).

Os colmos de cana são formados pelo *nó*, região onde se insere a bainha da folha; *zona radicular*, que inclui uma gema e vários primórdios radiculares; *anel de crescimento*, região com células que permite o alongamento do entrenó; *zona cerosa* e finalmente pelo *entrenó* (Martin, 1961). Os colmos apresentam muitas formas, cores e aparências, típicas de cada variedade e muito úteis nas descrições e identificações de cada uma (Scarpi e Beauclair, 2008). Cada nó tem uma gema, disposta alternadamente, protegida pela bainha da folha que é presa ao internódio. As gemas apresentam diversos formatos, podendo ser triangular, pentagonal, romboide, redonda, oval, obovada, oval alongada, retangular e imbricada. (Scarpi e Beauclair, 2008). Quando as folhas mais velhas caem, deixam uma cicatriz, conhecida como cicatriz foliar. Acima dela, na região da

inserção da gema, encontra-se a zona radicular, que contém os primórdios radiculares que darão origem ao sistema radicular no plantio das novas mudas.

As folhas são alternadas, opostas (dependendo da variedade) e presas aos nós dos colmos, podendo ser divididas em duas partes: *lâmina* (parte superior) e *bainha* (parte inferior). A lâmina é uma estrutura alongada, relativamente plana, de comprimento variável na fase adulta entre 0,5 a 1,5 m, com largura de 2,5 a 10 cm, dependendo da variedade. É sustentada por uma nervura central que se estende por todo comprimento da lâmina da folha. As folhas podem apresentar bordos serrilhados e algumas variedades apresentam pelos finos chamados de joçal, no dorso das bainhas podem dificultar o manuseio, quando rígidas (Scarpi e Beauclair, 2008). A partir da nervura central, saem nervuras paralelas contendo um feixe vascular cada. Entre elas são encontradas fileiras de estômatos nas duas faces da folha, mas em maior quantidade no limbo inferior.

O tipo de inflorescência é a panícula ou flecha, e a flor é hermafrodita com um óvulo. Os pistilos têm a terminação com estigmas roxos ou avermelhados, caracterizando o aspecto plumoso da panícula. O florescimento da cana-de-açúcar é indesejável para o manejo, devido ao consumo de energia com perdas no teor de sacarose e alterações na qualidade da matéria-prima industrial, mas é altamente interessante para os programas de melhoramento. Para o florescimento são necessárias algumas condições específicas de fotoperíodo, temperatura e umidade (Scarpi e Beauclair, 2008).

As raízes têm função principal de sustentação, além de absorver água e nutrientes. Possuem formato cilíndrico e se afinam em direção ao ponto de crescimento com regiões bem definidas: a capa protetora da raiz, o ponto de crescimento e região de alongação, e a região dos pelos radiculares (Scarpi e Beauclair, 2008). A descrição do sistema radicular feita por Evans (1935) é a mais aceita em trabalhos referentes às raízes da cana-de-açúcar. O autor descreve três tipos funcionais de raízes: *as superficiais*, que crescem lateralmente a partir da região radicular dos toletes, mais finas, com boa ramificação; *de sustentação*, emergindo de brotos jovens, grossas, atingindo a profundidade de até 1,5 m; e *raízes de cordão*, formadas por aglomerações de raízes verticais mais profundas que as outras. Vasconcelos e Dinardo-Miranda (2006) ressaltam que nos estudos realizados por Evans foram utilizadas variedades que atualmente não são mais

utilizadas. Dessa forma, deve-se considerar a evolução ocorrida nos programas de melhoramento e as mudanças no perfil varietal devem ser relevadas. A arquitetura do sistema radicular também muda de acordo com a idade da planta, tanto entre ciclos como dentro de um mesmo ciclo (Scarpi e Beauclair, 2008).

2.1.2 Aspectos fisiológicos

A quantidade de estudos envolvendo a cana-de-açúcar não é proporcional à importância desta espécie na agricultura, em termos de fonte alimentar e de energia. Por isso, muitos desafios devem ser superados quanto à fisiologia da cana em busca da melhoria do manejo e aproximação do máximo potencial produtivo das cultivares.

Os processos fisiológicos em cana-de-açúcar variam de acordo com o tempo, podendo ser divididos em: brotação, perfilhamento, crescimento, maturação, florescimento e a biossíntese de sacarose (Casagrande e Vasconcelos, 2008).

A cana-de-açúcar inclui-se entre as plantas propagadas vegetativamente, sendo a propagação por sementes realizada após os cruzamentos orientados nos programas de melhoramento visando à obtenção de novas variedades.

A principal condição para uma boa brotação da cana-de-açúcar é uma adequada disponibilidade de água. Sob condições adequadas de umidade do solo, inicia-se o processo de ativação das enzimas e hormônios que controlam a divisão e o crescimento celular. Portanto, a brotação é um processo biológico que envolve gasto de energia. Essa energia é originária da degradação de substâncias de reserva do tolete, tais como carboidratos, lipídeos e proteínas, que irão produzir nucleotídeos ricos em energia, como a adenosina trifosfato (ATP) (Casagrande e Vasconcelos, 2008).

Os principais fatores que influenciam na brotação da cana, além da disponibilidade de água, podem ser relatados como *ambientais* (temperatura, classe do solo), *genéticos e fisiológicos* (variedades, presença de bainha, tamanho e idade das gemas, dominância apical e número de gemas por tolete, e estado fitossanitário da muda) e *fitotécnicos* (preparo do solo, posição e profundidade de plantio, tempo entre corte e plantio, tratamento térmico, aplicação de inseticidas e fertilizantes, dentre outros) (Casagrande e Vasconcelos, 2008).

No plantio, após a brotação, começam a ser formados os perfilhos. O perfilhamento ocorre na parte subterrânea, e, no caso da cana-de-açúcar, é limitado, exceto em algumas variedades da espécie *S. spontaneum*. Os perfilhos originários das gemas dos toletes são denominados maternos ou primários. Considerando que esses possuem gemas na região subterrânea, essas se desenvolvem em novos perfilhos, formando os secundários e assim sucessivamente. (Casagrande e Vasconcelos, 2008).

Dentre os fatores que interferem no perfilhamento, está a já citada variedade cultivada, luminosidade, temperatura, nutrição, umidade do solo, competição com plantas daninhas e culturas consorciadas. Vale salientar que com a cultura estabelecida no campo, o autossombreamento induz a inibição do perfilhamento e aceleração do desenvolvimento do colmo principal (Rodrigues, 1995). As condições proporcionadas pela colheita mecanizada de cana crua (cana colhida sem ser queimada) interferem no perfilhamento da soqueira, podendo haver redução em decorrência da menor temperatura do solo, baixa luminosidade abaixo da palhada, pisoteio e aumento da compactação do solo (Casagrande e Vasconcelos, 2008).

Ao abordar a fisiologia do crescimento da cana-de-açúcar, é fundamental relatar que esta espécie é uma planta que apresenta o metabolismo fotossintético do tipo C_4 . As plantas com esse tipo de metabolismo apresentam maior eficiência fotossintética devido à abundância de cloroplastos dispostos em duas camadas na folha, uma localizada nas células mesofílicas, adjacentes aos estômatos e à superfície foliar, e a outra na região da bainha, ao redor dos feixes vasculares (Casagrande e Vasconcelos, 2008). Essa diferença anatômica corresponde a uma das principais características que separam os metabolismos C_3 e C_4 (Dengler e Nelson, 1999).

Em todas as plantas que possuem metabolismo fotossintético C_4 , o CO_2 que se difunde pelos estômatos é hidratado pela enzima anidrase carbônica, formando o ácido carbônico (HCO_3) (Hatch e Burnell, 1990). Este CO_2 é então fixado nas células do mesófilo pela enzima fosfoenol-piruvato carboxilase (PEPc). O produto desta carboxilação, o oxalacetato (4 carbonos), é rapidamente convertido a malato ou aspartato e um deles, dependendo da espécie, é difundido para as células da bainha vascular. Nas células da bainha vascular, estes compostos são descarboxilados, fornecendo CO_2 para a enzima ribulose 1,5-

bisfosfato carboxilase-oxigenase (Rubisco). O composto remanescente da descarboxilação retorna à célula do mesófilo e é regenerado para a formação de fosfoenol-piruvato (PEP) (Furbank et al., 2000). A Rubisco catalisa a reação entre o CO_2 e a ribulose 1,5 bisfosfato (RuBP) e, portanto, inicia o Ciclo de Calvin, formando 3-fosfoglicerato, que é reduzido a gliceraldeído 3-fosfato (3PGA). O 3PGA é convertido em trioses fosfato (trioses-P) que são exportadas para o citossol, onde é sintetizada a sacarose, ou permanecem no cloroplasto formando o amido (Dennis e Blakeley, 2000; Souza, 2011).

Em relação ao tipo de enzima de descarboxilação presente na célula da bainha vascular, as plantas com metabolismo do tipo C_4 podem apresentar variações bioquímicas (Kanai e Edwards, 1999), resultando em três diferentes subtipos de fotossíntese C_4 : (1) NADP-ME (NADP⁺ - “*malic enzyme*”), (2) NAD-ME (NAD⁺ - “*malic enzyme*”) e (3) PCK ou PEPCK (*Phosphoenolpyruvate carboxykinase*) (Sage e Pearcy, 2000). Além disso, os subtipos podem apresentar diferenças na morfologia, na ultraestrutura dos cloroplastos da bainha vascular e no modo de transporte de metabólitos entre as células (Hatch et al., 1975). Embora a cana-de-açúcar possa trabalhar com as enzimas do metabolismo de PEPCK (Calsa Jr e Figueira, 2007), ela é considerada uma planta C_4 do subtipo NADP-ME (Bowyer e Leegood, 1997; Souza, 2011).

A existência da via C_4 é um exemplo interessante da relação estrutura-função em plantas. A bainha vascular e os mecanismos bioquímicos acoplados à via C_3 criaram, nestas plantas C_4 , uma espécie de “bomba” que torna o sistema fotossintético mais eficiente em certas situações (Buckeridge).

As plantas com metabolismo fotossintético C_4 , quando comparadas às C_3 , são referidas como altamente eficientes na conversão de energia luminosa em biomassa (Pearcy e Ehleringer, 1984). Essas plantas também são capazes de utilizar mais eficientemente a água, pois com uma mesma assimilação fotossintética, as folhas apresentam valores de condutância estomática de 50 a 70% menores do que plantas C_3 (Sage e Pearcy, 2000). Ainda, tais plantas utilizam melhor o nitrogênio (Long, 1999), além de tolerar maiores temperaturas e praticamente não apresentar fotorrespiração.

Em condições de estresse hídrico, o fechamento dos estômatos limita a difusão do CO_2 do meio externo para o mesófilo da folha, ocasionando uma redução da pressão parcial de CO_2 no interior da folha. Uma das primeiras

consequências desta redução é o aumento da atividade oxigenase da Rubisco, e consequente estímulo da fotorrespiração (Gaudillere,1982).

Ainda não se compreende muito bem as funções fisiológicas da fotorrespiração, mas sabe-se que em certas condições, esta rota pode ser um problema, visto que a concentração de O_2 na atmosfera é de 21%, enquanto o CO_2 representa apenas 0,038%, o que aumenta a probabilidade da Rubisco capturar O_2 ao invés de CO_2 . Dessa forma, a planta tem que lidar com uma assimilação indesejável de O_2 porque, ao entrar na planta, o O_2 tem o potencial de formar radicais livres que são altamente deletérios ao metabolismo. Assim, o sistema precisa gastar uma quantidade razoável de energia e nutrientes, comprometendo em 30-40% de fotossíntese em plantas C_3 (Buckeridge).

No processo de formação da inflorescência, é importante detectar o período em que ocorre o estímulo para que o meristema apical se modifique, deixando de produzir folhas e colmos, passando a formar a inflorescência. Este estímulo pode durar 18 - 25 dias, segundo Clements e Awada (1965), sendo o seu principal fator o fotoperíodo (Alexander, 1973). Assim, para o hemisfério Sul, os meses em que haveria estímulo para a formação da inflorescência estariam entre fevereiro e abril, com o florescimento acontecendo entre abril e junho (Casagrande e Vasconcelos, 2008).

A ação dos fitocromos está diretamente envolvida com as respostas fotoperiódicas. Normalmente, existem duas formas de fitocromo, uma delas instável, mas fisiologicamente ativa, o fitocromo vermelho distante ($V_{distante}$) e a forma estável, mas fisiologicamente inativa, o fitocromo vermelho (V) (Rodrigues, 1995). Normalmente, esse cromóforo encontra-se, na forma contrária da radiação que incide em maior concentração. Durante o dia, há maior quantidade de fitocromo V do que $V_{distante}$. Assim, para a indução do florescimento, a cana necessita de baixas concentrações de $V_{distante}$ noturnas. Caso haja qualquer iluminação, a concentração de $V_{distante}$ eleva-se, quebrando o estímulo. Ainda existe uma correlação entre níveis de giberelina (GA) e o fitocromo. Assim, em condições de dias longos, os níveis de GA são altos bem como de $V_{distante}$, levando à inibição do florescimento. Em condições de dias curtos, há baixos níveis de GA, acompanhado por baixas concentrações de $V_{distante}$. Logo, a GA pode inibir o florescimento da cana, ao mesmo tempo em que estimula o crescimento vegetativo (Rodrigues, 1995).

Também se destaca a importância da temperatura no processo. Tomando por base a linha do Equador, a temperatura ganha maior importância pela influência que exerce sobre o florescimento, à medida que vai se afastando dessa região (Alexander, 1973). Além desse aspecto, alguns pesquisadores realçam que, no período de indução do florescimento, as temperaturas noturnas têm maior importância do que as diurnas (Coleman, 1968).

Com relação à umidade, a existência de um período seco é outro fator que prejudica o florescimento. Nas condições brasileiras, Almeida et al., (1945), citados por Christoffoleti (1986), já haviam observado que a deficiência hídrica durante o período indutivo reduz o florescimento. Outro fator citado por Alexander (1973) é a relação Carbono: Nitrogênio (C/N), em que esse autor observou que há menor florescimento quando se combinam altas doses de nitrogênio com a suspensão de irrigação em período adequado.

Terminado o período de indução floral, tem-se o desenvolvimento da inflorescência, com o aparecimento da folha-bandeira. Clements (1975) observou que a folha que estava submetida a modificações para transformar-se em bandeira, era a folha -8, sendo essas modificações traduzidas na diminuição do limbo foliar e grande desenvolvimento da bainha protetora da inflorescência.

Há de se salientar que, se o florescimento é desejável para o melhorista de cana, não satisfaz o produtor em virtude da redução na qualidade da matéria-prima, principalmente pelo alto consumo de reservas da planta, que irão refletir na diminuição do teor de sacarose (Rodrigues, 1995).

Complementando as características fisiológicas da cana-de-açúcar, se faz necessário um enfoque na produção de sacarose e no conhecimento maior de todo sistema de transporte e de acúmulo desse açúcar que é o mais valioso produto da cana-de-açúcar. Em função disso, deve ser cuidadosamente analisado o processo de maturação e as formas de se conseguir incrementar e antecipar esse processo, em função de fatores ambientais e nutricionais, além da possível utilização de reguladores vegetais (Rodrigues, 1995).

Para Magalhães (1987), a sequência de eventos na formação de amidos ou sacarose envolve sistemas metabólicos localizados nos cloroplastos e no citoplasma, ligados pelos transportadores de fosfato localizados nas membranas dos cloroplastos. O mesmo autor afirma que a transferência da sacarose das células do mesófilo para o sistema vascular do floema envolve a passagem

através da plasmalema e da parede celular. Esse transporte atua associado com o transporte de potássio e depende de energia metabólica, ressaltando a grande importância do componente nutricional da planta no processo. Dessa forma, a sacarose segue da fonte pelos vasos condutores e está submetida a uma série de alterações antes de ser armazenada no vacúolo.

Segundo Alexander (1973), o mecanismo de acúmulo de sacarose é o mesmo, tanto em tecidos imaturos como em adultos. No entanto, o acúmulo difere nesses dois tecidos em função de reguladores de crescimento e da ação das invertases.

2.1.3 Aspectos fitotécnicos

Normalmente, a propagação vegetativa da cana é feita por toletes contendo uma ou mais gemas. Como já discutido no tópico sobre aspectos botânicos do presente trabalho, essas gemas contêm nós, entrenós e primórdios de raiz e de gema que se desenvolvem para produzir novos colmos que, nas fases iniciais de desenvolvimento, são nomeados perfilhos (Casagrande e Vasconcelos, 2008). Essas gemas permanecem no estado latente e, havendo condições favoráveis, passam para o estado ativo de crescimento e desenvolvimento (Dillewijn, 1952).

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene que tem seu plantio realizado apenas a cada cinco ou mais anos, o que torna essencial a qualidade da muda, sendo esse fator o de mais baixo custo e de maior retorno econômico ao produtor (Barbosa, 2012).

Ainda de acordo com Barbosa (2012), para produção de mudas, é necessário que o material básico seja de boa procedência, com idade de 7 a 12 meses, proveniente de cana-planta ou primeira soca, além da tomada de algumas medidas fitossanitárias, tais como:

- Desinfestação do podão utilizado na colheita das mudas;
- Vigilância sanitária para erradicação de possíveis touceiras com sintomas de Patógenos;
- Rotação de culturas durante a reforma do canavial, sendo mais recomendado a utilização de amendoim e soja;

- Tratamento térmico, submetendo os colmos à 50,5°C por 2 horas para evitar o raquitismo da cana-soqueira

O período de crescimento da cana é bastante variável, oscilando de 9 a 10 meses na Louisiana (Estados Unidos), a até 2 anos ou mais em regiões do Peru ou África do Sul (Scarpi e Beauclair, 2008). O primeiro ciclo da cultura, chamada de cana-planta (CP), pode ser de 12 ou 18 meses.

A cana-de-açúcar, na região centro-sul do Brasil, pode ser plantada durante todo o ano, porém há algumas restrições que se referem à disponibilidade hídrica e às características da variedade quanto à maturação e ao ciclo fenológico (Barbosa, 2012).

Segundo Barbosa (2012), os principais períodos de plantio e a denominação que a cultura recebe de acordo com esses períodos são:

- Cana-de-ano: plantada de setembro a início de dezembro, apresenta produtividade abaixo de 100 t/ha;

- Cana-de-ano-e-meio: plantada de janeiro a março ou abril, com produtividade acima de 120 t/ha. Nesta época a cultura vegeta por um maior período (12 a 18 meses), não tendo produção durante uma safra. É o período mais utilizado para plantio;

- Cana-de-inverno: plantada de maio a agosto, geralmente período seco na região centro-sul, tem produtividade, geralmente, acima de 100 t/ha, porém é o período que a cultura mais necessita de irrigação devido a baixa disponibilidade de água no solo.

Após o primeiro corte, e para todas as variedades, os ciclos passam a ser de 12 meses. Nessa fase, a planta é conhecida como cana-soca (CS) (Picoli, 2007). Essa CS pode ser colhida cinco ou mais vezes, devendo ser feito investimentos significativos em insumos e tratamentos culturais para menores perdas na produtividade (UNICA, 2004).

2.1.4 Condições climáticas ideais para o cultivo

A cana-de-açúcar é tradicionalmente cultivada em áreas subtropicais entre 15 e 30° de latitude (Rhein, 2008), podendo se estender desde 35°N a 35°S. No entanto, em virtude da expansão da área de cultivo para atender aos programas de energia renovável e bioenergia, a cultura vem enfrentando desafios

tecnológicos (Brunini, 2008). Dessa forma, a caracterização das exigências climáticas e áreas de adaptação tem sido motivo de estudo para atender as exigências do agronegócio. Os fatores ambientais que afetam em maior intensidade a produção de cana-de-açúcar são a temperatura, luz e a disponibilidade de água e nutrientes (Alfonsi et al., 1987).

O desenvolvimento da cana-de-açúcar está intimamente ligado à temperatura ambiente. A temperatura basal para o bom desenvolvimento da cultura está na faixa dos 20°C. A temperatura ótima situa-se entre 22° e 33°C, sendo nessas condições o máximo crescimento da cultura (Domingues, 2010). Acima de 38°C não há crescimento, abaixo de 20°C, o desenvolvimento da cultura é considerado nulo (Barbieri et al., 1977). Segundo Fauconier (1975), citado por Scarpari (2002), o crescimento da cana é máximo no intervalo entre 30°C e 34°C, lento abaixo de 25°C e acima de 35°C, e é praticamente nulo acima de 38°C. Existem vertentes que ainda consideram a faixa ideal para o desenvolvimento da cultura entre 20°C e 35°C (Casagrande, 1991).

O fotoperíodo é ligado ao florescimento da cana-de-açúcar. Para a grande maioria das variedades, são necessários entre 12 e 12,5 horas de fotoperíodo para indução do florescimento. Essa indução floral não é interessante para os produtores, pois, após o seu acontecimento, a formação de novos internódios cessa e pode iniciar o processo de “isoporização” ou “chochamento”, que se caracteriza pelo secamento do interior do colmo e perda de peso final oriunda da redução do volume de caldo (Leite e Crusciol, 2008).

Já com relação à radiação solar, a cana apresenta resposta positiva devido ao seu metabolismo fotossintético (tipo C₄). Quanto maior a intensidade luminosa, maior será a taxa fotossintética realizada pela cultura, refletindo em um maior crescimento e acúmulo de açúcares (Brunini, 2008). A radiação solar afeta todos os estádios de desenvolvimento da cultura, e quando se desenvolve sob condições de baixa luminosidade, a planta apresenta colmos finos e longos, o que diminui o acúmulo de matéria seca (Lucchesi, 1995).

Em regiões tradicionais de cultivo, o total anual de precipitação está entre 1.000 e 1.6000 mm. Não somente os totais mensais ou anuais são importantes, mas também a distribuição das chuvas ao longo do ciclo. Durante o crescimento vegetativo as chuvas devem ser adequadas, já na maturação, o período seco favorece um maior acúmulo de sacarose (Alfonsi et al., 1987).

Há de se destacar que um dos fatores determinantes na queda da produtividade entre as safras 2010/11 e 2011/12 (-11,8%), foi justamente os fatores climáticos. Dentre esses componentes, a falta de chuvas em períodos fundamentais no desenvolvimento da cana não permitiu o pleno desenvolvimento dos canaviais, provocando atraso no início da moagem. Além disso, a ação de geadas, florescimento excessivo em decorrência da temperatura, umidade, fotoperíodo e radiação solar inadequados; e ainda a combinação de chuva e calor (que criou condições propícias para o ataque de doenças), fizeram parte do componente climático que provocou o insucesso da safra 2011/12 (CONAB, 2011).

2.1.5 Características da variedade RB867515

O plantio da cana-de-açúcar no Brasil está distribuído entre as variedades nacionais desenvolvidas, principalmente, por três instituições: Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e o Planalsucar, extinto em 1990, que atualmente tem todo o trabalho de pesquisa realizado pela Rede Interuniversitária para Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA). Atualmente, a RIDESA vem coordenando excelentes trabalhos na área de pesquisa com a cana-de-açúcar (Daros et al., 2010).

A variedade RB867515, lançada oficialmente como variedade comercial pela Universidade Federal de Viçosa em março de 1997, segue atendendo a uma demanda que facilitou o avanço dos canaviais para solos de baixa fertilidade, arenosos e com restrições hídricas em todo Brasil (Daros et al., 2010). No Brasil, a área de plantio da cana-de-açúcar apresenta uma elevada magnitude, e a escolha da variedade é fundamental para que as principais características se adequem às condições edafoclimáticas e de cultivo da região. Para isso, se faz necessário conhecer tanto a morfologia, quanto as características agroindustriais da variedade, e adequá-las à maior quantidade de exigências, para que a maior parte do seu potencial produtivo possa ser expressa em campo. Segundo o catálogo publicado pela RIDESA (Daros et al., 2010), a variedade RB867515 apresenta as seguintes características morfológicas e agroindustriais:

Características Morfológicas

A variedade RB867515 apresenta hábito de crescimento ereto e despalha com facilidade. O perfilhamento é médio, com colmos de diâmetro médio e alta uniformidade. Os colmos possuem entrenós cilíndricos, de cor verde-arroxeadado sob a palha, e roxo intenso quando expostos ao sol. A planta apresenta colmo com pouca rachadura, de aspecto liso e pouca cera. O anel de crescimento tem largura média, de cor verde-amarelada sob a palha e verde-arroxeadado quando exposto ao sol. A zona radicular é de largura média, sem enraizamento aéreo. As gemas são de tamanho médio do tipo pentagonal, pouco proeminentes, ultrapassando o anel de crescimento e com poro germinativo apical. As folhas são de largura média, arqueadas, curvas, e bordos com serrilhamento pouco agressivo. A bainha é de comprimento longo com quantidade de cera regular. Apresenta duas aurículas, sendo uma lanceolada, de tamanho médio, e a outra curta de forma transitória. A lígula é de forma crescente. A parte considerada “palmito” é média, de cor verde-arroxeadado e com pouca cera (Daros et al., 2010).

Características Agroindustriais

Pesquisas realizadas em usinas e destilarias mostraram que a variedade RB867515 apresentou melhor desempenho em solos de textura leve e fertilidade média, frente a quatro importantes variedades (SP79-1011, RB765418, RB72454, RB739359) (Daros et al., 2010). Verificou-se também que a RB867515 apresentou significativos valores de TCH (Tonelada de Cana por Hectare) e TPH (Tonelada de pool por Hectare). Esta variedade tem apresentado boa capacidade de brotação, mesmo em plantios tardios sob baixas temperaturas (Daros et al., 2010). No plantio de ano e meio de cana-planta, pode ocorrer tombamento ao final do ciclo devido a crescimento vigoroso, e ainda pode ocorrer florescimento. Contudo, neste caso, a variedade pode apresentar o fenômeno denominado de “chochamento” ou “isoporização”.

A colheita é recomendada nos meses de junho a agosto, pois apresenta teor de fibra relativamente alto, com média de 13% em ensaios colhidos (Daros et al., 2010). Também são características dessa variedade, o alto teor de sacarose,

alta produtividade agrícola, boa resposta à utilização de maturadores, excelente desenvolvimento, e uma boa brotação na planta e socas (Daros et al., 2010).

2.2 Importância econômica

A importância da cultura da cana-de-açúcar tem raízes antigas na economia brasileira, sendo as primeiras mudas plantadas na capitania de São Vicente - São Paulo. Mas foi no Nordeste, especialmente nas capitanias de Pernambuco e da Bahia, que os engenhos de açúcar se multiplicaram. O Brasil foi o maior produtor e fornecedor mundial de açúcar até o fim do século XVII. Historicamente, a cana-de-açúcar sempre foi um dos principais produtos agrícolas do Brasil (Beauclair et al., 2009). Depois da década de 70, como abordado anteriormente, a crise do petróleo promoveu uma intensa produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, por meio de uma utilização direta em motores a explosão (hidratado) ou em mistura com a gasolina (anidro). Nesta época, foi criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) para estimular a produção de etanol e atender o mercado interno e externo. Trinta anos depois do início do Proálcool, o Brasil vive uma nova expansão dos canaviais com o propósito de oferecer, em grande escala, o combustível alternativo (Beauclair et al., 2009). Desde então, o álcool combustível destacou-se como matéria-prima derivada da cana-de-açúcar, cuja fração principal destinava-se, sobretudo, à extração do açúcar (Mozambani et al., 2006).

O plantio comercial visa principalmente à obtenção do açúcar e do etanol. Contudo, existem outros subprodutos que podem ser utilizados em diversas áreas, como por exemplo: o melado e também o bagaço, que podem ser usados na alimentação animal e na geração de energia por meio da queima. Outro importante derivado da cana é a cachaça, obtida da fermentação e da destilação do caldo e muito consumida, principalmente no Brasil (Beauclair et al., 2009). Além disso, uma grande “reserva” de biocombustível entusiasma a cadeia produtiva. Ela se refere à produção do etanol celulósico extraído a partir da biomassa, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar (Santos et al., 2010). Estudos iniciais apontam que o processo poderá ampliar a oferta de etanol no Brasil em pelo menos um terço, o que significa acréscimo de cerca de 11 bilhões de litros (Santos et al., 2010). Esse surgimento é importante porque, além da alta

demanda de exportação, o mercado interno não para de crescer, principalmente, devido ao grande aumento da frota de carros bicompostíveis. Atualmente, são mais de 11 milhões de veículos, dos quais 2 milhões produzidos e comercializados até outubro de 2010 (Santos et al., 2010).

Em levantamento realizado pela CONAB entre outubro e novembro de 2011, a companhia registrou que a lavoura da cana-de-açúcar continua em expansão no Brasil, destacando o começo de atividades em novas usinas, distribuídas nos estados de Minas Gerais (3), São Paulo (2), Goiás (2), e uma nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Rio de Janeiro (CONAB, 2011).

A área destinada à atividade sucroalcooleira foi estimada em 8.368,4 mil hectares no Brasil. O Estado de São Paulo continua sendo o maior produtor com 52,2% (4.370 mil hectares), seguido por Minas Gerais com 8,87% (742,65 mil hectares), Goiás com 8,1% (678,42 mil hectares), Paraná com 7,3% (611,44 mil hectares) Mato Grosso do Sul com 5,70% (480,86 mil hectares), Alagoas com 5,45% (463,65 mil hectares), e Pernambuco com 3,89% (326,11 mil hectares) (CONAB, 2011).

O total da área de expansão em todo País deve ficar em 697.770,9 hectares, sendo a maior parte na região Sudeste, responsável por 38,04% do total da área nova agregada (CONAB, 2011).

Quanto ao aspecto agrônômico, a lavoura de cana-de-açúcar apresentou desenvolvimento da safra (2011/12) inferior ao da safra passada (2010/11). As causas foram diversas, mas, o clima foi o principal fator de queda da produção, com a ocorrência de secas, geadas e luminosidade aliada às amplitudes térmicas que estimularam o florescimento das lavouras. Outros fatores que reforçaram a queda da produtividade foram: a falta de renovação dos canaviais, diminuição da quantidade de insumos aplicados e a utilização da mecanização da colheita, que acelera a necessidade de renovação do canavial.

Dessa forma, a produtividade média brasileira foi estimada em 68.289 kg. ha⁻¹, 11,8% menor que a na safra 2010/11, com previsão do total de cana moída de 571.471,0 milhões de toneladas, queda de 8,4% em relação à safra 2010/11. A previsão de esmagamento de cana para a produção de açúcar é de 283,9 milhões de toneladas. Já para a produção de etanol, serão esmagadas 287,6 milhões de toneladas de cana para produção de 22.857,6 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2011).

A cogeração, que aproveita a biomassa de cana-de-açúcar, é um dos pilares da revolução da bioenergia no país. Além da competitividade estrutural em termos de preço e quantidade, a bioeletricidade pode ser solução ambientalmente limpa e econômica (CNI, 2007).

A cana-de-açúcar se consolidou como a segunda fonte energética mais importante, inferior apenas ao petróleo. Nessa conjuntura, o governo brasileiro acredita no potencial da cultura e investe em políticas públicas para a expansão produtiva (BRASIL, 2011).

De acordo com a Unica (União da Indústria de Cana-de-açúcar), de 2003 a 2010 o Brasil evitou a emissão de 103,44 milhões de toneladas de gás carbônico (CO₂) na atmosfera graças ao uso de etanol na frota de veículos bicombustíveis. O produto obtido da cana-de-açúcar emite 90% menos gases causadores do efeito estufa comparado à gasolina, gerando ganhos ambientais evidentes. No entanto, os biocombustíveis não podem ser considerados como estritamente renováveis, como a energia eólica ou solar, uma vez que sua produção depende de recursos finitos como terras, nutrientes e água. A cadeia de produção de biocombustíveis utiliza água em dois principais pontos, na produção e no processamento, sendo a produção a maior contribuinte para o grande consumo de água (Varghese, 2007). Sendo assim, os estudos relacionados ao consumo de água por plantas produtoras de biocombustíveis, bem como os efeitos da limitação hídrica do solo sobre o processo fotossintético destas plantas são de extrema importância.

2.3 Estado do Rio de Janeiro

A agricultura do Rio de Janeiro é pouco expressiva por representar cerca de 1% do PIB do estado. Isso pode ser considerado impreciso, levando-se em conta os fatores compreendidos durante toda a cadeia produtiva. Incluem-se, aí, a escolha e limpeza do produto, preparo para comercialização, embalagem, transporte, industrialização e a comercialização propriamente dita, que compõem, junto com a fase agrícola, o chamado agronegócio, que representa cerca de 16% do PIB do Estado (Andrade, 2007). Deve-se ressaltar, ainda, que o setor é o que gera mais empregos por unidade monetária aplicada, reduzindo o problema habitacional das grandes cidades e possibilitando o abastecimento, além de

proporcionar o desenvolvimento dos municípios do interior. Assim, deduz-se que qualquer esforço bem coordenado para incentivar o agronegócio no Estado será compensador. Com esse entendimento, o Governo do Estado do Rio de Janeiro promulgou o Decreto Estadual nº 37.927, de 06.07.2005, que instituiu o Programa RioBiodiesel (Andrade, 2007). Estas informações mostram que o estado do Rio de Janeiro já possui estratégias para incentivar o consumo/produção dos biocombustíveis. Obviamente, o uso do etanol da cana-de-açúcar será um dos produtos a ser incentivado.

No estado do Rio de Janeiro, dentre os diversos produtos agrícolas cultivados, a cana-de-açúcar é a cultura de maior importância econômica, apresentando a maior área colhida e o maior valor de produção. Em 2005, o estado registrou a maior safra de cana dos últimos dez anos: 6,5 milhões de toneladas, 15% a mais que na safra anterior (Veiga, 2006). O recorde na produção foi resultado de condições climáticas adequadas, inovações tecnológicas e pesquisa científica aplicada. A região Norte do estado do Rio de Janeiro foi uma das primeiras a iniciar a atividade canavieira, a qual ainda representa um importante segmento na economia regional. De acordo com o levantamento da Produção Agrícola Mundial 2003/2004 do IBGE, citado por Veiga (2006), Campos dos Goytacazes era o município que apresentava a maior área colhida de cana-de-açúcar, com cerca de 60% do total da área do Estado. Em relação à quantidade total de cana-de-açúcar produzida por município, Campos dos Goytacazes ocupava o segundo lugar, seguido apenas do município de Morro Agudo, situado na região nordeste do Estado de São Paulo (Veiga, 2006). No entanto, nos últimos anos, esse cenário se alterou e o Rio de Janeiro vem perdendo espaço na produção de cana-de-açúcar. Atualmente o estado tem a menor área plantada (41,3 mil ha) e é o menor produtor (2.065 mil t) da região Sudeste (Quadro 1). Apesar de ter registrado aumento da produtividade em relação à safra 2010/11 (1,1%), a diminuição da área plantada em relação à mesma safra levou a redução de 18,6% de sua produção (CONAB, 2011).

Quadro 1. Área plantada, produtividade e produção de cana-de-açúcar do Brasil por região / UF. Seta indica o Estado do Rio de Janeiro. Fonte: CONAB - 3º levantamento. Dezembro 2011

REGIÃO/UF	ÁREA (Em mil ha)			PRODUTIVIDADE (Em kg/ha)			PRODUÇÃO (Em mil t)		
	Safra 2010/11	Safra 2011/12	VAR. %	Safra 2010/11	Safra 2011/12	VAR. %	Safra 2010/11	Safra 2011/12	VAR. %
NORTE	19,6	34,8	77,20	65.124	73.889	13,46	1.278,4	2.570,6	101,10
RO	2,610	3,160	21,00	52.380	56.782	8,40	136,7	179,4	31,20
AC	0,420	0,570	35,00	80.400	92.350	14,90	33,8	52,6	55,60
AM	3,800	3,780	(0,50)	91.320	74.144	(18,80)	347,0	280,3	(19,20)
PA	9,980	12,570	26,00	52.290	55.000	5,20	521,9	691,4	32,50
TO	2,820	14,710	422	84.750	92.925	9,6	239,0	1.366,9	471,9
NORDESTE	1.113,2	1.120,1	0,60	55.764	60.279	8,10	62.079,4	67.520,0	8,80
MA	42,100	39,570	(6,00)	55.285	59.383	7,40	2.327,5	2.349,8	1,00
PI	13,290	13,910	4,70	62.973	70.660	12,20	836,9	982,9	17,40
CE	2,760	3,420	24,00	65.380	70.100	7,20	180,5	239,7	32,80
RN	65,720	62,260	(5,27)	41.530	51.534	24,10	2.729,4	3.208,5	17,60
PB	111,800	122,590	9,65	46.926	53.071	13,10	5.246,3	6.506,0	24,00
PE	346,820	326,110	(5,97)	48.500	56.515	16,50	16.820,8	18.430,1	9,60
AL	451,199	463,650	2,76	64.540	64.350	(0,30)	29.120,4	29.835,9	2,50
SE	36,990	37,260	0,73	54.760	66.000	20,50	2.025,6	2.459,2	21,40
BA	42,570	51,360	20,65	65.590	68.300	4,10	2.792,2	3.507,9	25,60
CENTRO-OESTE	1.202,5	1.379,4	14,70	77.624	69.282	(10,75)	93.344,7	95.566,1	2,40
MT	207,050	220,090	6,30	65.980	61.547	(6,70)	13.661,2	13.545,9	(0,80)
MS	396,160	480,860	21,38	84.503	70.682	(16,40)	33.476,7	33.988,1	1,50
GO	599,310	678,420	13,20	77.100	70.800	(8,20)	46.206,8	48.032,1	4,00
SUDESTE	5.136,5	5.221,0	1,60	82.507	69.760	(15,40)	423.799,5	364.212,5	(14,10)
MG	659,550	742,650	12,60	84.927	67.204	(20,90)	56.013,6	49.909,1	(10,90)
ES	68,650	66,930	(2,50)	51.345	62.224	21,20	3.524,8	4.164,7	18,20
RJ →	51,330	41,310	(19,53)	49.440	50.000	1,10	2.537,8	2.065,5	(18,60)
SP	4.357,010	4.370,080	0,30	83.021	70.496	(15,10)	361.723,3	308.073,2	(14,80)
SUL	584,0	613,1	5,00	74.318	67.850	(8,70)	43.403,1	41.601,8	(4,20)
PR	582,320	611,440	5,00	74.394	67.900	(8,70)	43.321,1	41.516,8	(4,20)
RS	1,700	1,700	-	48.250	50.000	3,60	82,0	85,0	3,60
NORTE/NORDESTE	1.132,9	1.154,9	1,90	55.926	60.689	8,50	63.357,8	70.090,6	10,60
CENTRO-SUL	6.923,1	7.213,5	4,20	80.968	69.506	(14,20)	560.547,3	501.380,4	(10,60)
BRASIL	8.056,0	8.368,4	3,90	77.446	68.289	(11,80)	623.905,1	571.471,0	(8,40)

2.4 Importância da água

A água é um recurso imprescindível para a produção de alimentos e biomassa, sendo a segurança energética e hídrica de uma nação. Enquanto estão disponíveis várias fontes para alcançar a segurança energética, apenas uma maneira para assegurar um nível de conforto em termos de disponibilidade hídrica existe, seu manejo sustentável (Varghese, 2007).

Em muitas regiões do globo, as projeções atuais do Painel Internacional para Mudanças Climáticas prevêem que a escassez de água e a temperatura irão aumentar em um futuro próximo. Apesar do aumento da concentração de CO₂ na atmosfera poder compensar parcialmente os efeitos dessas alterações no desenvolvimento das plantas, principalmente àquelas com metabolismo fotossintético C₃, não se sabe as consequências concretas dessas mudanças. Contudo, os estudos alertam que a ação das mudanças climáticas globais pode causar um efeito prejudicial na produção de alimentos, e tal ação é prevista para ocorrer em muitas das principais regiões produtoras do mundo (Lobell et al. 2008).

A crescente preocupação sobre a capacidade do homem de alimentar uma população em crescimento resultou em um esforço para dobrar a produção de alimentos. As previsões mais otimistas sugerem que um aumento de 50% na produção de alimentos será necessário em um futuro próximo (The Royal Society, 2009; Chaves e Davies, 2010). Atualmente o mundo possui 7 bilhões de habitantes, com projeções para 10 bilhões em poucos anos (Kollodge, 2011).

Existe um conflito no aumento da demanda global de alimentos, aliada à diminuição dos recursos hídricos que precisa ser resolvida. Essa segurança pode ser alcançada com a agricultura irrigada (Morinson et al., 2008), até porque, apesar das áreas irrigadas responderem por aproximadamente 18% das terras cultivadas do mundo em 2003 (FAOSTAT 2006), elas produziram cerca de 40-45% do total de alimentos (Döll & Siebert, 2002). Dessa forma, a área irrigada deve ser aumentada em mais de 20%, e o rendimento das culturas irrigadas deve ser aumentado em 40% até 2025 para assegurar o fornecimento de alimento para toda população (Lascano e Sojka, 2007).

O fornecimento de água é essencial para todas as formas de agricultura, embora a quantidade necessitada seja variável dependendo da cultura e das regiões climáticas em que será feito o cultivo. Dada a dimensão da atividade

agrícola no mundo (1,54 bilhões de hectares de terra arável; FAOSTAT 2006), cerca de 70% da água doce é utilizada na agricultura (FAO 2002; WRI 2005). Esse número fica ainda maior quando se fala nos países em desenvolvimento, o que vem causando conflitos em relação às demais formas de utilizar a água. No Brasil, o setor de irrigação é o que possui a maior parcela de vazão retirada (cerca de 47%) e a maior vazão consumida (69%) (BRASIL, 2009).

De um modo geral, em terras brasileiras, cada hectare irrigado equivale a três hectares de sequeiro em produtividade física e a sete em produtividade econômica (BRASIL, 2004). Esses dados fornecem uma ideia da importância da prática da irrigação no contexto alimentar (Paulino et al., 2011). De acordo com Mukherji e Facon (2009), nos próximos 25 anos, 80% dos produtos necessários para satisfazer as necessidades da população mundial serão providos pelos cultivos irrigados.

Atualmente, existe um consenso de que as mudanças climáticas poderão aumentar a escassez de água, agravando a seca em várias regiões (IPCC 2007). Dessa forma, produtores de muitos países estão enfrentando restrições legislativas sobre o uso da água (Morinson et al., 2008) em prol de uma utilização mais racional. No que se refere à legislação sobre a gestão das águas no Brasil, existe a Lei nº 9.433 (“Lei das Águas”), de 08/01/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; o Decreto nº 4.613, de 11/03/2003, que regulamenta o Conselho Nacional de Recursos Hídricos; e a Lei nº 9.984, de 17/07/2000 sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Atualmente, está em tramitação no Congresso brasileiro o Projeto de Lei nº 6.381/2005 que propõe uma nova Política Nacional de Irrigação para o Brasil. (Silva et al., 2005)

Assim, reduzir o uso da água na agricultura e fazer a utilização desse recurso de forma sustentável é uma questão da maior importância que exige a combinação de conhecimentos de áreas afins, como a fisiologia, biotecnologia, melhoramento genético e engenharia que possam ter como consequência uma agricultura de economia de água (Morinson et al., 2008). O mesmo autor cita que é preciso utilizar os conhecimentos agrônômicos de forma adequada para escolher as culturas mais adaptadas ao ambiente que sejam cultivadas,

utilizando-se menos água, quer seja cultivando-se em sequeiro ou sob irrigação. Morinson et al. (2008), também observam que é preciso desenvolver culturas que exijam menos água para produzir rendimento suficiente, por meio da compreensão dos mecanismos fisiológicos que determinam o crescimento e a perda de água em resposta à baixa disponibilidade hídrica. O objetivo deve ser reduzir a quantidade de água utilizada por unidade de rendimento alcançado. Como disse o Secretário Geral da ONU, Kofi Annan, em 2000: "*Precisamos de uma revolução azul na agricultura em que se necessita concentrar esforços em aumentar a produtividade das culturas por unidade de água consumida e aplicada*" (UNIS 2000 apud Morinson et al., 2008).

Nesse sentido, práticas agrícolas devem focar um aumento de produtividade sustentável, utilizando-se de técnicas que promovam, principalmente, o aumento da eficiência de uso da água. Neste contexto, a irrigação parcial do sistema radicular pode ser uma excelente alternativa.

2.4.1 Água x cana-de-açúcar

De todos os recursos necessários ao pleno desenvolvimento das plantas, a água é o mais abundante e, ao mesmo tempo, o mais limitante. A razão para essa limitação é a enorme quantidade de água utilizada pelas plantas. Cerca de 97% da água absorvida pelas raízes é transpirada das superfícies foliares. Os outros 3% permanecem na planta para suprir o crescimento e ser utilizada na fotossíntese ou em outros processos metabólicos (Taiz e Zeiger, 2009). Apesar da significativa perda, esse fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera é essencial para a absorção de nutrientes e manutenção da temperatura foliar, sendo a transpiração influenciada pela incidência de energia radiante, pelo déficit de pressão de vapor do ar e pela resistência difusiva do vapor de água no interior da planta (Nogueira et. al., 2000; 2002).

O consumo hídrico da cultura da cana-de-açúcar varia com o clima, disponibilidade de água e com o próprio desenvolvimento e duração do ciclo da cultura, podendo variar de 1.000 a 2.000 mm, segundo a FAO (Doorenbos e Kassam, 1979). Comumente, a cultura está estabelecida em regiões com precipitações de 1.000 a 1.500 mm ano⁻¹, porém, podem-se observar casos excepcionais de 3.000 mm ano⁻¹, como na região nordeste da Austrália

(Robertson et al., 1997). No entanto, em muitas regiões do mundo onde a cana é cultivada, a água é o fator limitante na produção (Inman-Bamber e Smith, 2005). Mesmo em regiões com 1.500 a 2.000 mm de chuva por ano, a irregularidade na distribuição de chuvas pode causar limitações no desenvolvimento das plantas (Taiz e Zeiger, 2009).

Durante todo o ciclo, o conhecimento da variação das fases de desenvolvimento da cultura é fundamental para que se possa modelar e quantificar o crescimento nos diferentes estádios (Teruel et al., 1997) e identificar aqueles em que a técnica de irrigação é fundamental para assegurar boa produtividade. Além disso, entender a resposta da cana-de-açúcar frente ao déficit hídrico é de suma importância para a seleção de cultivares tolerantes à seca e para o desenvolvimento de práticas de manejo adequadas às diferentes condições climáticas (Smith e Singels, 2006).

No geral, estima-se que exista um retorno entre 1 a 2 toneladas de açúcar para cada 1.000 toneladas de água utilizada (Robertson et al., 1997). Boas produtividades de cana, de acordo com a FAO, vão de 70 a 100 t ha⁻¹ na região dos trópicos úmidos e 110 a 150 t ha⁻¹ no trópico seco com irrigação.

No cultivo da cana-de-açúcar, a irrigação pode ser feita de forma eventual ou complementar às chuvas. Esta técnica pode ser essencial para o desenvolvimento em regiões secas ou apenas para a disposição de resíduos, como na aplicação da vinhaça (Pires et al., 2008).

O emprego da irrigação na produção da cana-de-açúcar tem sido bastante questionado, principalmente, pelo alto investimento para realização desta técnica. No entanto, as novas tecnologias de irrigação baratearam significativamente em relação às décadas passadas, o que vem possibilitando a evolução e o uso dessa tecnologia no Brasil (Pires et al., 2008).

A expansão do cultivo da cana está contribuindo para que os produtores plantem a cana em áreas antes consideradas marginais, principalmente devido à deficiência hídrica. Segundo o diretor da UNICA, Antônio de Pádua Rodrigues, até 2020, a expectativa dos usineiros é dobrar a produção, de 555 milhões de toneladas para 1,2 bilhão de toneladas. “*Precisamos produzir muito mais cana para atender a todos os mercados que a gente tem e, para isso, precisamos de políticas públicas e privadas também*” (Cruz, 2011).

Para atender esse aumento expressivo, a irrigação é uma alternativa incontestável para suprir a demanda evaporativa da cultura. É importante salientar que, com base na fisiologia da cana, o potencial produtivo é muito favorecido em plantios nas áreas com grande disponibilidade de radiação e temperaturas elevadas, desde que atendida a demanda hídrica da cultura. Assim, o aumento da produção e o retorno econômico pelo emprego da irrigação são bastante dependentes da região de cultivo, além das práticas de manejo adotadas (Pires et al., 2008).

Na cultura da cana-de-açúcar, a irrigação é feita por diferentes métodos, dentre eles a irrigação por aspersão, localizada, por superfície e subterrânea, não existindo um melhor, mas um mais adaptado à situação encontrada no campo e em nível tecnológico e financeiro do produtor. Para escolha do método adequado, devem-se considerar alguns aspectos, tais como: mão de obra, disponibilidade e qualidade da água, energia, topografia do terreno, operação e manutenção do sistema, clima, compatibilidade do método de irrigação com os tratamentos culturais e a importância da técnica no sistema produtivo (Pires et al., 2008).

Dentre os sistemas de irrigação utilizados na cana-de-açúcar, serão enfatizados os de possível adaptação à irrigação parcial do sistema radicular, quais sejam: irrigação por superfície, localizada, localizada subterrânea e com fertirrigação.

A irrigação por superfície na cana-de-açúcar é praticada por sulcos retos, em contornos, em corrugação ou zigue-zague. Nesse tipo de irrigação, a água é aplicada nos sulcos em taxa acima da capacidade de infiltração do solo possibilitando fluir sobre a superfície durante tempo suficiente para que ocorra infiltração e seja atingido o final do sulco. O desempenho é afetado pela vazão de entrada, lâmina e manejo da irrigação, características de infiltração da água no solo e pela declividade, comprimento, forma e rugosidade hidráulica do sulco (Andrade et al., 1998). Esse método é bem rústico e não apresenta boa eficiência no uso da água, no entanto, é bastante barato e simples. Torna-se importante relatar que, adaptando-se a irrigação parcial do sistema radicular, será possível atingir uma eficiência do uso da água bem maior.

Outro método de irrigação utilizado na cultura é a irrigação localizada. Nesse método, a água é conduzida por tubulações até as plantas, sendo aplicada diretamente na região das raízes, molhando apenas parte da superfície do solo. A

água é aplicada em pequenas vazões, baixas pressões com alta frequência, permitindo a manutenção da umidade do solo próxima à capacidade de campo. Também são características desse sistema a alta eficiência do uso da água, boa uniformidade de aplicação, redução de perdas de água por escoamento superficial ou percolação profunda e a economia de água, energia e mão de obra. (Pires et al., 2008)

Uma derivação desse método é a irrigação localizada subterrânea. Esse tipo de irrigação tem sido adotado em muitos países no sistema de produção de cana-de-açúcar, sendo feita por instalações subterrâneas antes do plantio. Dessa forma, a água é aplicada diretamente na zona radicular na subsuperfície do solo. Esse sistema oferece como vantagens maior eficiência do uso da água, menor custo de manutenção, redução de perdas com vandalismo, e nenhuma interferência nas operações agrícolas. Esta técnica pode ainda estimular o sistema radicular a atingir maiores profundidades, diminuir a perda de água e nutrientes, possibilitar que a superfície do solo permaneça seca, diminuindo a incidência de plantas invasoras, pragas e doenças, além de reduzir as perdas por evaporação (Pires et al., 2008)

Devido ao alto custo de implantação, os sistemas de irrigação localizados devem, preferencialmente, ser associados à adubação, ou seja, à fertirrigação. Isso permite a aplicação fracionada de nutrientes, contribuindo no aumento de produtividade, e conseqüente compensação do investimento feito na implantação do sistema.

Alguns autores têm investigado a viabilidade econômica da adoção da irrigação complementar às chuvas para aumento de produtividade em áreas mais próximas às usinas, evitando dessa forma um maior custo com arrendamento de terras em áreas mais distantes (Pires et al., 2008). Scardua e Rosenfeld (1987) apresentaram resultados comparando produtividades de cana irrigada e não irrigada. O cultivar C-76 irrigado por sulcos na região de Araras – SP apresentou aumento de produção médio de 28% no tratamento irrigado, considerando-se sete cortes. Guazzeli e Paes (1997) observaram aumento de produção da ordem de 20% com cana irrigada na região de Ribeirão Preto – SP. Mattoli et al., (1998) avaliaram a economicidade da irrigação complementar da cultura da cana-de-açúcar na região norte de São Paulo, suprimindo apenas metade da deficiência hídrica das soqueiras de cana, apenas nos primeiros estádios de

desenvolvimento. A irrigação complementar proporcionou aumento dos rendimentos da cultura e os retornos líquidos foram maiores, quando considerados os benefícios indiretos, como a redução do custo de arrendamento, plantio, tratos culturais e transporte da cana. Os resultados também demonstraram que a irrigação complementar às socas apresentou viabilidade técnica e econômica para as lavouras canavieiras da região. Magro (2000) relatou que a viabilidade econômica da irrigação da cana deve considerar a distância da fonte de água e o custo para adução.

A adoção da irrigação ainda deve ser considerada como uma técnica que favorece a menor oscilação na produção, uma vez que não fica dependente das condições climáticas para estabelecer déficits hídricos importantes ou não (Pires et al., 2008). No entanto, deve-se considerar o fato de que muitos produtores utilizam a irrigação sem um planejamento adequado, sem considerar as necessidades hídricas, o manejo apropriado de água na cultura, e sem o conhecimento das peculiaridades fisiológicas do crescimento da cana-de-açúcar irrigada (Farias et al., 2008). Dessa forma, é adequado fornecer esclarecimento técnico para evitar tomadas de decisão precipitadas que possam comprometer cultivos.

Além da relevância do cultivo irrigado no aumento da produtividade, na vida útil do canavial e no aumento do lucro do produtor, existem benefícios indiretos, como o aumento do número de empregos na região (Bernardo, 2006). Aliado a essas respostas positivas de produtividade e nas consequências da baixa disponibilidade hídrica em todos os processos fisiológicos necessários para o desenvolvimento pleno da cultura (Valliyodan e Nguyen, 2006), se faz necessário utilizar-se de alternativas que supram essa demanda hídrica com sustentabilidade. Dessa forma, a adaptação da irrigação parcial do sistema radicular (IPSR) em sistemas de irrigação já implantados ou a implantação da IPSR em cultivos novos de cana-de-açúcar pode ser uma alternativa na melhoria da eficiência do uso da água e segurança de produtividades elevadas.

2.5 Irrigação parcial do sistema radicular

Na produção de culturas, principalmente nas regiões áridas e semiáridas, o uso eficaz da água de irrigação tornou-se uma ação importante. Nestas áreas, irrigar as culturas tem sido a principal força motriz para o desenvolvimento agrícola há algum tempo (Khang e Zhang, 2004). Segundo estes mesmos autores, muito esforço tem sido gasto no desenvolvimento de técnicas de irrigação que melhorem a eficiência do uso da água nas culturas, dentre elas destacam-se o déficit de irrigação (DI) e a irrigação parcial do sistema radicular (IPSR). A IPSR é uma forma modificada do DI (English et al., 1990), que preconiza irrigar apenas metade do sistema radicular em cada evento de irrigação, deixando a outra parte com baixa disponibilidade hídrica até o momento da reirrigação, quando alternam-se os lados irrigado e não-irrigado das raízes. (Sepaskhah e Ahmadi, 2010).

Originalmente, o conceito da IPSR foi aplicado pela primeira vez por Grimes et al. (1968) nos Estados Unidos, trabalhando com algodão cultivado no campo sob irrigação por sulcos alternados. Em seguida, vieram Sepaskhah et al., (1976), Sepaskhah e Amin-Sichani (1976), e Samadi e Sepaskhah (1984) com feijão irrigado por meio de superfície e por gotejamento subsuperficial no Irã .

Esta técnica tem dois pressupostos teóricos, as plantas totalmente irrigadas, apresentam grande abertura estomática, funcionando em uma condição considerada de “luxo”. Dessa forma, um pequeno estreitamento da abertura estomática poderia reduzir a perda de água substancialmente com pouco efeito sobre a fotossíntese (Jones, 1992). A parte do sistema radicular exposta à região com baixa disponibilidade hídrica no solo pode “responder” a esse estresse enviando um sinal químico originário das raízes, possivelmente sintetizando o ácido abscísico (ABA). Isso pode permitir que estes sinais, transportados para parte aérea via corrente transpiratória, promovam a diminuição da condutância estomática, da fotossíntese, e do crescimento (Loveys, 1984; Gowing et al., 1990; Azevedo, 2006), além de reduzir a perda de água (Davies e Zhang, 1991; Kang e Zhang, 2004).

O estresse tem elementos construtivos e destrutivos, e é um fator de seleção para incrementar a tolerância e evolução adaptativa da planta (Pimentel, 2005). Por outro lado, um estresse suave pode ativar o metabolismo celular e aumentar a atividade fisiológica da planta (Boyer, 1978) sem causar nenhum

dano, mesmo em longo prazo, sendo, portanto, favorável à planta (Lichtenthaler, 1996). Assim, o estresse hídrico moderado em uma parte da raiz serviria apenas como uma válvula sinalizadora para a planta fechar os estômatos (Azevedo, 2006). Teoricamente, é uma situação simples o esperado aumento na eficiência do uso da água (EUA) sem efeitos na produtividade, como encontrado por Stoll et al., (2000) em videira. No entanto, aumentar a EUA não é tão simples, pois em muitas culturas o controle estomático sobre a transpiração é mínimo e depende do ambiente ou da atmosfera de "acoplamento" (Jarvis, 1985; Jarvis e McNaughton, 1986). Em um dossel denso, por exemplo, a resistência da camada de ar limítrofe pode ser tão alta que a resistência estomática é apenas uma pequena proporção de toda resistência à difusão e evaporação das folhas (Khang e Zhang, 2004).

Para sustentar o efeito da IPSR nos estômatos, é necessário regular os lados úmido e seco das raízes a um dado período, dependendo da cultura cultivada, demanda evaporativa e do tipo de solo, sendo o intervalo ideal, segundo Stoll et al. (2000), entre 10 e 14 dias. Uma questão fundamental que envolve esse intervalo está ligada às raízes. As raízes expostas ao solo seco por muito tempo podem ficar suberizadas, apresentar baixa condutividade hidráulica e perda da sensibilidade. É necessário saber quanto tempo essas raízes podem sobreviver e quais os efeitos que serão sentidos com a variação decorrente do ciclo de molhagem de determinada cultura (Kang e Zhang, 2004). No entanto, essa mesma condição pode trazer benefícios para a planta por meio do estímulo da formação de raízes secundárias, possibilitando um possível aumento da sensibilidade quanto à desidratação do solo, além de proporcionar aumento na absorção de nutrientes (Kang e Zhang, 2004).

Sepaskhah e Ahmadi (2010) citam que a técnica da IPSR vem sendo utilizada de diversas maneiras, dependendo da cultura, das condições do solo, das condições ambientais e do método de irrigação adotado. Dentre os métodos, os autores destacam a irrigação por sulcos alternados, que resultou em maior produtividade por água aplicada (Sepaskhah e Parand, 2006; Sepaskhah e Ghasemi, 2008; Sepaskhah e Hosseini, 2008). Na irrigação por gotejamento superficial e subterrâneo, a IPSR foi utilizada para diversas culturas, como feijão (Sepaskhah e Amin-Sichani, 1976), pimentão (Kang et al., 2001.), maçã (Leib et

al., 2006.), batata (Ahmadi et al., 2010), tomate (Kaman et al., 2006), algodão (Du et al., 2008) e uva (de la Hera et al., 2007).

Experimentos controlados realizados em casa de vegetação e no campo têm demonstrado que é possível obter respostas de forma independente dos efeitos do volume de água aplicado nas diversas culturas. Basicamente, o que eles mostram é que a IPSR muda a maneira que as plantas respondem às condições da evaporação. Em condições de baixa demanda evaporativa, há pouca diferença entre os tratamentos, mas quando as condições se tornam mais estressante as plantas submetidas à IPSR reduzem a transpiração relativamente mais do que as convencionalmente irrigadas. No entanto, em muitos estudos onde a IPSR superou a irrigação convencional, não havia um controle adequado e, portanto, confundiram-se dois efeitos: a quantidade de água aplicada e o princípio-chave dos ciclos de “seco-molhado” nas partes do sistema radicular (Bravdo et al., 2004; Sadras, 2009).

Sabe-se que a irrigação é um diferencial de produtividade das culturas, e na cana-de-açúcar não é diferente. Além de garantir aumento na produtividade (Sousa e Bernardo, 1999; Santos, 2005), produção e número de cortes por plantio, a irrigação contribui com benefícios socioeconômicos. No entanto, o programa de irrigação precisa ter sustentabilidade econômica, social e ambiental (Bernardo, 2006). Utilizando a técnica da IPSR em cana-de-açúcar, Shani-Dashtgol et al., (2006), trabalhando em uma região semiárida do Iran, utilizaram 26% menos água em irrigação por sulco alternado comparado ao controle, mas obtiveram produção até 10% maior. Isso significou um aumento de 34% na produtividade por água aplicada. Pandias et al., (1992) relataram uma redução no consumo de água de até 46% em plantas sob irrigação parcial (irrigadas por sulcos) para a cana na Índia.

Em plantas de metabolismo fotossintético C_4 , como o sorgo, os resultados encontrados, indicaram redução na água aplicada de 11% sem redução da produção (Sepaskhah e Ghasemi, 2008). Já em milho, (Sepaskhah e Khajehabdollahi, 2005) indicaram que intervalos de dois dias entre as irrigações reduziram em 6% a quantidade de água aplicada sem redução no rendimento de grãos. Os mesmos autores ressaltaram que em uma região semiárida, a IPSR não foi muito eficaz em culturas com alta sensibilidade ao estresse hídrico.

Em condições usuais de irrigação, os estômatos atuam, na maior parte do tempo, totalmente abertos, o que pode ser considerado um estado de “luxo”. No entanto, a assimilação enquanto os estômatos estão fechados (ou parcialmente fechados) é uma porção um pouco menor do que a assimilação total (Kang e Zhang, 2004). Quando uma aplicação contínua de sinais de estresse induz uma mudança na resposta estomática, uma nova eficiência no uso da água (EUA) pode ser gerada sem maiores perdas de massa seca. Ou seja, a planta parece se adaptar àquela situação e não responde de forma tão sensível a pequenos estresses. Certamente, se esse é o caso, o conhecimento da fotossíntese em relação à água será enriquecido (Kang e Zhang, 2004).

Em um mundo onde a chuva é imprevisível, a planta necessita regular a perda de água em longo prazo, ou seja, ela deve ser capaz de “detectar” a secagem do solo e depois “responder”, regulando assim o consumo de água. Tal mecanismo pode ser denominado como um mecanismo do tipo “*feed-forward*”, ou seja, “se ajustar para o futuro”. Essa resposta da planta em reduzir a abertura estomática acontece bem antes da escassez completa da água do solo (Kang e Zhang, 2004). Os trabalhos coordenados por esse mesmo grupo (Zhang e Davies, 1990; Davies e Zhang, 1991; Liang et al, 1997) revelaram que tal mecanismo do tipo “*feed-forward*” pode trabalhar junto com ação do ácido abscísico (ABA).

O ABA pode ser produzido nas raízes que estão no lado seco do solo e transportado, via fluxo transpiratório, para os brotos. Este sinal originário da raiz pode reduzir substancialmente a perda de água através de estômatos, em um momento em que nenhum déficit hídrico é detectável na parte aérea, e pode ser descrito como a primeira linha de defesa contra a seca (Kang e Zhang, 2004). Com a seca prolongada no solo, uma segunda linha de defesa pode atuar por meio do murchamento progressivo a partir das folhas mais velhas. Com a diminuição da disponibilidade de água no solo, os sinais de primeira e segunda linha de defesa aumentarão e irão promover o fechamento estomático. Portanto, pode-se concluir que os estômatos possuem um padrão de resposta. Pode esse tipo de mecanismo de resposta ser usado para aumentar a EUA da planta? Tipicamente, a taxa fotossintética mostra uma resposta de saturação quando os estômatos estão abertos, enquanto que a taxa transpiratória mostra uma resposta mais linear. Dessa forma, espera-se que o fechamento não-acentuado dos

estômatos reduza a perda de água, mas com pouco efeito sobre a taxa de fotossíntese (Kang e Zhang, 2004), como foi encontrado por de Souza et al., (2005) em videira, onde os autores concluíram que os benefícios da utilização da irrigação parcial do sistema radicular e do déficit de irrigação frente à irrigação comum foram a diminuição do consumo da água com assimilação similar de CO₂, levando a um aumento da eficiência do uso da água.

2.6 Estresse hídrico

As respostas das plantas aos efeitos dos estresses ao longo do crescimento e desenvolvimento são dependentes de espécie, genótipo, duração e severidade do estresse, idade e estágio de desenvolvimento do órgão, tipo de célula e do comportamento subcelular (Barbosa, 2010). Assim, as plantas podem apresentar tolerância, resistência ou suscetibilidade ao estresse ao qual estão sendo submetidas, podendo chegar à morte em função da intensidade deste estresse (Cambraia, 2005).

Tais estresses podem ser classificados como bióticos (resultantes da ação de micro-organismos) ou abióticos (resultantes do excesso ou déficit de algum fator físico ou químico do meio ambiente), podendo ocorrer de forma isolada ou concomitante (Gonçalves, 2008). Dentre os estresses considerados abióticos, a deficiência hídrica é o principal fator limitante à produtividade das culturas em todo o mundo (Vallioyodan e Nguyen, 2006) e, dessa maneira, do rendimento agrônomico (Torres Netto, 2005). De acordo com Ortolani e Camargo (1987), sem se considerar os efeitos extremos, esta limitação hídrica é responsável por 60 a 70% da variabilidade final da produção. Portanto, no planejamento da agricultura irrigada, é de fundamental importância conhecer as condições meteorológicas durante o ciclo das culturas, principalmente quanto aos períodos de baixa precipitação e elevada demanda evapotranspiratória.

O estresse hídrico pode ocorrer como consequência de uma diminuição sazonal da disponibilidade de água no solo, ou pelas variações de demanda transpiratória ao longo do dia. A intensidade e a duração desses estresses determinam os efeitos na planta devido à sua ocorrência (Chaves e Oliveira, 2004). Quando o estresse é imposto lentamente, as plantas podem desencadear mecanismos para escapar à desidratação, o que pode levar até a redução do

ciclo de vida. No caso de desidratação rápida da rizosfera, o estresse oxidativo desenvolvido como efeito secundário é muito danoso ao processo fotossintético (Ort, 2001).

A compreensão dos mecanismos de tolerância das plantas à baixa disponibilidade de água é fundamental para uma seleção criteriosa de genótipos tolerantes a esta limitação, de forma a promover a exploração economicamente viável e a obtenção de produtos com características de qualidade e segurança para o consumidor em novas fronteiras agrícolas (Evans, 1998). Estas fronteiras estão em plena expansão, principalmente no cultivo da cana-de-açúcar.

As respostas das plantas ao déficit hídrico são complexas e envolvem mudanças adaptativas e/ou efeitos deletérios (Chaves et al., 2002). No campo, essas respostas podem ser maiores ou menores de acordo com a superposição de outros estresses como temperatura, luminosidade, déficit de pressão de vapor, entre outros. As estratégias das plantas para superar o estresse hídrico, normalmente envolvem uma ação complexa relacionada à sensibilidade e à tolerância a outros estresses, o que pode variar entre os genótipos (Chaves et al., 2002). As respostas à deficiência hídrica envolvem uma complexa interação de processos bioquímicos como síntese e acúmulo de solutos osmoticamente ativos (Delauney e Verma, 1993), composição proteica (quantidades e proporções das enzimas) (Riccardi et al., 1998; Deleu et al., 1999) e alterações nas células, nos órgãos e na estrutura da planta como um todo (Kramer e Boyer, 1995).

Sob condições de suprimento inadequado de água ou quando a demanda evapotranspiratória é excessiva, se faz necessária a presença de alguma estratégia em condições naturais para garantir a sobrevivência do vegetal. Por isso, é necessário identificar as características da espécie em estudo que garantam a sobrevivência em ambientes com deficiência de água, para futuras seleções a fim de utilização nos sistemas de produção, com diminuição do custo tecnológico, sobretudo em climas tropicais (Turner, 1986).

Turner (1986), baseado em Kramer (1980) propõe três tipos de respostas adaptativas de plantas sob estresse por deficiência hídrica: os mecanismos de escape, mecanismos de tolerância sob alto conteúdo de água e mecanismos de tolerância sob baixo conteúdo de água. Subbarao et al., (1995) classificaram os mecanismos de adaptação à seca em três tipos: os mecanismos de escape, os mecanismos de evitamento e os mecanismos de tolerância propriamente ditos.

A planta que é capaz de obter mais água ou que tem maior eficiência no uso deste recurso resistirá melhor à seca. Assim, plantas com metabolismo fotossintético C_4 levam vantagem por conseguir, em certo nível, explorar ambientes mais áridos, como foi explicitado no tópico sobre os aspectos fisiológicos da cana-de-açúcar.

Na ausência de qualquer avanço biotecnológico significativo em aumentar a resistência à seca das principais culturas (rendimento sustentado sob a escassez de água), o melhoramento de plantas é dependente da triagem de uma ampla gama de germoplasma a fim de identificar a variação genética nas principais características envolvidas na resistência ao estresse (Lopes e Reynolds 2010; Richards et al., 2010.; Saint Pierre et al., 2010).

Não existe uma única variável fisiológica que por si só seja indicativa de tolerância à seca. O ideal é avaliar uma gama de variáveis ao longo das fases do ciclo (Passioura, 1997), a fim de encontrar explicações fundamentadas em aspectos gerais da planta, para que não se tomem conclusões precipitadas acerca da resposta de determinada espécie ou genótipo em relação ao estresse. Para isso, podem-se avaliar variáveis fisiológicas com equipamentos simples, como a área foliar e o acúmulo de massa seca na parte aérea, considerados por Blum (1997) como variáveis mais sensíveis ao estresse; o conteúdo relativo de água (CRA) (Pimentel et al., 1990); os potenciais hídrico (Ψ_w), osmótico (Ψ_s) e de pressão (Ψ_p) (Bolaños e Edmeades, 1991), com o auxílio de uma bomba de Scholander (Scholander, 1965). Outras variáveis indicadoras de estresse possíveis de avaliar com equipamentos mais sofisticados são o grau de abertura estomática, com um porômetro e/ou as trocas gasosas, por meio do analisador de gás infravermelho (Pimentel et al., 1999); a discriminação isotópica do carbono ($^{13}CO_2/^{12}CO_2$), por meio de um espectrômetro de massa (White et al., 1990); a temperatura de folha, por meio do termógrafo por infravermelho (Bascur et al., 1985); ou a emissão de fluorescência da folha, por meio do fluorímetro (Maxwell e Johnson, 2000).

Portanto, é importante combinarmos a experiência das diferentes áreas das ciências agrárias em busca da identificação e superação das limitações genéticas e agronômicas das culturas, principalmente em regiões desfavoráveis, como as em que ocorrem períodos prolongados de seca. Além disso, inovações

que possam mitigar os efeitos deletérios desse estresse são fundamentais para a segurança alimentar e energética do planeta.

2.6.1 Efeitos na cana-de-açúcar

O processo de adaptação das plantas ao estresse hídrico pode ocorrer de forma lenta e progressiva, principalmente na fase de crescimento vegetativo. Em resposta ao ambiente com limitação hídrica, ocorrem importantes modificações morfológicas nas plantas com o objetivo de redução da transpiração e economia de água. Contudo, o principal foco é preservar os processos fisiológicos e manter a integridade dos pontos de crescimento e brotação. Em geral, as plantas adaptadas às condições de baixa disponibilidade hídrica possuem maior concentração de sais, ácidos orgânicos e fotoassimilados, possuem menor porte e área foliar, mas continuam se desenvolvendo (Pires et al., 2008).

Em cana-de-açúcar, os sintomas mais típicos provocados pela deficiência hídrica são a leve mudança na coloração da folhagem, a mudança no ângulo de inserção das folhas em relação ao colmo e o enrolamento progressivo das folhas (Pires et al., 2008).

Aos primeiros sintomas de redução de água no solo, os processos de expansão e divisão celular começam a ser afetados. A intensificação do secamento do solo na região das raízes mais superficiais pode levá-las à morte. As folhas mais expostas ao sol apresentam sintomas de murchamento nas horas mais quentes do dia que vão progredindo com o tempo e a severidade do estresse. Assim como em outras plantas, a translocação da seiva também é afetada. Ocorre também a redução na fotossíntese devido ao fechamento estomático e à consequente redução na produção de fotoassimilados. Dessa forma, ocorrerá a mobilização dos fotoassimilados de folhas mais velhas para a sobrevivência das mais novas, resultando na senescência das folhas mais baixas, que já são afetadas pela menor incidência de luz (Pires et al., 2008). O estresse hídrico também pode se expressar de forma moderada e de longa duração. Nesse caso, os sintomas visuais são pouco evidentes, mas os processos de divisão e expansão celular são afetados ao longo da estação e podem representar um comprometimento do tamanho final das plantas, e, conseqüentemente, da área foliar e da produção. (Pires et al., 2008).

Thompson (1976) afirma que os períodos de deficiência hídrica podem ocorrer durante todo ciclo da cultura, mas os maiores efeitos sobre a produtividade da cana-de-açúcar variam em função da interação entre época do ano e a fase do ciclo fenológico em que ocorrem.

Dividindo-se o ciclo da cana de doze meses de acordo com Bernardo (2006), tem-se: germinação e emergência - 1 mês; perfilhamento e estabelecimento da cultura - 2 a 3 meses; desenvolvimento da cultura - 6 a 7 meses; maturação - 2 meses. Durante cada etapa do ciclo da cultura, tem-se a influência da disponibilidade de água no desenvolvimento. Desta maneira, durante o período de estabelecimento da cultura e início de desenvolvimento vegetativo, a baixa disponibilidade hídrica afeta mais a produção do que se ocorrer nos estádios seguintes, uma vez que reduz o desenvolvimento radicular e a emissão e sobrevivência de perfilhos, os quais irão influenciar diretamente no número final de colmos. No período vegetativo, o déficit hídrico afeta o colmo diminuindo o alongamento desta parte da planta. Já durante o período de maturação, a deficiência hídrica é benéfica, pois provoca a redução de um possível crescimento vegetativo, favorecendo o acúmulo de açúcar, desde que esta não seja muito severa.

Estudando o período crítico de deficiência hídrica para cana-planta, Rosenfeld (1989) concluiu que o início do estágio de máximo desenvolvimento da cana-planta é o período mais sensível ao déficit hídrico. Para a cana plantada em fevereiro e junho, o período mais crítico é o do 4º ao 8º mês, já para cana planta em outubro, o período crítico é do 8º ao 11º, sendo as maiores reduções de produção geradas em períodos secos durante o verão, em canas de 4 a 8 meses (Barbosa, 2010).

2.6.2 Estimativa do teor de clorofila

As clorofilas são pigmentos responsáveis pela captura de luz usada na fotossíntese, sendo essenciais na conversão da radiação luminosa em energia química, na forma de ATP e NADPH. Assim, as clorofilas estão relacionadas com a eficiência fotossintética das plantas e, conseqüentemente com o crescimento e adaptabilidade aos diferentes ambientes (Jesus e Marengo, 2008).

O teor de clorofila da folha é uma característica importante para os estudos da fisiologia da planta, pois pode ser relacionado para indicar a senescência foliar (Noodén et al., 1997), teor de nitrogênio nas folhas (Azia e Stewart 2001; Esposti et al. 2003), além de poder ser alterado em resposta aos estresses ambientais (Neufeld et al., 2006; Nauš, 2010).

Tradicionalmente, os métodos utilizados para determinação do teor de clorofila requerem destruição das folhas, o que é uma desvantagem em estudos que visem determinar o efeito da ontogenia da folha no grau de esverdeamento, além de serem métodos demorados e onerosos (Jesus e Marengo, 2008). Por isso, o medidor portátil de clorofila Minolta SPAD-502 tem sido utilizado como instrumento para rápido diagnóstico do estado nutricional de diversas culturas em relação ao conteúdo de clorofila, e também de N, agregando vantagens como a simplicidade de utilização (Argenta et al., 2001).

O medidor portátil de clorofila (MPC) possui diodos que emitem radiação em 650 nm (luz vermelha) e 940 nm (radiação infravermelha). Durante a mensuração, a luz passa pela folha e é recebida por um fotodiodo onde é convertida em sinais elétricos analógicos e depois em sinais digitais. Esses sinais passam por um microprocessador que calcula valores proporcionais ao teor de clorofila da folha (Minolta, 1989). A absorvância das clorofilas é muito eficiente em 650 nm, mas é desprezível em 940 nm (Minolta, 1989; Marengo e Lopes, 2007). Assim, o sinal da emissão em 650 nm serve de base para o cálculo do teor relativo de clorofila, enquanto que o sinal da emissão em 940 nm serve como um fator de correção para compensar a absorção de fótons em 650 nm por partes do tecido foliar desprovidas de clorofila (Jesus e Marengo, 2008), uma vez que tal leitura a 940nm pode remover o efeito da espessura da folha nas leituras do MPC.

Apesar de ser um método simples e rápido de estimar o conteúdo de clorofila da planta, parece que nem sempre existe uma correlação linear entre as leituras de MPC e esse teor (Nauš, 2010), sendo essa estimativa útil em casos em que uma faixa do teor de clorofila não é muito grande (Castelli et al., 1996; Jifon et al., 2005). Segundo Nauš (2010), em concentrações mais elevadas de clorofila a leitura do MPC é menos sensível, a dispersão dos valores medidos é superior e a exatidão da medição diminui. Em folhas com teor de clorofila alta, a transmissão da luz pode ser afetada pelo efeito “peneira” causada pela heterogeneidade de distribuição da clorofila no interior da folha (McClendon e

Fukshansky 1990). Esse efeito aumenta a transmitância, principalmente, em regiões de alta absorção de pigmentos (vermelho e azulil). Assim, a leitura é menor em comparação com uma amostra com a mesma quantidade de clorofila uniformemente distribuída (Uddling et al., 2007; Marengo et al., 2009; Nauš, 2010).

Outro fator destacado nas avaliações de MPC, consiste na importância da calibração do equipamento para cada espécie ou cultivar (Loh et al., 2002; Pinkard et al., 2006), bem como entre as plantas cultivadas sob diferentes condições (Campbell et al., 1990; Jifon et al., 2005; Pinkard et al., 2006).

Também tem sido demonstrado que a posição do cloroplasto pode variar durante o dia, de acordo com variações naturais das condições de luz e que a resposta do movimento dos cloroplastos à luz pode ser bastante rápida (Williams et al., 2003). Assim, os valores de MPC podem ser influenciados pelas condições de luz, antes e durante a medição (Hoel e Solhaug, 1998; Martínez e Guiamet, 2004). Este efeito já foi estudado em folhas de tabaco, onde foi encontrada diferença de até 35%, dependendo da posição da folha (Nauš et al., 2010). Para uma eliminação do efeito do movimento do cloroplasto, pode ser recomendada a avaliação com MPC em folhas com um arranjo definido dos cloroplastos.

Dessa forma, tomando-se os devidos cuidados, a determinação dos pigmentos fotossintéticos pode ser uma importante ferramenta no diagnóstico de estresse em plantas (Hendry e Price, 1993), uma vez que diferentes tipos de estresse, tais como o hídrico, nutricional e estresses bióticos, causam reduções significativas na concentração de clorofila nas folhas.

2.6.3 Fluorescência da clorofila a

Segundo Meyer e Genty (1999), a fluorescência da clorofila permite verificar a atividade do transporte de elétrons da fase fotoquímica, fornecendo uma análise detalhada da inibição desta fase da fotossíntese, induzida pelo estresse. Por meio da fluorescência, é possível obter informações detalhadas sobre a estrutura, distribuição de energia e atividade do aparato fotossintético, em especial o fotossistema II (PSII) (Strasser et al., 2000) em resposta a vários estresses, dentre eles o hídrico.

Segundo Krause e Weiss (1991), a medição da fluorescência pode ser considerada uma medida complementar às medições do processo fotossintético. Por ser precisa, rápida e não-destrutiva, esta técnica pode ser utilizada em condições de campo, permitindo efetuar o diagnóstico da distribuição da energia no PSII, antes que os sintomas do dano sejam externados (Bolhar-Nordenkamp et al., 1989; Torres Netto, 2005).

Como qualquer outro processo de troca de energia, a conversão de energia luminosa em energia química no processo fotossintético não é perfeita (Peçanha, 2010). Nem todos os elétrons que estão no mais alto nível energético são passados para os aceptores. Esses elétrons retornam ao estado inicial (antes de receber energia dos fótons) sem a produção de ATP e NADPH₂. Ao retornar ao estado inicial, essa energia é dissipada em forma de calor ou luz (fluorescência), sendo quase toda a fluorescência proveniente das moléculas de clorofilas associadas ao PSII (Bolhar-NordenKampf e Öquist 1993).

Um grupo de variáveis da fluorescência, obtido a partir de medições de alta resolução, pode oferecer informações detalhadas sobre a estrutura e atividade do aparelho fotossintético da planta, principalmente do PSII (Živčák et al., 2008).

A relação entre a fluorescência variável com a fluorescência máxima (F_v/F_m) é uma medida da eficiência intrínseca ou máxima do PSII. Ou seja, esta relação mede a eficiência quântica de todos os centros do PSII, quando estes estão abertos. Essa variável indica a probabilidade de que um elétron absorvido pelos pigmentos fotossintéticos do PSII reduza a quinona A (QA) (Krause e Weis, 1991). Em plantas consideradas saudáveis, essa variável pode variar de 0,75 a 0,85 (Bolhar-Nordenkamp et al., 1989) e é altamente correlacionada com o rendimento quântico do processo fotossintético (Kao e Forseth, 1992).

Para os estresses ambientais que não causam modificações na relação F_v/F_m , pode-se utilizar o índice fotossintético ou "*Photosynthetic index*" (PI). Esta variável proposta por Strasser et al (2000) é um índice que integra 3 componentes independentes: (i) densidade dos centros de reação ativos (RCs); (ii) eficiência no transporte de elétrons após Qa ter sido reduzida, (iii) a probabilidade de que um fóton absorvido seja capaz de reduzir Qa. A variável PI mostra a atividade do fotossistemas I e II e pode avaliar a performance da planta sob condição de estresse (Strasser et al (2004). Em condição de estresse hídrico, a variável PI foi

considerada um melhor índice (maior sensibilidade) do que a relação F_v/F_m , na avaliação da eficiência fotoquímica em genótipos de trigo (Živčák et al., 2008).

O JIP-teste proposto por Strasser et al., (1995) fornece um grande número de variáveis que caracterizam a amostra fotossintética, envolvendo as estimativas de fluxos de energia por centro de reação ou por seção transversal da amostra, proporções de diferentes fluxos de energia e outras expressões matemáticas envolvendo fluxos de energia (Stirbet e Govindje, 2011). Estas variáveis são calculadas usando os valores específicos de fluorescência a partir da medida JIP-teste, com base em um número de hipóteses sobre o aparato fotossintético e sua função (Stirbet e Govindje, 2011).

Force et al. (2003) demonstraram uma vantagem de utilizar as variáveis derivadas do JIP-teste, para avaliar a atividade do PSII, ao invés de utilizar somente a relação F_v/F_m . A análise mais completa proporcionada pelas variáveis do JIP-teste também é vantajosa por indicar precocemente possíveis estresses nas plantas antes que o sintoma do estresse seja exteriorizado (Christen et al., 2007). Neste contexto, o JIP-teste torna-se um método para ser utilizado como uma ferramenta prática, para obtenção de informações rápidas sobre várias possibilidades de efeitos sobre a fotossíntese, em particular sobre o PSII, e para uma extensão limitada do PSI (Stirbet e Govindje, 2011).

A diminuição da relação F_v/F_m é um excelente indicador de efeito fotoinibitório quando as plantas estão submetidas a qualquer tipo de estresse, e pode representar tanto uma regulação fotoprotetora reversível ou uma inativação irreversível do PSII (Long et al., 1994; Araus e Hogan, 1994). Como visto, o PI é tido como uma variável mais completa no estudo do aparato fotoquímico da planta. Dessa forma, a possibilidade de indicar um efeito fotoinibitório nas plantas pode ser ainda mais eficaz utilizando-se essa última variável.

Com relação à fotoinibição, este fenômeno pode ter um termo amplo que inicialmente foi descrito como o declínio na capacidade fotossintética, envolvendo o oxigênio devido ao excesso de iluminação. O fenômeno foi identificado a mais de 100 anos por Ewart (1896), que em suas primeiras pesquisas analisou os efeitos de fatores externos no processo fotossintético (Araújo e Deminicus, 2009). Entretanto, até os dias atuais, a fotoinibição é considerada um dos temas mais discutíveis no campo fotossintético (Adir et al. 2003).

A fotoinibição é reversível nos primeiros estágios. Porém, em estágios mais avançados, o excesso de energia luminosa pode resultar em danos severos, tal que o centro de reação do PSII necessita ser “desmontado” e “consertado”. Neste PSII o principal local da ação do excesso de energia luminosa é a proteína D1 (Aro et al., 1993). As outras partes do centro de reação do PSII são projetadas para serem recicladas, assim a proteína D1 é o único componente que precisa ser sintetizado (Aro et al. 1993).

De acordo com Taiz e Zeiger (2009), dois tipos de fotoinibição são identificados, a fotoinibição dinâmica e a crônica. Sob excesso de luz moderado, observa-se a fotoinibição dinâmica, que provoca queda da eficiência quântica (temporário, voltando ao normal quando o fluxo de fótons decresce abaixo dos níveis de saturação). Já a fotoinibição crônica resulta da exposição a altos níveis de luz, que danificam o sistema fotossintético e diminuem a eficiência quântica e a taxa fotossintética máxima. Esta está associada ao dano e à substituição da proteína D1 do centro de reação do PSII. Ao contrário da fotoinibição dinâmica, tais efeitos têm duração longa.

Dessa forma, em decorrência de algum fator biótico ou abiótico, estudar as respostas da planta por meio do uso da emissão da fluorescência da clorofila tem sido uma prática bastante eficiente na avaliação dos efeitos de danos no processo fotoquímico da fotossíntese.

2.6.4 Potencial hídrico foliar

Como já comentado no trabalho, em períodos muito secos, como resposta ao estresse, as plantas reduzem seu crescimento e a assimilação do CO₂ para que se mantenham vivas e terminem o ciclo reprodutivo, mesmo que com comprometimento da produção.

À medida que decresce o conteúdo de água na planta, as células contraem-se e é reduzida a pressão de turgescência contra as paredes celulares. Esse decréscimo de volume concentra os solutos nas células, tornando a membrana plasmática mais espessa e comprimida. Por ser essa redução da turgescência, o mais precoce efeito do estresse hídrico, como a expansão foliar e o alongamento de raízes, são os mais sensíveis a esse estresse (Taiz e Zeiger, 2009).

O potencial hídrico é uma medida da energia livre da água por unidade de volume [equivalentes a unidades de pressão, como o pascal (Pa) e o megapascal (MPa)]. A unidade mais comum para essa característica é o MPa. O potencial hídrico, que avalia o grau de hidratação da planta, fornece um índice relativo do estresse hídrico ao qual a planta está submetida, sendo responsável pelo movimento da água dentro da planta em virtude do gradiente desta variável fisiológica (Taiz e Zeiger, 2009).

Essa variável é representada pela letra grega Ψ (psi), sendo composta por quatro componentes: Ψ_s : potencial osmótico, Ψ_p : potencial de pressão, Ψ_g : potencial gravitacional e Ψ_m : potencial mátrico. Como os componentes que mais influenciam essa variável são o osmótico e o de pressão, o potencial hídrico é usualmente descrito como: $\Psi_w = \Psi_p + \Psi_s$.

O potencial do soluto, ou potencial osmótico (Ψ_s), representa o efeito de solutos dissolvidos sobre o potencial hídrico. Esses solutos são responsáveis pela redução da energia livre da água por meio da diluição. Esse é um efeito de entropia, ou seja, a mistura entre soluto e água aumenta a desordem do sistema, reduzindo a energia livre (Taiz e Zeiger, 2009).

O termo Ψ_p representa a pressão hidrostática da solução ou potencial de pressão. A pressão positiva dentro de células se refere à pressão de turgescência. Quando negativa, é muito importante para o movimento da água de longa distância na planta (Taiz e Zeiger, 2009).

O crescimento foliar, a assimilação fotossintética do carbono e a produtividade de cultivos são todos fortemente influenciados pelo potencial hídrico e pelos componentes desta variável fisiológica, sendo o potencial hídrico um bom indicador da saúde da planta. De acordo com Syvertsen e Lloyd (1994) e Nobel (2004), as variações nas relações água-planta são as principais respostas para alterações no estado do solo e atmosfera, sendo que as relações hídricas afetam diretamente na transpiração, no processo de abertura e fechamento estomático e no fluxo de CO_2 dentro do mesófilo.

Em resposta ao estresse hídrico, as duas principais variáveis utilizadas para avaliar as relações hídricas da planta são o conteúdo relativo de água e o potencial hídrico. No entanto, uma precisa resposta dessas variáveis em ligação aos efeitos do estresse na ação sobre os estômatos e sobre o processo fotossintético irá depender do genótipo (Tardieu e Simonneau, 1998), das

condições do ambiente (Schulze e Hall, 1982) e da velocidade de imposição do estresse (Flexas et al., 1999)

Dessa forma, os estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar o *status* hídrico da planta por meio da avaliação dos componentes do potencial hídrico, sendo a metodologia de avaliação desta variável por meio da câmara de pressão descrita por Scholander (1965), a mais encontrada na literatura.

Angelocci (2002) cita que é preciso considerar a variação temporal para as medidas de Ψ_w , e quando o objetivo for a comparação do potencial hídrico foliar entre tratamentos, as medidas devem ocorrer nos horários de maior demanda hídrica da atmosfera, entre 11 às 14 horas, quando existe certa estabilidade do potencial de água.

Antes do amanhecer, é frequentemente assumido que o potencial hídrico foliar está em equilíbrio com o potencial hídrico do solo, permitindo o uso do potencial hídrico antemanhã (predawn) como substituto do potencial hídrico do solo (Crombie et al., 1988; Richter, 1997; David et al., 2007). No entanto, caso aconteça uma transpiração noturna da planta, a suposição pode ser inválida (Bucci et al., 2004).

Quando o suprimento de água declina em algumas plantas [plantas anisohídricas, Larcher, (1980)], as células-guarda dos estômatos respondem ao potencial hídrico da folha, e ambos respondem controlando a perda de água pelas folhas (Leuning et al., 2003). Além disso, foi mostrado que o declínio no potencial hídrico da folha pode aumentar a sensibilidade do estômato ao ABA (Chaves et al., 2010). Em plantas de videira, esse efeito interativo pode explicar o decréscimo na g_s observado ao meio-dia, incluindo as bem-irrigadas (Correia et al., 1995; Rodrigues et al., 2008).

O potencial hídrico foliar em plantas sob efeito da deficiência hídrica, tende a decrescer, seja pela desidratação dos tecidos ou pela hidrólise dos compostos de reserva (Cairo, 1995). Com a diminuição da disponibilidade de água no solo, a planta responde osmoticamente com o aumento dos teores de alguns solutos orgânicos, no sentido de se adaptar ou se ajustar ao ambiente com deficiência hídrica. De acordo com Bray (1997), as plantas adaptadas ao estresse hídrico acumulam açúcares, ácidos orgânicos e íons no citosol para diminuir o

potencial osmótico e, conseqüentemente, manter o potencial hídrico e o turgor das células em níveis adequados de hidratação.

Apesar de deliberadamente secar parte do sistema radicular, a técnica da irrigação parcial do sistema radicular, teoricamente, mantém as raízes suficientemente bem irrigadas para que seja mantido o *status* hídrico da planta próximo dos níveis ótimos. No experimento realizado por Hutton e Loveys (2009) com citrus, os autores encontraram um pequeno aumento no estresse hídrico nas plantas sob IPSR por meio das avaliações do potencial hídrico foliar ao meio-dia e antemanhã, o que também foi relatado em Israel (Moreshet et al., 1983). Nesses estudos, um controle interno para reduzir a transpiração pareceu estar em funcionamento independente do teor de umidade do solo, permitindo assim que as plantas lidem de forma mais eficiente com situações de limitado fornecimento de água (Hutton e Loveys 2009).

Este fenômeno está bem documentado e é um importante aspecto da adaptação das plantas à distribuição não-uniforme da água do solo (Richards e Caldwell, 1987; Burgess et al., 1998; Smart et al., 2005). Tal mecanismo pode ser favorecido pela redistribuição interna da água dentro de sistemas radiculares de acordo com o gradiente de potencial hídrico gerado pela secagem parcial do solo, quer como um resultado de irrigação normal ou, como na IPSR.

Por outro lado, o potencial hídrico antemanhã pode não ser o melhor indicador da intensidade do estresse hídrico, porque raízes mais profundas podem influenciar nessa variável, enquanto os estômatos podem estar respondendo aos sinais químicos provocados pela desidratação na parte superficial das raízes antes que qualquer mudança no potencial hídrico foliar seja perceptível (de Souza et al., 2005).

2.6.5 Termografia por infravermelho

Existe um grande interesse na utilização de imagens por infravermelho do dossel, como um possível indicador de estresse para fins de irrigação (Idso, 1982; Jackson, 1982). O recente desenvolvimento de termógrafos portáteis tem apresentado oportunidades para a análise das propriedades térmicas da copa das plantas, e ampliou as informações disponíveis sobre o crescimento (Boissard et al., 1990; Jones, 1999). No entanto, a técnica ainda enfrenta limitações quanto à

sensibilidade mostrada pelo aparelho em dias úmidos, em que há pouca variação na temperatura, além de ser sensível ao vento e à irradiância (Hippis et al., 1985; Jones et al., 1997). Outro problema consiste na área de captação da imagem, que não tem um alvo limitado e acaba incluindo nas fotos partes indesejadas, como o caule e o céu (Moran et al., 1994; Jones, 2002).

Uma abordagem alternativa para o uso da termografia é utilizar a temperatura da folha para estimar a condutância estomática. Aston e van Bavel (1972) e Fuchs (1990) mostraram que possíveis alterações na condutância estomática podem causar um aumento na temperatura foliar (Jones, 2002). Estritamente relacionada à condutância estomática, a transpiração é dependente, além da umidade e da temperatura do ar, da quantidade de radiação absorvida pela folha e do fluxo de energia dissipada por condução e convecção, assim como da dimensão da folha e velocidade do vento. A taxa transpiratória vai afetar a temperatura da folha, a qual pode ser menor que a do ar, quando a radiação incidente é baixa, ou maior que a do ar, quando a radiação é alta e, em ambos os casos, essa temperatura é reduzida pelo aumento da transpiração (Angelocci, 2002). Por isso, a medida da temperatura da folha usando o sensoriamento remoto por termometria infravermelha é utilizada, quando comparada com a do ar, como indicador da taxa de transpiração e, conseqüentemente, da disponibilidade hídrica do solo com vista à necessidade de irrigação (Idso et al., 1986).

De acordo com Berry e Björkman (1980), Wahid et al., (2007) e Vítolo et al., (2012), o primeiro dano imposto quando a temperatura excede a faixa ótima para fotossíntese é a perda de estabilidade e desorganização das membranas, que irão afetar a estabilidade do aparato fotossintético. O processo fotossintético e a respiração são dependentes da atividade de transporte, e as membranas associadas das enzimas são reduzidas quando a integridade funcional do cloroplasto e das mitocôndrias é afetada (Vítolo et al., 2012).

As mudanças associadas ao modelo padrão de resfriamento da folha podem ser monitoradas instantânea e remotamente por meio de imagens termográficas (Nilsson, 1995). Dessa forma, a termografia por infravermelho é um método rápido e menos trabalhoso que a estimativa da temperatura foliar por meio de porômetros e analisadores de gás a infravermelho (Peçanha, 2010). Além disso, as fotografias termográficas do dossel estão sendo utilizadas na tentativa de automatização de monitoramento do status hídrico da planta, com o

objetivo de automatizar sistemas de controle de irrigação (Wang et al., 2010). Dessa forma, esse método para avaliar a necessidade de irrigação pode ser mais econômico que os tradicionais, pois a necessidade de água pela cultura tem grande variabilidade interespecífica e intraespecífica (Doorembos e Pruit, 1977), e é dependente do ambiente em análise (Doorembos e Kassan, 1979).

Outro uso da medição da temperatura da folha, pela termometria infravermelha, é a indicação de genótipos mais ou menos eficientes no uso de água (Bascur et al., 1985).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização

O experimento foi realizado entre os meses de janeiro e abril de 2011, em condições de casa de vegetação sob estrutura telada, localizada no campus da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em Campos dos Goytacazes-RJ, (21°44'47" S e 41°18'24" W e 10 m de altitude). Segundo a classificação climática de Köppen (1948), a região Norte Fluminense insere-se na classe Aw, isto é, tropical úmido, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura do mês mais frio superior a 18 °C. A temperatura média anual situa-se em torno de 24 °C, sendo a amplitude térmica pequena. A precipitação pluviométrica média anual está em torno de 1.020 mm (Mendonça et al., 2011).

3.2 Material vegetal

Os minitoletes com uma gema de cana-de-açúcar da variedade RB867515 foram provenientes da Usina Santa Teresa (Goiana-PE), sendo passados por tratamento térmico. Antes do plantio nas bandejas, estes minitoletes foram selecionados de acordo com o tamanho e a idade fisiológica, de modo que o plantio fosse feito com material bem uniforme em tamanho e com excelente estado fitossanitário.

3.3 Condições de cultivo

No dia 18 de janeiro de 2011, os toletes da variedade estudada foram plantados em três bandejas contendo como substrato areia lavada em água corrente. Cada bandeja continha 25 toletes, e estes foram irrigados diariamente para que brotassem de maneira uniforme e saudável. Vinte dias após o plantio (DAP), as mudas mais homogêneas, com duas folhas totalmente expandidas, foram retiradas manualmente das bandejas com auxílio de colheres, e transplantadas para vasos de PVC (cloreto de polivinila, com capacidade de 12L cada, unidos um ao outro com o auxílio de um perfurador e arames (Figura 1), para que o sistema radicular fosse dividido de forma uniforme entre os vasos. O substrato utilizado no cultivo foi composto de uma mistura de latossolo amarelo distrófico, areia e esterco caprino curtido na proporção 2:2:1 (Apêndice 1A).



Figura 1. Vasos unidos para indução da divisão do sistema radicular (A) e detalhe da união dos vasos e do sistema radicular dividido em *Sacharum* spp.

O transplântio foi realizado 20 dias após o plantio nas bandejas, no período da tarde para evitar temperaturas elevadas, que pudessem potencializar a desidratação das raízes. Após o transplântio, todos os vasos foram envolvidos em uma manta aluminizada de material refletivo para que não ocorresse um aumento excessivo da temperatura do solo, e fosse minimizada a perda de água

por evaporação. Nesta condição, as plantas foram aclimatadas por 50 dias em condições ideais de cultivo, sendo mantidas na capacidade de campo.

Os dados climatológicos (mínimos, médios e máximos) (Figura 2) de temperatura (T°), umidade relativa do ar (UR%) e o fluxo de fótons fotossintéticos (FFF) no ambiente de cultivo foram monitorados com o auxílio de uma estação meteorológica modelo 450, Spectrum Technologies, Inc., Illinois, USA. A partir dos dados máximos, médios e mínimos de T° e UR, foi obtido o déficit de pressão de vapor do ar (DPV) (Figura 2), segundo equação proposta por Jones (1992).

$$DPV = 0,61137 * \exp (17,502 * T^{\circ} / 240,97 + T^{\circ}) * (1,0 - (UR\% / 100)),$$

Em que:

DPV: Déficit de Pressão de Vapor;

exp: Exponencial;

T[°]: Temperatura em graus Celsius;

UR%: Umidade Relativa.

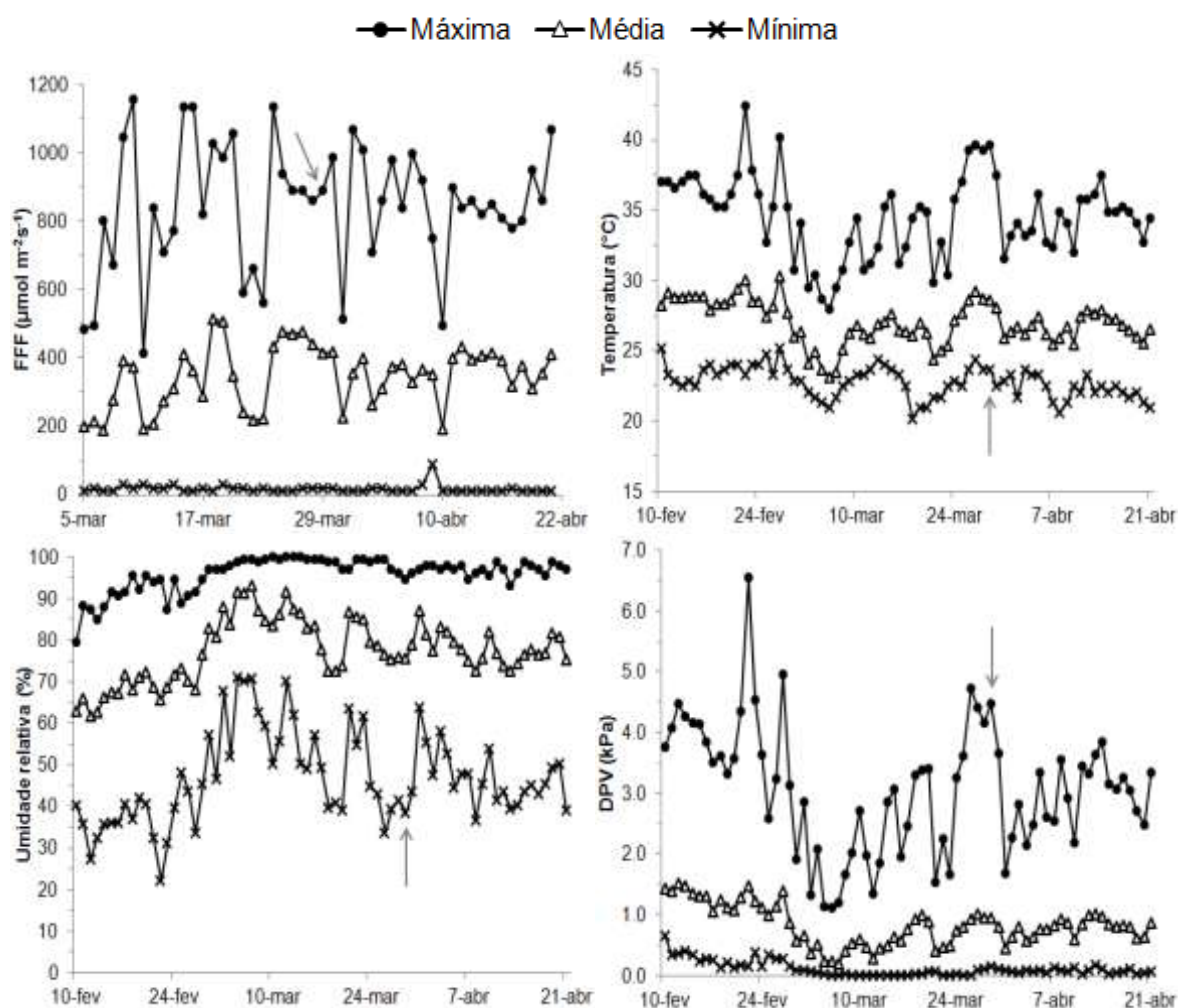


Figura 2. Fluxo de fótons fotossintéticos (FFF), temperatura (T°), umidade relativa (UR%) e déficit de pressão de vapor (DPV) no ambiente de cultivo de *Saccharum* spp. As setas indicam o início dos tratamentos.

Durante o período experimental, a tensão de água no substrato foi monitorada por 16 sensores modelo 6450 WD (Watermark Soil Moisture Sensor, USA) distribuídos entre os tratamentos, sendo 4 no tratamento controle, 4 no tratamento não-irrigado e 8 no tratamento com irrigação parcial do sistema radicular (Figura 3). Os sensores foram instalados nos vasos com auxílio de um trado, na parte central, aproximadamente a 15 cm de profundidade. Da mesma forma foram instalados 3 sensores de monitoramento da temperatura do substrato, distribuídos entre os tratamentos (Figura 3). Os sensores foram acoplados a um coletor de dados modelo Watchdog 200 (Spectrum Technologies, Inc., Illinois, USA) e as informações tomadas ao longo do dia com intervalos de 30 minutos.

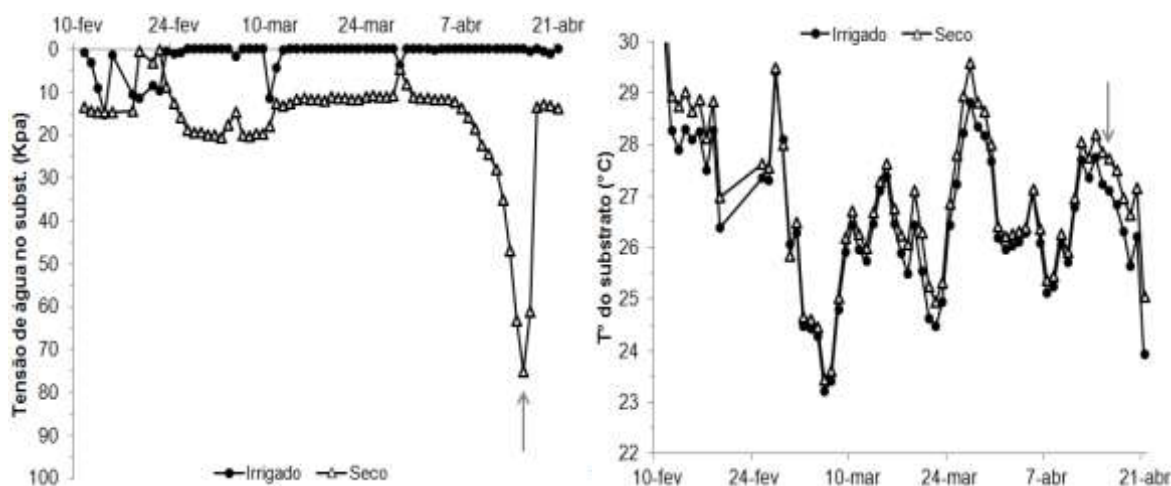


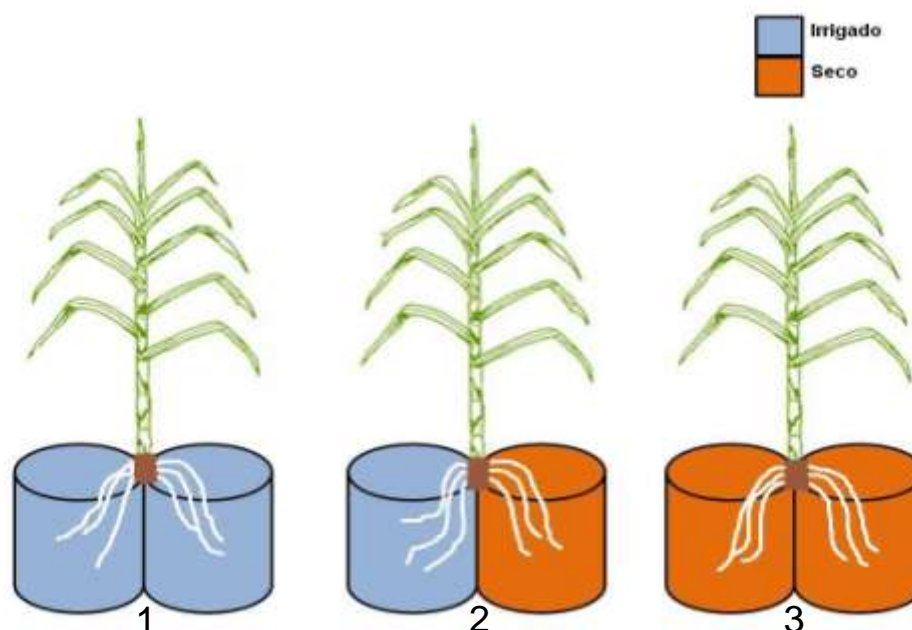
Figura 3. Comparativo entre a tensão de água e temperatura do substrato de cultivo nos lados “irrigado” e “seco” do vaso de *Saccharum* spp. sob o tratamento irrigação parcial do sistema radicular. As setas indicam o momento da reirrigação.

3.4 Aplicação dos tratamentos

Para aplicação dos tratamentos, foi determinada a capacidade de campo dos vasos (CCV). Para tal, após o preenchimento dos mesmos com o substrato, uma quantidade de água conhecida (500ml) era aplicada de maneira uniforme em todos os vasos. Quando, visivelmente, o substrato parecia saturado, a quantidade de água aplicada nos vasos foi diminuída para 100ml. Após a visualização do drenado na maioria dos vasos, chegou-se a CCV de 4.800 ml de água. Essa metodologia foi utilizada devido à indisponibilidade de uma balança adequada para o peso do vaso.

O experimento foi composto pelo tratamento controle (C), em que ambos os lados do sistema radicular foram mantidos na CCV; a irrigação parcial do sistema radicular (IPSR), ou seja, um lado do sistema radicular foi mantido na CCV, e no outro foi suspensa a aplicação de água; e pelo tratamento não-irrigado (NI), em que a irrigação foi suspensa em ambos os lados do sistema radicular (Figura 4). A quantidade de água aplicada em cada tratamento foi controlada com o auxílio de uma proveta de 500 ml. A água era aplicada de maneira uniforme, de acordo com o tratamento, até que fosse possível visualizar o líquido drenado no fundo do vaso. Assim, o volume de água aplicado era aferido na proveta e

computado para posterior cálculo da eficiência agrônômica do uso da água e da quantidade de água aplicada em cada tratamento.



Martin-Vertedor e Dodd (2011), adaptado por Ribeiro (2012).

Figura 4. Esquema dos tratamentos aplicados [controle (1), irrigação parcial do sistema radicular (2) e não irrigado (3)] em *Saccharum* spp.

A imposição dos tratamentos foi feita até que a taxa fotossintética líquida do tratamento NI fosse igual à zero. Após isso, as plantas foram reirrigadas por dois dias para que fosse avaliada a recuperação dos tratamentos supracitados.

3.5 Características avaliadas

3.5.1 Avaliações Biométricas

Altura da planta (AP)

Esta característica foi determinada a cada dois dias após o início dos tratamentos (DAIT), tomando-se a altura do coleto até o ápice da maior folha esticada, com auxílio de uma trena.

Altura do colmo (AC)

A cada dois dias, a altura do colmo foi determinada, com auxílio de uma trena, tomando-se a altura do coleto até a inserção da folha considerada do tipo +1 (Figura 5), ou seja, a folha em que a primeira aurícula é visível, conforme classificação de Kujiper (Dilejwin, 1952; Gallo et al., 1962).

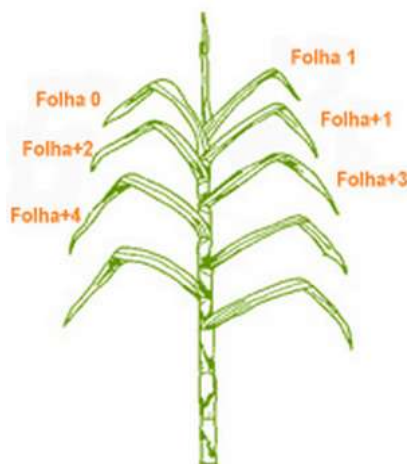


Figura 5. Esquema de denominação das folhas de cana-de-açúcar, segundo classificação de Kujiper (Dilejwin, 1952; Gallo et al., 1962).

Número de folhas (NF)

A cada dois dias, esta característica foi determinada pela contagem dos órgãos.

Área foliar (AF)

A área foliar foi determinada ao final do período experimental com auxílio de um medidor de bancada LI-3100 AREA METER (LI-COR, Lincoln, NE, USA).

Massa Seca e as relações

Ao final do experimento, as plantas foram divididas em folhas, colmo e raiz. Estas partes foram postas em sacos de papel, identificadas, e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 70°C por 72 h. Por meio de pesagem em balança analítica ELECTRONIC BALANCE FA-2104N (BIOPRECISA - 2008), foi determinada a massa seca de cada parte da planta: massa seca das raízes

(MSR) e massa seca da parte aérea (MSPA). Em posse desses dados, foi possível estimar a relação massa seca da parte aérea / massa seca das raízes (MSPA/MSR), razão de massa foliar (RMF = massa seca das folhas / massa seca total), razão de massa do colmo (RMC = massa seca do colmo/massa seca total), razão de massa das raízes (RMR = massa seca das raízes/massa seca total) e razão de área foliar (RAF = área foliar / massa seca total) (Cruz et al., 2004).

Volume de raiz

Ao final do experimento, após a separação de cada parte da planta, as raízes de cada lado do vaso foram lavadas com auxílio de uma peneira e um jato de água (Figura 6A), separadamente, e calculado o seu volume com auxílio de uma proveta graduada de 2L (Figura 6B). Para tal, a proveta era preenchida com um volume conhecido (V_1) e, após a adição das raízes na proveta, o novo volume era verificado (V_2) sendo a diferença contabilizada como o volume das raízes em ml ($Vol_{raiz} = V_2 - V_1$). Os dois lados do sistema radicular foram somados para contabilizar o volume total de raízes da planta. Para o tratamento irrigação parcial do sistema radicular, foram analisados, tanto a soma das raízes, como cada lado separadamente.



Figura 6. Detalhe da lavagem das raízes em cada lado do vaso (A) e medição do volume das raízes (B) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato.

3.5.2 Capacidade fotossintética

Todas as avaliações dessas variáveis foram realizadas nas folhas +1 e +2, segundo o sistema de classificação de Kujiper (Dilejwin, 1952; Gallo et al., 1962). Na primeira avaliação, as folhas consideradas +1 e +2, na época, foram marcadas para que fossem avaliadas até o final do experimento. Para os resultados, foram consideradas as médias aritméticas das avaliações nas duas folhas.

Estimativa do medidor portátil de clorofila (MPC)

O índice de clorofila das folhas foi estimado a cada dois dias, entre 8:00 e 9:00 horas, com o Medidor Portátil de Clorofila, modelo SPAD-502 "Soil Plant Analyser Development" (Minolta, Japão). Foram realizadas cinco leituras na mesma parte da folha utilizada na avaliação das trocas gasosas.

Taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E) e déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar ($DPV_{\text{folha-ar}}$).

A taxa fotossintética líquida, condutância estomática, transpiração e o déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar foram determinados a cada dois dias por meio de um analisador de gás a infravermelho (IRGA), modelo LI-6400 (LI-COR, Lincoln, NE, USA). As medidas foram feitas entre 8:00 e 10:00 horas com auxílio de luz artificial (LEDs), com fluxo de fótons fotossintéticos ajustado para $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, de acordo com curva de luz da fotossíntese previamente feita em plantas de cana-de-açúcar da mesma variedade. Durante as avaliações, a concentração inicial do CO_2 na câmara foi mantida em torno de $380 \pm 30 \mu\text{mol mol}^{-1}$ e a área da folha analisada foi de 6 cm^2 .

Curva de fotossíntese versus Luz

Essa curva foi feita em três períodos, quais sejam: T0 (dia de início dos tratamentos), A = 0 (quando a taxa fotossintética líquida do tratamento NI foi igual à zero) e dois dias após a reirrigação. As curvas de luz (assimilação fotossintética do carbono *versus* fluxo de fótons fotossintéticos) foram traçadas com o auxílio de um analisador de gás a infravermelho (IRGA), modelo LI-6400 (LI-COR, Lincoln, NE, USA). As avaliações foram realizadas nas mesmas folhas e horários das

avaliações das trocas gasosas, com cinco intensidades luminosas (0, 500, 1000, 1500, e 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), sendo cada intensidade fornecida por 30 segundos com auxílio de luz artificial (LEDs).

Rendimento quântico máximo do fotossistema II (F_v/F_m)

O rendimento quântico máximo do fotossistema II foi obtido com auxílio do fluorímetro Pocket PEA (*Plant Efficiency Analyser*). Para tanto, as folhas foram adaptadas ao escuro por 30 minutos com auxílio de pinças adequadas, para que os centros de reações estivessem completamente abertos com perda mínima de calor (Strasser et al. 2000). Após a adaptação, um único pulso forte de luz 1s^{-1} ($3500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foi aplicado com a ajuda de três diodos emissores de luz (650 nm). As avaliações foram realizadas às 4:00 e 12:00 horas, sendo os dados obtidos às 4:00 horas considerados somente para o cálculo da %fotoinibição_(Fv/Fm).

Índice fotossintético “Photosynthetic Index” (PI)

Para as avaliações do PI, foi feito o mesmo procedimento, já que o parâmetro também é fornecido pelo fluorímetro Pocket PEA (*Plant Efficiency Analyser*). As avaliações também foram realizadas às 4:00 e 12:00 horas, sendo os dados obtidos às 4:00 horas considerados somente para o cálculo da %fotoinibição_(PI).

Estimativa de fotoinibição (%fotoinibição_{Fv/Fm} e %fotoinibição_{PI})

Com os valores de F_v/F_m e PI obtidos nos dois horários (4:00 e 12:00) foi possível estimar a fotoinibição de acordo com Azevedo, (2006).

$$\%fotoinibição_{Fv/Fm} = [1 - (F_v/F_{m\ 12h} / F_v/F_{m\ 4h})] \times 100$$

e

$$\%fotoinibição_{PI} = [1 - (PI_{12h} / PI_{4h})] \times 100$$

3.5.3 Potencial hídrico antemanhã (Ψ_{pd})

O potencial hídrico foliar antemanhã foi avaliado entre 4:00 e 5:00 horas em três períodos: T0 (dia de início dos tratamentos), A = 0 (quando a taxa fotossintética líquida do tratamento NI foi igual à zero) e dois dias após a reirrigação. Para tal, foi utilizada uma câmara de pressão do tipo Scholander,

modelo Soil Moisture (Scholander et al, 1965), com bocal adaptado para gramíneas, onde foram levadas as folhas consideradas +3 e +4. Tais folhas foram levadas imediatamente à câmara e foi feito um corte em bisel da nervura central para melhor visualização da exsudação da seiva.

3.5.4 Termografia por infravermelho

As fotografias termográficas foram obtidas com auxílio de um termógrafo modelo FLIR i50 (FLIR Systems AB, Sweden) e analisadas no software FLIR QuickReport, versão 1.2. Para tanto, a média da temperatura da porção da folha onde foram avaliadas as trocas gasosas foi considerada para estudo. As fotos foram feitas em três épocas: T0, A = 0 e dois dias após a reirrigação, e tiradas a uma distância aproximada de 20 cm, sempre entre 11:00 e 13:00 horas, faixa de horário que está dentro do horário mais quente do dia devido, dentre outros fatores, à incidência de radiação solar ortogonal ao dossel.

3.5.5 Eficiência do uso da água (EUA), eficiência intrínseca do uso da água (EIUA), eficiência agrônômica do uso da água (EAUA) e Economia de água em relação ao controle (EARC)

A EAUA foi estimada pela divisão da massa seca total da planta (massa seca da parte aérea + massa seca das raízes) pela quantidade de água aplicada em cada tratamento, desde o transplântio até o final do experimento. A EUA foi estimada pela dispersão dos valores da taxa fotossintética líquida (A) x transpiração (E). Da mesma forma, foi estimada a EIUA, substituindo-se os valores de E pelos valores da condutância estomática (g_s) na dispersão.

Para calcular a economia de água dos tratamentos IPSR e NI em relação às plantas controle, o total de água aplicado nas plantas desse tratamento, a partir da aclimatação até o final do experimento, foi considerado 100%. Dessa forma, foi feita uma regra de três simples, onde:

Água aplicada no Controle (L) – 100%

Água aplicada no tratamento (L) – X%

$X = \text{Água aplicada no tratamento} * 100 / \text{Água aplicada no Controle}$

3.6 Delineamento Experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), com plantas de cana-de-açúcar cultivadas em pares de vasos de 12L sob três tratamentos: controle (C), irrigação parcial do sistema radicular (IPSR) e não-irrigado (NI), com sete repetições cada, totalizando 42 parcelas experimentais.

Para casualização do experimento, foi realizado um sorteio que definiu a localização de cada planta no ambiente de cultivo e os respectivos tratamentos. Além disso, para as plantas do tratamento IPSR, um novo sorteio foi realizado com o objetivo de determinar o lado da planta a ser irrigado quando da aplicação dos tratamentos.

3.7 Análise Estatística

Com auxílio do software ASSISTAT 7.6 beta (2011) (Silva, 1996; Silva e Azevedo 2002; Silva e Azevedo, 2006; Silva e Azevedo 2009), os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As variáveis EUA e EIUA foram analisadas por meio da dispersão dos pontos com o auxílio do Microsoft Excel 2007, que também foi o programa utilizado na confecção dos gráficos e tabelas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliações Biométricas

A análise do crescimento possibilita descrever as características morfofisiológicas da planta em diferentes intervalos de tempo acompanhando a dinâmica da produção fotossintética, avaliada por meio do acúmulo de biomassa (Magalhães, 1979). Portanto, a avaliação de medidas biométricas em relação ao tempo, pode ser uma excelente ferramenta para se investigar a capacidade produtiva de culturas de interesse agrônomo (Torres Netto, 2005).

Ao se estudar o crescimento da cana-de-açúcar, se faz necessário realçar que essa planta está entre as de maior eficiência fotossintética devido ao metabolismo C_4 que apresenta. Sendo assim, esta pode utilizar com mais eficiência a água, a luz e se desenvolver bem em condições de elevada temperatura.

Na figura 7 (A e B), observa-se, nos dias avaliados, que a utilização da irrigação parcial do sistema radicular (IPSR) não comprometeu a altura do colmo (AC). No entanto, houve uma tendência à diminuição da altura da planta (AP) no tratamento não-irrigado a partir do 15º dia após o início dos tratamentos (DAIT). No dia de estresse máximo (19 DAIT), essa diminuição se confirmou ao se observar a diferença estatística. Esses resultados estão em concordância com os encontrados por Barbosa (2010), que trabalhando com diferentes reposições da evapotranspiração acumulada nas variedades SP81-3520 e RB867515, relatou

que a altura da planta foi a característica mais sensível ao estresse. Em cana-de-açúcar, a variação da altura da planta é um bom indicativo de tolerância ou susceptibilidade ao déficit hídrico (Silva et al., 2008). Assim, pode-se afirmar que essa variável foi um bom indicativo dos efeitos deléteiros na planta em resposta ao déficit hídrico severo. Na figura 7A, observou-se que a AP foi menor em 29 cm e 22 cm, quando comparado o tratamento não-irrigado ao controle e sob irrigação parcial do sistema radicular, respectivamente. Com relação à altura do colmo (AC), o tratamento não-irrigado somente diferiu dos demais na última avaliação.

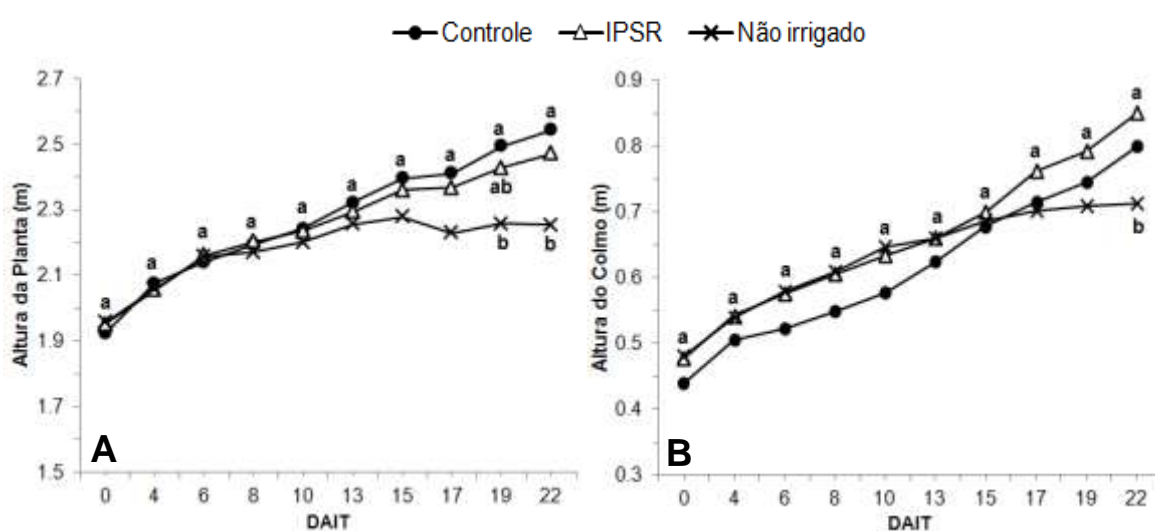


Figura 7. Altura da planta (A) e altura do colmo (B) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quanto maior a demanda evaporativa da atmosfera, mais elevada será a necessidade de fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera, e as folhas são responsáveis pela maior parte dessa demanda evaporativa. Por isso, é nelas que ocorre a primeira mudança em resposta à seca, que é a inibição da expansão celular, o que diminui o ritmo da expansão foliar no início do desenvolvimento do déficit hídrico (Vidal et al., 2005). Outro aspecto importante é o aumento da senescência das folhas em condições de estresse hídrico. Ou seja, em muitas plantas, e em períodos longos de estiagem, ocorre queda das folhas, o que seria

uma maneira para evitar a perda excessiva de água pela planta e, no período chuvoso, o lançamento foliar retorna, para compensar a fase de estresse.

Dessa forma, a partir do 13º DAIT, dia considerado crítico, a restrição hídrica afetou significativamente o número de folhas (NF) das plantas de cana-de-açúcar submetidas ao estresse severo (Figura 8A). Contudo, ao se analisar esta figura, não foi observada diferença entre os tratamentos controle (C) e o submetido à irrigação parcial do sistema radicular (IPSR).

Uma resposta comum à condição da irrigação parcial identificada em videira e tomate é o controle do vigor vegetativo (Loveys et al., 2000; Davies et al., 2000; Campos et al., 2010). Esse tipo de resposta pode ser aplicada ao presente trabalho em que, ao longo das avaliações, apesar de não diferir estatisticamente das plantas controle, as plantas sob irrigação parcial apresentaram uma tendência a ter um menor número de folhas.

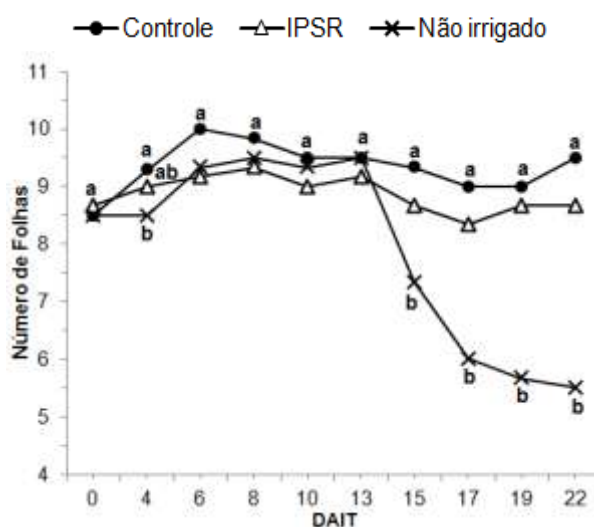


Figura 8. Número de folhas de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A área foliar é um importante fator de produção que influencia o uso da água pelas plantas, representando o potencial de produtividade. Sob condições de déficit hídrico, o equilíbrio entre a produção de assimilados e a demanda para o desenvolvimento dos órgãos reprodutivos é severamente afetado devido à

redução da área fotossinteticamente ativa (Gerik et al., 1996). A limitação na área foliar pode ser considerada como uma primeira reação das plantas em relação ao déficit hídrico (Taiz e Zeiger, 2009). Isso foi comprovado nos resultados obtidos no presente trabalho (Figura 9). Nesta figura, e no final do experimento, observa-se que o tratamento não-irrigado apresentou o valor médio ($0,3065 \text{ m}^2$), estatisticamente diferente comparado aos demais tratamentos, com redução de 59% da área foliar comparado ao controle ($0,7606 \text{ m}^2$). Segundo Bittman e Simpson (1987), trabalhando com gramíneas e Cirilo e Andrade (1996); Azevedo (2006) com milho, a área foliar foi significativamente menor quando as plantas foram submetidas a déficit hídrico total.

Com área foliar menor, existe uma diminuição da transpiração total da planta, conservando, efetivamente, o suprimento de água no solo, por período mais longo (Taiz e Zeiger, 2009). Dessa forma, alguns trabalhos com irrigação parcial, em que é preconizada a diminuição da perda de água, estes podem apresentar, tanto em condições de campo como em casa de vegetação, o crescimento da parte aérea e a taxa de transpiração total da planta significativamente reduzidos (Stoll et al., 2000).

No presente trabalho, as plantas sob IPSR apresentaram área foliar ($0,6609 \text{ m}^2$) 13% menor que o tratamento controle. No entanto, essa redução não foi significativa estatisticamente (Figura 9). Esse resultado é semelhante ao encontrado por Huitziméngari (2009) que, trabalhando com tomate sob 30% da capacidade de campo em um lado do sistema radicular e 90% do outro, observou 15% de diminuição comparando os resultados com o tratamento considerado controle (90% da capacidade de campo nos dois lados do vaso). Da mesma forma, Ali et al., (2004), também trabalhando com tomate sob irrigação parcial, encontraram diminuição de 13% da área foliar do tratamento IPSR comparado ao controle. Esses resultados eram esperados, tendo em vista que a técnica preconiza uma pequena redução do crescimento das plantas em virtude do reduzido fornecimento de água.

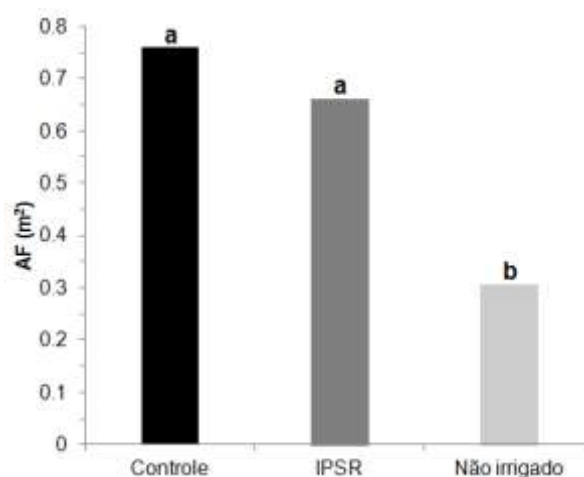


Figura 9. Área foliar de *Saccharum* spp. 22 dias após início dos tratamentos (DAIT) sob aplicação diferencial de água no substrato. Cada barra representa o valor médio de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A limitação hídrica está inteiramente ligada com a eficiência fotossintética da planta; ou seja, esta limitação causa efeitos significativos no crescimento/desenvolvimento, por meio do comprometimento na assimilação fotossintética do carbono e na eficiência fotoquímica (Lawlor e Cornic, 2002). Sendo assim, esse estresse ambiental limita a capacidade de acúmulo de fotoassimilados durante o ciclo produtivo, e a análise da massa seca é de grande importância para entender a quantificação deste estresse no crescimento/desenvolvimento da planta.

A limitação hídrica no solo pode desencadear algumas respostas da planta. Como exemplo, pode haver um estímulo para maior produção de raízes, a fim de otimizar a absorção de água e de nutrientes em porções mais profundas do solo. Tal ação da planta pode causar redução no crescimento da parte aérea. Esta resposta pode ser observada nos resultados da relação massa seca/parte aérea/massa seca das raízes (MSPA/MSR) (Figura 10C).

Segundo Arias et al. (1996), existe alta correlação entre a produção de matéria seca e o consumo de água em cana-de-açúcar. No presente trabalho, os resultados encontrados para MSPA e MSR (Figura 10A e B) comprovam a teoria de Arias, pois quando se compara as médias com o tratamento controle, a baixa disponibilidade hídrica comprometeu a produção para as duas variáveis no tratamento não-irrigado, causando perdas de 34,2% e 45,5%, respectivamente.

Da mesma forma, no mesmo tratamento não-irrigado, Azevedo (2006), trabalhando com irrigação parcial em plantas de milho, encontrou redução significativa da MSPA.

Segundo Tardieu (1997), sob déficit hídrico moderado, o crescimento do sistema radicular pode ser mantido. Nesse trabalho com cana-de-açúcar, a irrigação parcial do sistema radicular mostrou-se eficiente para produção de MSPA, com valor médio de (117,02 g), não diferindo estatisticamente do tratamento controle (128,15 g) (Figura 10). Ensaios realizados com IPSR têm demonstrado a eficiência do método na produção de MSPA em diversas culturas, com a manutenção, ou pequenas reduções, dos valores dessa variável em cana-de-açúcar (Deus, 2010), algodão (Tang et al., 2010), milho (Yazar et al., 2009), pimentão (Cheng et al., 2010). Nestes trabalhos, houve significativas reduções na aplicação de água, refletindo em uma maior eficiência na utilização desse recurso.

Com o aumento do déficit hídrico, as camadas superiores do solo são, em geral, as primeiras a secarem. Assim, as plantas perdem as raízes superficiais e produzem raízes profundas em direção à parte do solo mais úmida; sendo assim, o crescimento de raízes durante o estresse exige alocação de fotoassimilados para as extremidades das raízes em crescimento (Taiz e Zeiger, 2009).

Quando as plantas estão sob estresse, o desenvolvimento das raízes é fundamental para a sobrevivência da planta (Burkart et al., 2004; McCully, 1999). Assim como na MSPA, a produção de massa seca das raízes (MSR) não foi afetada estatisticamente nas plantas sob irrigação parcial do sistema radicular (Figura 10B), apesar da média obtida (46,37 g) ser 17,2% menor que a observada nas plantas controle (56,05 g). Esses resultados diferem dos encontrados na literatura para essa variável, como observado por Deus (2010) em plantas de cana-de-açúcar e Tang et al., (2010), com algodão. Estes autores encontraram aumento nos valores de MSR. Deus (2010) justifica esse aumento com o fato da diminuição do fornecimento de água provocar aumento na sensibilidade das raízes à deficiência hídrica, que passa a enviar sinais químicos (ABA) à parte aérea (Stoll et al., 2000; Kang e Zhang, 2004). O ABA produzido nas raízes inibe a síntese de etileno, permitindo o crescimento em condições de baixa disponibilidade hídrica (Sharp e Lenoble, 2002). Algo que também está relacionado a esse mecanismo para o maior desenvolvimento do sistema radicular está nas condições de implantação da irrigação parcial, pois a

reirrigação em raízes previamente secas, ou seja, a alternância entre os lados seco e molhado do sistema radicular, pode estimular o acúmulo de biomassa nesse órgão (Mingo et al., 2004). Trabalhos em que a técnica é aplicada de forma alternada (Tang et al., 2010; Wang et al., 2012) têm demonstrado que há um estímulo na produção de raízes secundárias devido a esses ciclos “seco-molhado” (Kang e Zhang, 2004). Dessa forma, as plantas que passam por essa situação estão mais propensas a resistir a possíveis situações de estresse moderado no campo, o que fornece a elas certa rusticidade. Em síntese, a irrigação parcial alternada leva a planta a desenvolver um melhor sistema radicular que em um sistema de irrigação parcial fixo (Tang et al., 2010).

Quanto aos valores da relação MSPA/MSR (Figura 10C), não houve diferença significativa entre os três tratamentos. No entanto, o tratamento não-irrigado apresentou a maior média (2,85). Tal resultado sugere que essas plantas, por apresentarem baixa produção de raízes, podem ter menor capacidade de exploração de água e nutrientes minerais no solo (Torres Netto, 2005) o que levou a um menor desenvolvimento da parte aérea, provocando um aumento do valor dessa variável.

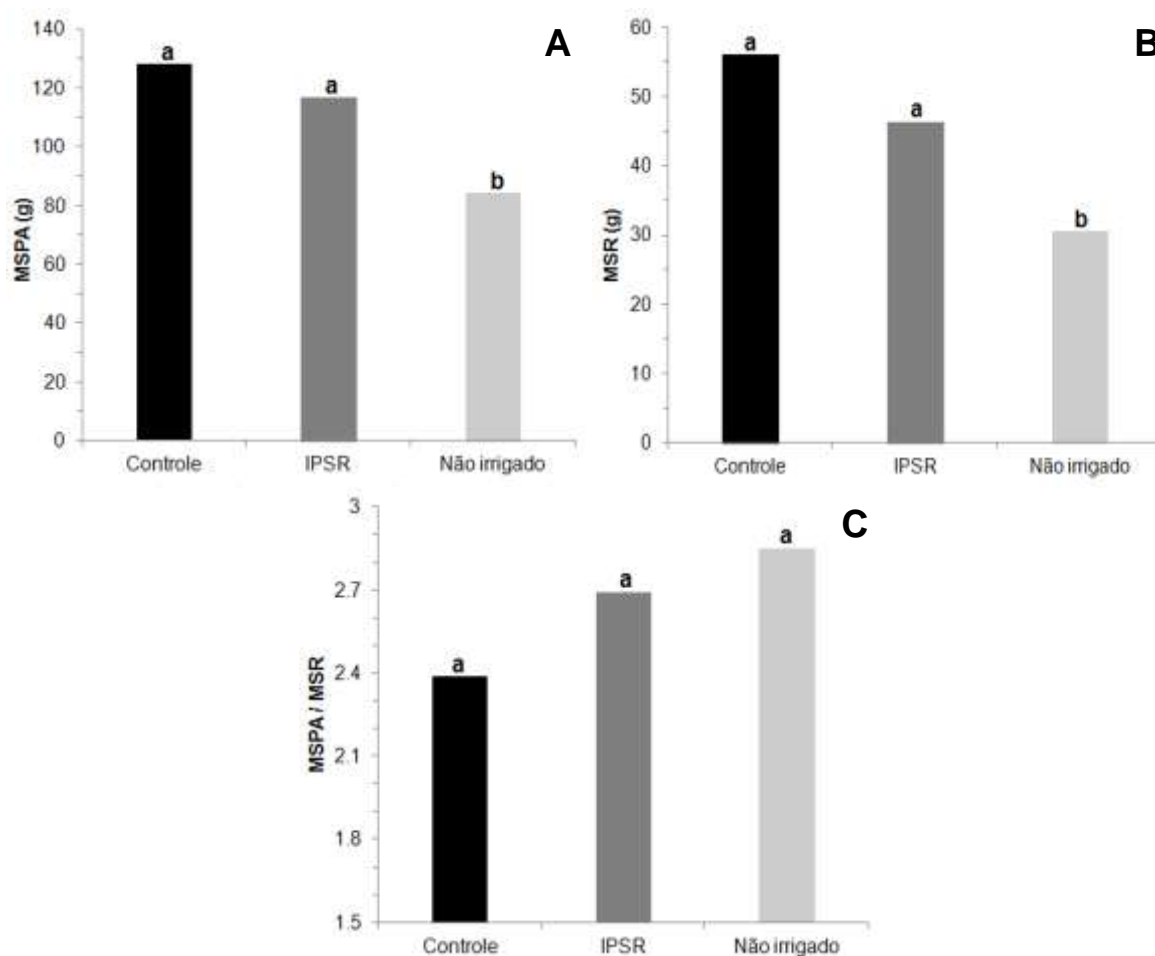


Figura 10. Massa seca da parte aérea (A), Massa seca das raízes (B) e Relação massa seca da parte aérea / Massa seca das raízes (C) de *Saccharum* spp. 22 dias após início dos tratamentos (DAIT) sob aplicação diferencial de água no substrato. Cada barra representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Torres Netto (2005), a razão de massa foliar (RMF) avalia a capacidade das plantas em direcionar os fotoassimilados para a formação de novas folhas (órgãos assimiladores). Da mesma forma, a razão de massa de colmo (RMC) avalia a capacidade da planta em direcionar os fotoassimilados para o colmo, e a razão de massa das raízes (RMR) representa o quanto a planta investe nos fotoassimilados na produção das raízes.

Em cana-de-açúcar, saber onde a planta armazena em maior quantidade os fotoassimilados é fundamental para conhecer o desempenho produtivo. Uma vez que uma variedade de cana-de-açúcar que invista mais no acúmulo de fotoassimilados no colmo (local onde se concentra a sacarose) irá determinar o

valor comercial da cultura. No momento da escolha da variedade a ser plantada, bem como um manejo adequado da irrigação, uma maior capacidade deste acúmulo de sacarose pode ser um diferencial no lucro do produtor. Da mesma forma, uma planta que desenvolve um sistema radicular robusto estaria mais apta a enfrentar ambientes com alguma limitação de nutrientes ou baixa disponibilidade de água, além de possibilitar um estabelecimento da cultura no campo mais eficiente.

Apesar de não ter sido encontrada diferença significativa entre os tratamentos para RMF, RMC e RMR, as plantas do tratamento controle apresentaram uma tendência a investir os fotoassimilados nas folhas e raízes (Figura 11A, B e C). Já as plantas não-irrigadas investiram mais em colmo, diferente do que era esperado, já que o estresse hídrico provoca um aumento na produção de raízes, como já foi explicitado nesse trabalho (Figura 10B). Nas plantas sob irrigação parcial, existiu uma grande tendência no investimento dos fotoassimilados no colmo e nas raízes (Figura 11B e C). Esse resultado corrobora com as informações da literatura, de que plantas sob irrigação parcial do sistema radicular diminuem o crescimento vegetativo (Loveys et al., 2000; Davies et al., 2000; Campos et al., 2010). Vale ressaltar que esse resultado é importante, à medida que o principal produto econômico da cana-de-açúcar encontra-se no colmo, além da importância do sistema radicular no estabelecimento da cultura e na resistência a possíveis estresses durante o ciclo.

A razão de área foliar (RAF) é uma característica morfológica e, comparativamente, pode representar a área foliar disponível para o processo fotossintético (Cruz et al., 2004). Dessa forma, os resultados encontrados demonstraram o comprometimento das plantas submetidas ao não-fornecimento de água (NI). Os tratamentos controle e IPSR não diferiram estatisticamente (Figura 11D).

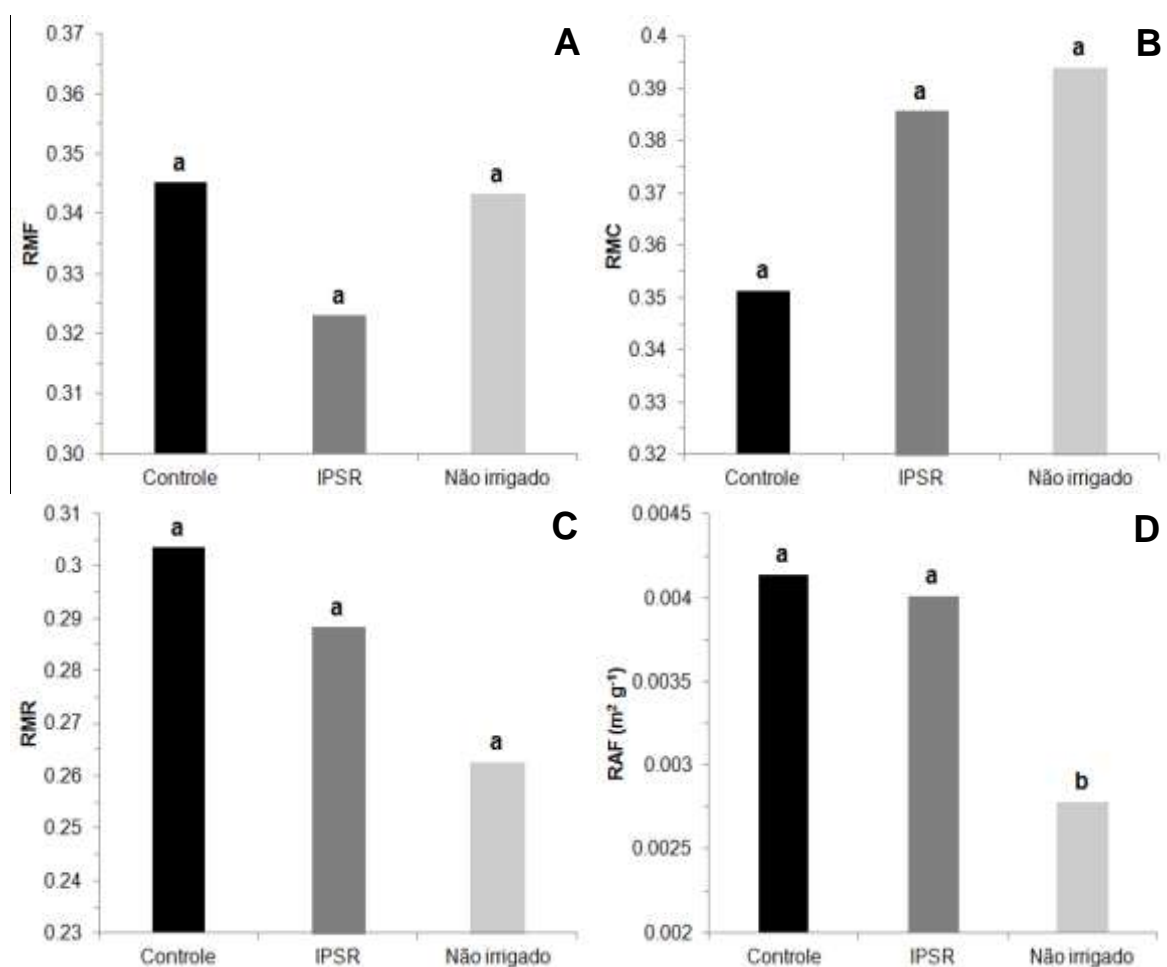


Figura 11. Razão de massa foliar (A), razão de massa do colmo (B), razão de massa de raiz (C) e razão de área foliar (D) de *Saccharum* spp. 22 dias após início dos tratamentos (DAIT) sob aplicação diferencial de água no substrato. Cada barra representa a média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O volume de solo explorado e o contato entre a superfície das raízes e o solo são essenciais para a absorção efetiva da água e nutrientes pelas raízes das plantas (Santos e Carlesso, 1998). Por essa razão, o desenvolvimento do sistema radicular está relacionado com o processo de adaptação morfofisiológica que as plantas desenvolvem em resposta ao estresse hídrico.

O estudo de Ball et al., (1994) demonstrou que o maior desenvolvimento das raízes ocorre nas camadas de solo cuja disponibilidade de água é maior. Um resultado semelhante foi encontrado nesse trabalho, em que as plantas do tratamento controle apresentaram o maior valor de volume de raízes, com 362,85 ml. Apesar disso, as plantas sob irrigação parcial do sistema radicular não

apresentaram diferença estatística comparadas às controle (292,85 ml) (Figura 12A). Uma grande redução do volume de raízes foi observada nas plantas não-irrigadas (168,57 ml). Ao se comparar o referido tratamento com as plantas dos tratamentos controle e IPSR, foi encontrada uma redução de 53,5% e 42,4%, respectivamente (Figura 12A). Esses dados são importantes, pois, dependendo das características morfológicas e genótípicas de cada espécie, o crescimento do sistema radicular nas camadas mais profundas do perfil do solo possibilita uma melhor exploração da umidade e da fertilidade pelas plantas (Goldmann et al., 1989). Dessa forma, o sistema radicular da planta é fundamental para a tolerância a estresses hídricos moderados, por exemplo.

Trabalhos com irrigação parcial do sistema radicular têm demonstrado que a massa seca das raízes, assim como o volume são influenciados pelos ciclos “seco-molhado” (Kang e Zhang, 2004). Ou seja, esse ciclo causa uma alternância dos lados seco e molhado do sistema radicular ao longo do tempo. No presente trabalho, no tratamento IPSR, foi adotado o sistema fixo, ou seja, as raízes do lado seco do vaso permaneceram secas durante todo período experimental, até o momento da reirrigação, aos 19 DAIT. Já as raízes molhadas, permaneceram nesse estado até o final do período experimental. Os resultados encontrados mostraram que, em relação ao lado úmido, as partes do sistema radicular das plantas sob IPSR, que permaneceram secas, tiveram o crescimento altamente comprometido, com redução de 48,8% do volume (Figura 12B). Esse dado é relevante, porque, dependendo do ciclo da cultura, as raízes das plantas sob irrigação parcial do sistema radicular fixo podem chegar à morte, o que vai representar uma grande perda no poder de absorção de água e nutrientes, além de provocar problemas na sustentação das plantas, o que poderá causar tombamento em plantas de algumas espécies.

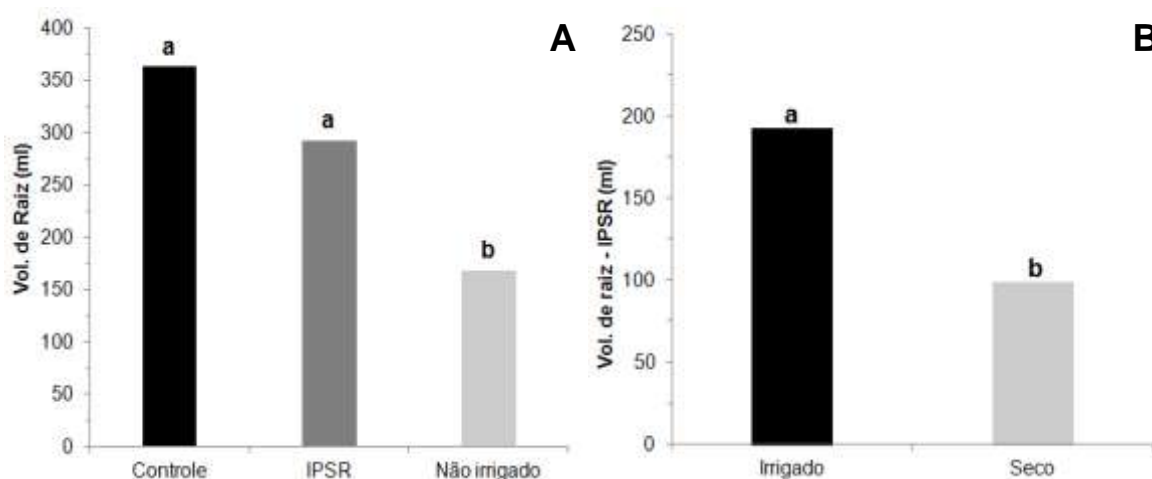


Figura 12. Volume de raiz (A) e volume de raiz do tratamento IPSR (B) de *Saccharum* spp. 22 dias após início dos tratamentos (DAIT) sob aplicação diferencial de água no substrato. Cada barra representa a média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.2 Capacidade fotossintética

Geralmente, a relação entre as leituras com o medidor portátil de clorofila (MPC) e o conteúdo de clorofila não é linear. Embora alguns autores apresentem essa correlação (Xu et al. 2000; Yamamoto et al. 2002), parece que esta pode ser útil em casos em que o teor de clorofila não é grande (Castelli et al. 1996; Jifon et al. 2005; Nauš et al., 2010). Além disso, existe uma alta interferência do horário de avaliação na composição dos cloroplastos na folha, possibilitando erros de leitura de até 35%, como foi comprovado por Nauš et al., (2010), em folhas de tabaco. Entretanto, apesar destes detalhes a serem considerados durante as medidas, estas avaliações utilizando o MPC foram bem relacionadas com os teores de N e clorofila em folhas de mamoeiro e café (Torres Netto et al., 2002 e 2005).

Segundo Hendry e Price (1993), o conteúdo de pigmentos fotossintéticos, principalmente as clorofilas, pode ser afetado devido à ação de fatores do ambiente como deficiências minerais, estresse hídrico, poluição industrial e temperatura infra ou supraótima. Assim, as clorofilas estão relacionadas com a eficiência fotossintética das plantas e, conseqüentemente com o crescimento e adaptabilidade da planta aos diferentes ambientes (Jesus e Marengo, 2008).

Portanto, a determinação do teor destes pigmentos fotossintéticos é de extrema importância no diagnóstico do nível de estresse que está atuando sobre a planta.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se observar que a partir do 15° DAIT, as plantas não-irrigadas apresentaram uma diminuição no teor de clorofila (Figura 13). Essa resposta se confirmou ao longo das avaliações posteriores, inclusive, não se observando recuperação após a reirrigação dos tratamentos. Ao final do período experimental, as plantas do tratamento controle e IPSR apresentavam valores médios de leitura de MPC de 44,05 e 43,2; respectivamente, enquanto no tratamento não-irrigado foi obtido 17,83 (Figura 13), uma redução aproximada de 59% na estimativa do teor de clorofila dessas plantas em relação às plantas dos tratamentos controle e IPSR. Da mesma forma, resultados semelhantes foram encontrados por Deus (2010), em cana-de-açúcar sob irrigação parcial do sistema radicular, em que o autor encontrou menores leituras de MPC nas plantas não-irrigadas, sem recuperação após a reirrigação, evidenciando o dano nos teores de clorofila (Azevedo, 2006). Esta resposta pode ter ocorrido devido à degradação de pigmentos fotossintéticos, como clorofila (em maior intensidade) e carotenoides, o que geralmente é relatado como consequência da deficiência hídrica (Colom e Vazzana, 2002). Além disso, pode-se associar essa resposta a uma provável menor longevidade foliar provocada pelo estresse, uma vez que reduções nos valores de intensidade de verde podem mostrar antecipação do processo de senescência (Torres Netto, 2005), o que ficou comprovado com o decréscimo do número de folhas das plantas não irrigadas ao longo das avaliações no presente trabalho (Figura 8A).

Para plantas C_4 , existem evidências que a assimilação e absorção do nitrato são fortemente reduzidas sob estresse hídrico (Becker e Fock, 1986; Foyer et al., 1998). Isto pode ser mais uma explicação para a queda no teor de clorofila e de proteína relatadas em uma série de espécies C_4 submetidas a estresse hídrico (Marques da Silva e Arrabac, 2004; Carmo-Silva et al., 2007; Ghannoum, 2009), o que vai de encontro com os resultados desse trabalho.

A diminuição da clorofila e proteína sob tensão de água pode também ser devido à degradação da proteína, resultado da senescência induzida, tal como sugerido pelo conteúdo aumentado de aminoácidos (Becker e Fock, 1986).

Por outro lado, as plantas sob irrigação parcial e nas condições controle não apresentaram diferença estatística ao longo das avaliações, exceto em uma medida pontual no 13° DAIT (Figura 13).

Segundo Hoel e Solhaug (1998), o valor obtido pelo medidor portátil de clorofila pode ser considerado um índice avaliador de senescência foliar na seleção de genótipos de milho com elevada longevidade foliar. Trazendo essa conclusão para o presente trabalho, é possível comprovar o benefício da utilização da IPSR frente às condições controle, ou seja, foi observada uma manutenção nos valores de MPC utilizando-se menor quantidade de água. Assim, é possível sugerir que a longevidade das folhas das plantas sob IPSR não foi afetada, o que vai representar tempo semelhante na atividade fotossintética da folha com consumo de água menor, ou seja, maior eficiência do uso da água.

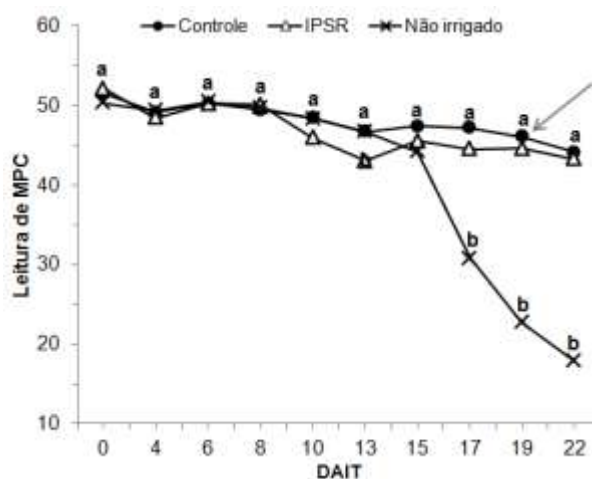


Figura 13. Leituras do medidor portátil de clorofila (MPC) em *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. A seta indica o momento da reirrigação.

Na avaliação feita em T0, nenhum dos tratamentos foi afetado nas faixas de luz trabalhadas (Figura 14A), sendo os valores de fotossíntese máxima para todos os tratamentos encontrada entre 1000 (Controle: $19,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e $1500 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (IPSR: $22,6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e não-irrigado: $22,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

No dia de estresse máximo nas plantas NI, as curvas de fotossíntese *versus* luz mostraram que o estresse hídrico afetou intensamente a taxa fotossintética das plantas não-irrigadas (Figura 14 B), exceto em $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Nessa época (17 DAIT), não houve assimilação fotossintética do carbono em nenhuma das faixas de luz trabalhadas. Ao se observar as figuras 14A, B e C, foi possível perceber uma redução nos valores de fotossíntese máxima dos tratamentos controle e IPSR, comparados à primeira avaliação (Figura 14A e B). Esta redução foi devido às variáveis climáticas dentro da casa de vegetação, na época de medição da taxa fotossintética. No entanto, a resposta das plantas continuou semelhante, com valores máximos da taxa fotossintética em $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Controle: $11,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e IPSR: $12,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Dois dias após a reirrigação (Figura 14C), as plantas não-irrigadas apresentaram recuperação. Os valores médios da taxa fotossintética do tratamento não-irrigado mantiveram-se sempre menores que o controle e o IPSR, nas faixas de 500, 1000 e $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na avaliação após a reirrigação (Figura 14C). Este fato mostra que o nível de estresse experimentado pelas plantas do tratamento não-irrigado causou um dano crônico, pois as plantas não se recuperaram a ponto de atingir taxa fotossintética próxima aos valores encontrados nas plantas controle e IPSR. Este resultado pode ser explicado pela redução significativa dos teores de clorofilas, avaliados pelo MPC, verificados nas folhas das plantas NI (Figura 14). Este dano crônico também pode ser observado por meio da inclinação da curva entre 0 e $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 14C) Esta inclinação mostra o rendimento quântico (quantidade de CO_2 assimilado por unidade de fóton absorvido) e no tratamento NI verificou-se que, em relação aos demais tratamentos, esta inclinação foi bem reduzida (Figura 14C).

Os valores máximos de fotossíntese na avaliação realizada 2 dias após a reirrigação voltaram a situar-se nas faixas entre 1000 e $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz, com máximos de $11,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $12,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $8,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, para os tratamentos controle, IPSR e não-irrigado, respectivamente.

Esse tipo de resposta encontrada nas três avaliações (Figura 14A, B e C) é abordada por Taiz e Zeiger (2009), que explicam que em fluxos de luz mais altos, a resposta fotossintética da planta começa a estabilizar, alcançando a saturação. Após isso, aumentos desse fluxo não afetam as taxas fotossintéticas,

indicando que fatores como a taxa de transporte de elétrons, atividade da Rubisco ou o metabolismo das trioses fosfato tornam-se limitantes à fotossíntese.

Ao longo das avaliações, e nas plantas não-irrigadas, a redução constatada na taxa fotossintética líquida (A) está ligada à redução da g_s ocorrida em decorrência do estresse hídrico (Peçanha, 2010). Após a reirrigação, apesar da recuperação encontrada nos valores de g_s nas plantas NI (Figura 15B), os valores médios de A não retornaram aos valores iniciais das plantas controle (Figura 15A). Tal fato foi devido ao comprometimento nos teores de clorofilas (Figura 14), bem como por meio de danos encontrados na fase fotoquímica da fotossíntese (Figura 16A e B e 17A e B), o que reforça a ideia de que o estresse hídrico severo compromete a assimilação fotossintética do carbono por conta dos efeitos estomáticos e não-estomáticos (avaliados pela emissão da fluorescência da clorofila).

Obsevou-se também que nas avaliações em $A = 0$ e 2 dias após a reirrigação, a taxa fotossintética máxima foi reduzida em todos os tratamentos, quando comparada à avaliação em T_0 . Esse fato poderia ser atribuído às condições climáticas no momento das avaliações, mas como visto na figura 14A, B e C, as variáveis climáticas T° , UR% e DPV não apresentaram grande diferença. Dessa forma, uma possível explicação baseada nos resultados encontrados do volume de raiz (Figura 12) que esteja no confinamento do sistema radicular, segundo Tschaplinski e Blake, (1985), Arp, (1991), Gomes et al., (2006), é que existe uma correlação positiva entre o volume do sistema radicular e a taxa fotossintética da planta. Assim, em condições de restrição mecânica do sistema radicular, a taxa fotossintética pode ser afetada negativamente.

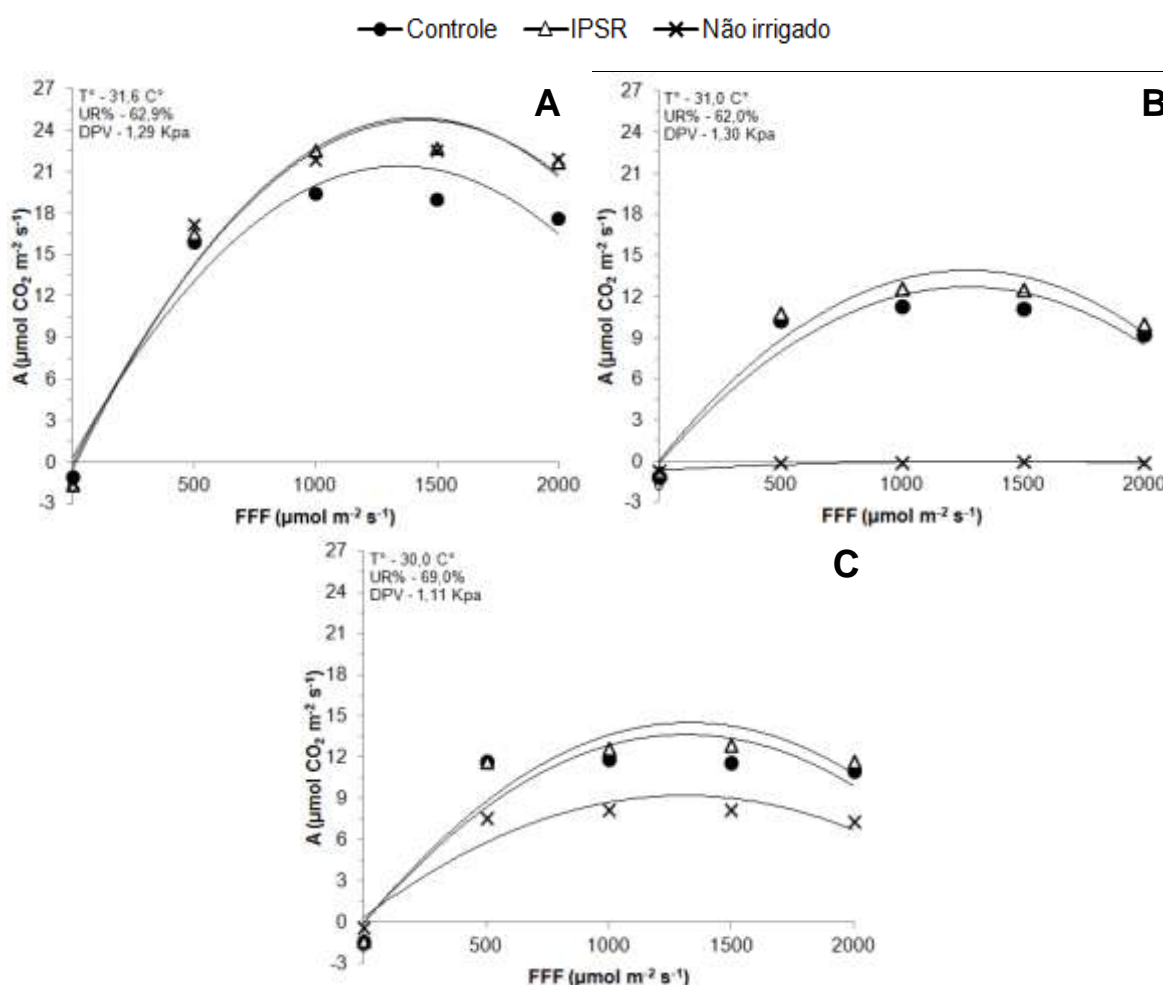


Figura 14. Curva de fotossíntese *versus* Luz de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato em três épocas: T0 (A), A = 0 (B) e 2 dias após a reirrigação (C). Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Como já foi explicado ao longo do trabalho, a ação da sinalização do ABA emitida pelas raízes presentes no lado seco do solo sob irrigação parcial, tem um envolvimento fundamental no controle estomático, sendo a chave da eficiência do método para o desempenho fotossintético, e conseqüentemente, produtivo da cultura.

De uma forma geral, a IPSR mostrou-se eficiente na manutenção da taxa fotossintética, não tendo sido encontrada em nenhuma época diferença significativa em relação ao controle (Figura 15A); apesar de uma pequena redução nos valores em relação ao tratamento controle a partir do 13DAIT. Isso vai de acordo com o defendido por diversos trabalhos referentes à IPSR, em que

os autores descrevem as taxas fotossintéticas das plantas cultivadas em IPSR semelhantes às plantas controle, com leve redução do crescimento da parte aérea; assim como foi encontrado em cana-de-açúcar no presente trabalho. Ainda, corroborando com essa resposta, percebeu-se também uma leve queda na condutância estomática nas plantas IPSR, mas já a partir do 10DAIT (Figura 15B). As reduções na condutância estomática são atribuídas à sinalização química de ácido abscísico (ABA). Este fitormônio é translocado para a parte aérea via corrente transpiratória, a partir das raízes. Os experimentos realizados por Hartung et al., (2002) e Zhang et al., (2001) mostraram que o fechamento estomático ocorreu quando o potencial hídrico foliar não tinha sido ainda afetado, reforçando a teoria da emissão de sinais químicos das raízes para a parte aérea, assim como foi encontrado no presente trabalho. Segundo Jones (1992), uma pequena redução na abertura estomática pode reduzir substancialmente a perda de água com um mínimo de efeito sobre a absorção de CO₂. De acordo com Comstock (2002), o uso desse conhecimento na prática pode resultar em diminuição significativa da utilização de água, pois a transpiração consome mais de 95% da água absorvida pela planta, ficando apenas o menor percentual para produção de frutos e crescimento vegetativo.

O leve fechamento estomático das plantas sob IPSR se confirmou no dia de estresse máximo ($A = 0$) (Controle - 0,228 mol H₂O m⁻²s⁻¹; IPSR - 0,175 mol H₂O m⁻²s⁻¹), evidenciando uma economia de água nas plantas desse tratamento. No entanto, não houve comprometimentos às plantas em termos da eficiência fotoquímica (Figura 16A e B) e na dissipação do calor nas folhas (Figura 21A, B e C), como ficou comprovado nas variáveis analisadas ao longo do trabalho. Tang et al. (2006) encontraram que os sinais não-hidráulicos influenciaram na condutância estomática, mas somente ocorreram quando as plantas estavam sob condições hídricas favoráveis. Por outro lado, os sinais hidráulicos foram atribuídos como o principal fator afetando a condutância estomática.

Flexas et al., (2004) afirmam que a comparação da resposta à fotossíntese, baseada na condutância estomática, parece ser mais apropriada entre diferentes estudos. Realmente, a *gs* responde a vários fatores internos e externos envolvendo a planta (potencial hídrico e do xilema, pH, ácido abscísico, dentre outros), que a torna uma variável integrada a todos os sinais associados com a planta, em resposta ao estresse hídrico, tanto moderado como severo.

Apesar da redução nos valores de g_s , não foi encontrada diminuição significativa na transpiração (Figura 15C) entre os tratamentos Controle e IPSR. Ainda, a leve diminuição dos valores encontrados para essa variável (E) nas plantas sob IPSR comparadas à planta controle, não foi semelhante à encontrada em g_s e A. No entanto, a maior eficiência na utilização da água foi comprovada, quando se analisou a eficiência agrônômica do uso da água (Quadro 2). Na figura 15D, também percebeu-se um aumento do $DPV_{\text{folha-ar}}$ a partir do 13DAIT no tratamento NI. Essa variável representa o grau de secura do ar e a demanda hídrica do ar por água. Esse pequeno aumento também pode estar relacionado com a leve redução da condutância estomática encontrada em IPSR (Figura 15B). No entanto, as demais características encontradas nas plantas sob IPSR ao longo do trabalho corroboram na assertiva de que a capacidade fotossintética não foi comprometida.

Como já era esperado, as plantas não-irrigadas apresentaram queda acentuada na taxa fotossintética, mas somente a partir do 15DAIT (Figura 15A). Essa redução esteve associada ao fechamento estomático pronunciado encontrado a partir do 13DAIT (Figura 15B). Essa diminuição da g_s também provocou quedas na transpiração (Figura 15C), influenciando no fluxo de água pela planta que é fundamental para o crescimento. Outra consequência dessa menor taxa transpiratória, foi o incremento da temperatura da folha em até 4,6°C, como foi possível visualizar nas fotografias termográficas (Figura 21B). Como já era esperado, os maiores valores de $DPV_{\text{folha-ar}}$ também foram encontrados nesse tratamento (Figura 15D).

Após a reirrigação, as plantas não-irrigadas recuperaram a condutância estomática ao mesmo nível dos demais tratamentos (Figura 15B). No entanto, os valores da taxa fotossintética das plantas não-irrigadas ($6,04 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) continuaram estatisticamente menores que em controle e IPSR ($12,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $12,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), o que representou uma redução de 50% em relação aos valores dos tratamentos supracitados. Sabe-se que o estresse hídrico afeta a fotossíntese da planta devido aos efeitos estomáticos e não-estomáticos. O efeito estomático seria o evento primário, que levaria a uma menor disponibilidade de CO_2 nos espaços intercelulares, reduzindo a assimilação nos sítios de carboxilação da Rubisco (Faria et al., 1996; He e Lee, 2001). Já os efeitos não-estomáticos estão relacionados às perturbações nos processos fotoquímicos

(redução no transporte de elétrons, reduzindo a formação de ATP e NADPH) e nos processos bioquímicos (redução na eficiência carboxilativa e/ou na quantidade e atividade da Rubisco e de outras enzimas do metabolismo fotossintético/Ciclo de Calvin) (Wise et al., 1991; Kanechi et al., 1996; Lu e Zhang, 1999).

Dessa forma, pode-se concluir que nas plantas do tratamento NI, também houve efeitos não-estomáticos no comprometimento da taxa fotossintética. Essa conclusão foi evidenciada pelos resultados da estimativa do teor de clorofila (Figura 13) e das variáveis que avaliaram a eficiência fotoquímica das plantas de cana-de-açúcar (Figura 16).

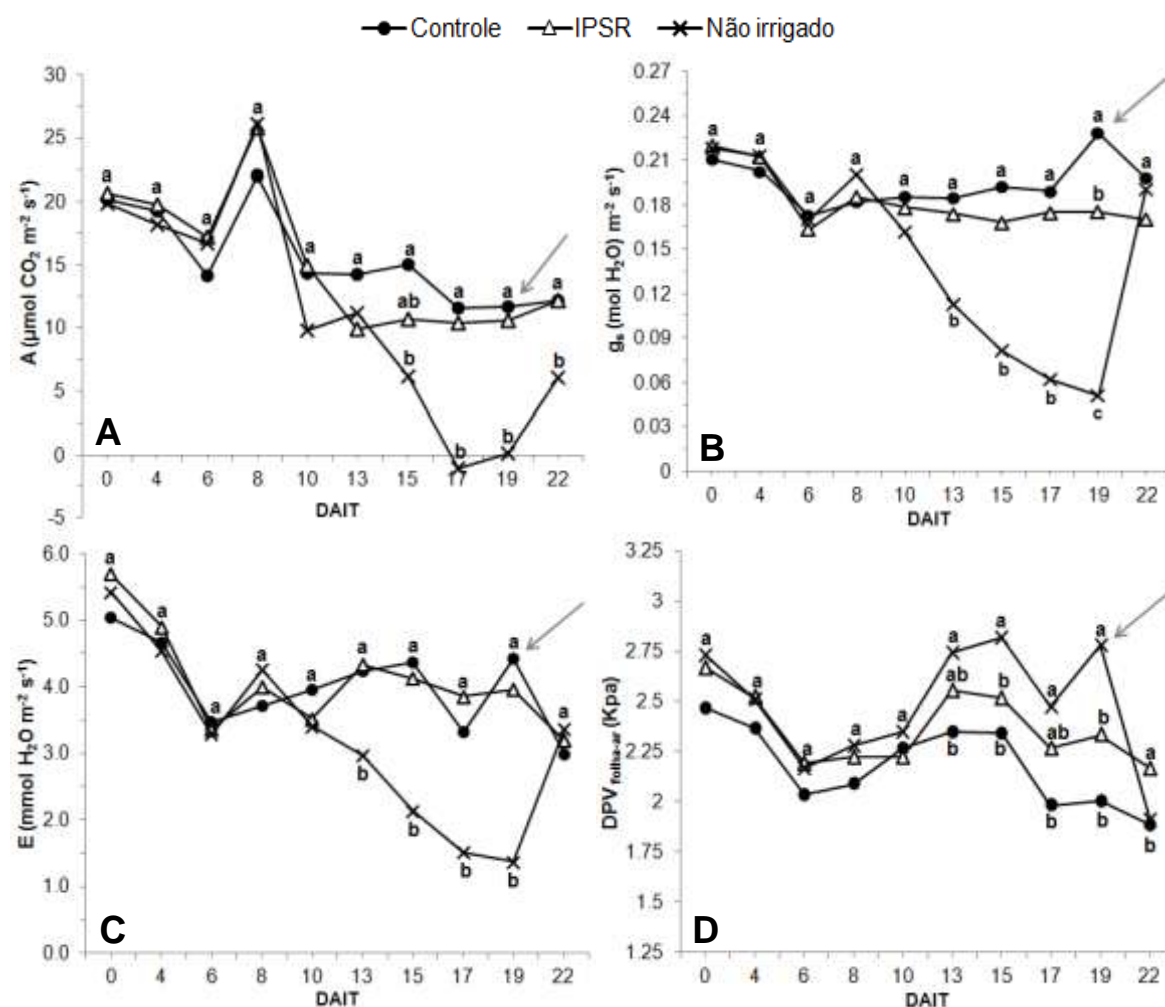


Figura 15. Taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (B), transpiração (C) e déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar (D) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por

letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. As setas indicam o momento da reirrigação.

Sabe-se que as técnicas para avaliação da fluorescência da clorofila são uma ferramenta sensível, podendo avaliar precocemente os efeitos de diferentes estresses, antes que os sintomas relacionados se tornem perceptíveis por outros métodos (Torres Netto, 2005).

Na figura 16, é possível observar o efeito do estresse severo na resposta da variável F_v/F_m , bem como de PI, das plantas de cana-de-açúcar. Com relação a F_v/F_m , e a partir de 15 DAIT, esta variável apresentou redução significativa dos valores encontrados no tratamento NI comparados aos demais tratamentos (Figura 16A). Este dia, também foi crítico para decréscimo do teor de clorofila medido pelo MPC (Figura 13). Cinco dias antes deste tempo crítico ($A = 0$), foi iniciado o decréscimo da variável condutância estomática (Figura 15B). Nas plantas não-irrigadas, o decréscimo nos valores destas duas variáveis (F_v/F_m e PI) contribuiu para o decréscimo da taxa fotossintética (Figura 15A). Da mesma forma, Souza et al., (2005), verificou em videiras não-irrigadas, o decréscimo de 70% da taxa fotossintética, que foi acompanhado pela redução da eficiência quântica do PSII de 50%.

Em plantas submetidas à deficiência hídrica, quando ocorre uma redução da fotossíntese, e não se atribui essa redução aos fatores estomáticos, uma possível causa é a redução da atividade fotoquímica (Torres Netto, 2005). Este fato evidencia que, em algumas espécies, este tipo de estresse causa efeitos não-estomáticos no comprometimento do processo fotossintético. Em mamoeiro, Reis et al. (2004) têm mostrado que o estresse hídrico do solo causou efeitos não-estomáticos, por meio da degradação das moléculas de clorofila. Nesta condição de estresse, e também na mesma espécie, os efeitos não-estomáticos relacionados ao processo fotoquímico da fotossíntese foram observados por Castro et al., (2004).

Nas folhas das plantas não-irrigadas, a diminuição nos valores da relação F_v/F_m , indicam a ocorrência de um dano fotoinibitório no PSII (Björkman e Demming, 1987). Contudo, como foi salientado, possíveis reduções nos valores de F_v/F_m podem representar tanto uma regulação fotoprotetora reversível como uma inativação irreversível do PSII (Long et al., 1994; Araus e Hogan, 1994).

Na Figura 16A, observa-se que para F_v/F_m , as plantas de cana-de-açúcar do tratamento controle e IPSR mantiveram-se iguais ao longo de todas as avaliações. No entanto, foram encontrados alguns valores abaixo da faixa considerada ideal (0,75-0,85) (Figura 16A). Diferente do encontrado por Lawlor e Cornic (2002) e Azevedo (2006), estes não encontraram diminuição nos valores de F_v/F_m nas plantas controle e IPSR. Estes reduzidos números de valores abaixo de 0,75 podem estar relacionados às condições do ambiente de cultivo, bem como ao horário das avaliações (12h) (Valentini et al., 1994, Campostrini, 2002).

Em geral, a relação F_v/F_m é muito utilizada como um indicador de estresse em um grande número de estudos sobre a eficiência fotoquímica da planta. No entanto, em função das situações de estresse impostas, esta variável, que é calculada com base em F_o e em F_m , nem sempre é sensível o suficiente para observar as diferenças entre diversos tratamentos (Stirbet e Govindje, 2011).

Uma vez que nem sempre a variável F_v/F_m apresenta sensibilidade a um determinado estresse, Strasser et al., (2000) e (2004) criaram um índice mais sensível aos efeitos dos fatores do ambiente denominado índice fotossintético, ou *photosynthetic index* (PI). O PI é uma variável derivada do JIP-teste calculada a partir de três componentes que envolvem a densidade de centros de reação, a eficiência de captura, e a eficiência do transporte de elétrons. Consequentemente, se qualquer um desses componentes for afetado, o efeito será percebido na planta, dando uma maior sensibilidade a variável quando comparada àquelas que se baseia somente em um componente na avaliação dos efeitos de diferentes estresses ambientais (Strasser et al., 2000, Jiang et al., 2006, Christen et al., 2007, Oukarroum et al., 2007; Živčák et al., 2008).

Os resultados encontrados reforçam a maior sensibilidade do PI, tanto, que em 8 e 17 DAIT (Figura 16B), foram encontradas diferenças significativas entre o tratamento controle e IPSR. Esse fato não foi observado em F_v/F_m . Outra observação é que a variação dos valores encontrados em PI foi muito grande ao longo das avaliações, devendo esta estar relacionada às condições ambientais (T° , Ur% e DPV), assim como foi justificado para eficiência quântica máxima do PSII.

Também como em F_v/F_m , as plantas não-irrigadas apresentaram grande redução nos valores de PI, sendo o 15DAIT o dia crítico de redução (Figura 16B).

Os valores próximos a zero foram encontrados no dia de estresse máximo, evidenciando a sensibilidade da variável.

Muitos estudos verificaram que as limitações não-estomáticas da fotossíntese podem ocorrer com conteúdo relativo de água (CRA) em torno de 70%, causando um efeito direto sobre a inibição do componente fotoquímico (Chaves et al. de 2002, e Cornic Fresneau 2002). Ao final do período de desidratação, uma diminuição considerável das variáveis da fluorescência da clorofila é provavelmente mais relacionada com a senescência foliar (Lu e Zhang, 1998). No entanto, os resultados encontrados por Živčák et al., (2008) mostram que o declínio do PI ocorreu antes de alcançar este percentual de CRA.

Após a reirrigação, os valores de F_v/F_m e PI mantiveram-se próximos aos dos tratamentos C e IPSR. Já para NI, foi encontrada leve recuperação, mas não-suficiente para igualar aos valores nos demais tratamentos. Isso evidencia o comprometimento do aparato fotoquímico das plantas em decorrência da restrição hídrica, o que sustenta a tese de que, no tratamento NI, os efeitos não-estomáticos foram responsáveis pelo decréscimo da taxa fotossintética

Embora os danos no aparato fotoquímico sejam tidos como resistentes ao estresse hídrico moderado (Cornic e Briantais 1991, Havaux 1992), Živčák et al., (2008) encontraram uma diminuição contínua do índice fotossintético como resultado da deficiência hídrica, enquanto que a relação F_v/F_m não foi praticamente afetada até o período mais severo de desidratação. Isto está de acordo com as descobertas de Genty et al., (1987); Christen et al., (2007) e Oukarroum et al., (2007), que consideram esse parâmetro (F_v/F_m) insensível às alterações iniciais da fotossíntese em decorrência do estresse hídrico.

A fluorescência da clorofila *a* como um método não-destrutivo de avaliação da resposta da planta à seca, é muito vantajosa, com um potencial para uso em seleção de plantas, mas a sensibilidade das variáveis ainda é uma limitação (Živčák et al., 2008).

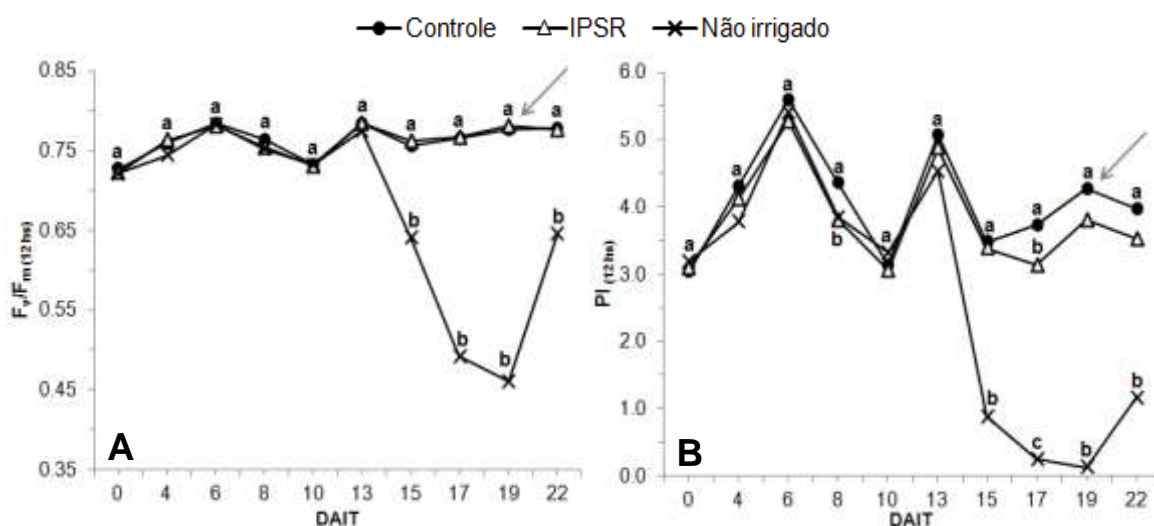


Figura 16. Eficiência quântica máxima do fotossistema II (A) e Índice fotossintético “*photosynthetic index*” (B) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. As setas indicam o momento da reirrigação.

Nos tratamentos C e IPSR, percebe-se que não existiu uma relação entre os valores da eficiência quântica máxima do fotossistema II (PSII) e a taxa fotossintética ($R^2 = 0,0097$ e $0,11$, respectivamente) (Figura 17). Contudo, no tratamento NI, foi encontrada uma melhor relação entre os valores de F_v/F_m e de A ($R^2 = 0,3543$). Neste tratamento não-irrigado, por ação do estresse hídrico, foram encontradas leituras abaixo de $0,60$. Tal fato mostra que houve danos na maquinaria fotoquímica da planta, devido à diminuição no teor de clorofila (Figura 13). Isso vai de acordo com o defendido por Lu e Zhang (1998), que consideram que ao final da desidratação, uma diminuição destas variáveis seja, provavelmente, devido à senescência foliar associada ao declínio da eficiência quântica máxima do PSII.

Assim, independente do tratamento, valores de F_v/F_m entre $0,65$ e $0,80$ (o máximo encontrado) corresponderam a taxas fotossintéticas variadas, demonstrando a baixa sensibilidade do parâmetro quando relacionado à resposta fotossintética da planta, assim como defendido por Christen et al., (2007) e Oukarroum et al., (2007), que consideram essa variável pouco sensível às alterações iniciais na fotossíntese em decorrência do estresse hídrico. Observando-se a Figura 18, no tratamento NI, encontram-se valores de PI,

embora mostrando uma relação negativa com a taxa fotossintética, também com uma grande variabilidade. Tal resultado não está de acordo com o encontrado por Živčák et al., (2008). Neste trabalho, os autores relatam que a variável PI, quando comparada à relação F_v/F_m , foi a variável mais sensível à desidratação do solo.

Segundo Bolhàr-Nordenkampf et al., (1989), quando uma planta não está sob estresse, os valores de F_v/F_m considerados ideais devem permanecer entre 0,75 a 0,85, representando a probabilidade de 75 a 85% do elétron absorvido pelos pigmentos fotossintéticos efetuar a redução da quinona A (Qa) no PSII. Dessa forma, pode-se concluir que, neste experimento com cana-de-açúcar em condição de casa de vegetação, a faixa de valores considerada ideal para o não-comprometimento da capacidade de absorver elétrons e comprometer o aparato fotoquímico da planta, provocando redução da taxa fotossintética, foi maior (0,65 – 0,80). Como não houve redução na taxa fotossintética, essa resposta pode estar atrelada a uma regulação fotoprotetora (Long et al., 1994; Araus e Hogan, 1994).

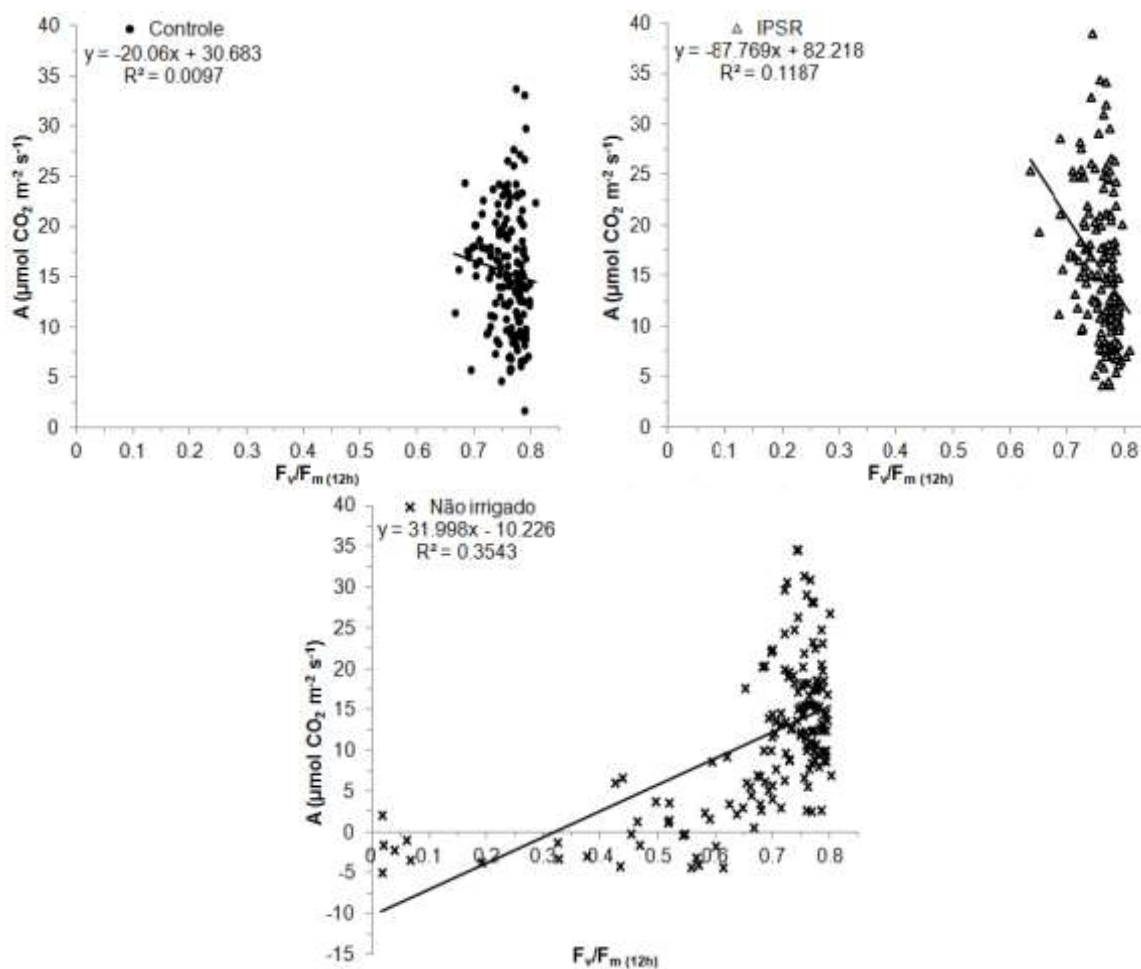


Figura 17. Dispersão da taxa fotossintética líquida *versus* eficiência quântica máxima do fotossistema II de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato, para os tratamentos Controle, IPSR e Não irrigado. Cada ponto representa 1 dado coletado ao longo do período experimental.

Tido como um parâmetro mais completo de avaliação do funcionamento fotoquímico da planta, como já foi visto, o índice de vitalidade da planta (PI), assim como a eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m), apresentou baixa relação com a taxa fotossintética nos tratamentos Controle e IPSR ($R^2 = 0,0153$ e $0,0011$, respectivamente) e pouco maior em NI ($R^2 = 0,4227$) (Figura 18). Apesar de Van Heerden et al. (2007) observar uma correlação positiva entre a assimilação de CO_2 e os valores de PI sob estresse hídrico, essa consideração se adequa melhor para os resultados das plantas não-irrigadas no auge do estresse, quando apresentaram PI abaixo de 1,0.

As leituras mais altas de PI (entre 6,0 e 7,3) não corresponderam a altas taxas fotossintéticas, tanto que o maior valor de PI encontrado (7,3) correspondeu

a $12,48 \mu\text{mol CO m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de fotossíntese. Já a maior taxa fotossintética ($39 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) correspondeu a um PI de 3,27.

Uma observação que deve ser feita é que, mesmo o tratamento considerado controle, este apresentou baixos valores de PI (1,8), demonstrando toda a sensibilidade da variável no estudo da resposta fotoquímica da planta. Esse fato pode ser atribuído às condições climáticas do dia e horário da avaliação (12h), pois quando da obtenção desses valores no referido tratamento, foram relatados os menores valores de umidade relativa dentro do ambiente de cultivo durante todo período de avaliação (36,6 a 37,9%), aliado a temperaturas entre 34,5 a 34,9°C. Quanto ao horário da avaliação, sabe-se que a hora em que se coleta uma amostra e/ou o horário de medição pode influenciar nos resultados (Valentini et al., 1994, Campostrini, 2002).

Os resultados da eficiência quântica máxima (F_v/F_m) encontrados em *Carica papaya* L., por Marler e Mickelbart, (1998) mostram essa influência, com leituras de 0,825 às 6:00 e 0,555 às 12:00. Como a avaliação do índice fotossintético é realizada com o mesmo equipamento, resultado semelhante pode ser encontrado e é uma alternativa para avaliar o efeito fotoinibitório da luz em função dos tratamentos, como será exposto ao longo desse trabalho.

Também foi possível observar com base na figura 18 que valores de PI acima de 2,0, para todos os tratamentos, representaram taxas fotossintéticas mais elevadas, exceto nas condições em que houve o fechamento estomático em decorrência das condições climáticas ou do estresse hídrico. Dessa forma, valores de PI acima de 2,0 podem ser adotados como adequados para uma boa resposta fotossintética em cana-de-açúcar.

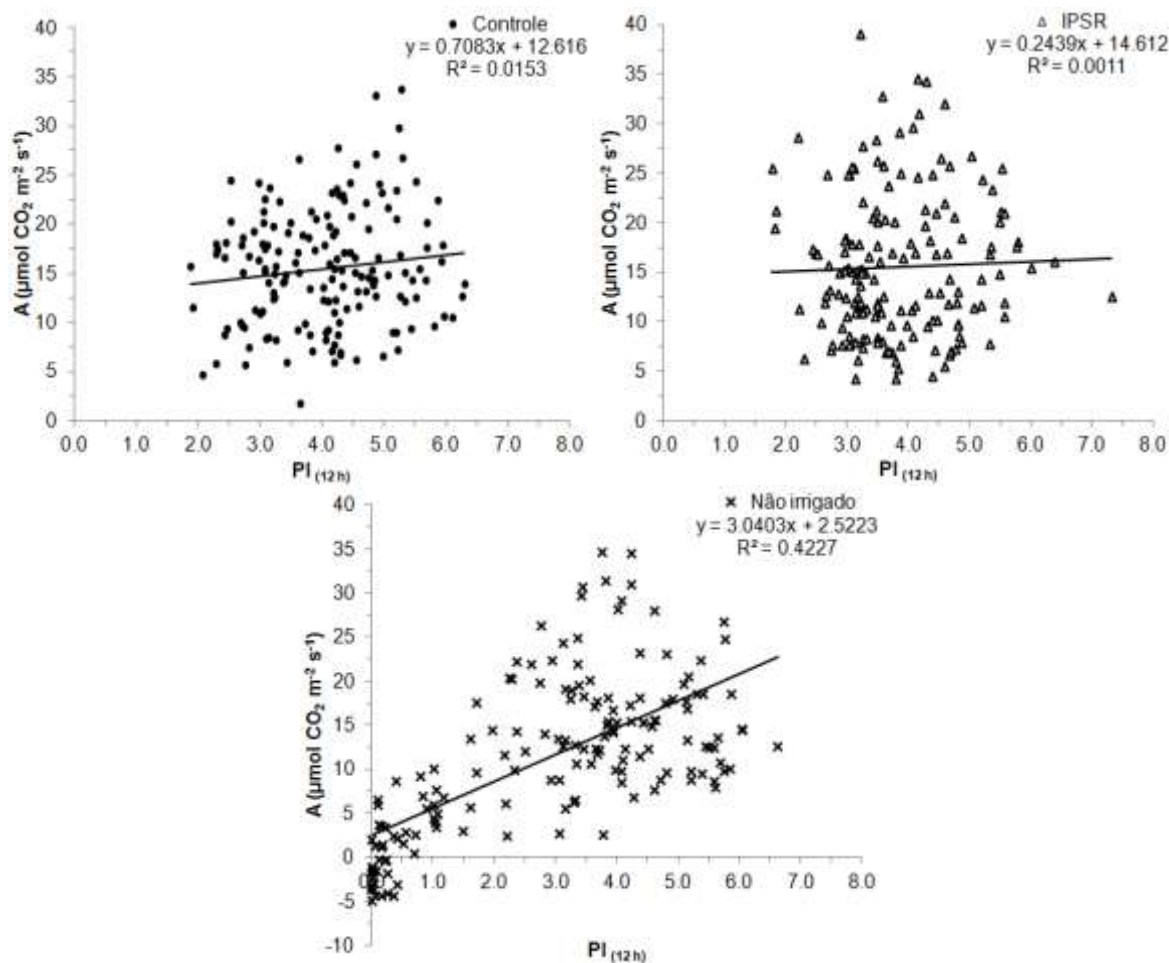


Figura 18. Dispersão da taxa fotossintética líquida *versus* índice fotossintético “*photosynthetic index*” de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato, para os tratamentos Controle, IPSR e Não irrigado. Cada ponto representa 1 dado coletado ao longo do período experimental.

A fotoinibição reduz a fotossíntese com a diminuição da $F_{\text{máx}}$, se a exposição à luz em excesso for prolongada (Long, 1994). Este fenômeno pode ser elevado por ação dos fatores de estresse tais como temperatura supraótima da folha e déficit hídrico (Powles, 1984). Sabe-se que em condições de déficit hídrico, a redução da concentração intercelular de CO_2 , devido ao fechamento estomático induz o aumento na probabilidade da dissipação dos fótons absorvidos pelo complexo coletor na forma de calor, resultando em regulação inibitória da atividade fotossintética devido ao estresse (Baker, 1993), como foi encontrado nesse trabalho (Figura 15A e B). Assim, a energia luminosa se torna excessiva, mesmo sob baixas irradiâncias (Maury et al., 1996), podendo levar à fotoinibição (Lima et al., 2002), como também é demonstrado na figura 19A e B, onde valores

de FFF encontrados às 12h a partir de 13DAIT provocaram maior efeito fotoinibitório no tratamento não irrigado independente dos seus valores até o momento da reirrigação. Dessa forma, o efeito fotoinibitório na fotossíntese torna-se um bom indicador de estresse na planta.

A relação F_v/F_m é um dos parâmetros de fluorescência mais utilizados para estimar o grau de fotoinibição (Solhaug e Haugen, 1998; Prabhu Inbaraj e Muthuchelian, 2011) quando as plantas são expostas a estresses bióticos e abióticos. Como o PI é uma variável mais sensível aos efeitos dos estresses no aparato fotoquímico da planta, o cálculo da fotoinibição usando os valores de PI pode ser uma alternativa mais precisa para estimar essa variável.

Na condição de estresse severo (NI), é possível observar a sensibilidade do PI em relação à estimativa da fotoinibição (Figura 19). Nesta figura, foram encontrados valores próximos de 62%, enquanto que a estimativa feita com base em F_v/F_m chegou a somente 22%. Isso mostra que a restrição hídrica, mais uma vez, comprometeu a eficiência fotoquímica da planta, tornando-a mais sensível aos efeitos da intensidade luminosa e ao aproveitamento dos fótons absorvidos. De acordo com Baker (1993), tem sido demonstrado que plantas submetidas ao estresse hídrico moderado não apresentam decréscimo na atividade potencial do PSII. Entretanto, sob estresse hídrico severo, as plantas frequentemente apresentam um marcante efeito fotoinibitório, caracterizado por um decréscimo significativo do rendimento quântico.

Como já foi dito, em condições de deficiência hídrica o fechamento estomático promove a redução na assimilação do CO_2 . No entanto, os fotossistemas continuam sendo excitados e necessitam dissipar esta energia. Assim, o ciclo de Calvin/Benson diminui a velocidade por limitação de CO_2 (estômatos fechados), e então não ocorre o dreno de elétrons via assimilação do CO_2 . Nesta condição, a energia luminosa se torna excessiva, mesmo sob baixas irradiâncias (Maury et al., 1996), podendo levar à destruição do polipeptídeo D1, diminuindo assim a eficiência do PSII, fenômeno denominado como fotoinibição (Critchley, 1998, Lima et al., 2002)

Mais uma vez, tanto com base em F_v/F_m , quanto em PI, a IPSR mostrou-se eficiente, não tendo sido encontrado efeito fotoinibitório mais pronunciado que o encontrado no tratamento controle. Esses resultados também são relatados em

trabalhos com a utilização da IPSR em mamoeiro (Gomes et al., 2005), milho (Azevedo, 2006) e cana-de-açúcar (Deus, 2011).

Após a reirrigação, como indicado nas setas da Figura 19A e 19B, foi observada uma recuperação das plantas não-irrigadas. Apesar disso, observando-se os valores de F_v/F_m e PI encontrados no presente trabalho (Figura 16A e B), percebe-se que essa recuperação não foi completa.

Outra ressalva a ser feita é que, na avaliação realizada após a reirrigação em plantas de cana-de-açúcar sob estresse severo, percebeu-se uma grande recuperação nos valores de PI nas leituras realizadas às 12h, o que levou a obtenção de valores de PI maiores nesse horário, algo não usual. Dessa forma, aplicando os valores na fórmula já citada no trabalho (Azevedo, 2006), encontrou-se valores muito negativos de %fotoinibição (PI), reforçando a grande sensibilidade da variável quanto ao funcionamento fotoquímico da planta, até porque a mesma resposta não foi encontrada em F_v/F_m , nas mesmas condições de avaliação.

Também se deve observar que, independente dos valores de FFF, após o 13 DAIT, o efeito fotoinibitório foi pronunciado no tratamento NI e irrelevante para os tratamentos Controle e IPSR.

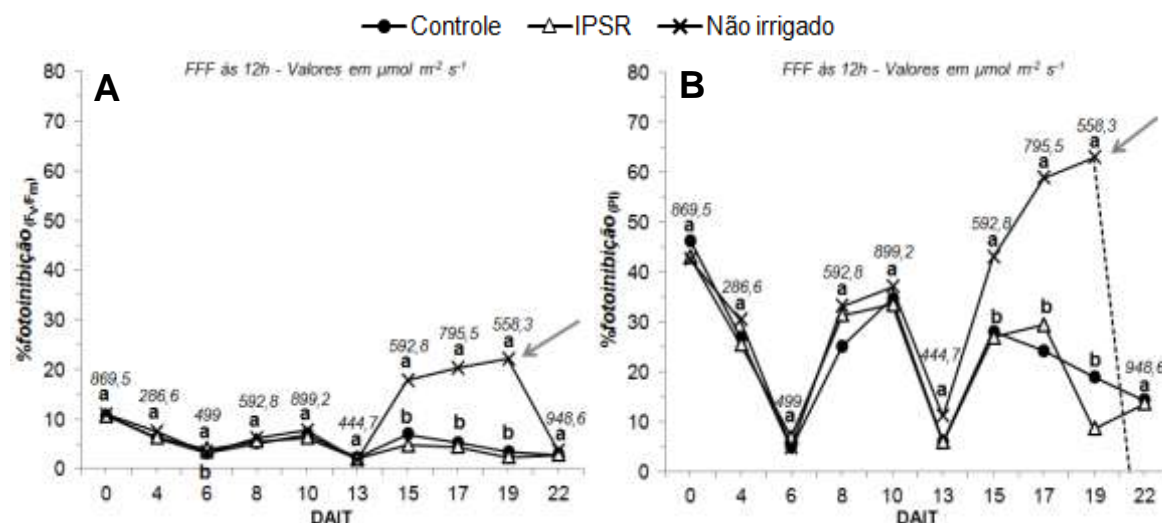


Figura 19. %fotoinibição (F_v/F_m) (A) e %fotoinibição (PI) (B) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato ao longo do tempo. Cada símbolo representa média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. As setas indicam o momento da reirrigação. Tracejado explica tendência a valores negativos na última avaliação de %fotoinibição (PI).

4.3 Potencial hídrico antemanhã

Como é possível observar na figura 20A, não foi encontrada diferença significativa nos valores médios de potencial hídrico foliar antemanhã (Ψ_{pd}) na primeira época de avaliação (T0). No entanto, assim como em todas as outras variáveis analisadas, o Ψ_{pd} foi severamente afetado nas plantas não-irrigadas, na época de estresse máximo (A = 0), chegando a valores de -1,16 MPa. Esse resultado era esperado, já que quando o suprimento de água diminui, a resposta das células guarda se reflete no potencial hídrico foliar e ambos respondem a isso controlando o suprimento e a perda de água pelas folhas (Leuning et al., 2003), demonstrando uma alta relação com a resposta estomática. Esse tipo de resposta também está associada ao acúmulo de solutos nas folhas, tais como o manitol, sorbitol e a prolina, que fazem com que a planta reduza o componente osmótico do potencial hídrico, para que o mesmo continue menor que o do solo e seja mantido o gradiente entre as raízes e a parte aérea responsável pelo fluxo de água na planta (Castillo et al., 2010).

Após a reirrigação, os valores encontrados sugerem que houve uma recuperação das plantas não-irrigadas, mas não suficiente para igualá-las às plantas controle, e às plantas sob irrigação parcial do sistema radicular (Figura 20A). Sobre a capacidade das plantas de evitar ou enfrentar o estresse hídrico, Chaves et al., (2009) destacam que a recuperação da taxa fotossintética após a reirrigação é fundamental para ditar a capacidade da planta de resistir ao estresse e prevenir grandes perdas de produção. Essa recuperação pode ser separada em dois estágios: (1) Durante as primeiras horas após a reirrigação, correspondendo ao aumento do *status* hídrico e à reabertura dos estômatos (Pinheiro et al., 2005; Antonio et al., 2008; Hayano-Kanashiro et al., 2009), assim como foi encontrado no presente trabalho (Figura 15B); (2) ou pode levar dias, e está relacionado à resíntese de proteínas relacionadas ao metabolismo fotossintético (Kirschbaum, 1988).

Nas três épocas avaliadas, a análise do Ψ_{pd} demonstrou que as plantas controle [-0,08 (T0), -0,03 (A=0) e -0,04 MPa (dois dias após a reirrigação)] e as sob irrigação parcial [(-0,05 (T0), -0,03 (A=0) e -0,04 MPa (dois dias após a reirrigação)] mantiveram os potenciais muito próximos de zero (Figura 20A), mesmo com a comprovada redução do potencial hídrico do solo no tratamento IPSR, como comprovado na figura 20B. Esses resultados também são relatados

em citrus (Hutton e Loveys, 2011), em duas espécies florestais (*Quercus ilex* ssp. *rotundifolia* Lam. e *Quercus suber* L.) (David et al., 2007) e em oliveira (Fernández et al., 2006).

Hutton e Loveys, (2011) concluíram que a irrigação parcial por gotejamento supriu a necessidade hídrica das plantas de citrus, indicando uma redistribuição interna de água dentro de sistemas radiculares, de acordo com o gradiente de potencial hídrico gerado pela secagem parcial do solo. Os autores também concluíram que um mecanismo interno de controle de redução na transpiração pareceu estar em funcionamento, permitindo que as plantas lidassem melhor com situações de baixa disponibilidade hídrica, sendo uma importante característica de adaptação à irregularidade na distribuição da água no perfil do solo (Burgess et al., 1998; Smart et al., 2005).

Flexas et al., (1998); Rodrigues et al., (2008) e Chaves et al., (2010) têm relatado correlações positivas entre Ψ_{pd} e máxima g_s em videiras sob déficit hídrico. Além disso, os autores mostram que o declínio no potencial hídrico foliar pode melhorar a sensibilidade do estômato ao ABA. Da mesma forma, Tang e Zhang (2010), relatam que logo após a irrigação, as plantas de algodão sob irrigação parcial apresentaram alto potencial hídrico e condutância estomática, sugerindo que outros fatores além do potencial hídrico regulam a condutância estomática. Provavelmente, sinais não-hidráulicos, como a translocação do ABA das raízes para a parte aérea podem estar envolvidos.

Como o Ψ_{pd} se equilibra com o potencial da parte mais molhada do perfil do solo, mesmo em situações heterogêneas de umidade, essa variável pode não ser sempre uma informação relevante para determinar quando a parte seca de um sistema radicular sob IPSR deve ser reirrigada (Ameglio et al., 1997; Dodd et al., 2010). Dessa forma, Dodd et al., (2010), sugerem que a medida de umidade do solo pode oferecer uma informação mais precisa para controle de irrigação em IPSR, considerando-se a variação local.

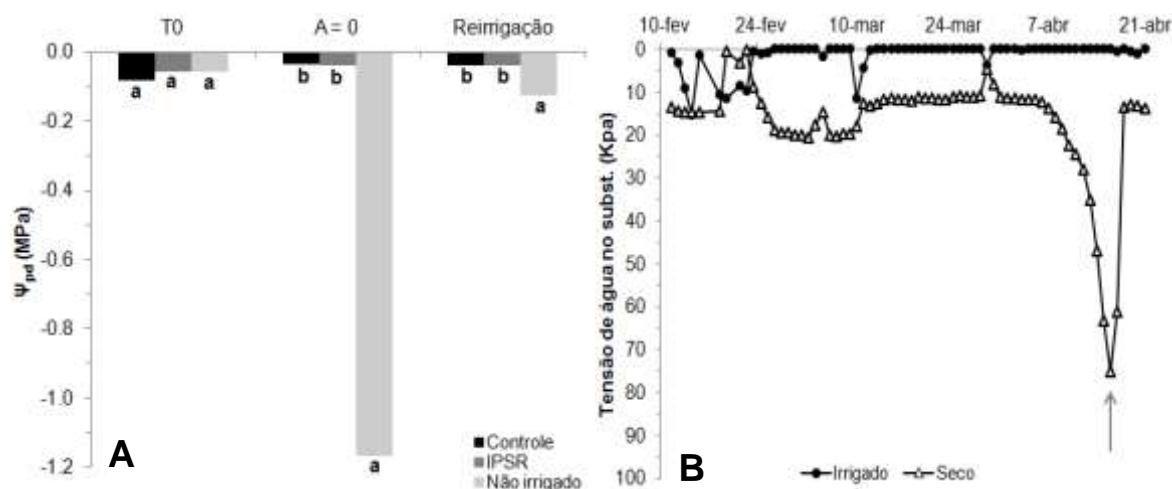


Figura 20. Potencial hídrico foliar antemanhã (A) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato, em três épocas: T0, A = 0 e 2 dias após a reirrigação. Cada barra representa a média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade. (B) Tensão de água no substrato do tratamento IPSR ao longo do período experimental. Seta indica momento de reirrigação.

4.4 Termografia por infravermelho

Na Figura 21A, observa-se que na época T0 (antes da aplicação dos tratamentos), não houve diferença significativa entre a temperatura das folhas de cana-de-açúcar entre os três tratamentos. No entanto, na época de maior estresse (A = 0) (17 DAIT) (Figura 21B), as plantas não-irrigadas apresentaram aumento de 4,6 °C, em comparação com as plantas controle e sob irrigação parcial do sistema radicular. Esse aumento está dentro da faixa de temperatura considerada por Taiz e Zeiger (2009), que afirmam que a temperatura da folha pode subir de 4 a 5 °C sob luz solar plena, próximo ao meio-dia. Após a reirrigação (Figura 21C), as plantas não-irrigadas continuaram mais quentes (32,2°C). No entanto, a diferença para os tratamentos controle e IPSR foi bem menor (1,1°C e 0,3°C, respectivamente). Tal fato mostra a ação da condutância estomática no controle da transpiração e, conseqüentemente da temperatura foliar (Figuras 15B e C).

Taiz e Zeiger (2009) relatam que plantas C_3 e C_4 sob condições de níveis elevados de irradiância sobre a folha necessitam da transpiração para que ocorra

a redução da temperatura foliar. Apesar de as plantas C₄ suportarem maiores temperaturas, fluxo de fótons fotossintéticos e utilizarem a água com mais eficiência (Nobel, 2004), esses aumentos da temperatura ao longo do dia podem, em decorrência do estresse hídrico, gerar um estresse térmico, que também contribuirá para o retardamento do crescimento da planta pela inibição da fotossíntese e respiração (Taiz e Zeiger, 2009). Essa informação corrobora com os dados obtidos nas avaliações das trocas gasosas desse trabalho (Figura 15), em que a abertura estomática foi significativamente reduzida nas plantas não-irrigadas, comprometendo também a dissipação de calor pela transpiração e, conseqüentemente, a taxa fotossintética. Isso também vai de acordo com Fuchs (1990) que afirma que a variação na temperatura cresce com o fechamento dos estômatos. Jones et al., (2002); de Souza et al., (2003); Leinonen e Jones, (2004) também indicam uma clara tendência do aumento da temperatura em plantas não-irrigadas, correlacionando esses resultados com os maiores valores de condutância estomática encontrados no tratamento com as raízes totalmente irrigadas.

As fotografias termográficas também comprovaram que não houve diferença significativa entre os tratamentos controle e IPSR nas três épocas avaliadas (Figura 21 A, B e C), o que mostra que o tratamento IPSR não experimentou estresse hídrico.

Sob condições crescentes de deficiência hídrica, as diferenças de até 7 °C na temperatura do dossel de plantas de trigo, levaram Inagaki e Nachit (2002) a concluir que o uso da termografia por infravermelho possui um grande potencial para detectar mudanças na transpiração das folhas, além de ser uma ferramenta de monitoramento do estresse hídrico no campo.

Lenionen e Jones (2004) afirmam que mais dados empíricos são necessários para verificar os resultados encontrados nos trabalhos, mas é possível que a variação de temperatura *per si* juntamente com a temperatura absoluta, possam vir a ser um índice útil para estimar a condutância estomática em condições de campo.

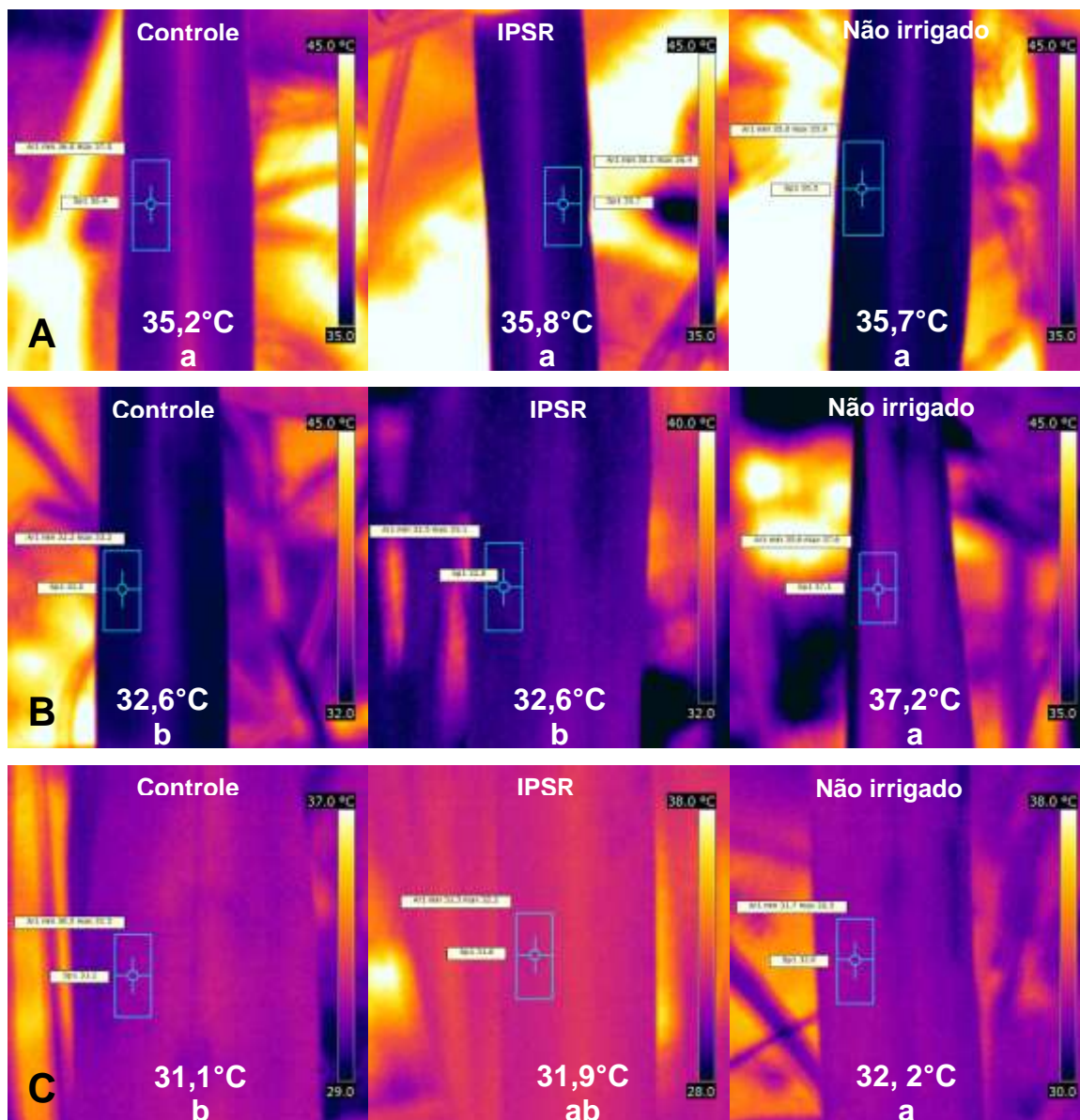


Figura 21. Termografia por infravermelho de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato em três épocas: T0 (A), A = 0 (B) e 2 dias após a reirrigação (C). Cada fotografia representa a média de 7 repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente, segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.5 EUA, EIUA e EAUA

Na dispersão entre os pontos da taxa fotossintética versus transpiração (EUA) foi possível observar que o tratamento que se ajustou melhor linearmente foi o não-irrigado ($R^2 = 0,78$), em função das baixas taxas transpiratórias decorrentes do fechamento estomático provocado pelo estresse (Figura 22). Dessa forma, as plantas do tratamento apresentaram baixos valores de A ao longo das avaliações, principalmente a partir do 13ºDAIT (Figura 22).

Tanto o tratamento controle, quanto o não-irrigado apresentaram baixa correlação entre as variáveis A e E ($R^2 = 0,43$ e $0,33$, respectivamente). Ou seja, altas taxas transpiratórias não representaram altas taxas fotossintéticas. Dessa forma, essa variável não foi a mais eficiente para demonstrar os benefícios da irrigação parcial do sistema radicular no aumento da eficiência do uso da água.

Em duas meta-análises realizadas para estudar as possíveis vantagens da IPSR frente ao déficit hídrico, Dodd (2009) e Sadras (2009), embora com algumas divergências, concluíram que a IPSR é mais eficiente na melhoria da EUA em diversas culturas. Ou seja, com a aplicação da IPSR, é possível reduzir a quantidade de irrigação sem uma redução significativa no rendimento econômico (Kang et al. 2000; Zegbe et al., 2004 Tang et al., 2005).

A maioria dos estudos mostrou que, em uma condição semelhante de economia de água, as plantas sob IPSR possuíam sinalização do ABA significativamente mais forte, maior sistema radicular e acúmulo de N do que as plantas sob déficit de irrigação (Mingo et al, 2004; Dodd et al, 2008; Wang et al, 2012); e todas estas respostas podem contribuir para a maior EUA nessas plantas, o que foi comprovado na cultura do milho (Li et al, 2007;. Hu et al, 2009; Wang et al., 2012).

Muitas vezes, presume-se que as plantas de metabolismo fotossintético do tipo C_4 são mais tolerantes à seca do que plantas C_3 , com base no fato das C_4 predominarem nas regiões quentes, que são mais propensas à seca (Wang et al., 2011). Além disso, uma menor condutância estomática, combinada com a concentração do CO_2 nas células, conduz a uma maior EUA nas plantas com esse tipo de metabolismo C_4 . No entanto, permanece questionável se a maior EUA das plantas C_4 , em comparação com C_3 , condiz com uma maior tolerância ao estresse hídrico. Em uma revisão sobre os efeitos do estresse hídrico em

plantas C₃ e C₄, Ghannoum de (2009) argumenta que, embora o mecanismo de concentração do CO₂, nas células proporcionado pela anatomia da folha das C₄, a escassez de CO₂ provocada pelo fechamento parcial dos estômatos sob estresse hídrico, torna a parte bioquímica envolvida na fotossíntese dessas plantas tão ou mais sensível que das plantas C₃. Essas razões ainda não estão claras. Essa maior sensibilidade das plantas do metabolismo C₄ surge como uma provável limitação metabólica em decorrência do estresse hídrico (Ghannoum, 2009). Possivelmente, a maior ausência da fotorrespiração nas plantas C₄ possa torná-las sensível ao déficit hídrico.

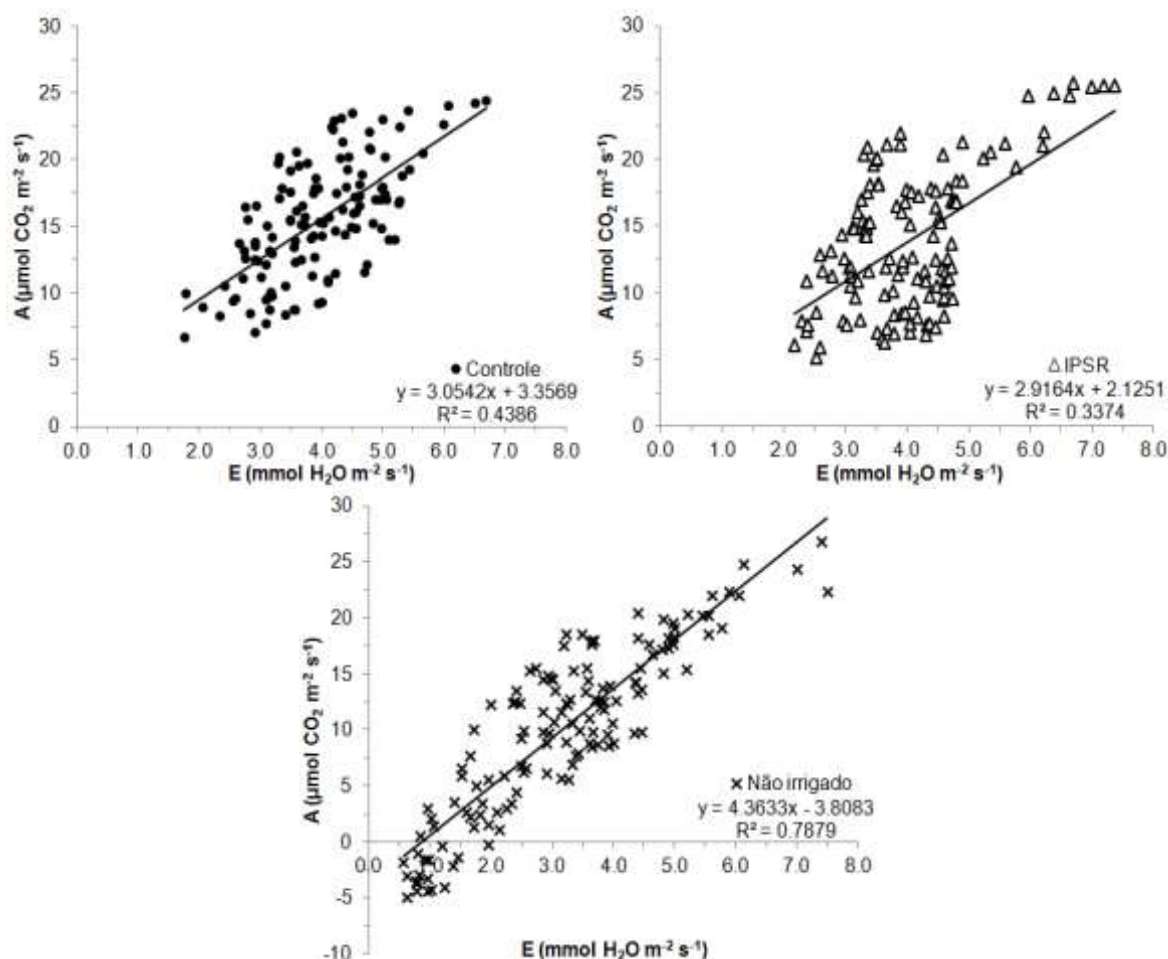


Figura 22. Dispersão da taxa fotossintética líquida (A) versus transpiração (E) (Eficiência do uso da água - EUA) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato para os tratamentos Controle, IPSR e Não irrigado. Cada ponto representa 1 dado coletado ao longo do período experimental.

Geralmente, em videiras submetidas a déficits hídricos moderados, as taxas fotossintéticas diminuem com a redução do potencial hídrico antemanhã em comparação com a condutância estomática. Como consequência, a eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) é normalmente maior nessas condições do que bem-irrigadas. Isto é refletido em um menor uso de água e maior EUA. Apesar disso, no tratamento não-irrigado, a dispersão $A \times g_s$ (EIUA) mostrou maior correlação ($R^2 = 0,80$). Nesta condição, o estresse hídrico provocou fechamento estomático e, conseqüentemente, as menores taxas fotossintéticas (Figura 15B e A). Neste tratamento, tal resultado desta ação do estresse sobre as trocas gasosas comprometeu o crescimento da planta, como foi exposto ao longo do trabalho.

Os tratamentos controle e IPSR não apresentaram alta correlação entre as duas variáveis ($R^2 = 0,54$ e $0,43$, respectivamente). No entanto, foi possível observar uma maior concentração dos pontos da curva do tratamento IPSR em menores condutâncias estomáticas. Tal resultado, vai de acordo com o pressuposto da técnica que defende esse mecanismo, em função da sinalização do ABA das raízes para parte aérea, provocando um leve fechamento estomático, mas sem comprometer a fotossíntese (Kang e Zhang, 2004).

Ao analisar a EIUA (Figura 23), observa-se que a inclinação da curva (o valor da EIUA) no tratamento IPSR ($89,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$) foi maior que o tratamento controle ($83,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$). O tratamento NI apresentou o maior valor, uma vez que, durante todo período experimental, as plantas deste tratamento apresentaram uma menor condutância estomática. Ao se comparar este resultado com o Quadro 2, em que mostra a eficiência agrônômica do uso de água, verifica-se que a EIUA ficou mais representativa do que a EUA.

Este resultado mostra que utilizar a EIUA, em vez da EUA, pode ser uma forma mais adequada de se expressar a eficiência no consumo agrônômico da água.

Estudos recentes sobre IPSR, realizados em plantas de pimenta, (Kang et al., 2001) e pêra (Kang et al., 2002), também demonstraram que pode-se aumentar a EIUA com pouca redução da produtividade da cultura, o que também vai de acordo com o encontrado por Guang-Cheng (2010), que verificou maior EIUA em plantas de milho sob IPSR.

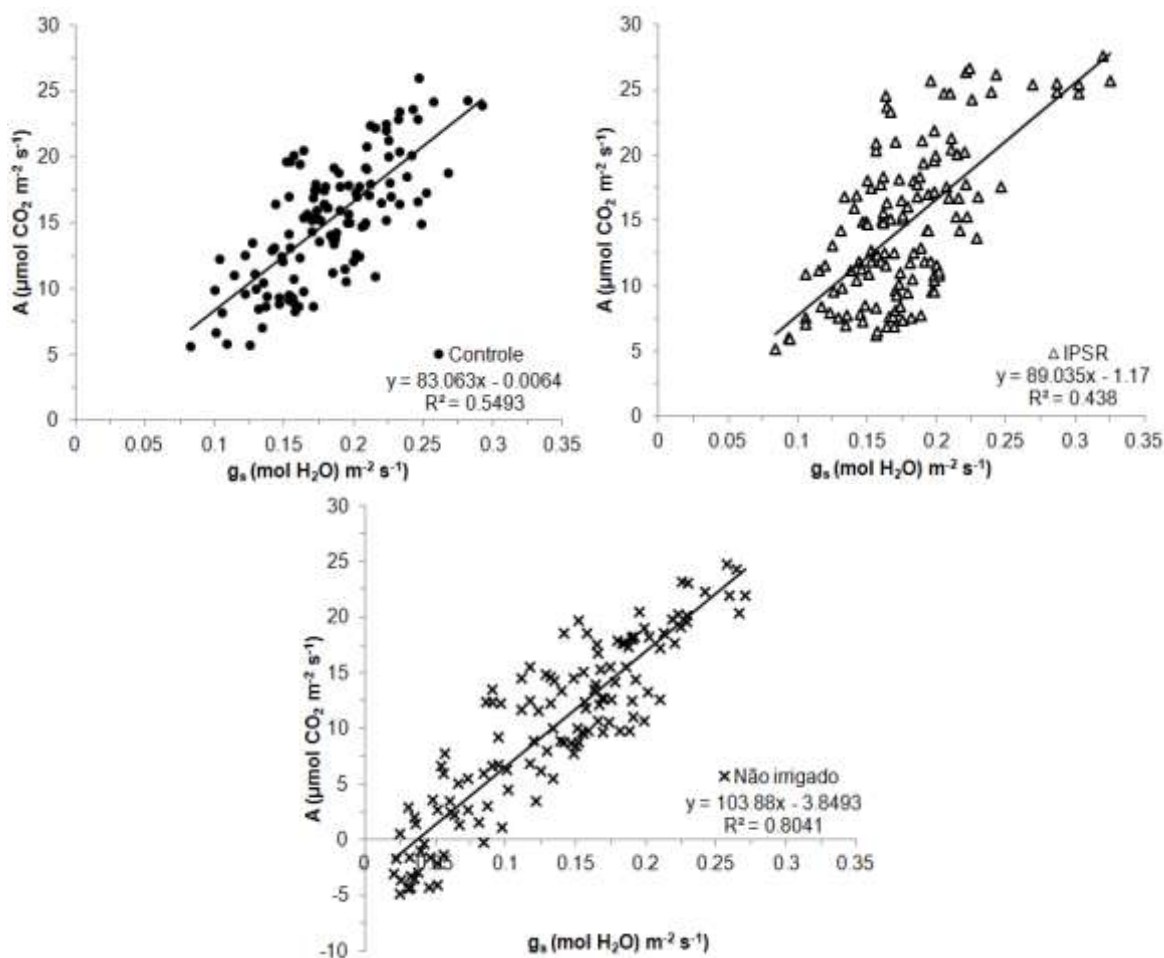


Figura 23. Dispersão da taxa fotossintética líquida (A) versus condutância estomática (g_s) (Eficiência intrínseca do uso da água - EIUA) de *Saccharum* spp. sob aplicação diferencial de água no substrato para os tratamentos Controle, IPSR e Não irrigado. Cada ponto representa 1 dado coletado ao longo do período experimental.

Baseado no conceito de que nas plantas sob IPSR, apenas uma metade das raízes é irrigada, estima-se uma economia próxima de 50% da água utilizada comparada ao tratamento controle, sem impacto negativo sobre a qualidade do produto ou o rendimento da cultura (Santos et al., 2003). Dessa forma, a EUA seria aumentada por todo mecanismo de resposta a ácido abscísico refletindo, finalmente, na redução da perda de água pela transpiração (Senyigit e Ozdemir, 2011).

No Quadro 2, é possível observar que a maior economia de água (66,5%) foi proporcionada pelo tratamento não-irrigado, assim como, a maior eficiência agrônômica do uso da água (EAUA) (14,38 g MS / L). No entanto, ao longo do

trabalho, foi possível observar o comprometimento de todas as variáveis analisadas nessas plantas em virtude da deficiência de água. Certamente, durante o ciclo comercial de cultivo, caso a cultura seja submetida à limitação hídrica moderada e/ou severa, a produtividade será significativamente comprometida.

Ao se observar o quadro 2, percebe-se que, em relação às plantas controle, o consumo de água das plantas sob irrigação parcial do sistema radicular foi reduzido em 38,5%. Apesar disso, o ganho de massa seca por litro (EAUA) foi bem maior (12,85 contra 7,48 g MS/L), o que representou um ganho de 42,8% de grama de massa seca por litro de água consumido. Em termos ambientais e agronômicos, esses dados são de extrema relevância, pois, as plantas deste tratamento IPSR, com base nos demais resultados obtidos nesse trabalho, apresentaram um excelente estado metabólico. Isso torna a IPSR uma técnica extremamente importante na agricultura, sendo uma alternativa, desde que mais estudada, extremamente eficiente na economia de água e na manutenção da produtividade das culturas.

Em macieiras, a técnica IPSR mostrou ser eficaz na economia de água e maior EUA, sem reduzir a qualidade da fruta (Senyigit e Ozdemir, 2011). Tal técnica foi sugerida como utilização comercial em condições semelhantes de clima e solo ao deste estudo. Também se constatou, em comparação com plantas irrigadas com 100% da capacidade de campo, uma redução na lâmina de irrigação de 35%, com um decréscimo de biomassa de somente de 11% (Kang e Zhang, 2004). Outra investigação com pimentas irrigadas por gotejamento, mostrou uma economia de água próximo de 40% para as plantas do tratamento “PRD” (em inglês: *Partial Root Drying*), com um rendimento de produtividade semelhante à das plantas irrigadas (Kang et al., 2001).

A técnica IPSR também foi testada em pomares de pêssego na China, usando um sistema de irrigação por gotejamento (Gong et al., 2001), e em um pomar de pêra em Victoria, Austrália, usando um sistema de irrigação por inundação (Kang et al. 2002). Os resultados mostraram uma economia de água de 52% em pêssego, e 23% em Pêra. Em videira, particularmente, tem sido demonstrado que a IPSR não tem efeito negativo em relação à produtividade. Todavia, tal técnica pode melhorar a qualidade do fruto com uma redução de mais

de 50% do consumo de água em relação a tratamentos que atendem plenamente à necessidade hídrica da cultura (Loveys et al., 2001).

Apesar dos resultados promissores, a utilização da IPSR envolve questões fundamentais para tomada de decisão do produtor. Ou seja, atualmente, os custos da água, da tecnologia, da manutenção e das adaptações de cultivos já instalados, e o preço do produto produzido, são muitas vezes empecilhos, e podem dificultar a aplicação da técnica pelo produtor. Dessa forma, Sadras (2009) afirma que uma análise financeira é necessária para identificar as condições em que essa prática de irrigação pode ser justificada.

Quadro 2. Consumo, economia e eficiência agrônômica do uso da água de *Saccharum* spp. L. sob aplicação diferencial de água no substrato

<i>Tratamento</i>	<i>Consumo total de água (L)</i>	<i>Economia de água em relação à controle (%)</i>	<i>EAUA (g MS/L⁻¹)</i>
Controle	177.2	-	7,48
IPSR	108.8	38,5%	12,85
Não irrigado	59.2	66,5%	14,38

RESUMO E CONCLUSÕES

O consumo hídrico da cana-de-açúcar varia com o clima, disponibilidade de água e com o próprio desenvolvimento e duração do ciclo da cultura, podendo variar de 1.000 a 2.000 mm, segundo a FAO (Doorenbos & Kassam, 1979). No entanto, em muitas regiões onde a cana é cultivada, a água é o fator limitante na produção (Inman-Bamber e Smith, 2005).

O estresse hídrico pode ocorrer como consequência de uma diminuição sazonal da disponibilidade de água no solo, ou pelas variações de demanda transpiratória ao longo do dia. Sua intensidade e duração determinam os efeitos sofridos pela planta (Chaves e Oliveira, 2004). Em cana-de-açúcar, os sintomas mais comuns em decorrência do estresse são: mudança na coloração das folhas, no ângulo das folhas em relação ao colmo e o enrolamento progressivo das folhas (Pires et al., 2008). Rosenfeld (1989) concluiu que o início do estágio de máximo desenvolvimento da cana-planta é o período mais sensível ao déficit hídrico, potencializando grandes perdas de produção. Dessa forma, se faz necessário procurar ferramentas que possibilitem assegurar boas produtividades usando a água de forma racional.

A IPSR é uma técnica em que somente um lado do sistema radicular é exposto a boas condições hídricas. Essa técnica defende que plantas totalmente irrigadas, apresentam grande abertura estomática, funcionando em uma condição considerada de “luxo”. Assim, um pequeno estreitamento da abertura estomática provocado pela síntese de ABA em decorrência de uma resposta às raízes sob

baixa disponibilidade de água, não comprometeria a fotossíntese da planta (Jones, 1992), além de economizar uma boa quantidade de água, aumentando a eficiência do uso desse recurso.

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação entre janeiro e abril de 2011 no campus da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em Campos dos Goytacazes-RJ. Toletes de cana-de-açúcar da variedade RB867515 foram semeados e, posteriormente transplantados para pares de vasos de 12L cada, unidos um ao outro para que o sistema radicular fosse dividido de forma uniforme. O experimento foi composto pelo tratamento controle (C), ambos os lados do sistema radicular mantidos na capacidade de campo; irrigação parcial do sistema radicular (IPSR), somente um lado do sistema radicular mantido na capacidade de campo, e não-irrigado (NI), em que a irrigação foi suspensa em ambos os lados do sistema radicular. A quantidade de água aplicada em cada tratamento foi controlada com o auxílio de uma proveta de 500ml. Os tratamentos foram impostos até que a taxa fotossintética líquida do tratamento NI fosse igual à zero. Após isso, as plantas foram reirrigadas para que fosse avaliada a recuperação dos tratamentos supracitados.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi estudar a resposta da cana-de-açúcar frente à irrigação parcial do sistema radicular quanto ao seu crescimento, à capacidade fotossintética, à fluorescência da clorofila a, ao potencial hídrico foliar, à temperatura foliar e à eficiência do uso da água, visando encontrar respostas que sirvam como base para estudos aprofundados que viabilizem a adaptação dessa técnica em cultivos comerciais com consumo de água reduzido e aumento da produtividade.

O estresse hídrico comprometeu todo o crescimento da planta, reduzindo as médias do tratamento não irrigado em todas as variáveis analisadas, não havendo recuperação após a reirrigação.

Da mesma forma, as leituras de MPC, variáveis de fluorescência da clorofila e trocas gasosas evidenciaram o dano causado na planta, onde foram constatadas as reduções em todas as variáveis analisadas, com redução na taxa fotossintética e efeito fotoinibitório. Após a reirrigação, as plantas não irrigadas recuperaram a condutância estomática, mas não recuperaram sua taxa fotossintética, evidenciando efeitos estomáticos e não estomáticos no comprometimento dessa característica. Já o efeito fotoinibitório foi reduzido.

A temperatura foliar também foi aumentada nas plantas não irrigadas em 4,6°C no período de estresse máximo, no entanto, após a reirrigação, a temperatura da folha das plantas não irrigadas se equiparou às das folhas dos demais tratamentos.

Da mesma forma, o potencial hídrico foliar antemanhã foi afetado pela restrição hídrica. Após a reirrigação, houve uma discreta recuperação, mas não suficiente para igualar esse tratamento aos demais, evidenciando os danos provocados pelo estresse no tecido foliar.

Apesar de apresentar a maior eficiência do uso da água, as plantas não irrigadas apresentaram redução das características de crescimento e componentes fotossintéticos, o que mostra que essa eficiência não é vantajosa, pois a planta estava visualmente senescente.

A irrigação parcial se mostrou eficaz em todas as características biométricas, se mantendo estatisticamente igual às plantas controle. Vale salientar que na variável RMC, as plantas sob irrigação parcial apresentaram uma tendência a aumentar o investimento de fotoassimilados no colmo, o que é muito importante na cultura estudada, tendo em vista que o principal produto econômico da cana-de-açúcar é o colmo.

As plantas sob irrigação parcial mantiveram as leituras de medidor portátil de clorofila nos mesmos níveis das plantas controle. Essa resposta também foi semelhante para a eficiência quântica do PSII e para o índice fotossintético. No entanto, essa última variável, por ser mais completa e envolver a densidade da atividade dos centros de reação, a eficiência do movimento de elétrons para reduzir a QA, e a probabilidade de que um fóton absorvido seja capturado pelos centros de reação reflete, a funcionalidade de ambos os fotossistemas (Strasser et al., 2004), dessa forma, percebeu-se um leve decréscimo nos valores de PI nas plantas sob IPSR a partir do 15 DAIT.

Não foi encontrado efeito fotoinibitório nas plantas Controle e IPSR. Também não foi encontrada relação entre as taxas fotossintéticas e os valores de F_v/F_m e PI em nenhum dos tratamentos, exceto no auge do estresse hídrico, onde foram encontrados valores muito baixos dessas variáveis, correspondendo a também baixos valores de fotossíntese.

Observou-se uma tendência à redução na condutância estomática nas plantas sob IPSR a partir do 13DAIT, no entanto, só houve uma pequena redução

na taxa fotossintética nesse tratamento no 13^o e 15^o dia de avaliação. Apesar dessa redução na g_s , a transpiração não foi afetada. Essas respostas foram seguidas de um leve aumento no $DPV_{\text{folha-ar}}$ no tratamento IPSR, o que já era esperado.

As curvas de luz traçadas demonstraram que a IPSR não comprometeu a taxa fotossintética em nenhuma das intensidades (0, 500, 1000, 1500 e 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

A temperatura foliar não foi afetada pela IPSR comparada à controle. Essa resposta está relacionada com a manutenção da transpiração dessas folhas (IPSR), como foi comprovado na análise de trocas gasosas.

Os dados de EUA e EIUA mostraram um ajuste semelhante em todos os tratamentos. Dessa forma, foi mais indicado avaliar a eficiência da técnica analisando a EAUA. Apesar do tratamento não irrigado ter apresentado o maior valor de EAUA, o comprometimento do desenvolvimento da planta evidenciado nas outras variáveis mascara esse resultado, uma vez que a planta só recebeu água no período de aclimação e após a reirrigação. Já o tratamento IPSR apresentou valor semelhante ao não irrigado, mas com as plantas saudáveis. Isso representou uma economia de água de 38,5% com relação à controle, mostrando que a técnica realmente tem potencial para ser utilizada, desde que sejam feitos estudos mais aprofundados levando isso para o campo, sendo estudada a sua viabilidade econômica.

Também foi possível concluir que as plantas de cana-de-açúcar da variedade RB867515 toleram curtos períodos de veranico (até 15 dias) sem sofrer danos fisiológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adir, N., Zer, H., Shochat, S., Ohad, I. (2003) Photoinhibition – a historical perspective. *Photosynthesis Research*, 76: p. 343-370.
- Ahmadi, S.H., Andersen, M.N., Plauborg, F., Poulsen, R.T., Jensen, C.R., Sepaskhah, A.R., Hansen, S., (2010) Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Gas exchange and xylem [ABA]. *Agri. Water Management*, 97: p. 1486-1494.
- Alexander, A. G. (1973) *Sugarcane physiology*. Amsterdam: Elsevier Publishing. 752p.
- Alfonsi, R. R.; Pedro, M. J.; Brunini, O.; Barbieri, V. (1987) Condições climática para a cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B (Ed.). *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. São Paulo: Fundação Cargill. cap.1 v.1, p. 42-87.
- Ali, H. I., Ismail, M. R., Saud, H. M., Manan, M. M. (2004) Effect of partial rootzone drying (PRD) on growth, water use efficiency (WUE) and yield of tomatoes grown in soil culture. *Pertianika. J. Trop. Agric. Sci.* n. 27 (2): p. 143-149.
- Ameglio T., Archer P., Cruiziat P., Daudet F. A. , Cohen M. , Valancogne C. , Dayau S. (1997) A limit in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Acta Horticulturae* 449: p. 431–437.
- Andrade, D. V., Botrel, T. A., Paz, V. P. Sp., Frizzone, J. A. (1998) Modelo matemático para simulação da fase de avanço na irrigação por sulcos. *Rev. bras. de eng. agrícola e ambiental*, v. 2, p. 56-62.
- Andrade, W. E. B. (2007) *Viabilidade técnica do cultivo de oleaginosas no Norte Fluminense*. Niterói/RJ: Pesagro-Rio, 47p.
- Angelocci, L. R. (2002) *Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico*. Piracicaba, SP: O autor, 268 p.

- Antonio C., Pinheiro C., Chaves M. M., Ricardo C. P., Ortuno M. F., Thomas-Oates J. (2008) Analysis of carbohydrates in *Lupinus albus* stems on imposition of water deficit, using porous graphitic carbon liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Chromatography*. 1187: p. 111–118.
- Antunes Filho, H. (1969) Amapro às pesquisas canavieiras. In: *Congresso latino-americano de alimentação e desenvolvimento sócio-econômico*. Livro de resumos. São Paulo: COPAESTE, 19p.
- Araújo, S. A. C., Deminicis, B. B. (2009) Fotoinibição da Fotossíntese. *Revista Brasileira de Biociências*. Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 463-472, out./dez. 2009.
- Araus, J. L., Hogan, K. P. (1994) Comparative leaf structure and patterns of photoinhibition of the neotropical palms. *Scheelea zonensis* and *Socratea durissima* growing in clearing and forest understory during the dry season in Panama. *Am. J. Bot.*, v. 81, n. 6, p. 726-738.
- Argenta, G., Silva, P. R. F., Bortolini, C. G., Forsthofer, E. L., Strieder, M. L. (2001) Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. *Rev. Bras. Fisiol. Veg.*, 13: p. 158-167.
- Arias, M. I. B.; Delgado, E. O.; Carmenate, R. V. (1996) Cambios fisiológicos de la caña de azúcar ante el déficit hídrico. 1.ed. México: Universidad Autónoma Chapingo, 135p.
- Aro, E. M., Virgin, I. Andersson, B. (1993) Photoinhibition of photosystem II. Inactivation, protein damage and turnover. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1143: p. 113-134.
- Arp, W.J. (1991) Effects of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO₂. *Plant, Cell and Environment*, Logan, v.14, n.8, p.869-875.
- Azevedo, L. C. (2006) *Secagem parcial do sistema radicular: um estudo relacionado às trocas gasosas, eficiência fotoquímica e às medidas biométricas em plantas de milho*. Monografia (Graduação em Engenharia Agrônoma) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ, 56p.
- Azia, F., Stewart, K. A. (2001) Relationships between extractable chlorophyll and SPAD values in muskmelon leaves. *J Plant Nutr.* 24: p. 961–966.
- Barbieri, V., Villa Nova, N. A. (1977) Climatologia e a cana-de-açúcar. Araras: Planalsucar. Coordenadoria Regional Sul. COSUL, p. 1-22.
- Barbosa, F. S. (2010) *Resistência à seca em cana-de-açúcar para diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo*. Dissertação (Mestrado em Ciências Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 81p.

- Barbosa, V. F. A. M. (2012) Plantio. In: Santos, F., Borém, A., Caldas, C. (Eds). *Cana-de-açúcar: Bionergia, Açúcar e Etanol: Tecnologias e Perspectivas*. 2 ed. rev. e ampl. Viçosa, MG. 637p.
- Bascur, G.; Oliva, M.A., Laing, D. (1985) *Termometria infraroja em selection de genotipos de Frijol (Phaseolus vulgaris L.), resistentes a sequia. I Bases fisiológicas; II. Crecimiento y productividad*. Turrialba, 35: p. 3-33.
- Beauclair, E. G. F., Romano, E., Ferro, J., Menossi, M., Matsuoka, S. (2009). *Guia da cana-de-açúcar*. 1. ed. São Paulo: CIB, v. 1. 20p.
- Becker, T. W., Fock, H. P. (1986) Effects of water stress on the gas exchange, the activities of some enzymes of carbon and nitrogen metabolism, and on the pool sizes of some organic acids in maize leaves. *Photosynthesis Research* 8: p. 175–181.
- Bernardo, S. (2006) *Manejo da Irrigação na Cana-de-açúcar*. Alcoolbrás, São Paulo, p. 72 – 80.
- Bittman, S., Simpson, G.M. (1987) Soil water deficit effect on yield, leaf area, and net assimilation rate of three forage grasses: Crested wheatgrass, Madison smooth bromegrass, and altai wildrye. *Agronomy Journal*, Madison, v.79: p. 768-774.
- Björkman, O. In: *Photoinhibition*. (1987) (eds.) Kyle, D. J.; Osmond, C. B.; Arntzen, C. J. Elsevier, Amsterdam. 123 p.
- Blum, A. (1997) Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. In: Drought tolerance in higher plants. Genetical, physiological and molecular biological analysis. Belhassen, E. (ed). *Kluwer Academic Publ.*, Dordrecht. p. 57-70.
- Bolaños, J. & Edmeades, G. O. (1991) Value of selection for osmotic potential in tropical maize. *Agr. J.*, 83: p. 948-956.
- Bolhàr-Nordenkamp, H.R., Long, S.P., Baker, N.R. (1989) Chlorophyll fluorescence as probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrument. *Functional Ecology*, v.3: p. 497-514.
- Bolhàr-Nordenkamp, H. R., Öquist, G. (1993) Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. In: *Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual* (D. Hall, J.M.O. Scurlock, H.R.R. Bolhàr-Nordenkamp, C.R.C. Leegood, S.P. Long, (eds). Chapman & Hall, London. p. 193-206.
- Bowyer, J. R. Leegood, R. C. (1997) Photosynthesis. In: Plant biochemistry. Day, P. M., Harbone J. B. (eds). *Academic Press*, San Diego, p. 49-110.
- BRASIL, Agência Nacional de Águas. (2004) *Agricultura irrigada: estudo técnico preliminar*. Brasília-DF, 107p.

- BRASIL, Agência Nacional de Águas. (2009) Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Brasília-DF. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/>>.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2011) Plano Agrícola e Pecuário 2011-2012. Secretaria de Política Agrícola. Brasília-DF, 92 p.
- BRASIL, Ministério da Integração Nacional. (2008) *A irrigação no Brasil: situação e diretrizes*. Brasília-DF, 133p.
- Bravdo, B., Naor, A., Zahavi, T., Gal, Y. (2004) The effects of water stress applied alternatively to part of the wetting zone along the season (PRD-partial rootzone drying) on wine quality, yield, and water relations of reed wine grapes. *Acta Horti* 664: p.101–109
- Bray, E. A. (1997) Plant responses to water deficit. *Trends in Plant Science*. v.2, p. 48-54, 1997.
- Brunini, O. (2008) Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: Dinardo -Miranda, L.L., Vasconcelos, A. C. M., Landell, M. G. A. (eds). *Cana-de-açúcar*. 1 ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008, v. 1, p. 205-218.
- Bucci, S. J., F. G. Scholz, G. Goldstein, F. C. Meinzer, J. A. Hinojosa, W. A. Hoffmann and A. C. Franco. (2004) Processes preventing nocturnal equilibration between leaf and soil water potential in tropical savanna woody species. *Tree Physiol*. 24: p.1119–1127.
- Buckeridge, M. S. Comparação entre os sistemas fotossintéticos C₃ e C₄. Disponível em: <<http://felix.ib.usp.br/pessoal/marcos/minhawe3/PDFs/Pratica%20fotossintese.pdf>>.
- Burgess, S.S.O., Adams, M.A., Turner, N.C., Ong, C.K. (1998) The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia* (Berlin) 115: p. 306–311.
- Burkart, S., Manderscheid, R., Weigel, H. J. (2004) Interactive effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations and plant available soil water content on canopy evapotranspiration and conductance of spring wheat. *Eur. J. Agron*. 21, p. 401-417.
- Cairo, P. A. R. (1995) *Curso básico de relações hídricas de plantas*. Vitória da Conquista, BA: UESB. 32 p.
- Calsa Jr, T. Figueira, A. (2007) Serial analysis of gene expression in sugarcane (*Saccharum* ssp.) leaves revealed alternative C₄ metabolism and putative antisense transcripts. *Plant Molecular Biology* 63: p. 745 – 762.
- Cambraia, J. (2005). Aspectos bioquímicos, celulares e fisiológicos dos estresses nutricionais em plantas. In: Nogueira, R. J. M. C., Araújo, E. D. E. L., Willadino, L. G., Cavalcante, U. M. T. (eds). *Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas*. Recife, UFRPE, cap. 2, p. 95-104.

- Campostrini, E. (2002) *Fluorescência da Clorofila a: Considerações Teóricas e Aplicações Práticas*. 34 p. (Apostila).
- Carmo-Silva, A. E., Soares, A. S., Marques da Silva, J., Bernardes da Silva, A., Keys, A. J., Arrabaça, M. C. (2007) Photosynthetic responses of three C₄ grasses of metabolic subtypes to water deficit. *Functional Plant Biology*. 34: p. 204–213.
- Carmo-Silva, A. E., Powers, S. J., Keys, A. J., Arrabaça, M. C., Parry, M. A. J. (2008) Photorespiration in C₄ grasses remains slow under drought conditions. *Plant Cell and Environment*.
- Casagrande, A. A. (1991) *Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar*. Jaboticabal: FUNEP. 157p.
- Casagrande, A. A., Vasconcelos, C. M. (2008) Fisiologia da parte aérea. In: Dinardo -Miranda, L.L., Vasconcelos, A. C. M., Landell, M. G. A. (eds). *Cana-de-açúcar*. 1 ed. Campinas: Instituto Agrônômico, v. 1, p. 57-78.
- Castro, F.A., Campostrini, E., Chiquieri, T. B., Reis, F. O., Torres Netto, A., Santos, A. M., Azevedo, L. C., Souza, M. A. (2004) Estresse hídrico em mudas de mamoeiro “golden” : Efeitos sobre a fotoquímica da fotossíntese. *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Fruticultura - Florianópolis / SC*.
- Chaves, M.M., Pereira, J.S., Maroco, J., Rodrigues, M.L., Ricardo, C.P.P., Osório, M.L., Carvalho, I., Faria, T., Pinheiro, C. (2002) How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and Growth. *Annals of Botany* 89: p. 907-916.
- Chaves, M.M., Maroco, J., Pereira, J.S. (2003) Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. *Functional plant Biology* 30: p. 239-264.
- Chaves, M.M., Oliveira, M.M. (2004) Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *Journal of experimental Botany* 55(407): p. 2365-2384.
- Chaves MM, Flexas J, Pinheiro C. (2009) Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany* 103: p. 551–560.
- Chaves, M., Davies, B. (2010) Drought effects and water use efficiency: improving crop production in dry environments. *Functional Plant Biology* 37, p. iii–vi.
- Chaves. M. M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J. M., Santos, T., Regalado, A. P., Rodrigues M. L., Lopes, C. M. (2010) Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany*. 105: p. 661–676.
- Christen, D., Schönmann, S., Jermini, M., Strasser, R. J., Défago, G. (2007) Characterization and early detection of grapevine (*Vitis vinifera*) stress

- responses to esca disease by *in situ* chlorophyll fluorescence and comparison with drought stress. *Environ. Exp. Bot.* 60. p. 504–514.
- Christoffoleti, P. J. (1986) *Aspectos fisiológicos da brotação, perfilhamento e florescimento da cana-de-açúcar*. Piracicaba: ESALQ/USP. 80p.
- Cirilo, A.G., Andrade, F. H. (1996) Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Science*, Madison, 36: p. 325-331.
- Clements, H. F., Awada, M. (1965) Experimentes on the artificial induction of flowering in sugarcane. In: *Congress of ISSCT, 12º*, Porto Rico. p. 795-812.
- Clements, H. F. (1975) *Flowering of sugarcane: mechanics and control*. Hawaii: Argic Express. Station. 56p. (boletim técnico)
- Coleman, R. E. (1968) Physiology of flowering in sugarcane. In: *congresso of ISSCT, 13º*, Taipé. p. 992-1000.
- Colom, M. R., Vazzana, C. (2002) Photosynthesis and PSII functionality of droughtresistant and drought-sensitive weeping lovegrass plants. *Environmental and Experimental Botany*. p. 1-10.
- Comstock, J. P. (2002) Hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and transpiration. *Journal of Experimental Botany*. v. 53, n. 367, p. 195-200.
- CONAB. (2011) *Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dezembro/2011*. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília – DF. 20p.
- Confederação Nacional da Indústria (2007) *Matriz energética: cenário, oportunidades e desafios CNI*. Brasília: CNI. 82p.
- Cornic, G., Briantais, J. M. (1991) Partitioning of photosynthetic electron flow between CO₂ and O₂ reduction in a C₃ leaf (*Phaseolus vulgaris* L.) at different CO₂ concentrations and during drought stress. *Planta*, 183: p. 178–184.
- Cornic, G., Fresneau, C. (2002) Photosynthetic carbon reduction and oxidation cycles are the main electron sinks for photosystem II activity during a mild drought. *Annals of Botany* 89: p. 887–894.
- Corrêa, M. A. (1935) *Sinopse histórica do açúcar em São Paulo*. Rio de Janeiro: Instituto do Açúcar e do Alcool, p. 153-163.
- Correia M. J., Pereira J. S., Chaves M. M., Rodrigues M. L., Pacheco, C. A. (1995) ABA xylem concentrations determine maximum daily leaf conductance of field-grown *Vitis vinifera* L. plants. *Plant, Cell and Environment* 18: p. 511–521.
- Costa, C. (1958) Primeiras canas e primeiros açúcares no Brasil. *Brasil açucareiro*, v. 3, p. 160-168.

- Critchley, C. (1998) Photoinhibition. In: *Photosynthesis: A Comprehensive Treatise*. Raghavendra, A.S., Eds. Cambridge University Press, New York, Chapter. 20: p. 264-272.
- Crombie, D. S., J. T. Tippet and T. C. Hill. (1988) Dawn water potential and root depth of trees and understorey species in south-western Australia. *Aust. J. Bot.* 36: p. 621–631.
- Cruz, J.L., Coelho, E.F., Pelacani, C.R., Coelho filho, M.A., Dias, A.T., dos Santos, M.T. (2004) *Crescimento e partição de matéria seca e de carbono no mamoeiro em resposta à nutrição nitrogenada*. *Bragantia* 63.(3): p. 351-361.
- Cruz, E. P – Safra da cana foi um desastre total e usineiros pedem redução de imposto do etanol: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2011-12-13/safra-de-cana-foi-um-desastre-total-e-usineiros-pedem-reducao-de-impostos-do-etanol> em 13/12/2011 página mantida pela Agência Brasil Empresa Brasil de Comunicação.
- Dantas, B. (1960) Contribuição para a história da gomose da cana-de-açúcar em Pernambuco e no Brasil. *Boletim Técnico do Instituto Agrônomo Nordeste*, n. 11, p. 2-17.
- Daros, E.; Zambom, J. L. C.; Oliveira, R. A.; Bessalho Filho, J. C. (2010) Catálogo Nacional de Variedades "RB" de cana-de-açúcar. 1. (ed). *Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro* – Curitiba, 136p.
- David T. S., Henriques M. O., Kurz-Besson C., Nunes, J., Valente, F., Vaz, M., Pereira, J. S., Siegwolf, R., Chaves, M. M., Gazarini I. C., David, J. S. (2007) Water use strategies in two co-occurring Mediterranean evergreen oaks: surviving the summer drought. *Tree Physiology*. 27: p. 793–803.
- Davies, W.J., Zhang, J., (1991) Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology* 42: p. 55 -76.
- Davies, W.J., Wilkinson, S., Loveys, B. (2002) Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist*, v.153, p.449-460.
- de la Hera, M. L., Romero, P., Gomez-Plaza, E., Martinez, A. (2007) Is partial root-zone drying an effective irrigation technique to improve water use efficiency and fruit quality in field-grown wine grapes under semiarid conditions? *Agri. Water Management*, 87: p. 261-274.
- de Souza, C. R., Maroco, J. P., dos Santos, T. P., Rodrigues, M. L., Lopes, C. M., Pereira, J. S., Chaves, M. M. (2003) Partial rootzone drying: regulation of stomatal aperture and carbon assimilation in field-grown grapevines (*Vitis vinifera* cv. Moscatel). *Functional Plant Biology*, 30. p. 653-652.
- de Souza, C. R., Maroco, J. P., Santos, T. P., Rodrigues, M. L., Lopes, C., Pereira, J. S., Chaves, M. M. (2005) Control of stomatal aperture and carbon uptake by

- deficit irrigation in two grapevine cultivars. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106: p. 261–274.
- Delauney, A.J., Verna, D.P.S. (1993) Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *Plant Journal* 4: p. 215 -223.
- Deleu, C., Coustaut, M., Niogret, M.-F., Larher, F. (1999) Three new osmotic stress-regulated cDNAs identified by differential display polymerase chain reaction in rapeseed leaf discs. *Plant, Cell and Environment* 22: p. 979 -988.
- Dengler, N. G. & Nelson, T. (1999) Leaf structure and development in C₄ plants. In: *C₄ Plant Biology*. Sage, R. F.; Monson, R. K. (eds) Academic Press, San Diego, CA, p. 133- 172.
- Dennis, D. T. & Blakeley, S. D. (2000) Carbohydrate metabolism. In: *Biochemistry and molecular Biology of Plants*. Buchanan BB, Gruissem, W. e Jones, R. L. (eds). *American Society of Plant Physiologists*, Tockville, p. 630-675.
- Deus, B. C. S. (2011) *Irrigação parcial do sistema radicular: respostas fisiológicas em cana-de-açúcar*. . Monografia (Graduação em Bacharelado em Ciências Biológicas) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ, 69p.
- Dillewijn, C. Van. (1952) *Botany of Sugarcane*. Waltham, Mass., USA. *The Cronica Botanica Co.*, 371p.
- Dodd IC, Egea G, Davies WJ. (2008) ABA signalling when soil moisture is heterogeneous: decreased photoperiod sap flow from drying roots limits ABA export to the shoots. *Plant, Cell and Environment* 31, p. 1263–1274.
- Dodd IC. (2009) Rhizosphere manipulations to maximize ‘crop per drop’ during deficit irrigation. *Journal of Experimental Botany* 60, p. 1–6.
- Dodd, C. I., Egea, G., Watts, C. W., Whalley, W. R. (2010) Root water potential integrates discrete soil physical properties to influence ABA signalling during partial rootzone drying. *Journal of Experimental Botany*. Vol. 61, No. 13, p. 3543–3551.
- Domingues, I. A. S. (2010) *Variabilidade climática e sua influência na produtividade da cultura da cana-de-açúcar (Saccharum spp) na região norte e noroeste do Paraná*. Tese (Doutorado em Geografia física) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 235p.
- Döll, P., Siebert, S. (2002) Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resour. Res.* 38, 1037.
- Doorenbos, J., Kassan, A. H. (1979) Yield response to water. Rome: FAO. 193p. (*FAO, Irrigation and Drainage Paper* 24).

- Dry, P.R.; Loveys, B.R. (1998) Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, v.4, p.140-148.
- Du, T., Kang, S., Zhang, J., Li, F. (2008) Water use and yield responses of cotton to alternate partial rootzone drip irrigation in the arid area of north-west China. *Irrig. Science*, 26: p. 147-159.
- English, M.J, Musick, J.T., Murty, V.V.N., (1990) Deficit irrigation. In: Management of farm irrigation systems (Hoffman, G.J., Howell, T.A., and Solomon, K.H., Editors). ASAE Monograph no. 9. *American Society of Agricultural Engineers publisher*, 1020p.
- Esposti, M. D. D., de Siqueira, D. L., Pereira, P. R. G., Venegas, V. H. A., Salomão, L. C. C., Filho, J. A. M. (2003) Assessment of nitrogenized nutrition of citrus rootstocks using chlorophyll concentrations in the leaf. *J Plant Nutr.* 26: p. 1287–1299.
- Evans, H. (1935) The root system of the sugarcane. *Empire J. Exp. Agric.*, v. 3, p. 351-362.
- Evans, L. T. (1998) *Feeding the Ten Billion*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 232p.
- Ewart, A.J. (1896) On assimilatory inhibition in plants. *Journal of the Linnean Society of Botany*, 31: p. 364-461.
- FAO (2002) Crops and drops: making the best use of water for agriculture, Rome, Italy: FAO. *Information brochure*, 28p.
- FAOSTAT (2006) FAO data for agriculture: statistics database. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/faostat/collections?version=ext&hasbulk=0&subset=agriculture>>
- FAOSTAT (2008) Disponível em: <<http://faostat.fao.org/default.aspx>>
- Faria, T., Garcia-Plazaola, J. I., Abadia, A., Cerasoli, S., Pereira, J. S., Chaves, M. M. (1996) Diurnal changes in photoprotective mechanisms in leaves of cork oak (*Quercus suber*) during summer. *Tree Physiology* 16 (1-2): p. 115-123.
- Farias, C. H. A., Fernandes, P. D., Azevedo, H. M., Dantas Neto, J. (2008) Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356-362.
- Fernández, J. E., Díaz-Espejo, A., Infante, J. M., Durán, P., Palomo, M. J., Chamorro, V., Girón, I. F., Villagarcía, L. (2006) Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant Soil.* 284: p. 273–291.

- Figueiredo, P. (2008). Breve historic da cana-de-açúcar e do papale do instituto agronômico no seu estabelecimento no Brasil. In: Dinardo -Miranda, L.L., Vasconcelos, A. C. M., Landell, M. G. A. (eds). *Cana-de-açúcar*. 1 ed. Campinas: Instituto Agronômico, v. 1, p. 31-44.
- Flexas, J., Escalona, J. M., Medrano, H. (1998) Down-regulation of photosynthesis by drought underfield conditions in grapevine leaves. *Australian Journal of Plant Physiology* 25: p. 893–900.
- Flexas, J., Escalona, J. M., Medrano, H. (1999) Water stress induces different levels of photosynthesis and electron transport rate regulation in grapevines. *Plant Cell Environ.* 22, p. 39– 48.
- Flexas, J., Bota, J., Cifre, J., Escalona, J. M., Galmés, J., Gulías, J., El-Kadri, L., Martínez-Cañellas, F., Moreno, M. T., Ribas-Carbó, M., Riera, D., Sampol, B., Medrano, H. (2004) Understanding down-regulation of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. *Ann. Appl. Biol.*, 144: p. 273-283.
- Force L., Critchley C., Van Rensen J. J. S. (2003) New fluorescence parameters for monitoring photosynthesis in plants. *Photosynth. Res.*, 78: p. 17–33.
- Foyer CH, Valadier M-H, Migge A, Becker TW. (1998) Drought-induced effects on nitrate reductase activity and mRNA and on the coordination of nitrogen and carbon metabolism in maize leaves. *Plant Physiology*. 117: p. 283–292.
- Fraiture, C., Giordano, M., Yongsong, L. (2008) Biofuels and implications for agricultural water use: blue impacts of green energy. *Water Policy* 10, p. 67-81.
- Fuchs, M. (1990) Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water stress. *Theoretical and Applied Climatology* 42, p. 253-261.
- Furbank, R. T., Hatch, M. D., Jenkis, C. L. D. (2000) C₄ photosynthesis: mechanism and regulation. In: Photosynthesis physiology and metabolism. Leegood, R. C., Sharkey, T. D., von Caemmerer, S. (eds). *Academic Publishers*, Netherlands, p. 435-457.
- Hatch, M. D., Burnell, J. N. (1990) Carbonic anhydrase activity in leaves and its role in the first step of C₄ photosynthesis. *Plant Physiology* 93: p. 825-828.
- Hatch, M. D., Kagawa, T., Craig, S. (1975) Subdivisio of C₄ pathways species based on differing C₄ decarboxylating system and ultrastructural features. *Australian Journal of Plant Physiology*, 2: p. 111-128.
- Gallo, J. R., Alvarez, R., Abramides, E. (1962) *Amostragem em cana-de-açúcar, para fins de análise foliar*. *Bragantia*. v. 21, n. 54, p. 899-921.
- García García, J., Martínez-Cutillas, A., Romero, P. (2011) Financial analysis of wine grape production using regulated defici irrigation and partial-root zone dryin strategies. *Irrig. Sci.* 10p.

- Gaudillere, J.P. (1982) La photorespiration, son coût énergétique. In: *La photosynthèse. Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, 11. p. 872-882.
- Genty, B., Briantais, J., da Silva, J. B. V. (1987) Effects of drought on primary photosynthetic process of cotton leaves. *Plant Physiology* 83: p. 360-364.
- Gerik, T.J., Faver, K.L.; Thaxton, P.M. (1996) Late season water stress in cotton: I. Plant growth, water uses, and yield. *Crop Science, Madison*, 6: p. 914-921.
- Ghannoum, O., Conroy, J. P., Driscoll, S. P., Paul, M. J., Foyer, C. H., Lawlor, D. W. (2003) Nonstomatal limitations are responsible for drought-induced photosynthetic inhibition in four C₄ grasses. *New Phytologist*, v.159, p. 599-608.
- Ghannoum, O. (2009) C₄ photosynthesis and water stress. *Annals of Botany* 103: p. 635-644.
- Goldmann, I.L., Carter, T.E., Patterson, R.P. A. (1989) Detrimental interaction of subsoil aluminum and drought stress on the leaf water status of soybean. *Agronomy Journal, Madison*, v.81, n.3, p.461-463.
- Gomes, M. M. A, Campostrini, E., Chiquieri, T. B., Siqueira, L. N., Reis, F. O., Azevedo, L.C, Souza, M. A., Bortot, P. A, Leal, N. R. (2005) Efeitos da secagem parcial e total do substrato de cultivo na assimilação de CO₂, rendimento quântico do PSII e pigmentos fotossintéticos do genótipo UENF - Caliman 01. In: *II Simpósio do Papaya Brasileiro*, Vitória. 1: p. 534-537.
- Gonçalves, E. D. (2008) *Fotossíntese, osmorregulação e crescimento inicial de quatro variedades de cana-de-açúcar submetida à deficiência hídrica*. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal e Proteção de Plantas), UFAL, Rio Largo – AL, 66p.
- Gowing, D. J. G., Davies, W. J., Jones, H. G. (1990) A positive root-sourced signal as an indicator of soil drying in apple, *Malus x domestica* Borkh. *J. Exp. Bot.* 41, p. 1535-1540.
- Grahan-Rowe, D. (2011) Agriculture: Beyond food versus fuel. *Nat. Clim. Change*, vol. 494, 1, S6-S8.
- Grimes, D.W., Walhood, V.T., Dickens, W.L., (1968) *Alternate-furrow irrigation for San Joaquin valley cotton*. California Agri., 22: p. 4-6.
- Guang-Cheng, S., Na, L., Zhan-Yu, Z., Shuang-Eh, Y., Chang-ren, C. (2010) Growth, yield and water use efficiency response of greenhouse-growth hot pepper under Time-Sapce deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 126. p. 172-179.
- Guazzelli, M. A. N., Paes, L. A. D. (1997) Irrigação de cana-de-açúcar comercial. In: *Seminário Copersucar de tecnologia agrônômica*, 7, Piracicaba – SP. Anais, Piracicaba: Copersucar. 11p.

- Hartung, W., Sauter, A., Hose, E. (2002) Abscisic acid in the xylem: where does it come from, where does it go to? *Journal of Experimental Botany*, v. 53, n. 366, p. 27-32.
- Havaux M. (1992) Stress tolerance of photosystem II *in vivo*. *Plant Physiol.*, 100: p. 424–432.
- Hayano-Kanashiro C., Calderon-Vazquez C., Ibarra-Laclette E., Herrera-Estrella L., Simpson J. (2009) Analysis of gene expression and physiological responses in three Mexican maize landraces under drought stress and recovery irrigation. *Plos One*. 4, e7531.
- He, J., Lee, S.K. (2001) Relationship among photosynthesis, ribulose-1,5 – biphosphate carboxylase (Rubisco) and water relations of the subtropical vegetable Chinese broccoli grown in the tropics by manipulation of root-zone temperature. *Environmental and Experimental Botany* 46: p. 119-128.
- Hendry, G.A.F., Price, A.H. (1993) Stress indicators: chlorophylls and carotenoids. In: Hendry, G.A.F., Grime, J.P. (eds). *Methods in comparative plant ecology*. London: Chapman e Hall, p. 148 -152.
- Hoel, B. O., Solhaug, K. A. (1998) Effect of irradiance on chlorophyll estimation with the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Ann Bot* 82: p. 389-392.
- Hu T, Kang S, Li F, Zhang J. (2009) Effects of partial root-zone irrigation on the nitrogen absorption and utilization of maize. *Agricultural Water Management* 96, p. 208–214.
- Huitziméngari, C., Trejo, C., Peña-Valdivia, C. B., Ramírez-Ayala, C., Sánchez-García, P. (2009) Effect of partial rootzone drying on growth, gas Exchange, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae*, v. 120, I.4, p. 493-499.
- Hutton, J. R., Loveys, B., R. (2011) A partial root zone drying irrigation strategy for citrus—Effects on water use efficiency and fruit characteristics. *Agricultural Water Management*. 98: p. 1485-1496
- Inagaki, M. N., Nachit, M. M. (2008) Visual monitoring of water deficit stress using infrared thermography in wheat. *The 11th International wheat genetics symposium proceedings*. 3p.
- Inman-Bamber, N.G.; Smith, D.M. (2005) Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, v. 92, p. 185–202.
- IPCC, (2007). Climate change 2007: the physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds) Solomon, S. D., Qin, M., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.

- Jarvis PG. (1985) Transpiration and assimilation of tree and agricultural crops: the “omega” factor. In: Cannell, M. G. R., Jackson, J. E., (eds). *Attributes of trees and crop plants*. Abbots Ripton, UK: Institute of Terrestrial Ecology.
- Jarvis PG, McNaughton KG. (1986) Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in Ecology Research* 15, p. 1-49.
- Jesus, S. V., Marengo R. J. (2008) O SPAD-502 como alternativa para a determinação dos teores de clorofila em espécies frutíferas. *Acta amazônica*. v. 38, p. 815-818.
- Jiang C. D., Shi L., Gao H. Y., Schansker G., Tóth S. Z., Strasser R. J. (2006) Development of photosystems 2 and 1 during leaf growth in grapevine seedlings probed by chlorophyll *a* fluorescence transient and 820 nm transmission *in vivo*. *Photosynthetica*, 44: p. 454–463.
- Jifon, J.L., Syvertsen, J. P., Whaley, E. (2005) Growth environment and leaf anatomy affect nondestructive estimates of chlorophyll and nitrogen in *Citrus* sp. leaves. *J Am Soc Hortic Sci* 130: p. 152-158.
- Jones, H.G. (1992) *Plant and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology*. 2 ed.: Cambridge University Press, 19-46.
- Jones, H. G. (1999) Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant Cell Environ.* 22: p. 1043–1055.
- Jones, H. G., Aikman, D., McBurney, T. A. (1997) Improvements to infrared thermometry for irrigation scheduling in humid climates. *Acta Horticulturae* 449: p. 259-266.
- Jones, H.G., Stoll, M., Santos, T., de Sousa, C., Chaves, M.M., Grant, O.M. (2002) Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*. 53: p. 224-2260.
- Kaman, H., Kirda, C., Cetin, M., Topcu, S., (2006) *Salt accumulation in the root zones of tomato and cotton irrigated with partial root-drying technique*. *Irrigation and Drainage*, 55: p. 533-544.
- Kanai, R., Edwards, G. E. (1999). The Biochemistry of C₄ photosynthesis. In: C₄ Plant Biology Sage, R. F., Monson, R. K. (eds) *Academic Press*, San Diego, CA, p. 49-87.
- Kang, S., Wenjuan, S., Zhang, J. (2000) An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crops Research*, vol. 67, p. 207- 214.
- Kang, S., Zhang, L., Hu, X., Li, Z., Jerie, P., (2001) An improved water use efficiency for hot pepper grown under controlled alternate drip irrigation on partial roots. *Scientia Horti.*, 89: p. 257-267.

- Kang, S., Hu, X.T., Goodwin, I., et al., (2002) Soil Water distribution, water use, and yield response to partial rootzone drying under a shallow groundwater table condition in a pear orchard. *Sci. Hortic.* 92, p. 277–291.
- Kang, S. & Zhang, J. (2004) Controlled alternate partial rootzone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. *J. Exp. Bot.* 55, p. 2437–2446.
- Kanechi, M., Uchida, N., Yasuda, T., Yamaguchi, T. (1996) Non-stomatal inhibition associated with inactivation of Rubisco in dehydrated coffee leaves under unshaded and shaded conditions. *Plant Cell and Physiology* 37: p. 455-460.
- Kao, W.-Y., Forseth, I .N. (1992) Diurnal leaf movement, chlorophyll fluorescence and carbon assimilation in soybean grown under different nitrogen and water availabilities. *Plant, Cell and Environment*, Oxford, v.15, p.703-710.
- Kirschbaum M. U. F. (1988) Recovery of photosynthesis from water stress in *Eucalyptus pauciflora* - process in two stages. *Plant, Cell and Environment* 11: p. 685–694.
- Kollodge, R. (2011) Relatório sobre a situação da população mundial 2011. UNFPA. 132p.
- Köppen, W. (1948) Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra Publications. New Jersey: *Climatology*. Laboratory of Climatology, 104 p.
- Kramer, P. J. (1980) Drought stress, and the origins of adaptations. In: *Adaptation of plants to water and high temperature stress*. Turner, N. C. e Kramer, P. J. (Ed.) Wiley publ., New York. p. 7-22.
- Kramer, P.J., Boyer, J.S. (1995) Water relation of plants and soils. *Academic Press*, London.
- Krause, G. H., Weis, E. (1991) Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42: p. 313–349.
- Landell, M. G. A.; Xavier, M. A.; Anjos, I. A.; Vasconcelos, A. C. M.; Pinto, L. R.; Creste, S. (2006) Potencialidade de novas variedades de cana-de-açúcar. In: Marques, M. O., Mutton, M. A., Azania, A. A. P. M., Tasso Junior, L. C., Nogueira, G. A., Vale, D. W. (eds). *Tópicos em Tecnologia Sucoalcooleira*. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda. p. 17-30.
- Larcher W. (1980) *Physiological Plant Ecology*, 2nd edn, Springer Verlag, Berlin.
- Larcher, W. (2006) *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: Rima. 531p.
- Lascano, R.J., Sojka, R.E., (2007) Preface. In: Lascano, R.J., and Sojka, R.E. (eds). *Irrigation of agricultural crops. 2nd edition*, *Agronomy Monograph*, n. 30, ASA-CSSA-SSSA publishing, 664p.

- Lawlor, D. W., Cornic, G. (2002) Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell and Environment* 25: p. 275–294.
- Leib, B. G., Caspari, H.W., Redulla, C.A., Andrews, P.K., Jabro, J., (2006) Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate. *Irrigation Science*, 24: p. 85-99.
- Leinonen, I., Jones, H. G. (2004) Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *J. Exp. Bot.*, Vol. 55, n. 401. p. 1423-1431.
- Leite, G. H. P., Crusciol, C. A. C. (2008) Reguladores vegetais no desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar. *Pesq. agropec. Bras* 43, n.8: p. 995-1001.
- Leuning, R, Tuzet A, Perrier A. (2003) Stomata as part of the soil-plant atmosphere continuum. In: Mencuccini M, Grace J, Moncrieff J, McNaughto K, eds. *Forests at the land-atmosphere interface*. Edinburgh: CAB International, p. 9–28.
- Li, F., Liang, J., Kang, S., Zhang, J. (2007) Benefits of alternate partial rootzone irrigation on growth, water and nitrogen use efficiencies modified by fertilization and soil water status in maize. *Plant and Soil* 295, p. 279–291.
- Liang, J., Zhang J., Wong M. H. (1997) Can stomatal closure caused by xylem ABA explain the inhibition of leaf photosynthesis under soil drying? *Photosynthesis Research* 51, p. 149–159.
- Lichtenthaler, H. K. (1996) Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. *J. Plant Physiol.*, 148: p. 4-14.
- Lima, A.L.S., Da Matta, F.M., Pinheiro, H.A., Totola, M.R., Loureiro, M.E. (2002) Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffea canephora* under water deficit conditions. *Environmental and Experimental Botany* .47: p. 239- 247.
- Loarie, S. R., Lobell, D. B., Asner, G. P., Mu, Q., Field, C. B. (2011) Direct impacts on local climate of sugarcane expansion in Brazil. *Nat. Clim Change*, 1, p. 105-109.
- Lobell, D.B., M.B. Burke, C. Tebaldi, M.D. Mastrandrea, W.P. Falcon, and R.L. Naylor. (2008) Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science* 319, no. 5863: 607p.
- Long, S. P., Humphries, S., Falkowski, P. G. (1994) Photoinhibition of photosynthesis in nature. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 45: p. 633-662.
- Long, S. P. (1999) Environmental responses. In: C₄ Plant Biology. Sage, R. F., Monson, R. K. (eds). *Academic Press*, San Diego, CA, p. 215-249.

- Lovett, J.C. (2007). Biofuels and Ecology. *African Journal of Ecology* 45, p. 117-119.
- Loveys, B.R.; Düring, H. (1984) Diurnal changes in water relations and abscisic acid in field-grown *Vitis vinifera* cultivars 2. Abscisic acid changes under semi-arid conditions. *New Phytologist*, 97: p. 37-47.
- Loveys, B.R., Dry, P.R., Stoll, M., MacCarthy, M.G. (2000) Using plant physiology to improve the water efficiency of horticultural crops. *Acta Horticulturae* 537: p. 187-197.
- Loveys, B., Grant, J., Dry, P., McCarthy, M. (2001) Progress in the development of partial rootzone drying. CSIRO, Plant Industry, University of Adelaide, SARDI,.
- Lu, C., Zhang, J. (1998) Effects of water stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and photoinhibition in wheat plants. *Aust. J. Plant Physiol.* 25: p. 883-892.
- Lu, C., Zhang, J. (1999) Effects of water stress on photosystem II photochemistry and its thermostability in wheat plants. *Journal of Experimental Botany* 50 (336): p. 1199 -1206.
- Lucchesi, A. A. (1995) Processos fisiológicos da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). *Boletim Técnico ESALQ/CENA*, n.7, p. 1-50.
- Magalhães, A. C. N. (1979) Análise quantitativa do crescimento. In: Ferri, M. G. (Coord.). *Fisiologia Vegetal*. São Paulo: EPU, v.1, 362p.
- Magalhães, A. C. N. (1987) Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono da planta. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Yamada, T. (Coord.) *Ecofisiologia da Produção*. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa do Potássio e do Fósforo, p. 113-118.
- Magro, J. A. (2000) Irrigação em cana. *STAB – Açúcar, Alcool e Subprodutos*, v. 19, n. 1, p. 44-46.
- Mangelsdorf, a. J. (1966) Um programa de melhoramento da cana-de-açúcar para agroindústria canavieira do Brasil. *Rio de Janeiro: Instituto do Açúcar e do Alcool*. 63p.
- Marques da Silva, J., Arrabaça, M. C. (2004) Photosynthesis in the waterstressed C₄ grass *Setaria sphacelata* is mainly limited by stomata with both rapidly and slowly imposed water deficits. *Physiologia Plantarum* 121: 409–420.
- Marengo, R. A., Lopes, N. F. (2007) Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral. 2 ed. Editora UFV, Viçosa, MG. 469p.
- Marler, T.E., Mickelbart, M.V. (1998) Drought, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence of field grown papaya. *Journal of the American Society of the Horticultural Science*, Alexandria, v. 123, n.4, p.714-718.

- Martin, J. P. (1961) The anatomy of the sugarcane plant. In: Martin, J. P., Abbott, E. V., Hughes, C. G. (eds). *Sugarcane diseases of the world*. Amsterdam: Elsevier, p. 1-52.
- Martin-Vertedor, A. I., Dodd, C. I. (2011) Root-to-shoot signalling when soil moisture is heterogeneous: increasing the proportion of root biomass in drying soil inhibits leaf growth and increases leaf abscisic acid concentration. *Plant, Cell & Environment*, v. 34, l. 7, p. 1164–1175.
- Matioli, C. S., Frizzone, J. A., Peres, F. C. (1998) Irrigação complementar de cana-de-açúcar: modelo de análise de decisão para região norte do estado de São Paulo. *STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v. 17, n. 2, p. 42-45.
- Maury, P., Mojayad, F., Berger, M., Planchon, C. (1996) Photochemical response to drought acclimation in two sunflower genotypes. *Physiologia Plantarum* 98(1): p. 57-66.
- Maxwell, K., Johnson, G. N. (2000) Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *J. Exp. Bot.*, 51: p. 659-668.
- Mendonça, J. C., Freitas, R. M., Aguiar, D. A., Sousa, E. F., Muniz, R. A., Esteves, B. S. (2011) Mapeamento das áreas de cana-de-açúcar na região norte fluminense – RJ por uso de técnicas de sensoriamento remoto. *Eng. Agrícola*, Jaboticabal – SP, v. 31, n. 3, p. 561-571.
- Meyer, S., Genty, B. (1999) Heterogeneous inhibition of photosynthesis over the leaf surface of *Rosa rubiginosa* L. during water stress and abscisic acid treatment: induction of a metabolic component by limitation of CO₂ diffusion. *Planta*, 210: p. 126-131.
- Mingo, D. M., Theobald, J. C., Bacon, M. A., Davies, W. J., Dodd, I. C. (2004) Biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown under partial rootzone drying: enhancement of root growth. *Functional Plant Biology* 31, p. 971–978.
- Minolta. (1989) Chlorophyll meter SPAD-502. Instruction manual. Minolta Co., Osaka, Japan. 22p.
- Moreshet, S., Cohen, Y., Fuchs, M. (1983) Response of mature ‘Shamouti’ orange trees to irrigation of different soil volumes at similar levels of available water. *Irrigation Science* 3: p. 233–236.
- Morinson, J.I.L., Baker N.R., Mullineaux, P.M., Davies, W.J. (2008) Improving water use in crop production. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 363: p. 639–658.
- Mozambani, A. E., Pinto, A. S., Segato, S. V., Mattiuz, C. F. M. (2006) História e Morfologia da cana-de-açúcar. In: Segato, S. V., Pinto, A. S., Jendiroba, E.; Nóbrega, J. C. M. (Org.). *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba: CP 2.,. 415p.

- Mukherji A, Facon T. (2009) Revitalizing Asia's irrigation: to sustainably meet tomorrow's food needs. Colombo (Sri Lanka): *International Water Management Institute and Bangkok (Thailand): Food and Agriculture Organization*.
- Nauš, J., Prokopová, J., Řebíček, J., Špundová, N. (2010) SPAD chlorophyll meter reading can be pronouncedly affected by chloroplast movement. *Photosynth. Res.* 105: p. 265-271.
- Neufeld, H. S., Chappelka, A. H., Somers, G. L., Burkey, K. O., Davison, A. W., Finkelstein, P. L. (2006) Visible foliar injury caused by ozone alters the relationship between SPAD meter readings and chlorophyll concentration in cutleaf coneflower. *Photosynth Res* 87: p. 281–286.
- Nobel, P. S. (2004) *Physicochemical and environmental plant physiology*. Elsevier academic press, 3rd ed. Amsterdam. 563p.
- Nogueira, R. J. M. C.; Santos, R.C. (2000) Alterações fisiológicas no amendoim, submetido ao estresse hídrico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, p. 41-45.
- Nogueira, R. J. M. C.; Silva, E. C. (2002) Comportamento estomático em plantas jovens de *Schinopsis brasiliensis* Engl. cultivadas sob estresse hídrico. *Iheringia, Série Botânica*, Porto Alegre, v. 57, n. 1, p. 31-38.
- Noodén, L. D., Guiamét, J. J., John, I. (1997) Senescence mechanisms. *Physiol Plant* 101: p. 746–753.
- Ort, D. R. (2001) When There is Too Much Light. *Plant Physiology*, 125: p. 29-32.
- Ortolani, A. A., Camargo, M. B. P. (1987) Influência dos fatores climáticos na produção. In: Castro, P. C. R., Ferreira, S. O., Yamada, T. *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p. 71-81.
- Oukarroum, A., El Madidi, S., Schansker, G., Strasser, R. J. (2007) Probing the responses of barely cultivars (*Hordeum vulgare* L.) by chlorophyll a fluorescence OLKJIP under drought stress and re-watering. *Environmental and Experimental Botany*, v. 60, p. 438-446.
- Pandias, B.J., Muthukrishmanard, P., Rajasekaran, S., (1992) Efficiency of different irrigation methods and regimes in sugarcane. *Indian Sugar*, 42: p. 215-219.
- Passioura, J. B. (1997) Drought and drought tolerance. In: *Drought tolerance in higher plants*. Genetical, physiological and molecular biological analysis. Belhassen E. (ed). Kluwer Acad. Publ., Dordrecht. p. 1-5.
- Paulino, J., Folegatti, M. V., Zolin, C. A., Sánchez-Román, R. M., José, J. V. (2011) Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. *Irriga*, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163-176.

- Pearcy, R. W., Ehleringer, J. (1984). Comparative ecophysiology of C3 and C4. *Plant Cell & Environment* 7: p. 1-13.
- Peçanha, A. L. (2010) *Metabolismo fotossintético, crescimento e estado nutricional do mamoeiro (Carica papaya L.) em resposta à condutividade elétrica da solução de cultivo*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ, 131p.
- Picoli, M.C.A. (2007) *Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso usina Catanduva*. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Ministério da Ciência e Tecnologia – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP. 93p.
- Pimentel, C., Jacob Neto, J., Goi, S. R., Pessanha, G. G. (1990) Efeito do estresse hídrico em cultivares de *Phaseolus vulgaris* L., em simbiose com o *Rhizobium leguminosarum* biovar phaseoli. *Turrialba*, 40: p. 521-526.
- Pimentel, C., Hébert, G., Vieira da Silva, J. (1999) Effects of drought on O₂ evolution capacity and stomatal conductance of beans at the pollination stage. *Environ. Exp. Bot.*, 42: p. 155-162.
- Pimentel, C. Respostas fisiológicas à falta d'água: limitação difusiva ou metabólica? (2000) In: Nogueira, R. J. M. C.; Araújo, E. de L.; Willadino, L. G.; Cavalcante, U. M. T. (eds). *Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas*. Recife: UFRPE, 2005. cap. 1, p. 13-21.
- Pimentel, C. (2005) *A relação da planta com a água*. Seropédica – RJ: Edur. 191p.
- Pinheiro, C., Kehr, J., Ricardo, C. P. (2005) Effect of water stress on lupin stem protein analysed by two-dimensional gel electrophoresis. *Planta* 221: p. 716–728.
- Pires, R. C. M., Arruda, F. B., Sakai, E. (2008) Irrigação e drenagem. In: Dinardo - Miranda, L.L., Vasconcelos, A. C. M., Landell, M. G. A. (eds). *Cana-de-açúcar*. 1 ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008, v. 1, p. 631-670.
- Planalsucar. IAA. MIC (1971) *Relatório anual: 1971*. Rio de Janeiro, 50p.
- Powles, S. B. (1984) Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. *Annual Review of Plant Physiology*, 35, p. 15-44.
- Prabhu Inbaraj, M., Muthuchelian K. (2011) Photoinhibition of photosynthesis in leaves of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp. P152) under boron and high irradiance stresses. *J. Biosci. Res.* v. 2(2): p. 81-89.
- Queiroz, R. J. B. (2006) *Quantificação da trealose e da prolina livre em cana-de-açúcar sob efeito da disponibilidade hídrica do solo*. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal – SP, 56p.

- Reis, F. O., Campostrini, E., Chiquieri, T. B., Castro, F. A., Torres N, A., Santos, Martins A., Azevedo, L. C. Gomes, M. M. A. Souza, M. A. (2004) Estresse hídrico em plantas de mamoeiro Golden: efeitos estomáticos e não-estomáticos. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Fruticultura*, Florianópolis/SC (Cd-Rom).
- Rhein, A. F. L. (2008) *Atividade da redutase do nitrato e acúmulo de prolina livre em raízes de cana-de-açúcar submetidas aos estresses hídrico e ácido no solo*. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Jaboticabal – SP, 67p.
- Riccardi, F., Gazeau, P., Vienne, D., De, Zivy, M. (1998) Protein changes in response to progressive water deficit in maize. *Plant Physiology* 117: p. 1253-1263.
- Richards, J. H., Caldwell, M. M., (1987) Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia* 73: p. 486–489.
- Richards, R. A., Rebetzke, G.J., Watt, M., Condon, A.G., Spielmeje, W., Dolferus, R. (2010) Breeding for improved water productivity in temperate cereals: phenotyping, quantitative trait loci, markers and the selection environment. *Functional Plant Biology* 37, p. 85–97.
- Richter, H. (1997) Water relations of plants in the field: some comments on the measurement of selected parameters. *J. Exp. Bot.* 87: p. 1287–1299.
- Robertson, M. J., Inman-Bamber, N. G., Muchow, R. C. (1997) Opportunities for improving the use of limited water by sugarcane crop. In: Keating, B. A., Wilson, J. R. (eds). *Intensive sugarcane production: meeting the challenges beyond 2000*. Wakkubford, UK: CAB International.
- Roach, B. T., Daniels, J. A. (1987) A review of the origin and improvement of sugarcane. In: *Copersucar international sugarcane breeding workshop*. Piracicaba: Copersucar, p.1-31.
- Rodrigues, J.D. (1995) *Fisiologia da cana-de-açúcar*. Botucatu: Instituto de Bociências – Universidade Estadual Paulista, 99p. (apostila).
- Rodrigues, M. L., Santos, T., Rodrigues, A. P., et al. (2008) Hydraulic and chemical signalling in the regulation of stomatal conductance and plant water use of field grapevines growing under deficit irrigation. *Functional Plant Biology* 35: p. 565–579.
- Rosenfeld, U. (1989) *Determinação do período crítico de deficiência hídrica para a cultura da cana-de-açúcar (Saccharum spp.)*. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 88p.
- Sadras, V.O., (2009) Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta analysis. *Irrigation Science*, 27: p. 183-190.

- Sage, R. F., Pearcy, R. W. (2000) The physiological ecology of C₄ photosynthesis. Leegood, R. C., Sharkey, T. D., von Caemmerer, S. In: *Photosynthesis: physiology and metabolism*. (eds). Academic Publishers, Netherlands. p. 497-532.
- Saint Pierre, C., Trethowan, R., Reynolds, M. (2010) Stem solidness and its relationship to water-soluble carbohydrates: association with wheat yield under water deficit. *Functional Plant Biology* 37, p. 166–174.
- Samadi, A., Sepaskhah, A.R., (1984) Effects of alternate furrow irrigation on yield and water use efficiency of dry beans. *Iran Agric. Research*, 3: p. 95-115.
- Sampaio, H. R. A., Coelho Filho, M. A., Coelho, E. F., Rossini, D., Machado, V. V., Carvalho, G. C., Santana Júnior, E. B. S. (2010) Déficit hídrico e secamento parcial do sistema radicular em pomar de lima ácida. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, v. 45, n. 10, p. 1141-1148.
- Santos, C. et al. (2010) *Anuário brasileiro da cana-de-açúcar*. Editora Gazeta Santa Cruz, Santa Cruz do Sul – RS. 136p.
- Santos, M. A. L. dos, (2005) *Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (Saccharum spp): Um modelo de análise de decisão para o estado de Alagoas*. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 100p.
- Santos, R. F., Carlesso, R. (1998) Déficit Hídrico e os Processos Morfológico e Fisiológico das Plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB. 3 (2): p. 287-294.
- Santos, T. P. D, Lopes, C. M., Rodrigues, M. L., Souza, C. R. D., Maroco, J. P., Pereira, J. S., Silva, J. R., Chaves, M. M. (2003) Partial rootzone drying, effects on growth and fruit quality of field-grown grapevines (*Vitis vinifera*). *Func. Plant Biol.*, 30: p. 663-671.
- Scardua, R., Rosenfeld, U. (1987) Irrigação da cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B. (coord.). *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, v. 1, p. 373-431.
- Scarpari, M. S. (2002) *Modelo para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar através de parâmetros climáticos*. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 43p.
- Scarpari, M. S., Beauclair, E. G. F. (2008) Anatomia e botânica. In: Dinardo - Miranda, L.L., Vasconcelos, A. C. M., Landell, M. G. A. (eds). *Cana-de-açúcar*. 1 ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008, v. 1, p. 47-56.

- Scholander, P. F., Hammel, H. T., Edda, D. B., Hemmingson, E. A. (1965) Sap pressure in vascular plants Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, v. 148, p. 339-346.
- Schulze E-D., Hall A . E. (1982) Stomatal responses, water loss and CO₂ assimilation rates of plants in contrasting environments. In *Encyclopedia of Plant Physiology*, v. 12B. *Physiological Plant Ecology II*. Lange, O. L., Nobel, P. S., Osmond, C. B. (eds). Berlin, Heidelberg, New York: Springer- Verlag.
- Senyigit, U., Ozdemir, F. O. (2011) Effects of partial rootzone drying and conventional deficit irrigation on yield and quality parameters of "Williams Pride" apple cultivar drafted on M9 rootstock. *Sci. Res. Essay*, v.6 (17), p. 3776-3783.
- Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H. (2010) A review on partial rootzone drying irrigation. *Int. J. Plant Production* 4 (4): p. 241-258.
- Sepaskhah, A.R., Ghasemi, M.M., (2008) Every-other furrow irrigation with different irrigation intervals for sorghum. *Pakistan Journal of Biological Science*, 11: 9. p. 1234-1239.
- Sepaskhah, A.R., Hosseini, S.N. (2008) Effects of alternate furrow irrigation and nitrogen application rates on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, water- and nitrogen-use efficiencies. *Plant Production Science*, 11: p. 250-259.
- Sepaskhah, A.R., Khajehabdollahi, M.H., (2005).] Alternate furrow irrigation with different irrigation intervals for maize (*Zea mays* L.). *Plant Production Science*, 8: p. 592-600.
- Sepaskhah, A.R., Sichani, S.A., (1976). Evaluation of subsurface irrigation spacings for bean production. *Canadian Agricultural Engineering*, 18: p. 23-26.
- Sepaskhah, A.R., Sichani, S.A., Bahrani, B., (1976) Subsurface and furrow irrigation evaluation for bean production. *Transactions of the ASAE*, 19: p. 1089-1093.
- Shani-Dashtgol, A., Jaafari, S., Abbasi, N., Malaki, A., (2006) Effect sof alternate furrow irrigation (PRD) on yield quantity and quality of sugarcane in southern farm in Ahvaz. Proceeding of national conference on Irrigation and Drainage Networks Management. *Shahid Chamran University of Ahvaz*. 2-4: p. 565-572.
- Sharp, R.E., LeNoble, M. E. (2002) ABA, ethylene and the control of shoot and root growth under water stress. *J. Exp. Bot.*, 53: p. 33-7.
- Silva, F. de A. S. e. & Azevedo, C. A. V. de. Principal Components Analysis in the Software Assisat-Statistical Attendance. In: World Congress On Computers In Agriculture, 7, Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.
- Silva, F. de A. S. e. & Azevedo, C. A. V. de. A New Version of The Assisat-Statistical Assistance Software. In: World Congress On Computers In

- Agriculture, 4, Orlando-FL-USA: Anais... Orlando: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. p.393-396.
- Silva, F. de A. S. e. & Azevedo, C. A. V. de. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.4,n.1, p71-78,2002.
- Silva, F.de A.S.e. The ASSISTAT Software: statistical assistance. In: International Conference On Computers In Agriculture, 6, Cancun, 1996. Anais... Cancun: American Society of Agricultural Engineers, 1996. p.294-298.
- Silva, H.R., Christofidis, D., MArouelli, W. A. (2005) Situação da Irrigação no Brasil. Embrapa Hortaliças - Ministério da Integração Nacional/SIH/DDH. Disponível em:< http://www.irrigacao.org.br/artigos/Christofidis_Situacao%20da%20Irrigacao%20no%20Brasil%20Henoque%20Demetrios.pdf>.
- Silva, M. A., Soares, R. A. B., Landell, M. G. A., Campana, M. P. (2008) Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. *Bragantia*, v. 67, p. 656-661.
- Smith, M. A.; Singels, A. (2006) The response of sugarcane canopy development to water stress. *Field Crops Research*, v. 98, p. 91-97.
- Smart, D.R., Carlisle, E., Goebel, M., Nunez, B.A. (2005) Transverse hydraulic redistribution by a grapevine. *Plant, Cell and Environment* 28: p. 157–166.
- Solhaugh, K.A. and Haugen, J. (1998) Seasonal variation of photoinhibition of photosynthesis in bark from *Populus tremula* L. *Photosynth.*, 35: p. 411-417.
- Sousa, E. F; Bernardo, S.; Carvalho, J. A. (1999) Função de Produção da Cana-de-açúcar em Relação à Água para Três Cultivares, em Campos dos Goytacazes, RJ. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal – SP, v. 19, n.1, p. 28- 42.
- Souza, C. R., Maroco, J. P., Santos, T. P., Rodrigues, M. L., Lopes, C. M., Pereira, J. S., Chaves, M. M. (2005) Impact of deficit irrigation on water use efficiency and carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of field-grown grapevines under Mediterranean climate. *Journal of Experimental Botany* 56: p. 2163–2172.
- Souza, A. P. (2011) Mecanismos fotossintéticos e relação fonte-dreno em cana-de-açúcar cultivada em atmosfera enriquecida em CO_2 . Tese (Doutorado em Ciência) Universidade de São Paulo – USP, São Paulo – SP, 228p.
- Stevenson, G. C. (1965) *Genetics and breeding of sugarcane*. London: Longmans, 284p.
- Stirbet, A., Govindjee (2011) On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll a fluorescence induction) and Photosystem II: Basics and applications of the OJIP fluorescence transient. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 104: p. 236–257.

- Stoll, M.; Loveys, B.; Dry, P., (2000) Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany* 51(350): p. 1627-1634.
- Strasser, B. J., Strasser, R. J. (1995) Measuring fast fluorescence transients to address environmental questions: the JIP-test. In: Mathis, P. (Ed.), *Photosynthesis: From Light to Biosphere*, vol. V. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, p. 977–980.
- Strasser, R. J; Srivasta, A; Tsimilli-Michel, M. (2000) The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In: Yunus, M; Pathre, U; Mohanty, P. (eds), *Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation and Adaptation*. London, Taylor and Francis, p. 445 - 483.
- Strasser, R.J., Srivastava, A., Tsimilli-Michael, M. (2004) Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. In: Papageorgiou, G., Govindjee (eds.), *Advances in Photosynthesis and Respiration*. vol. 19: *Chlorophyll fluorescence: a Signature of photosynthesis*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, p. 321–362.
- Subbarao, G. V., Johansen, A. C., Slinkard, R. C., Rao, N., Saxena, N. P., Chauhan, Y. S. (1995) Strategies for improving drought resistance in grain legumes. *Cri. Rev. Plant Scie.*, 14: p. 469- 523.
- Syvertsen J. P., Lloyd J., McConchie C., Kriedemann P.E., Farquhar G. D. (1995) On the relationship between leaf anatomy and CO₂ diffusion through the mesophyll of hypostomatous leaves. *Plant, Cell and Environment* 18: p.149–157.
- Taiz, L.; Zeiger, E. (2009) *Fisiologia vegetal*. 4. ed. Porto Alegre. Artmed. 848p.
- Tang, LS, Li Y, Zhang JH (2005) Physiological and yield responses of cotton under partial rootzone irrigation. *Field Crops Res* 94:p. 214–223
- Tang, L. S., Li, Y., Zhang, J. (2010) Biomass allocation and yield formation of cotton under partial rootzone irrigation in arid zone. *Plant Soil*, 337: p. 413-423.
- Tardieu, F. (1997) Drought perception by plants. Do cells of droughted plants experience water stress. In: Belhassen, E. (ed). *Drought tolerance in higher plants: Genetical, physiological and molecular biological analysis*. Kluwer Acad. Publ., p. 15-26.
- Tardieu, F., Simonneau, T. (1998) Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental Botany* 49: p. 419-432.
- Terra de Almeida, F., Bernardo, S., Fernandes de Sousa, E., Lucio, S., Marin, D., Grippa, S. (2003) Growth and yield of papaya under irrigation. *Scientia Agricola* 60, p. 419-424.

- Teruel, D. A., Barbieri, V., Ferraro Jr., L. A. (1997) Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. *Scientia Agricola*, v. 54, n. spe, p. 39-44.
- The Royal Society (2009) *Reaping the benefits: science and the sustainable intensification of global agriculture*. RS Policy document 11/09.
- Thompson, G. D. (1976) Water use by sugarcane. *The South African Sugar Journal*, Durban, v. 60, n. 11, p. 592-600.
- Torres Netto, A., Campostrini, E., Gomes, M. M. A (2006) Efeitos do confinamento radicular nas medidas biométricas e Assimilação de CO₂ em plantas de *Coffea canephora* Pierre. *R. Bras. Agrociência*, Pelotas, v. 12, n. 3, p. 295-303.
- Torres Netto, A. (2005) *Atributos fisiológicos e relações hídricas em genótipos de mamoeiro (Carica papaya L.) na fase juvenil*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ, 116p.
- Torres Netto, A., Campostrini, E., Oliveira, J. G., Yamanishi, O. K. (2002) Portable chlorophyll meter for the quantification of photosynthetic pigments, nitrogen and the possible use for assessment of the photochemical process in *Carica papaya*. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 14(3): p. 203-210.
- Tschaplinski, T.J., Blake, T.J. (1985) Effects of root restriction on growth correlations, water relations and senescence of alder seedlings. *Physiologia Plantarum*, Lund, v.64, n.2, p.167-176.
- Turner, N. C. (1986) Adaptation to water deficits: a changing perspective. *Austr. J. Plant Physiol.* 43: p. 175- 190.
- UNICA (2004) Cana-de-açúcar: história. www.unica.com.br. Disponível em: <[http://www.portalunica.com.br/portalunica/?Secao=memoria & SubSecao=cana-deaçúcar& SubSubSecao=história&id=%20and%20id=1](http://www.portalunica.com.br/portalunica/?Secao=memoria&SubSecao=cana-dea%C3%A7%C3%BAcar&SubSubSecao=hist%C3%B3ria&id=%20and%20id=1)>
- UNICA (2009) Estatísticas do setor de cana-de-açúcar - 2009. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>
- Valentini, R., Cecchi, G., Mazzinghi, P., Scarascia Mugnozza, G., Agati, G., Bazzani, M., De Angelis, P., Fusi, F., Matteicci, G., Raimondi, V. Remote (1994). *Sensing Environment*. 47: 29p.
- Valliyodan, B.; Nguyen, H. T. (2006) Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, New York, US, v.9(2): p. 189-195.
- Varghese, S. Biofuels and Global Water Challenges. (2007) Institute for Agriculture and Trade Policy, USA. 7p. Disponível online em <http://www.tradeobservatory.org/library.cfm?refid=100547>. Capturado em 03/2008.

- Vasconcelos, A. C. M., Dinardo-Miranda, L. L. (2006) *Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematoides*. Americana: Adonis. 56p.
- Veiga, C. F. M. (2006) *Diagnostico da cadeia produtiva da cana-de-açúcar do Estado do Rio de Janeiro: relatórios de pesquisa*. Rio de Janeiro: FAPERJ, SEBRAE-RJ, 107p.
- Vidal, M. S., Carvalho, J. M. F. C., Meneses, C. H. S. G. M. (2005) *Déficit Hídrico: Aspectos Morfofisiológico*. Campina Grande - PB: Embrapa Algodão, 20p.
- Wang, Z., Liu, F., Kang, S., Jensen, C. R. (2012) Alternate partial root-zone drying irrigation improves nitrogen nutrition in maize (*Zea mays* L.) leaves. *Environmental and Exp. Botany*, 75. p. 36-40.
- White, J. W., Castillo, J. A., Ehleringer, J. (1990) Associations between productivity, root growth and carbon isotope discrimination in *Phaseolus vulgaris* under water stress. *Austr. J. Plant Physiol.*, 17: p. 189-198.
- Wise, R.R., Sparrow, D.H., Ortiz-Lopez, A., Ort, D.R. (1991) Biochemical regulation during the midday decline of photosynthesis in field-grown sunflower. *Plant Science* 74: p. 45-52.
- WRI (2005) World Resources Institute: Freshwater resources 2005. Disponível em: http://earthtrends.wri.org/pdf_library/data_tables/wat2_2005.pdf.
- Xu, W., Rosenow, D. T., Nguyen, H. T. (2000) Stay green trait in grain sorghum: relationship between visual rating and leaf chlorophyll concentration. *Plant Breed* 119: p. 365–367.
- Yamamoto, A., Nakamura, T., Adu-Gyamfi, J. J., Saigusa, M. (2002) Relationship between chlorophyll content in leaves of sorghum and pigeonpea determined by extraction method and by chlorophyll meter (SPAD-502). *J Plant Nutr* 25: p. 2295–2301.
- Yazar, A., Gökçel, F., Sezen, M. S. (2009) Corn yield response do partial rootzone drying and defici irrigation strategies applied with drip system. *Plant Soil Environ.*, 55: p. 494-503.
- Yemn, E.W., Willis, A. J. (1954) The estimation of carbohydrate in plant extracts by anthrone. *The Biochemical Journal* 57: p. 505 – 514.
- Zegbe JA, Behboudian MH, Clothier BE (2004) Partial rootzone drying is a feasible option for irrigating processing tomatoes. *Agric Water Manage* 68:p. 195–206.
- Zhang, J., Davies, W. J. (1990) Changes in the concentration of ABA in xylem sap as a function of changing soil water status will account for changes in leaf conductance. *Plant, Cell and Environment* 13, p. 277–285.
- Zhang, S. Q., Outlaw, W. H. J., Aghoram, K. (2001) Relationship between changes in the guard cell abscisic-acid content and other stress-related physiological

parameters in intact plants. *Journal of Experimental Botany*, v. 52, n. 355, p. 301-308.

Živčák, M., Brestič, M., Olšovská, K., Slamka P. (2008) Performance index as a sensitive indicator of water stress in *Triticum aestivum* L. *Plant Soil Environ.*, 54, 4: p. 133–139.

APÊNDICE

Quadro 1A. Análise do substrato de cultivo utilizado em *Saccharum* spp. sob aplicação diferenciada de água no substrato.

Identificação		pH	P *	K *	Ca	Mg	Al	H +Al	Na	C	MO	S.B.	T	t	m	V	Fe	Cu	Zn	Mn	S	B
Lab.	Int.		mg/dm ³		cmol _e /dm ³					%	g/dm ³	cmol _e /dm ³			%		mg/dm ³					
1130	.1	6.5	261	792	3.6	2.0	0.0	10.0	0.90	0.83	14.3	8.5	18.5	8.5	0	46	37.4	1.1	9.8	30.0	262.3	0.99
Cultura:		* Extrator Carolina do Norte																				
* O Laboratório só se responsabiliza pelos dados analíticos																						
Local :																						
Eng. Agr. Mauri dos Santos Manhães Responsável pelo Centro de Análises																						
S.B. = Soma de Bases		m = Saturação de Alumínio			V = Saturação de Base			T = CTC a pH 7,0			t = CTC Efetiva											
CONVERSÕES:		mg/dm ³ = ppm			cmol _e /dm ³ = meq/100 cm ³			g/dm ³ = % x 10														