

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

ORIEL TIAGO KÖLLN

**Interação entre os estresses de nitrogênio e disponibilidade hídrica
no fracionamento isotópico de ^{13}C e na produtividade em soqueira
de cana-de-açúcar**

Piracicaba
2012

ORIEL TIAGO KÖLLN

**Interação entre os estresses de nitrogênio e disponibilidade hídrica
no fracionamento isotópico de ^{13}C e na produtividade em soqueira
de cana-de-açúcar**

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Dissertação apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Ocheuze Trivelin

Piracicaba

2012

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Kölln, Oriel Tiago

Interação entre os estresses de nitrogênio e disponibilidade hídrica no fracionamento isotópico de ^{13}C e na produtividade em soqueira de cana-de-açúcar / Oriel Tiago Kölln; orientador Paulo Cesar Ocheuze Trivelin. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.

102 p.: il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Água do solo 2. Biomassa 3. Crescimento vegetal 4. Irrigação por gotejamento 5. Isótopos estáveis 6. Latossolo 7. Nutrientes minerais do solo
I. Título

CDU (542.48 + 546.17) : 633.61

À minha esposa **Catarinie**, que eu AMO TANTO,
pelo estímulo cumplicidade, companheirismo,
amizade, carinho, e o amor incondicional,
em todos os momentos dessa jornada.
E por saber que estarás sempre ao meu lado.

DEDICO

Ao meu herói, meu pai **Paulo**,
pelo caráter, pelos ensinamentos
e pelos esforços que fez, que faz,
para eu ser o que eu sou.

À minha amorosa mãe **Helenice**,
pelo amor, afeto e dedicação para
tornar meus sonhos realidade.

Às minhas irmãs **Aline e Raquel**,
pelo apoio, carinho e incentivo em
todos os momentos da minha vida.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A **Deus** pela vida e por estar sempre presente em todos os momentos.

Ao Professor Dr. Paulo Cesar Ocheuze Trivelin, pela excelente orientação, pelo importante treinamento, amizade e grande esforço para realização deste trabalho.

Ao Pesquisador Dr. Glauber José de Castro Gava, por acreditar em mim, pela amizade, por me trazer até o CENA, pelo apoio, confiança, e por todos ensinamentos nesses três anos de convivência.

Ao Pesquisador Dr. Heitor Cantarella pela ajuda financeira, idéias inovadoras, e por compartilhar tamanha experiência.

Ao CENA/USP em especial ao laboratório de Isótopos Estáveis pelo ensino, suporte técnico e pessoal fundamental nessa dissertação.

À Agência Paulista de Tecnologias dos Agronegócios – APTA de Jaú/SP, por toda infra-estrutura e apoio imprescindível na realização deste trabalho.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear - pela concessão de bolsas de estudos de abril de 2010 a março de 2012.

A empresa Netafim, pela montagem do sistema de irrigação e dos seus Engenheiros: Daniel Pedroso, Yoram Krontal e Eli Vered.

Ao Grupo Raízen, Unidade de Barra Bonita, pelo suporte logístico e dos seus Engenheiros: Sebastião dos Santos Ribeiro, Rodrigo Rodrigues Vinchi e Cassio Paggiaro.

A UNICENTRO pela sólida formação e importante contribuição em minha carreira.

Ao Professor Dr. Marcelo Marques Müller, por me ensinar o caminho na iniciação científica, pela amizade e exemplar orientação.

Aos meus colegas de Pós-Graduação e amigos que sempre lembrarei Eduardo Mariano, José Marcos Leite, João José de Miranda Milagres, Murilo Impulcetto Monteiro de Moraes, Rafael Otto, Henrique Junqueira Franco, Danilo Ferreira, Michele Xavier Vieira, Emídio Cantídio Almeida de Oliveira, Diego Vendramini, Carlos Santana pela convivência, troca de experiências, colaboração, ajuda e por partilhar conhecimento.

Aos colegas do laboratório de Isótopos Estáveis Professores José Albertino Bendassolli (sinônimo de alegria), aos funcionários Hugo, Bento, Miguel, Clélber, Magda, Juliana, Glauco, e José (Pingin) e aos estagiários Axadô, Arface, Caio, Djama, Ispanô, Leandro, Laranja, Ludmila, Mega, Stefânia e Thiago pelo auxílio e saudável convívio que torna o trabalho mais fácil.

À equipe da APTA Jaú/SP Pesquisadores Elisângela, Marcelo, Juliana, Samira pela contribuição. Aos funcionários João, Ezequiel, Silmara, Edilson, Nico, Zelão e Antonio Carlos em especial ao Valdir, pela importante colaboração no desenvolvimento dos experimentos. Aos doutorandos, mestrandos e estagiários: grande Raul, Paula, Silvia, em especial Andressa, Marcel, e Willian pela enorme ajuda, amizade e apoio na realização deste trabalho.

Aos amigos do Instituto Agrônomo de Campinas - IAC Vitor, Johnny, Hélio, Zaqueu e Zé Luís pela troca de experiências e apoio.

Enfim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma contribuíram na realização dessa importante etapa da minha vida.

MUITO OBRIGADO!

“O gênio é um por cento
de inspiração e noventa
e nove por cento
de transpiração”

Thomas Edison

RESUMO

KÖLLN, O. T. **Interação entre os estresses de nitrogênio e disponibilidade hídrica no fracionamento isotópico de ^{13}C e na produtividade em soqueira de cana-de-açúcar.** 2012. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

A cana-de-açúcar tem significativa importância nas regiões tropicais e subtropicais do mundo. O Brasil tem importância mundial como maior produtor de cana-de-açúcar, etanol e açúcar, no entanto, a produtividade da cultura ainda é baixa em muitas regiões do país, principalmente devido à deficiência hídrica e de nitrogênio. Estimar as perdas de produtividade causada por estresse hídrico e de N com métodos de experimentação convencionais nem sempre apresentam resultados satisfatórios. Este trabalho teve como objetivos quantificar em cana-de-açúcar fertirrigada com doses crescentes de N-fertilizante e duas disponibilidades hídricas contrastantes, os estresses a N (deficiência ou excesso) e o déficit hídrico por meio do fracionamento isotópico de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) e da produtividade de cana-de-açúcar, assim como, correlacionar o $\Delta^{13}\text{C}$ com o acúmulo de massa seca de colmos nos tratamentos com e sem aplicação de N e em duas disponibilidades de água no solo (regime irrigado e de sequeiro); quantificar acúmulo de matéria seca em três compartimentos da planta (folha seca, ponteiro e colmo), correlacionando os resultados obtidos com avaliações fisiológicas como índice SPAD, IAF e biométricas como altura, diâmetro, perfis ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. O estudo foi desenvolvido no município de Jaú, no Estado de São Paulo, nas coordenadas geográficas de: 22°17'S 48°34'O, em Latossolo Vermelho. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com quatro repetições. O cultivar de cana-de-açúcar foi o SP80-3280. Utilizou-se quatro doses de N, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹, aplicadas por fertirrigação subsuperficial e mais um tratamento controle sem N, para estimar acúmulo de fitomassa e de N na parte aérea de cana-de-açúcar. Para quantificar as perdas de produtividade causadas por deficiência hídrica e de N foram usados os tratamentos: T1-sequeiro não fertilizado com N; T2-irrigado não fertilizado com N; T3-sequeiro e fertilizado com N; e T4-irrigado e fertilizado com N. Foi verificada resposta linear das variáveis fisiológicas,

morfológicas e da produção de biomassa da cultura em função das doses de N. O teor de N e índice Spad da folha +1 ajustaram-se ao modelo linear decrescente. A elevação da dose de N de 100 para 200 kg ha⁻¹ N aumentou o acúmulo de matéria seca da parte aérea em 20 Mg ha⁻¹, e de N em 95 kg ha⁻¹, incrementos também observados nas taxas de produção matéria seca e taxas de acúmulo de N. O $\Delta^{13}\text{C}$ (‰) apresentou correlação negativa com a produtividade de colmos ($R^2= 0,69$, $p<0,05$) e a MSPA ($R^2= 0,69$, $p<0,05$) nas diferentes doses de N aplicadas. Verificou-se aumento linear na produtividade de colmos e de açúcar com um incremento respectivamente de 60 e 8 Mg ha⁻¹ em função das doses de N aplicadas junto à irrigação. Os maiores valores de fracionamento dos isótopos de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) foram obtidos para o tratamento com deficiência de N e elevado déficit hídrico (T1), enquanto que para o tratamento T4 (adubação com N e baixo déficit hídrico) foram verificados valores de $\Delta^{13}\text{C}$ inferiores. A medida do fracionamento isotópico de carbono mostrou-se eficiente na avaliação de estresse da cana-de-açúcar, podendo ser utilizado como um indicador de déficit hídrico e deficiência de N nessa cultura.

Palavras-chave: *Saccharum* sp. Disponibilidade hídrica. $\Delta^{13}\text{C}$. Doses de N.

ABSTRACT

KÖLLN, O. T. **Interaction between nitrogen and water availability over isotopic discrimination of ^{13}C and ratoon sugarcane production.** 2012. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

The sugarcane crop has an important contribution in sub tropical and tropical regions around the world, which Brazil the major producer of sugarcane crop, sugar and ethanol. However, the sugarcane yield is still very low in many regions of this country, mainly due to water stress and nitrogen supply. Understand the loss sugarcane production related with water and nitrogen stress using experimental classical methodology not always has obtained conclusive results. This work has evaluated the impact of water and nitrogen (N) stress by discrimination of ^{13}C ($\Delta^{13}\text{C}$) and sugarcane production in a ratoon over fertirrigation system, where 2 water supply and 5 N level were applied. The results of isotopic technique ($\Delta^{13}\text{C}$) were correlated with a several parameters like sugarcane production, biomass accumulation (tops, stalks and dry leaves), and, others physiologic parameters (SPAD index, foliar area, diameter, tillering and height) evaluated throughout crop cycle. The research was performed in Jaú county, São Paulo State, Brazil (22°17'S 48°34'O), over Rhodic Eutrudox condition. The randomized block design was used with 4 replication per treatment. The sugarcane cultivar SP80-3280 was submitted a 5 N rates (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ N) which were applied by fertirrigation system. Further, 4 treatments were used to estimate the N and water stress, such as: T1- without water irrigation and N application; T2 – water irrigation without N supply; T3 - without water irrigation but with N application; T4 – with water irrigation and N fertilization. The results showed linear increase in physiologic, morphologic parameters and biomass production related N rates applied. The N content and SPAD index of leaf +1 correlated a linear decreasing model. The elevation of dose of 100 to 200 kg N ha⁻¹ no increased dry matter accumulation of aboveground in 20 Mg ha⁻¹, and N in 95 kg ha⁻¹, increments also observed in dry matter production rates and rates of accumulation of N. The data of ^{13}C ($\Delta^{13}\text{C}$) had a negative correlation between sugarcane production ($R^2= 0.69$, $p<0.05$) and biomass ($R^2= 0.69$, $p<0.05$) and N

rates. Verified an increase linear in productivity of stalks and sugar with an increment respectively of 60 and 8 Mg ha⁻¹ as a function of applied doses of N along the irrigation. The higher value of ¹³C ($\Delta^{13}\text{C}$) were observed when took place N and water stress (T1), whilst the treatment with N application and water irrigation (T4) showed the lowest value of ¹³C discrimination ($\Delta^{13}\text{C}$). The ¹³C discrimination ($\Delta^{13}\text{C}$) was efficient to evaluate stress in sugarcane crop, can be used as an indicator of water deficit and deficiency of N to in this culture.

Keywords: *Saccharum* sp. Water stress. $\Delta^{13}\text{C}$. N rates.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
REFERÊNCIAS	18
2 ACÚMULO DE BIOMASSA E DE NITROGÊNIO EM SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR NO MANEJO IRRIGADO COM DIFERENTES DOSES DE N	21
2.1 INTRODUÇÃO	23
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	25
2.2.1 Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental	25
2.2.2 Espaçamento e manejo da irrigação	26
2.2.3 Avaliações realizadas	28
2.2.4 Análises dos resultados	29
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
2.3.1 Biometria	31
2.3.2 Parâmetros fisiológicos	35
2.3.3 Acúmulo de fitomassa	41
2.3.4 Acúmulo de N na parte aérea de cana-de-açúcar	46
2.4 CONCLUSÕES	48
Referências	48
3 FRACIONAMENTO DOS ISÓTOPOS ESTAVEIS DE CARBONO E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR FERTIRRIGADA COM DOSES DE N	54
3.1 INTRODUÇÃO	56
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	58
3.2.1 Caracterização da área experimental tratamentos e delineamento	58
3.2.2 Espaçamento e manejo da irrigação	59

3.2.3 Avaliações realizadas e análise estatística.....	61
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
3.3.1 Produtividade de colmos e açúcar.....	63
3.3.2 Fracionamento isotópico de carbono.....	67
3.3.3 Qualidade tecnológica.....	69
3.4 CONCLUSÕES.....	71
Referências.....	71
4 PERDA DE PRODUTIVIDADE EM CANA-DE-AÇÚCAR POR DEFICIÊNCIA HÍDRICA E DE NITROGÊNIO.....	75
4.1 INTRODUÇÃO.....	77
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	79
4.2.1 Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental.....	79
4.2.2 Caracterização climática e manejo da irrigação.....	81
4.2.3 Avaliações.....	83
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	86
4.3.1 A interação entre água e nitrogênio na produtividade, no acúmulo de matéria seca de colmos, nitrogênio e no fracionamento isotópico de carbono em cana-de-açúcar.....	86
4.3.2. Perda de produtividade da cana-de-açúcar por deficiência hídrica e de nitrogênio, relacionada com o acúmulo de matéria seca dos colmos e o fracionamento isotópico de carbono.....	93
4.4 CONCLUSÕES.....	96
Referências.....	96
APÊNDICES.....	100

1 INTRODUÇÃO

O cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) tem grande importância no cenário socioeconômico brasileiro, principalmente para a produção de açúcar e etanol (WIEDENFELD; ENCISO, 2008). Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar; sendo que na safra 2010/2011 a área cultivada da cultura alcançou 8,0 milhões de hectares, com produção estimada em 625 milhões de toneladas (CONAB, 2011). O Estado de São Paulo é o maior produtor do país, representando aproximadamente 57% do total produzido (CONAB, 2011). As perspectivas para esse segmento do agronegócio são de crescimento, principalmente devido ao aumento da frota nacional de carros bicompostíveis e ao incremento da demanda mundial por etanol hidratado, uma vez que esse combustível apresenta um equilíbrio potencialmente positivo na produção de energia a partir da cana-de-açúcar (RENOUF et al., 2008; SMEETS et al., 2009).

A água é uma substância essencial para a produção vegetal, pois tanto a falta quanto o excesso prejudicam o crescimento e desenvolvimento das plantas (NILSEN; ORCUTT, 1996). O déficit hídrico não é limitado apenas às regiões áridas e semi-áridas do mundo (CLAY et al., 2005), pois mesmo em regiões consideradas climaticamente úmidas a distribuição irregular das chuvas pode, em alguns períodos, limitar o crescimento das culturas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Para a cana-de-açúcar, os períodos em que o déficit hídrico pode resultar em maiores danos à produtividade da cultura são nos estádios de perfilhamento e de grande crescimento (RAMESH, 2000). Nesses estádios, mesmo uma pequena redução na disponibilidade de água do solo pode afetar tanto a divisão celular quanto o alongamento celular em cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). A condição de escassez hídrica ocasiona redução de trocas gasosas - especialmente de gás carbônico (CO_2) - e sua condução para as folhas, reduzindo a produção de fotossimilados (FARQUHAR et al., 1988; LOPES, 1988; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Com isso, ocorre diminuição da área foliar e, conseqüentemente, do índice de área foliar (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; SMIT; SINGELS, 2006; FARIAS et al., 2008), tendo em vista que este índice associa-se à quantidade de luz absorvida e à fotossíntese total da cana-de-açúcar (IRVINE,

1975). Dessa forma, há redução no surgimento de novas folhas e aumento da abscisão foliar (SMIT; SINGELS, 2006), devido à elevação da concentração de ácido abscísico na planta (KRAMER, 1983). A falta de disponibilidade de água às culturas em condições de campo é difícil de ser avaliada porque uma determinada quantidade de água que entra no agroecossistema nem sempre é aproveitada pela planta, podendo ser perdida por evaporação, escoamento superficial ou drenagem.

Com relação ao nitrogênio, a cana-de-açúcar apresenta resposta pronunciada na produção de fitomassa com o aumento de seu teor na planta (BOLTON; BROWN, 1980). Além dessa característica, a cana-de-açúcar é uma planta do ciclo fotossintético C_4 , que em comparação às plantas C_3 produz duas vezes mais matéria seca por unidade de N presente na folha (BLACK et al., 1978). O arranjo espacial da estrutura fotossintética das plantas C_4 as torna mais eficiente que as C_3 na fixação do carbono (C) atmosférico. A maior afinidade da enzima fosfoenol piruvato-carboxilase (PEPC) pelo CO_2 aumenta a concentração desse gás nos feixes da bainha vascular, aumentando a fixação de CO_2 e suprimindo a de O_2 para enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCo) (MEINZER; ZHU, 1998). Entretanto, este aumento da eficiência na fixação do C em plantas C_4 representa um gasto adicional em termos de consumo de ATP nas folhas, para manutenção e regeneração da PEPC (FARQUHAR, 1983).

São muitos os trabalhos encontrados na literatura que indicaram a importância do N na cultura da cana-de-açúcar (GAVA et al., 2010; FRANCO et al., 2011, VITTI et al., 2011). Este nutriente se encontra em cerca de 1% da massa seca total da planta, mas sua deficiência causa a redução na síntese de clorofila, de aminoácidos essenciais e da energia necessária à produção de carboidratos e esqueletos carbônicos, refletindo diretamente no desenvolvimento e rendimento da cultura (RANJITH et al., 1995; MEINZER; ZHU, 1998; EPSTEIN; BLOOM, 2004). A deficiência de N também reduz drasticamente a capacidade fotossintética da cana-de-açúcar, pois as atividades da PEPC e da RuBisCo são diretamente afetadas na carência do nutriente (RANJITH, et al., 1995; MEINZER; ZHU, 1998). Segundo Ranjith et al. (1995), o N é o maior componente das duas enzimas contidas nos tilacóides, onde cerca de 60% do N acumulado nas folhas estão associados com as referidas enzimas.

Uma possível forma de se avaliar o estresse hídrico e de N em plantas é a determinação do fracionamento isotópico dos isótopos de C (^{12}C e ^{13}C), avaliada nas folhas de plantas (SMELTEKOP et al., 2003). O fracionamento isotópico ocorre porque existem na natureza apenas dois isótopos estáveis do C, o ^{13}C de ocorrência mais rara (cerca de 1,1% do total), e o ^{12}C que representa 98,9% do total. Esses isótopos de C, na forma de CO_2 , são fixados nos tecidos das plantas de forma diferenciada (FARQUHAR et al., 1989), pois nos processos biológicos e físicos há leve preferência pelo CO_2 constituído do isótopo de menor massa atômica ($^{12}\text{CO}_2$). O $^{12}\text{CO}_2$ com menor massa molecular que o $^{13}\text{CO}_2$ se difunde mais rapidamente na câmara estomática. Desse modo, as enzimas assimilam mais facilmente o $^{12}\text{CO}_2$ em condições de ambiente não estressante.

A determinação do $\Delta^{13}\text{C}$ em plantas, e sua relação com o estresse ao N e o rendimento da fotossíntese das culturas de ciclo C_4 , foram obtidos para as culturas de milho (CLAY et al., 2005), sorgo (HUBICK et al., 1990), e cana-de-açúcar (RANJITH et al., 1995; MEINZER; ZHU, 1998).

Segundo Clay (2001), apesar da importância do estresse hídrico, experimentos em condições de campo não avaliam a interação entre estresse hídrico, deficiências nutricionais de N, e a produtividade das culturas. Uma possível forma de avaliar esta interação é utilizar a técnica da discriminação isotópica de $\Delta^{13}\text{C}$, pois esta metodologia se constitui em uma medida indireta e integradora de resposta fisiológica da planta aos estímulos (positivos e negativos) do ambiente.

Diante do exposto é possível formular as seguintes hipóteses: i) a determinação do fracionamento isotópico de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) é capaz de quantificar os estresses provenientes da água e N em plantas de cana-de-açúcar cultivadas em condições de campo; ii) a aplicação parcelada de N por meio de gotejamento subsuperficial influencia no desenvolvimento da cana-de-açúcar, reduzindo o estresse hídrico e deficiência de N; e iii) o estresse hídrico e de N diminuem a produtividade de colmos mais em relação à deficiência isolada de N.

Portanto, o presente estudo teve como objetivos:

a) Avaliar em cana-de-açúcar fertirrigada com doses crescentes de N-fertilizante os estresses a N (deficiência ou excesso) e a disponibilidade hídrica por meio do fracionamento isotópico de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) e da produtividade de cana-de-açúcar;

- b) Quantificar acúmulo de matéria seca em três compartimentos da planta (folha seca, ponteiro e colmo), correlacionando os resultados obtidos com avaliações fisiológicas como índice SPAD, IAF e biométricas como altura, diâmetro, perfilhos ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura;
- c) Correlacionar o $\Delta^{13}\text{C}$ com o acúmulo de fitomassa da parte aérea da cana-de-açúcar nos tratamentos com estresse à N e em duas disponibilidades contrastantes de água no solo (regime irrigado e de sequeiro).

Os resultados experimentais deste trabalho de dissertação mestrado serão apresentados em três capítulos, a saber:

1. Acúmulo de biomassa e de nitrogênio em soqueira de cana-de-açúcar no manejo irrigado com diferentes doses de N;
2. Fracionamento dos isótopos estáveis de carbono e produtividade de cana-de-açúcar fertirrigada com doses de N;
3. Perda de produtividade em cana-de-açúcar por deficiência hídrica e de nitrogênio.

REFERÊNCIAS

BLACK, E. C.; BROWN, R. C.; MOORE, R. C. Plant photosynthesis. In: DOBEREINER, J.; BURRIS, R. H.; HOLLAENDER, A. (Ed.). **Limitations and potentials for biological nitrogen fixation in the tropics**. New York: Plenum, 1978. p.95-110.

BOLTON, J. K.; BROWN, R. H. Photosynthesis of grass species differing in carbon dioxide fixation pathways. V. Response of *Panicum maximum*, *Panicum milioides* and tallfescue (*Festuca arundinacea*) to nitrogen nutrition. **Plant Physiology**, Chicago, v. 66, p. 97-100, 1980.

CLAY, D. E.; CLAY, S. A.; LIU, Z.; and REESE, C. Spatial variability of C-13 isotopic discrimination in corn (*Zea mays*). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, p. 1813-1827, 2001.

CLAY, D. E.; CLAY, S. A.; LYON, D. J.; BLUMENTHAL, J. M. ^{13}C discrimination in corn grain can be used to separate and quantify yield losses due to water and nitrogen stresses. **Weed Science**, Ithaca, v. 53, p. 23-29, 2005.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO - CONAB. **Levantamentos de safras**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>>> Acesso em: 10 set. 2011.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. Sunderland: Sinauer Associates, 2004. 400 p.

FARIAS, C. H.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M.; DANTAS, J. N. 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, 2008.

FARQUHAR, G. D. On the nature of carbon isotope discrimination in C₄ species. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 10, p. 205-26, 1983.

FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K. T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis, **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 40, p. 530–537 1989.

FARQUHAR, G. D.; HUBICK, K. T.; CONDON, A. G.; RICHARDS, R. A. Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency. In: RUNDEL, P. W.; EHLERINGER, J.; NAGY, K. A. (Ed.). **Stable isotopes in ecology**. Berlin: Springer-Verlag, 1988. p. 21-40.

FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer in Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, p. 29-41, 2011.

GAVA, G. J. C.; KÖLLN, O. T.; URIBE, R. A. M.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H. Interação entre água e nitrogênio na produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.). In: CRUSCIOL, C. A. (Org.). **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. 1. ed. Botucatu: FEPAF, 2010. v. 1, p. 49-66.

HUBICK, K. T.; HAMMER, G. L.; FARQUHAR, G. D.; WADE, L. J.; VON CAEMMERER, S.; HENDERSON, S. A. Carbon isotope discrimination varies genetically in C₄ species. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 91, p. 534-537, 1990.

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

IRVINE, J. E. Relations of photosynthetic rates and leaf and canopy characters to sugarcane yield. **Crop Science**, Madison, v. 15, p. 671-676, 1975.

KRAMER, P. J. **Water relations of plants**. New York: Academic Press, 1983. 489p.

LOPES, B. F.; SETER, T. L.; MCDAVID, C. R. Photosynthesis and water vapor exchange of pigeonpea leaves in response to water deficit and recover. **Crop Science**. Madison, v. 28, p. 141-145, 1988.

MEINZER, F. C.; ZHU, J. Nitrogen stress reduces the efficiency of the C4 CO₂ concentrating system, and therefore quantum yield, in *Saccharum* (sugarcane) species. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, p. 1227-1234, 1998.

NILSEN, E. T.; ORCUTT, D. M. **The physiology of plants under stress**. New York: John Wiley & Sons, 1996. 689 p.

RAMESH, P. Effect of Different Levels of Drought during the Formative Phase on Growth Parameters and its Relationship with Dry Matter Accumulation in Sugarcane, **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 185, p. 83-89, 2000.

RANJITH, S. A.; MEIZER, F. C.; PERRY, M. H.; THOM, M. Partitioning of carboxylase activity in nitrogen-stressed sugarcane and its relationship to bundle sheath leakiness to CO₂, photosynthesis and carbon isotope discrimination. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 22, p. 903-911, 1995.

RENOUF M. A.; WEGENER M. K.; NIELSEN L. K. An environmental life cycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 32, p. 1144–1155, 2008.

SMEETS, E. M. W.; BOUWMANW, L. F.; STEHFEST, E.; VAN VUUREN, D. P.; POSTHUMA, A. Contribution of N₂O to the greenhouse gas balance of first generation biofuels. **Global Change Biology**, Oxford, v. 15, p. 1–23, 2009.

SMELTEKOP, H.; CLAY, D. E.; CLAY, S. A. The impact of intercropping annual sava snail medic on corn production. **Agronomy journal**, Madison, v. 94, 2003.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 91-97, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2004. 719 p.

VITTI, A. C.; FRANCO, H. C. J; TRIVELIN, P. C. O.; FERREIRA, D. A.; OTTO, R.; FORTES, C.; FARONI, C. E. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, p. 287-293, 2011.

WIEDENFELD, B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid south texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 665-671, 2008.

2 ACÚMULO DE BIOMASSA E DE NITROGÊNIO EM SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR NO MANEJO IRRIGADO COM DIFERENTES DOSES DE N

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura de clima tropical e subtropical que se destaca por produzir elevadas quantidades de açúcar e etanol. A análise mais detalhada do crescimento da cana-de-açúcar permite aprimorar algumas práticas de manejo, inclusive a adubação, uma das mais importantes para a cultura. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar o acúmulo de biomassa e de N da parte aérea da cana-de-açúcar fertirrigada (gotejamento subsuperficial) com doses de N-fertilizante ao longo do ciclo de crescimento de uma soqueira (cultivar SP80-3280), correlacionando-a com medidas biométricas e fisiológicas da planta. O experimento foi desenvolvido no município de Jaú São Paulo, em Latossolo Vermelho. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições a saber: quatro doses de N: 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N mais um tratamento controle sem aplicação de N. Foram realizadas avaliações temporais aos, 38, 121, 208, 291 e 381 dias após a colheita para determinação das medidas fisiológicas, morfológicas e acúmulo de matéria seca. Foi verificada resposta linear das variáveis fisiológicas, morfológicas e da produção de biomassa da cultura em função das doses de N. O teor de N e índice Spad da folha +1 ajustaram-se ao modelo linear decrescente. A elevação da dose de N de 100 para 200 kg ha⁻¹ N aumentou o acúmulo de matéria seca da parte aérea em 20 Mg ha⁻¹, e de N em 95 kg ha⁻¹, incrementos também observados nas taxas de produção matéria seca e taxas de acúmulo de N. Conclui-se que, as doses de N-fertilizante aplicadas por gotejo subsuperficial modificaram as variáveis fisiológicas (índice SPAD, índice de área foliar, teor de N na folha +1) e biométricas (altura, diâmetro, número de perfilhos) da cana-de-açúcar. A adubação nitrogenada aplicada por gotejamento subsuperficial elevou o acúmulo de massa seca da parte aérea e de N da cana-de-açúcar, assim como a taxa de produção de matéria seca e taxa de acúmulo de N.

Palavras-chaves: análise de crescimento, índice spad, IAF, teor de N na folha +1, altura, diâmetro.

ABSTRACT

The sugarcane crop outstands by producing high amounts of biomass and to have a balance of energy in the ethanol production satisfactory. A more detailed growth analysis of sugarcane allows you to improve some management practices, including the fertilization, one of the most important for the crop. Therefore, the aim of this study was to evaluate the accumulation of biomass and N of the shoot of sugarcane fertirrigada (subsurface drip) at doses of N-fertilizer throughout the growth cycle of ratoon (cultivar SP80-3280), correlating it with plant physiological and biometric measures. The experiment was carried out in Jaú, SP Rhodic Eutrudox. The experimental design used randomized blocks, with five treatments and four replications as follows: four doses of N: 100, 50, 150 and 200 kg ha⁻¹ de N more a control treatment without application of N. Evaluations temporal were performed the,38, 121, 208, 291 and 381 days after harvest for determination of physiological, morphological measures, and dry matter accumulation. There was a significant linear response to physiological variables, morphological and dry matter production with increasing dose of nitrogen applied. The N content and leaf SPAD an index set to the decreasing linear model. The elevation of dose of 100 to 200 kg N ha⁻¹ no increased dry matter accumulation of aboveground in 20 Mg ha⁻¹, and N in 95 kg ha⁻¹, increments also observed in dry matter production rates and rates of accumulation of N. It is concluded that the doses of N-fertilizer applied by drip surface physiological and biometric variables changed and sugar cane. The nitrogen fertilization applied by drip surface upped the MSPA and the N in the shoots sugarcane, as well as the dry matter production rates and N accumulation rate.

Key-Words: analysis of growth, spad index, IAF, N content leaves +1, height, diameter.

2.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) tem significativa importância nas regiões tropicais e subtropicais do mundo, principalmente para a produção de açúcar e etanol. Recentemente, a cultura está ganhando interesse global como produtora de matéria-prima para produção de energia, pois o seu balanço energético é potencialmente positivo (RENOUF et al., 2008; SMEETS et al., 2009). O Brasil desempenha importante papel neste setor, destacando-se como maior produtor mundial de cana-de-açúcar (FAO, 2011).

A cana-de-açúcar é uma cultura tropical e subtropical que produz uma grande quantidade de biomassa, requerendo entradas substanciais de água e N para alcançar elevadas produtividades (WIEDENFELD, 2000). No entanto, a produtividade da cultura da cana-de-açúcar em algumas regiões do país ainda é baixa em função de uma série de fatores que reduzem o seu desenvolvimento, tais como: deficiência hídrica e de N (WIEDENFELD, 1995; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; GAVA et al., 2010, GAVA et al., 2011); quantidade de fertilizantes aplicados (THORBURN et al., 2003); a escolha do cultivar; idade de corte, tipo de solo e clima (RAMESH; MAHADEVASWAMY, 2000; SMIT; SINGELS, 2006).

Korndörfer et al. (2002), enfatizou que a adubação nitrogenada da cana-de-açúcar é uma das práticas culturais de maior demanda por pesquisas para essa cultura, pois os estudos sobre o nitrogênio apresentam resultados muito variáveis e até contraditórios no manejo de sequeiro. Outro fator relevante sobre as pesquisas com N, é a forma de avaliação, quase sempre realizada na colheita final, sendo que poucos trabalhos avaliam a produção de fitomassa durante o ciclo de crescimento da cultura. Nesses casos, a resposta à adição de N pode ser mascarada por fatores ambientais como o déficit hídrico (FRANCO, 2008).

Diferente do manejo de sequeiro a cana-de-açúcar irrigada apresenta elevada resposta à adubação nitrogenada. Thorburn et al. (2003); Ng Kee Kwong et al. (1999) estudando a importância da irrigação e aplicação de N em cana-de-açúcar, observaram aumento da produtividade com a utilização destas práticas de manejo. Ng Kee Kwong e Deville (1994) constataram que a eficiência de utilização do N-fertilizante aumentou quando a fertilização foi feita por fertirrigação na cultura da

cana-de-açúcar. Singh e Mohan (1994) demonstraram haver grande interação entre doses de N e a quantidade de água aplicada na cultura. No manejo de irrigação plena com 100% da evapotranspiração, esses pesquisadores obtiveram uma produtividade (média de três cortes) de 66 Mg ha⁻¹ na ausência de fertilização nitrogenada, de 77 Mg ha⁻¹ com uma dose de 100 Mg ha⁻¹ de N, e de 90 Mg ha⁻¹ para as doses de 200 e 300 kg ha⁻¹ de N.

A análise do crescimento da cana-de-açúcar permite aprimorar algumas práticas de manejo, inclusive uma das mais importantes, a adubação (GAVA et al., 2001). Essa análise pode ser feita realizando-se amostragens temporais de biomassa da parte aérea ou por meio de índices fisiológicos e biométricos quantificados ao longo do ciclo de crescimento da cultura. Os parâmetros biométricos são importantes para experimentos em condições de campo, pela possibilidade de se obter informações do desenvolvimento das plantas. O desenvolvimento da parte aérea da cana-de-açúcar pode ser dividido em três etapas: fase inicial, em que o crescimento é lento; fase de crescimento rápido, com surgimento e alongamento de internódios dos colmos, em que se acumulam cerca de 75% da matéria seca; e fase final, ou de maturação (ROBERTSON et al., 1996; GAVA et al., 2001; INMAN-BAMBER et al., 2002; FRANCO, 2008; FARONI, 2008; OLIVEIRA, 2011). Entretanto, Gascho (1985) considerou a existência de quatro períodos distintos, compreendendo a brotação após o corte, perfilhamento, fase de grande crescimento, e maturação.

O manejo da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento apresenta algumas características distintas dos cultivos de sequeiro, em que não há fornecimento suplementar de água. Nesse sistema, ocorre no solo, no sulco de plantio, uma região de alta umidade que possui intensa atividade de microrganismos e alta concentração do sistema radicular da cultura, chamada de bulbo úmido (THORBURN et al., 2003). O manejo de fertirrigação por gotejamento mostra-se benéfico para as plantas, pela possibilidade de fornecimento dos fertilizantes em pequenas doses ao longo do ciclo de cultivo aumentando a absorção e favorecendo o aproveitamento do N do fertilizante (SINGH; MOHAN, 1994; NG KEE KWONG et al., 1999), por apresentar um sincronismo maior de disponibilização e absorção de nutrientes para as plantas.

Pelo exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar o acúmulo de biomassa e de N da parte aérea da cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial, com doses de N-fertilizante ao longo do ciclo de crescimento de uma soqueira (cultivar SP80-3280), correlacionando-a com medidas biométricas e fisiológicas da planta.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental

Desenvolveu-se um experimento na Unidade da APTA Centro Oeste, no município de Jaú, Estado de São Paulo, situado na localização geográfica: 22°17'S 48°34'O, com altitude média de 580 m em relação ao nível do mar. O estudo foi realizado numa terceira soqueira de cana-de-açúcar (safra 2009/2010). O cultivar utilizado foi o SP80 3280, por apresentar boa produtividade em soqueiras, baixa redução de produtividade ao longo dos cortes (média de 6%), crescimento inicial vigoroso, bom perfilhamento e fechamento das entrelinhas; alto teor de fibra e sacarose (COPERSUCAR, 1997).

O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho (Embrapa, 2006), cujas características químicas e físicas das camadas de 0-25 e 25-50 cm estão descritas na Tabela 2.1.

Os tratamentos foram quatro doses de N-fertilizante (50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), além de um tratamento controle, sem N, em delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. As doses de N foram aplicadas na forma de uréia, duas vezes por semana, em fertirrigação por gotejamento subsuperficial. Cada período do ciclo recebeu uma porcentagem da dose conforme o estágio de desenvolvimento das plantas. Quatro meses antes da colheita foi interrompida a aplicação de fertilizante nitrogenado, na fase correspondente a maturação da cana-de-açúcar (Figura 2.1). Todos os tratamentos receberam 150 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio, distribuído ao longo do ciclo, sendo interrompida essa aplicação três meses antes da colheita (Figura 2.1).

Tabela 2.1 - Características químicas e físicas do solo da área experimental

Prof. Cm	pH	¹ COT g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K -----mmol _c dm ⁻³ -----	Ca -----mmol _c dm ⁻³ -----	Mg -----mmol _c dm ⁻³ -----	CTC -----	V %	Areia -----g kg ⁻¹ -----	Silte	Argila
0-25	5,2*	8,7	17	1,7	15	7	70	56	660**	70	270
0 - 50	4,8	7,5	20	1,2	9	4	32	44	560	100	320

*Análise realizada segundo metodologia de RAIJ(2001), **análise realizada segundo metodologia da EMBRAPA, (1997), ¹COT= Carbono orgânico total.

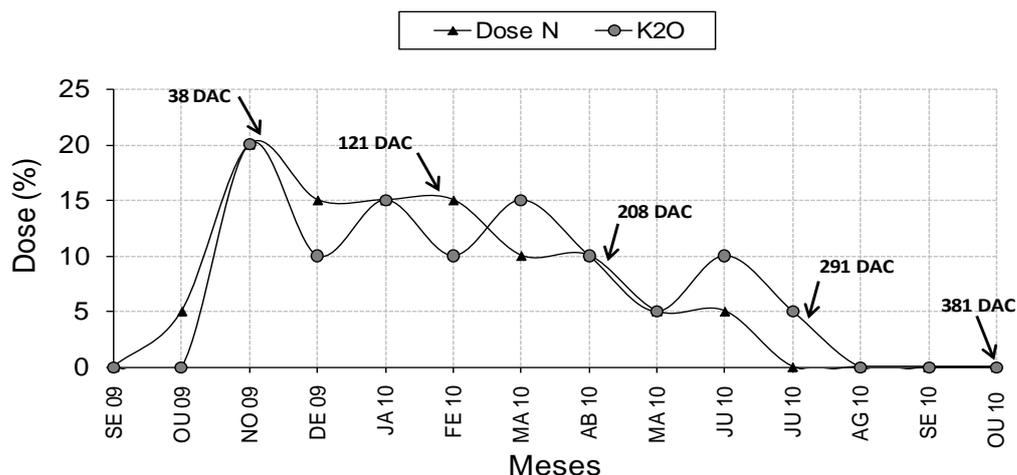


Figura 2.1 - Distribuição em porcentagem das doses de N e K₂O aplicadas por fertirrigação durante o ciclo de desenvolvimento de soqueira de cana-de-açúcar. As setas com o tempo em dias após o último corte (DAC) indicam os estádios em que foram realizadas avaliações biométricas e fisiológicas na cultura

2.2.2 Espaçamento e manejo da irrigação

As parcelas foram compostas por cinco linhas de cana-de-açúcar, com 40 m de comprimento, divididas em três subparcelas de 10 metros. Duas subparcelas foram utilizadas para realizar avaliações fisiológicas e biométricas temporais e uma para a determinação da produtividade final. Em todos os tratamentos foi utilizado o plantio em linha dupla (plantio “em W” ou plantio “abacaxi”), com espaçamento de 1,80 m entre as linhas duplas, e 0,4 m entre linhas de cana, onde no centro se instalou o tubo gotejador da irrigação. O tubo gotejador modelo (DRIPNET PC 22135 FL, Adana, Turquia) possuindo vazão de 1,0 L h⁻¹ e com gotejadores a cada 0,5 m, foi enterrado a 25 cm de profundidade da superfície do solo.

A precipitação total ocorrida durante o ciclo da cultura foi de 1.435 mm. A lâmina de água aplicada por meio da irrigação foi de 390 mm, distribuída ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, repondo 100% a evapotranspiração da cultura (ETC), segundo o método de Penman-Monteith (HOWELL; EVETT, 2004).

A frequência de irrigação foi realizada, contabilizando-se o suprimento de água ao solo, pela precipitação (P), e a demanda atmosférica pela evapotranspiração da cana-de-açúcar (ETC), considerando uma capacidade de água disponível do solo (CAD) de 70 mm. Desse modo foi feita a estimativa do balanço hídrico a cada decêndio e calculada a deficiência hídrica (DEF) (Figura 2.2).

As temperaturas máximas e mínimas médias observadas durante o ciclo de desenvolvimento de 381 dias foram de 29,2 e 16,4 °C respectivamente.

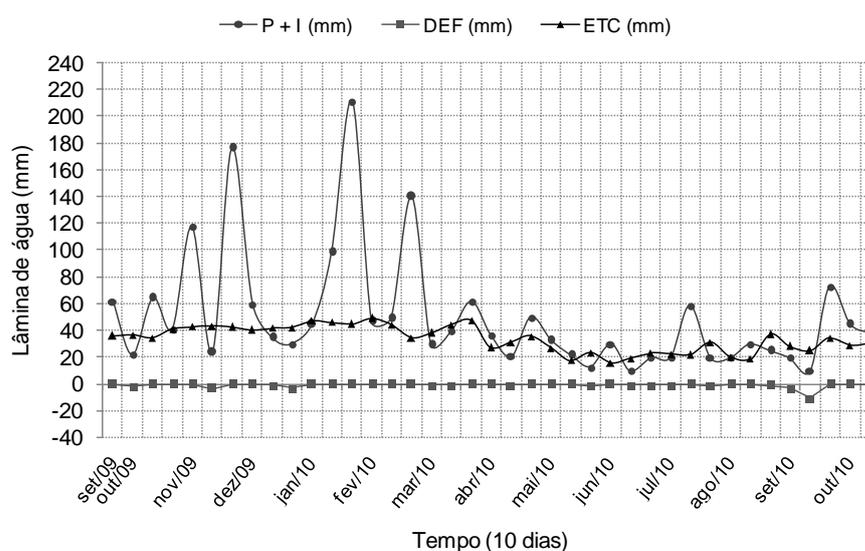


Figura 2.2 - Balanço hídrico decenal no manejo irrigado no período de 2009/2010

2.2.3 Avaliações realizadas

Realizaram-se avaliações da cultura aos 38, 121, 208, 291, e 381 dias após o corte da soqueira (DAC). Em cada avaliação foram realizadas medidas fisiológicas, biométricas e de fitomassa da parte aérea.

As análises fisiológicas biométricas realizadas foram: i) índice de área foliar (IAF) utilizando-se o aparelho ceptômetro, PAR/LAI (modelo LP-80, Decagon, Pullman, Wa, EUA); as leituras foram realizadas inserindo a régua do aparelho horizontalmente no meio da linha da cana-de-açúcar e mantendo-se o sensor assistente em local onde havia radiação solar total (sem sombra). As leituras foram realizadas sempre no período de alta radiação solar, geralmente às 13 horas; ii) Índice SPAD ou estimativa do conteúdo de clorofila, foi determinado por meio do clorofilômetro (modelo SPAD-502, Konica Minolta, New Jersey, EUA), sendo utilizado a média de 20 leituras realizadas em folhas +1 de diferentes perfilhos por parcela de cada tratamento; iii) Determinação do teor de N da folha +1: foram retiradas 20 lâminas foliares de folhas +1 de cada parcela. Após a coleta, foi feita a eliminação da nervura central e separação de 20 cm da região mediana, que depois de terem sido lavadas foram colocados para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C. Em seguida, os teores de N das amostras foram quantificados em espectrômetro de massas (Hydra 20-20 da Sercon Corporation, Crewe, GBR) acoplado a um analisador automático de N (modelo ANCA-GSL) (BARRIE; PROSSER, 1996); iv) altura das plantas, medidas do colo até a inserção da folha +1; v) diâmetro dos colmos determinado no terço médio dos colmos em todos os perfilhos e vi) número de perfilhos por metro, contabilizados em 2 metros de linha de cana-de-açúcar sem falhas.

As amostragens da parte aérea das plantas foram realizadas em 2 m de linha de cana-de-açúcar, sendo compartimentalizada em folhas secas, ponteiros (folhas verdes + palmito) e colmos. Em cada amostra, após a determinação da biomassa fresca, toda a amostra foi triturada em picadora de foragem, sendo retirada uma subamostra em que se determinou a fitomassa seca após secagem em estufa de circulação forçada a 65 °C. Posteriormente realizou-se a moagem das subamostras em moinho de facas tipo Willey, sendo quantificados os teores de N (g kg^{-1}) nas

folhas secas, ponteiros e colmos segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

Com esses resultados, considerando existirem 5556 m de cana-de-açúcar em um hectare foram estimados o acúmulo de matéria seca (Mg ha^{-1}) e de N (kg ha^{-1}), nos diferentes compartimentos da parte aérea de cana-de-açúcar, durante o ciclo agrícola da cultura.

2.2.4 Análises dos resultados

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância utilizando-se teste F a 5% de probabilidade. Posteriormente, realizaram-se análises de regressões não lineares, polinomiais (linear e quadrática) e de correlação.

Para estimar a altura das plantas (cm), diâmetro dos colmos (mm), acúmulo de matéria seca (Mg ha^{-1}) e de N (kg ha^{-1}) da parte aérea da cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos no período experimental, utilizou-se a função sigmóide descrita a seguir (LUCCHESI, 1984)(Eq. 2.1):

$$Y = Y_{\max}/1 + \exp(-B * (DAC - X_0)) \quad [\text{Eq. 2.1}]$$

Em que:

Y= Crescimento ou acúmulo das variáveis descritas no parágrafo anterior;

Y max= Máximo acúmulo ou crescimento das variáveis elencadas;

DAC= Dias após o corte da soqueira;

B e X_0 = Coeficientes de ajuste da equação.

Para descrever as variáveis: teor de N (g kg^{-1}) na folha+1 e índice SPAD, foi utilizada a função linear segundo Ferreira (1999) (Eq. 2.2):

$$Y = Y_0 - b * DAC \quad [\text{Eq. 2.2}]$$

Em que:

Y_0 = Coeficiente linear;

b = Coeficiente angular ou inclinação da reta;

DAC= Dias após o corte das soqueiras.

Para estimar a evolução do número de perfilhos por metro e do índice de área foliar (IAF) utilizou os modelos quadráticos segundo Ferreira (1999) (Eq. 2.3) e (Eq. 2.4):

$$Y = a + Y_0 * b^{DAC} \quad [\text{Eq. 2.3}]$$

$$Y = Y_0 + a * DAC + b * DAC^2 \quad [\text{Eq. 2.4}]$$

Em que:

Y_0 = Constante

a e b = coeficientes de ajuste da equação.

Com os resultados de acúmulo de matéria seca e de N dos diferentes tratamentos foram calculadas as taxas de produção de massa seca (TPMS) e as taxas de acúmulo de N (TAN) segundo modelo descrito Lucchesi (1984).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Biometria

A adubação nitrogenada promoveu incrementos na altura das plantas, diâmetro dos colmos e número de perfilhos por metro (Tabela 2.2). Observa-se resposta linear para as variáveis: diâmetro dos colmos e número de perfilhos por metro aos 121, 208, 291, e 381 DAC. Para altura das plantas verifica-se resposta linear aos 121 e 381.

Resposta similares ao deste trabalho na altura das plantas foram constatadas por Dantas Neto et al. (2006); Wiedenfeld e Enciso (2008) e Uribe (2010) com doses de N no manejo irrigado. Os autores verificaram que a altura das plantas aumentou com o aumento na dose de N.

Com relação ao diâmetro dos colmos, de acordo com Moura et al. (2005) valores acima de 22 mm são considerados adequados para cana-de-açúcar irrigada, o que corrobora com os valores obtidos por este trabalho (Tabela 2.2). Aos 381 DAC os diâmetros dos colmos aumentaram de 18 a 26 mm com a dose de N. Constatou-se neste estudo, um acréscimo de 30% no diâmetro dos colmos com a elevação da dose de N (0 para 200 kg ha⁻¹ de N). Moura et al. (2005), avaliando doses crescentes de N em cobertura no manejo irrigado, verificaram incrementos menores da ordem 13%. Entretanto Dantas Neto et al. (2006) e Uribe (2010) não observaram aumento no diâmetro dos colmos com a elevação da dose de N sob irrigação.

As equações que descrevem o crescimento de altura e diâmetro das plantas ajustaram-se ao modelo sigmoidal (Figuras 2.3A e 2.3B). Resultados semelhantes foram verificados por Oliveira et al. (2010) em diferentes cultivares irrigadas na região nordeste do país.

Para a altura das plantas (cm), o período de máximo crescimento ocorreu entre os 90 e 291 DAC. Observou-se que a alongação dos colmos manteve-se crescente até os 291 DAC para as doses de N 50, 100, 150, e 200 Kg ha⁻¹ de N, estes resultados estão de acordo com Oliveira et al. (2010). No tratamento controle o fim da alongação ocorreu antes dos 200 DAC. Wieldelfeld (1995) constatou que o

período de alongação das plantas foi dependente da quantidade de N aplicada, pois este faz parte da molécula de clorofila que é responsável pela produção e acúmulo de fotoassimilados que resultam no crescimento celular.

O diâmetro dos colmos estabilizou-se ao redor dos 150 DAC após uma fase de rápido incremento de espessura, Oliveira et al. (2010) verificou comportamento semelhante em diferentes cultivares de cana-de-açúcar.

Na Tabela 2.2 e Figura 2.4 observa-se a variação no perfilhamento da cana-de-açúcar ao longo do ciclo de crescimento da cultura. Verificou-se que, após um alto índice de perfilhamento no início do ciclo (38 DAC), ocorreu uma drástica redução no número de perfilhos, causada pela competição interespecífica relacionada a fatores ambientais responsáveis pelo crescimento, como: temperatura, luz, água e nutrientes (OLIVEIRA, et al., 2004). A época de máximo perfilhamento obtida com fertirrigação (38 DAC) difere dos demais resultados encontrados na literatura. Oliveira et al. (2004); Almeida et al. (2008), verificaram que a estabilidade no perfilhamento ocorreu após 200 DAC. Este fato possivelmente pode ser explicado pelo fornecimento de água e N conjuntamente, na região radicular, acelerando o processo de perfilhamento, ou em virtude de diferenças varietais e edafoclimáticas, tendo em vista que os trabalhos de Oliveira et al. (2004) e Almeida et al. (2008) foram realizados na região Nordeste do Brasil. No final do ciclo de desenvolvimento da cultura existiam em média 16 perfilhos por metro, esses valores são superiores aos verificados em canaviais plantados em espaçamento tradicional de 1,5 m (DALRI; CRUZ, 2008). No entanto, estão coerentes com o sistema de plantio em linha dupla com 0,4 m entre linhas simples e 1,8 m entre linhas duplas (ERNANDES, 2005; URIBE, 2010). Ng Kee Kwong et al. (1999), trabalhando com doses de N entre 40 a 160 kg ha⁻¹ de N aplicadas por meio do gotejamento subsuperficial, observaram valores de perfilhamento no final do período de alongação de 12 a 15 perfilhos por metro.

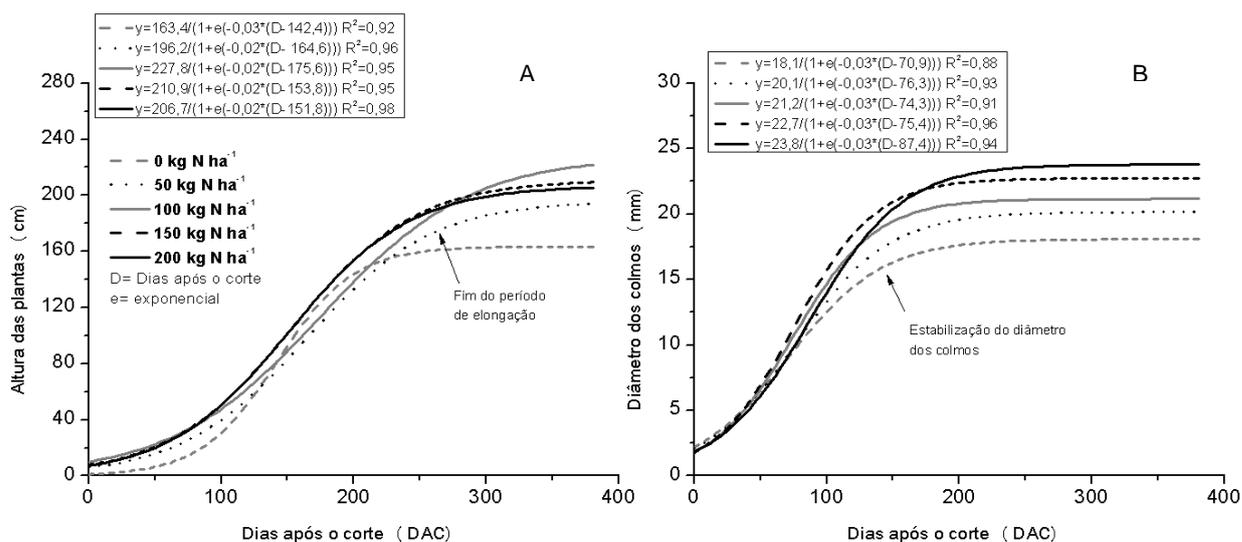


Figura 2.3 - Altura (A) e diâmetro (B) das plantas de cana-de-açúcar em função dos dias após o corte nas doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

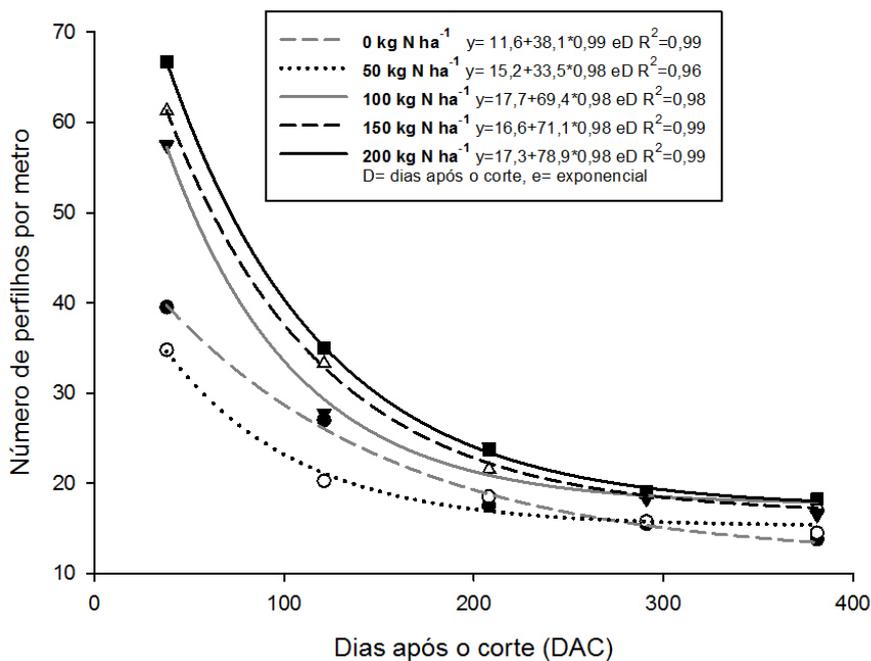


Figura 2.4 - Número de perfilhos por metro de cana-de-açúcar em função de doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial.

Tabela 2.2 - Altura das plantas (ALT: cm), diâmetro das plantas (DIA: mm) e número de perfilhos por metro (NP: unidades) em diferentes épocas do ciclo em função de doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

Doses N	38 DAC			121 DAC			208 DAC			291 DAC			381 DAC		
kg ha ⁻¹	ALT	DIA	NP	ALT	DIA	NP	ALT	DIA	NP	ALT	DIA	NP	ALT	DIA	NP
0	9,6	6,8	39	51,7	13,8	27	149,0	17,9	17	166,7	17,9	15	158,6	18,4	13
50	10,1	6,4	34	59,4	15,7	20	138,1	17,9	18	183,8	20,6	16	194,7	17,9	14
100	10,3	6,0	57	76,2	17,3	27	136,2	18,0	24	207,0	22,8	18	220,3	22,2	16
150	9,8	6,2	61	76,0	18,4	33	158,4	21,3	21	194,5	22,5	19	215,3	24,2	17
200	10,4	5,4	66	74,3	17,6	35	159,8	20,8	23	188,0	23,2	19	213,9	26,2	18
CV (%)	8,8	20,1	28,6	17,2	12,3	26,8	16,3	7,2	20,3	13,3	8,9	12,1	12,3	19,5	15,4
R ² R. L.	ns	ns	0,83**	0,74**	0,79**	0,62*	ns	0,71**	0,68*	ns	0,80**	0,87*	0,66**	0,92**	0,97**
R ² R. Q.	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

** p<0,01, *p<0,05, ns=não significativo, (DAC) = dias após o corte, (ALT) = altura (cm), (DIA) = diâmetro (mm), (NP) = número de perfilhos por metro (unidades)

(R. L)= regressão linear, (R. Q) = regressão quadrática.

2.3.2 Parâmetros fisiológicos

As variáveis fisiológicas responderam às doses de N-fertilizante em todas as épocas avaliadas, com exceção do índice SPAD aos 38 DAC (Tabela 2.3).

Ao final do ciclo da soqueira, constatou-se valores de índice SPAD de 26 e 35, respectivamente, para o tratamento controle e dose de 200 kg ha⁻¹ de N. Ao longo do ciclo da soqueira houve diminuição do índice SPAD.

Os resultados de índice SPAD (Figura 2.5A) e do teor de N na folha +1 em função do tempo (DAC) (Figura 2.5B), nas doses de N, ajustaram-se a equação linear decrescente, mostrando diminuição na estimativa do conteúdo de clorofila das plantas e também do teor de N da folha +1 em todos os tratamentos. Esse fato possivelmente ocorreu devido ao efeito diluição do N na planta com a evolução de seu crescimento, pois a taxa de produção de matéria seca (TPMS) é maior que a taxa de acúmulo de N (TAN) (FARONI, 2008; OLIVEIRA, 2011). Resultados semelhantes aos deste trabalho foram obtidos também por Wood et al. (1996) em cana planta e em soqueira com dois cultivares na Austrália (Q117 e Q138).

Constata-se na (Tabela 2.3 e Figura 2.5A) que as doses de N aplicadas por gotejo subsuperficial promoveram a elevação do teor de N da folha +1 da cana-de-açúcar, com conseqüente aumento no acúmulo de N na parte aérea (Tabela 2.4). Resultados semelhantes foram obtidos por Franco et al. (2007); Rozane et al. (2008) e Pereira (2011).

A correlação entre o índice SPAD e teor de N na folha+1 de cana-de-açúcar (Figura 2.6), considerados todos os resultados (n=80 leituras), demonstrou-se altamente significativo ($R^2 = 0,77$, $p < 0,05$). Pode-se inferir que neste experimento o clorofilômetro foi eficiente para estimar o teor de N na folha +1 apresentando respostas rápidas do estado nutricional de cana-de-açúcar ao longo do ciclo de desenvolvimento. Rocha et al. (2005) contataram correlações positivas entre índice SPAD e teor de N nas folhas de milho de três híbridos simples (R^2 0,96; 0,86; 0,77 $p < 0,05$). Godoy et al. (2008) verificou correlação positiva ($R^2 = 0,80$, $p < 0,01$) entre índice SPAD e teor de N em folhas de café.

Verificou-se correlação quadrática entre IAF e o acúmulo de MSPA nas diferentes épocas de amostragens (Figura 2.7). O índice de área foliar (IAF) é uma medida fisiológica em condições de campo que apresenta relação com o acúmulo de matéria seca (fotossíntese líquida) da cana-de-açúcar (NG KEE KWONG et al., 1999; ALVAREZ; CASTRO, 1999; RAMESH, 2000 e WIEDENFELD; ENCISO, 2008). Esta elevada correlação ocorre porque o IAF está associado à quantidade de luz absorvida e conseqüentemente, a fotossíntese realizada pelas plantas (FARIAS et al., 2007), sendo a produtividade das culturas uma função direta da eficiência fotossintética (FLOSS, 2006). No entanto, a produtividade não aumenta indefinidamente com a elevação do IAF, isso ocorre porque a partir de um determinado IAF tem uma parte das folhas fazendo fotossíntese, porém uma grande quantidade sendo auto-sombreadas (FLOSS, 2006).

Constataram-se aumentos no IAF em função das doses de N ao longo do ciclo agrícola da soqueira (Figura 2.8 e Tabela 2.3). No início do período de máximo crescimento da cana-de-açúcar os valores de IAF medidos aos 121 DAC variaram de 2,1 a 3, enquanto que no final dessa fase (291 DAC) os valores foram de 4,1 a 5,4, respectivamente, no tratamento controle e na maior dose de N. No fim do período experimental, aos 381 DAC, os valores de IAF variaram de 4,5 a 6,4 no tratamento controle e na dose de 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Para soqueira de cana-de-açúcar (primeira rebrota) no manejo de gotejo subsuperficial com doses de N fertilizante, Ng Kee Kwong et al. (1999) observaram que o IAF foi aumentado com a elevação das doses de N. Esses pesquisadores verificaram valores de IAF de: 3,64; 4,41; 4,95; 5,16 e 5,19 para as doses de: 0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de N respectivamente.

As curvas de IAF ajustaram-se a um modelo quadrático, (Figura 2.8), caracterizado por elevado incremento de IAF na fase inicial até os 100 DAC, fase em que há elevado perfilhamento e surgimento de muitas folhas, estabilizando-se no período de 200 a 300 DAC com posterior queda na fase final de crescimento, correspondendo ao período de maturação da cana-de-açúcar, em que ocorre um maior auto-sombreamento e morte das folhas.

Tabela 2.3 - Índice SPAD, índice de área foliar (IAF) e teor de N total na folha +1 (N F+1), em diferentes épocas do ciclo em função de doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

	38 DAC		121 DAC			208 DAC			291 DAC			381 DAC		
Doses N	SPAD	IAF	SPAD	N F+1	IAF									
	--	m ² m ⁻²	--	g kg ⁻¹	m ² m ⁻²	--	g kg ⁻¹	m ² m ⁻²	--	g kg ⁻¹	m ² m ⁻²	--	g kg ⁻¹	m ² m ⁻²
0	40,0	0,8	35,0	18,2	2,1	33,1	13,7	3,8	24,4	10,8	4,1	25,9	9,2	4,5
50	39,2	0,9	37,4	19,1	2,5	32,4	14,1	4,5	25,8	11,3	4,2	27,6	10,1	5,4
100	40,5	1,2	39,3	21,1	2,7	38,3	16,8	5,1	31,7	14,3	4,8	31,7	11,6	5,9
150	39,8	1,1	40,3	22,1	3,0	37,4	17,5	5,2	30,7	14,3	4,9	31,5	11,3	6,0
200	39,1	1,3	42,6	21,7	3,0	38,7	18,2	5,1	35,0	14,2	5,4	34,8	12,7	6,4
CV (%)	6,4	26,0	6,7	9,1	7,6	5,9	6,4	7,1	5,1	5,2	2,7	7,1	8,4	2,76
R ² R. L.	ns	0,81*	0,98**	0,85**	0,92**	0,73**	0,92**	0,77**	0,89**	0,77**	0,96**	0,93**	0,91**	0,89**
R ² R. Q.	ns	ns	ns	ns	ns	ns	Ns	0,99**	ns	0,86**	ns	ns	ns	0,97**

** p<0,01, * p<0,05, ns=não significativo, (DAC) = dias após o corte, (IAF) = índice de área foliar, (SPAD) = índice Spad, (N F+1) =teor de N na folha +1, (R. L)= regressão linear, (R. Q) = regressão quadrática.

Tabela 2.4 - Teor e acúmulo de N na parte aérea de cana-de-açúcar em diferentes épocas do ciclo em função de doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

Doses N	38 DAC		121 DAC		208 DAC		291 DAC		381 DAC	
	teor	estoque								
	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹								
0	15,0	5,6	5,8	24,1	2,6	34,1	2,1	35,4	2,5	45,1
50	16,3	7,4	6,2	29,6	3,5	56,0	3,0	77,1	3,3	90,0
100	18,1	12,3	6,1	49,2	3,1	77,5	3,9	140,3	3,3	121,3
150	16,6	9,6	6,9	77,5	4,2	103,8	4,6	167,1	3,8	158,7
200	15,9	12,7	7,9	81,8	4,3	110,5	5,6	226,0	4,3	209,1
CV (%)	8,3	19,6	19,4	16,1	19,3	20,6	14,4	15,0	17,9	21,4
R ² R. L.	ns	30,5**	ns	151,0**	Ns	36,5**	93,0**	235,7**	17,6**	88,0**
R ² R. Q.	ns	ns								

** p<0,01, * p<0,05, ns=não significativo, (DAC) = dias após o corte, (R. L)= regressão linear, (R. Q) = regressão quadrática.

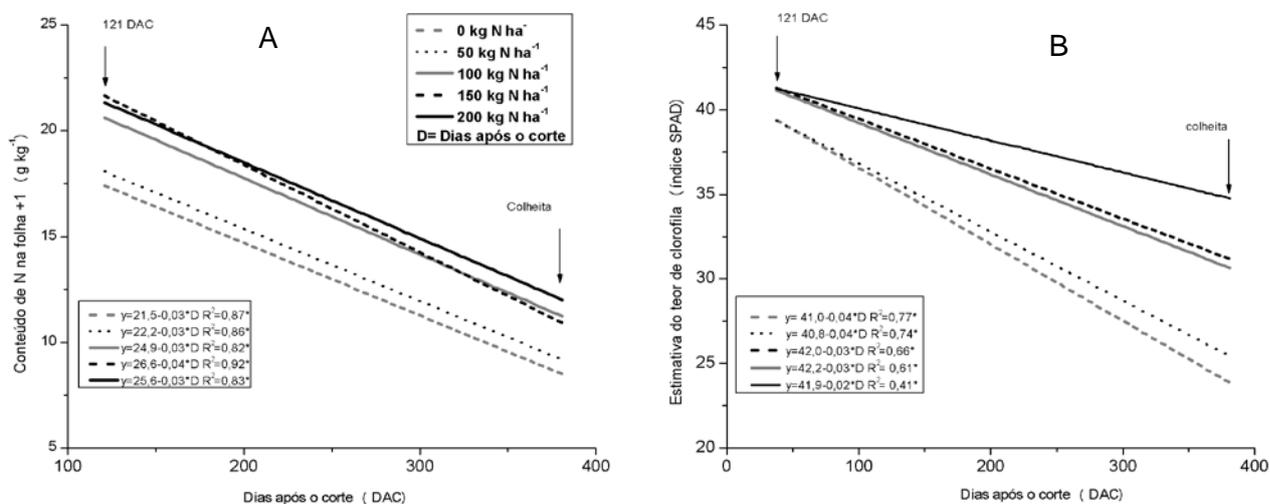


Figura 2.5 - Teor de N (g kg⁻¹)(A) e estimativa do conteúdo de clorofila (índice SPAD) (B) na folha +1 em plantas de cana-de-açúcar em função dos dias do ciclo de crescimento nas doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

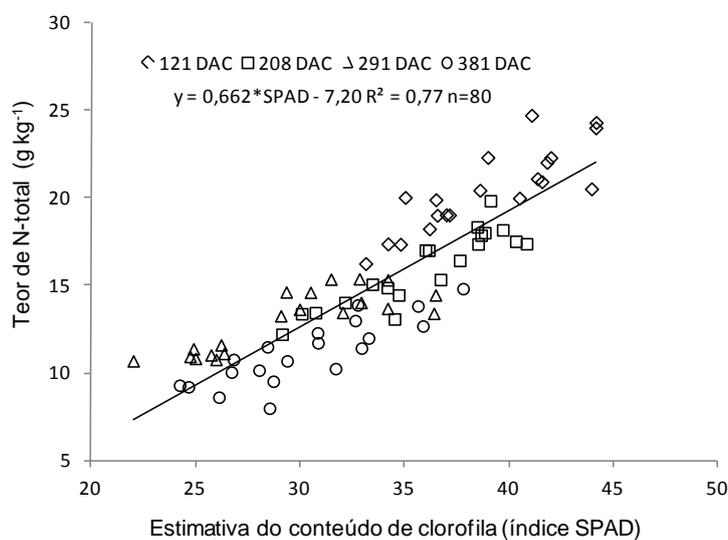


Figura 2.6 - Correlação entre estimativa do conteúdo de clorofila na folha +1 (unidades SPAD) e teor de N na folha +1 (g kg⁻¹) em diferentes épocas do ciclo considerada todas doses de N

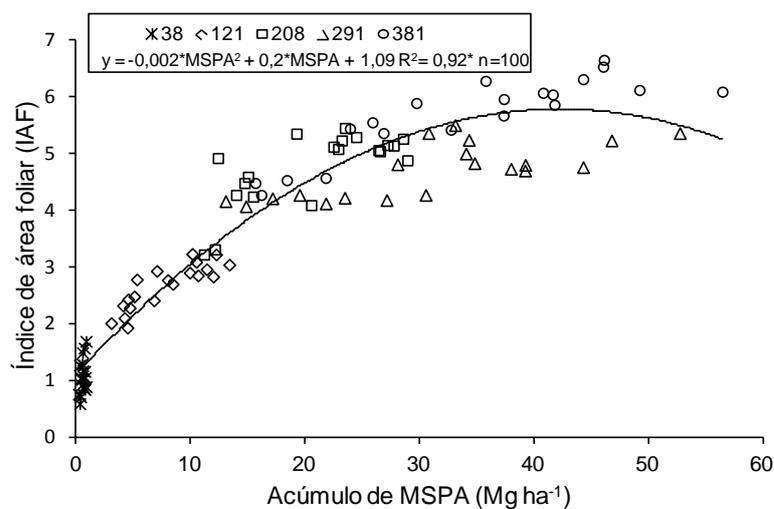


Figura 2.7 - Correlação entre IAF e acúmulo de matéria seca da parte aérea (MSPA) durante o ciclo de desenvolvimento considerando as diferentes doses de N aplicadas por gotejo subsuperficial

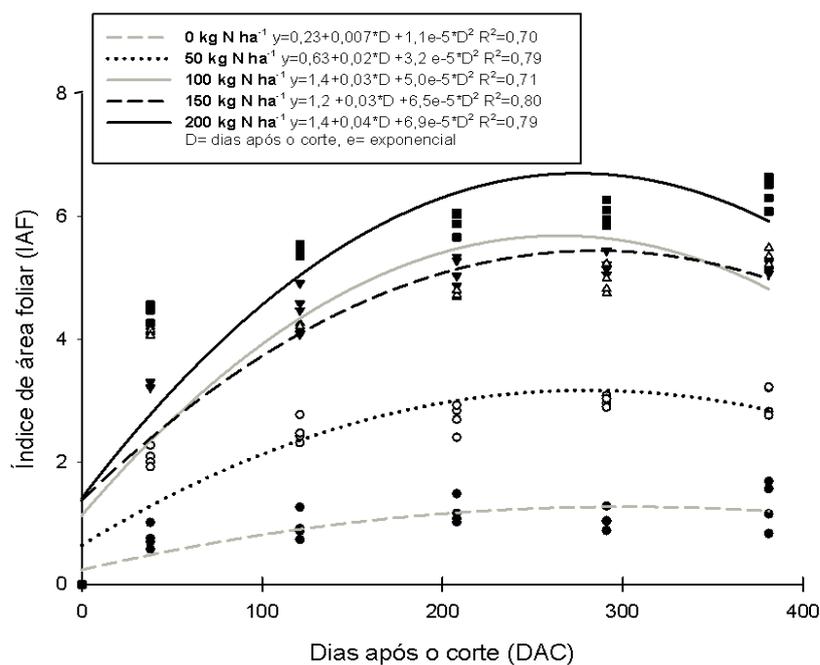


Figura 2.8 - Índice de área foliar (IAF) de cana-de-açúcar em função dos dias do ciclo de crescimento nas doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

2.3.3 Acúmulo de fitomassa

Na Tabela 2.5 estão apresentados os valores de acúmulo de fitomassa seca dos diferentes compartimentos da planta: massa seca de folhas secas (FS), massa seca de ponteiros (P), massa seca de colmos (C) e massa seca da parte aérea (PA). Houve resposta linear ao aumento da dose de N em todas as avaliações, embora tenha havido também resposta quadrática para massa seca de C e da PA aos 208 DAC e FS aos 291 DAC estes resultados estão de acordo os de Ng Kee Kwong et al. (1999); Thorburn et al. (2003); Dalri; Cruz (2008) e Gava et al. (2010).

As respostas à fertilização nitrogenada são mais frequentes em soqueiras de cana-de-açúcar no manejo de sequeiro (VITTI et al., 2007; PEREIRA, 2011) embora resultados positivos à adubação com N nem sempre são constatados (SAMPAIO et al., 1984; FARONI, 2008). No manejo da cana-de-açúcar irrigada a prática da adubação nitrogenada apresenta maior potencial de resposta comparado ao manejo de sequeiro (NG KEE KWONG et al., 1999; THORBURN et al., 2003; GAVA et al., 2010). Wiedenfeld e Enciso (2008), em estudos desenvolvidos com a aplicação de N por irrigação de gotejo subsuperficial em cana-de-açúcar verificaram que os resultados positivos da fertilização nitrogenada foram proporcionais a quantidade de água aplicada. O efeito da adição de N também foi estudado por Wiedenfeld (1995), o qual constatou que a maior resposta à adubação nitrogenada em cultivos irrigados ocorreu devido ao maior tempo de absorção de N-fertilizante pelas raízes das plantas, uma vez sendo fornecido em pequenas parcelas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

No final do ciclo (381 DAC) foi observado diferenças entre os tratamentos para a produção de massa seca da PA (Tabela 2.5). Estes elevados acúmulos de massa seca da PA refletiram em grande parte na produção de colmos nessa fase da cultura, uma vez que o acúmulo de massa seca de FS e P decresceu em relação à amostragem aos 291 DAC.

As produtividades de massa seca C foram elevadas aos 381 DAC, com valores de 13, 21, 30, 31 e 37 Mg ha⁻¹, respectivamente, no tratamento controle e nas doses de 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N (Tabela 2.5). Ng Kee Kwong et al. (1999) verificaram produções de massa seca de C de 38, 43, 46, e 44 Mg ha⁻¹ para

as doses de 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹, respectivamente, aplicadas por gotejamento subsuperficial em cana de terceira corte com a cultivar (R570) nas Ilhas Maurício.

As equações de acúmulo de massa seca da PA ajustaram-se ao modelo sigmóide descrito pela equação $Y=Y_{\max}/1+\exp(-B*(DAC-X_c))$, modelo esse capaz de descrever o crescimento vegetal, dividido por três fases distintas: primeira fase em que ocorre crescimento lento, compreendendo a fase de brotação e perfilhamento; a segunda fase que concentra o máximo crescimento quando ocorre a alongação dos colmos e o acúmulo de grande parte da MSPA e a terceira fase que apresenta baixo crescimento, período de maturação e acumulação de sacarose nos colmos (HUNT, 1982, SILVEIRA, 1985).

A primeira fase de crescimento vegetal durou do corte da soqueira até aproximadamente 90 DAC e acumulou em média 11% da MSPA total, correspondendo em média de 4 Mg ha⁻¹ de MSPA. Essa fase foi caracterizada pelo intenso perfilhamento, porém baixo acúmulo de MSPA (FARONI, 2008; OLIVEIRA, 2011). A segunda fase de crescimento compreendeu o período entre 90 DAC até 291 DAC acumulando em média de 81% da MSPA total; estes resultados foram semelhantes aos de Gava et al. (2001); Faroni (2008); Oliveira (2011) que verificaram um acúmulo médio de 80% nessa fase, utilizando doses crescentes de N em soqueira de cana-de-açúcar no manejo de sequeiro. Segundo Faroni (2008) o grande incremento de MSPA tem relação com a formação dos colmos. Estes resultados confirmaram que em cana fertirrigada, mesmo com colheita realizada em outubro, a fase de máximo crescimento ocorreu entre os meses de dezembro a junho correspondendo ao início do verão até o começo do inverno na região centro sul do país. Outra característica verificada no manejo irrigado foi que, quando se aplicou N à segunda fase de crescimento prolongou-se em relação ao controle sem N. A terceira fase de foi caracterizada por baixo acúmulo MSPA, cerca de 8% do total e compreendeu ao período 291 aos 381 DAC.

Na Figura 2.9A verifica-se resposta pronunciada da cultura no acúmulo de massa seca da PA com as doses de N-fertilizante. É importante ressaltar que o manejo de aplicação do N por fertirrigação é fracionado em pequenas doses ao longo do ciclo, tornando as plantas mais eficientes na absorção e assimilação do N

proveniente do adubo, refletindo em ganhos de massa seca por unidade de N aplicada (SINGH; MOHAN, 1994; NG KEE KWONG et al., 1999; URIBE, 2010).

A taxa de produção de massa seca (TPMS) foi obtida da derivada da equação: $Y = Y_{max}/1 + \exp(-B*(DAC-XC))$, sendo representada por uma função em formato de sino, baixa no início, aumentando rapidamente até atingir o máximo, para depois decrescer acentuadamente (MACHADO et al., 1982). Os máximos nas TPMS ocorreram em diferentes tempos do ciclo para as doses de N sendo de: 11,5 (170 DAC), 15,6 (192 DAC), 22,5 (180 DAC), 19,9 (186 DAC) e 22,2 (207 DAC) $g\ m^{-2}\ dia^{-1}$, respectivamente, para o tratamento controle e as doses de 50, 100, 150 e 200 $kg\ ha^{-1}$ de N (Figura 2.9B).

As curvas de TPMS das doses 100, 150 e 200 $kg\ ha^{-1}$ de N apresentaram tempo de máximo muito próximos, embora as doses 100 e 200 $kg\ ha^{-1}$ de N tenham obtido uma TPMS máxima mais elevada. O tratamento controle e a dose de 50 $kg\ ha^{-1}$ de N tiveram a mesma TPMS até os 120 DAC, sendo que após esse período atingindo a máxima taxa, seguindo-se uma acentuada redução (Figura 2.9B). Segato (2006) observou que houve crescimento radicular e intenso perfilhamento nos primeiros 100 DAC, ocorrendo posteriormente a fase de máximo crescimento, em que a cana-de-açúcar demanda grande quantidade de água e nutrientes, com destaque para o N. Nesse estudo verificou-se que a maior dose de N proporcionou maior máximo na TPMS, refletindo em ganhos de produtividade de MSC.

Os valores de TPMS médios foram de 4,6; 7,1; 9,8; 10,4 e 12,3 $g\ m^{-2}\ dia^{-1}$ para o controle e nas doses de 50, 100, 150 e 200 $kg\ ha^{-1}$ de N respectivamente. Observou-se que as TPMS médias aumentaram com a elevação das doses de N, destacando-se que 200 $kg\ ha^{-1}$ de N incrementou a produção diária de MS em 7,7 $g\ m^{-2}\ dia^{-1}$ em relação ao controle.

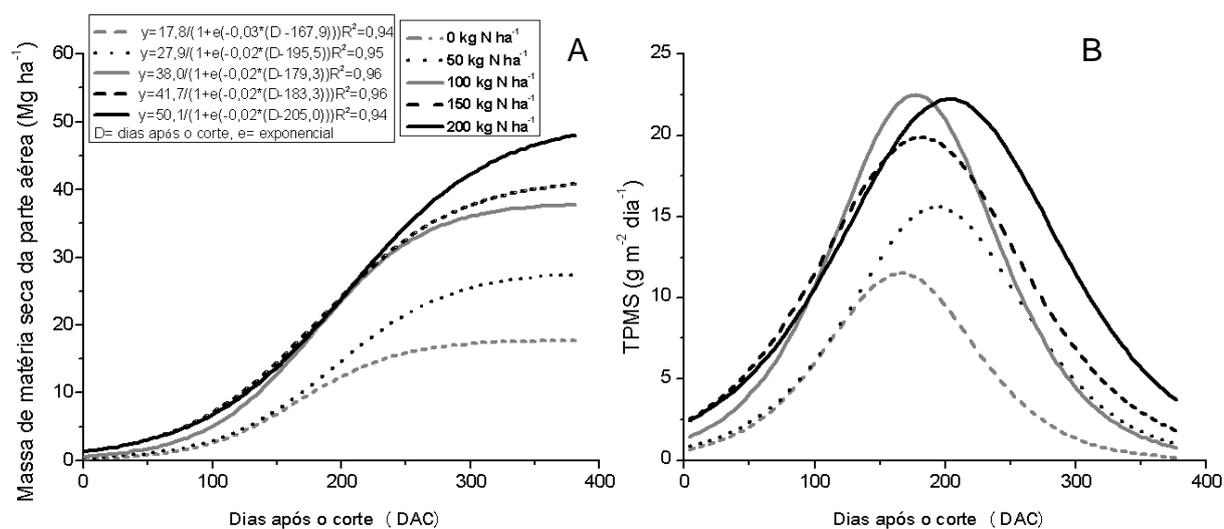


Figura 2.9 - Acúmulo de massa de matéria seca (A) e taxa de produção de matéria seca (TPMS) (B) da parte aérea de cana-de-açúcar em função dos dias do ciclo de crescimento nas doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

Tabela 2.5 - Acúmulo de matéria seca de folhas secas (FS), ponteiros (P), colmos (C), e parte aérea (PA) em diferentes épocas do ciclo em função de doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial.

Doses N	38 DAC	121 DAC				208 DAC				291 DAC				381 DAC			
	PA	FS	P	C	PA												
----- Mg ha ⁻¹ -----																	
0	0,37	0,4	2,4	1,4	4,1	1,5	3,3	8,4	13,2	2,5	2,4	11,8	16,7	2,3	2,8	12,9	18,0
50	0,45	0,4	2,7	1,6	4,8	1,8	4,4	9,6	15,7	3,4	4,1	17,7	25,2	3,0	3,6	20,8	27,4
100	0,58	0,7	4,0	3,5	8,3	1,9	6,5	16,4	24,8	4,8	6,0	25,3	36,2	3,9	4,0	29,5	37,4
150	0,67	1,2	5,5	4,7	11,3	2,5	6,7	15,9	25,1	4,8	6,7	25,4	36,9	4,6	5,9	30,6	41,1
200	0,80	0,7	5,9	4,1	10,6	2,2	7,1	16,2	25,5	4,6	8,7	27,6	40,9	4,5	5,7	37,3	48,3
CV (%)	14,8	35,9	15,6	26,4	16,9	29,8	24,7	12,4	13,6	17,7	33,5	17,9	19,4	18,7	24,0	17,3	15,0
R ² R. L.	0,99**	0,44**	0,95**	0,82**	0,88**	0,76*	0,88**	0,76**	0,82**	0,73**	0,98**	0,88**	0,91**	0,91**	0,89**	0,95**	0,97**
R ² R. Q.	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,86*	0,91*	0,95*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

** p<0,01, * p<0,05, ns=não significativo, (DAC) = dias após o corte, (PA) = parte aérea, (FS) = folhas secas, (P) = ponteiros, (C)= colmos, (R. L)= regressão linear, (R.Q) = regressão quadrática.

2.3.4 Acúmulo de N na parte aérea de cana-de-açúcar

Os ajustes das curvas de acúmulo de N na parte aérea da cana-de-açúcar em função do tempo apresentaram formato sigmóide (Tabela 2.10A). Verificou-se elevação no acúmulo de N com o aumento das doses de N. A diferença entre o acúmulo do tratamento controle e a dose de 200 kg ha⁻¹ de N foi de 180 kg ha⁻¹ de N.

As extrações iniciais de N ocorreram até os 50 DAC, apresentando acúmulos médios de 15 kg ha⁻¹ de N. Na segunda fase de acúmulo de N que compreendeu dos 50 DAC até os 300 DAC, observando-se as maiores extrações de N, com acúmulos percentuais chegando a 81%. Na última fase, os acúmulos foram inferiores, com valores de 1,4 a 9,4% para o tratamento controle e na dose de 200 kg ha⁻¹ (Figura 2.10A).

Constataram-se diferenças nas taxas de acúmulo de N (TAN) entre os tratamentos devido às doses de N. As taxa máximas de acúmulo de N (TMAN) foram de 239,3; 370; 605,7; 742,1 e 961,0 g ha⁻¹ dia⁻¹, enquanto que, as TAN médias observadas foram de 97,7; 219,2; 328,9; 402,6 e 557,8 g ha⁻¹ dia⁻¹, respectivamente, no tratamento controle e nas doses de N de 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N.

Oliveira (2011) observou uma defasagem no tempo entre os máximos da TAN e a TPMS na condição de sequeiro. No presente estudo, com fertirrigação constatou-se ocorrer a mesma defasagem em graus variados de tempo. As TPMS máximas ocorreram aos 170, 192, 180, 176 e 207 DAC (Figura 2.9B), e as TAN ocorreram nas épocas de: 111, 181, 169, 154 e 184 DAC (Figura 2.10B), respectivamente, para o tratamento controle e as doses de 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N. O máximo na TAN antecipou-se ao máximo da TPMS em 59, 11, 11, 22 e 23 dias para o controle e as doses de 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N respectivamente.

Verifica-se que, somente para o controle ocorreu um tempo de defasagem maior entre a TAN e a TPMS máxima. Estes resultados discordam, em parte, dos obtidos por Oliveira (2011) no manejo de sequeiro, em que foi verificada uma defasagem média de 60 dias entre os máximos da TAN e da TPMS. Essa diferença pode ser explicada, em parte, pela disponibilidade de N a cultura que é diferente na

condição de sequeiro e no sistema fertirrigado. Uma vez que os fertilizantes minerais representam uma fonte imediata de nutriente às plantas (DOURADO NETO et al., 2010), a aplicação de todo o N em uma única ocasião, o que é realizado no manejo de sequeiro, disponibiliza rapidamente o fertilizante as plantas. Havendo assim, um consumo imediato do N do fertilizante mesmo sem refletir em grande crescimento da parte aérea. Entretanto, no manejo fertirrigado por gotejamento subsuperficial, as doses de N são aplicadas em parcelas durante o ciclo, ocorrendo absorção de N e acúmulo de matéria seca durante todo o período.

Na Tabela 2.4 observam-se os resultados de teor e acúmulo de N nos colmos nas amostragens realizadas durante o ciclo de crescimento da cana-de-açúcar. Consta-se que os teores de N nos colmos não diferiram com o aumento da dose de N nas épocas 38, 121 e 208 DAC. Entretanto, o acúmulo de N aumentou linearmente com as doses de N em todas as épocas de amostragem.

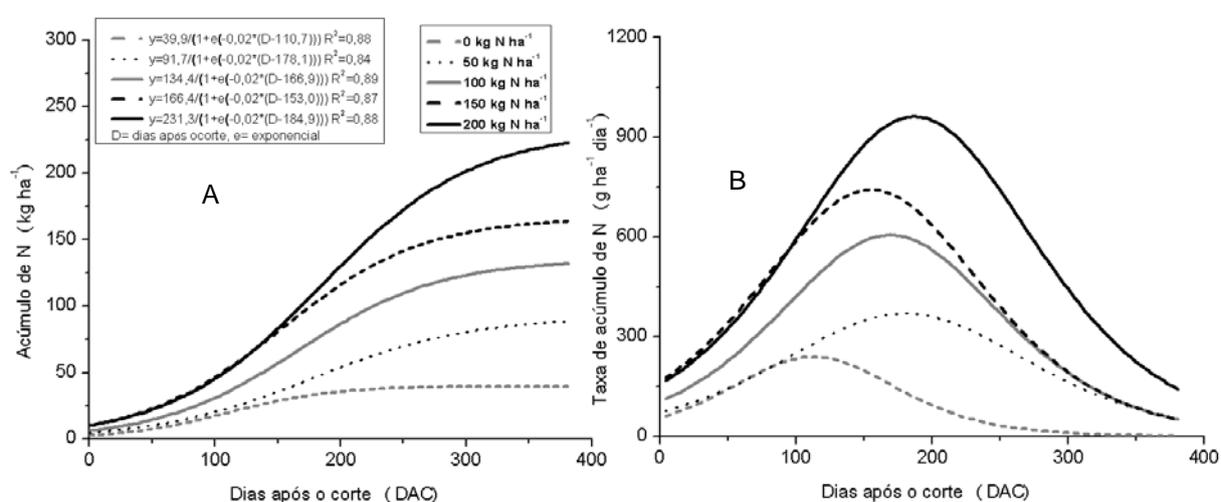


Figura 2.10 - Acúmulo de N em (kg ha⁻¹) (A) e taxa de acúmulo de N TAN (g ha⁻¹ dia⁻¹) (B) na parte aérea de cana-de-açúcar em função de doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

2.4 CONCLUSÕES

1. As doses de N-fertilizante aplicadas por gotejo subsuperficial influenciaram diretamente nas variáveis fisiológicas (índice SPAD, IAF, teor de N na folha) e biométricas (altura, diâmetro, número de perfilhos) da cana-de-açúcar;
2. O índice SPAD mostrou-se eficiente para avaliar o estado nutricional em nitrogênio da cana-de-açúcar durante seu ciclo de crescimento de uma terceira soca;
3. A adubação nitrogenada aplicada juntamente a irrigação por gotejamento superficial elevou o acúmulo de fitomassa e de N da parte aérea da cana-de-açúcar, assim como a taxa de produção de matéria seca TPMS e taxa de acúmulo de N TAN.

Referências

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.

ALVAREZ, I. A.; CASTRO, P. R. C.; Crescimento da parte aérea de cana crua e queimada. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1069-1079, 1999. Suplemento.

BARRIE, A.; PROSSER, S.J. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T. W.; YAMASAKI, S. (Ed.). **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 1-46.

COOPERATIVA CENTRAL DOS PRODUTORES DE AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - COPERSUCAR. **Sexta geração de cultivares de cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1997. 28 p.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L; Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 516-524, 2008.

DANTAS NETO, J.; FIGUREDO, J. L.; FARIAS, C. H.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 283-288. 2006.

DOURADO-NETO, D.; POWLSON, D.; ABU BAKAR, R. BACCHI, O. O. S.; BASANTA, M. V.; THI CONG, P.; KEERTHISINGHE, G.; ISMAILI, M.; RAHMAN, S. M.; REICHARDT, K.; SAFWAT, M. S. A.; SANGAKKARA, R.; TIMM, L. C.; WANG, J. Y.; ZANGAL, E.; KESSEL, C. van. Multisession recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping system. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, p. 139-152, 2010.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

ERNANDES, M. L. **Comportamento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum SPP.*) cultivadas em espaçamentos simples e duplos**. 2005. 56 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia Sistemas de Produção) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2005.

FAOSTAT- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Statistics Division 2011**. Rome, 2011. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>> Acesso em: 10 out. 2011.

FARIAS, C. H. A.; DANTAS NETO, J.; FERNANDES, P. D.; GHEIY, H. R. Índice de área foliar em cana-de-açúcar sob diferentes níveis de irrigação e zinco na Paraíba. **Revista Catinga**, Mossoró, v. 20, p. 45–55, 2007.

FARONI, C. A. **Eficiência agrônômica das adubações nitrogenadas de plantio e após o primeiro corte avaliada na primeira soca da cana-de-açúcar**. 2008. 190 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FERREIRA, R. S. **Matemática aplicada às ciências agrárias: análise de dados e modelos**. Viçosa: UFV, 1999. 333 p.

FLOSS, E. L. **Fisiologia de plantas cultivadas**. Passo Fundo: UPF, 2006. 751 p.

FRANCO, H. C. J. **Eficiência agrônômica da adubação nitrogenada de cana-planta**. 2008. 112 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. **Bragantia**, Campinas, v. 66, p. 669-674, 2007.

GASCHO, G. J. Water-sugarcane relationships. **Sugar Journal**, New Orleans, v. 48, p. 11-17, 1985.

GAVA, G. J. C.; KÖLLN, O. T.; URIBE, R. A. M.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H. Interação entre água e nitrogênio na produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.). In: CRUSCIOL, C. A. (Org.). **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. 1. ed. Botucatu: FEPAF, 2010. v. 1, p. 49-66.

GAVA, G. J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. C.; JERÔNIMO, E. M.; CRUZ, C. S.; KÖLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011.

GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; PENATTI, C. P. Crescimento e acúmulo de N em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.

GODOY, L. J. G.; SANTOS, T. S.; VILLAS BOAS, R. L.; LEITE JUNIOR, J. B. Índice relativo de clorofila e o estado nutricional em nitrogênio durante o ciclo do cafeeiro fertirrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 217-226, 2008.

HOWELL, T. A.; EVETT S. R. **The Penman-Monteith method**. Washington, DC: USDA-Agricultural Research Service, Conservation & Production Research Laboratory, 2004. 14 p.

HUNT, R. **Plant growth curves**. The functional approach to plant growth analysis. London: Edward Arnold, 1982. 248 p.

INMAN-BAMBER, N. G.; MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J. Dry partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, p. 71-84, 2002.

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

KORNDÖRFER, G. H.; COLOMBO, C.; CHIMELLO, M. A.; LEONE, P. L. C. Desempenho de variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem Nitrogênio. **STAB – Açúcar, Álcool e Sub-Produtos**, Piracicaba, v. 20, p. 28-31, 2002.

LUCCHESI, A. A. Utilização prática da análise de crescimento vegetal. **Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, Piracicaba, v. 41, p. 181-202, 1984.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; FAHL, J. L.; ARRUDA, H. V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, n. 9, p. 1323-1329, 1982.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional de plantas**: Princípios e aplicações. Piracicaba: Potafós, 1997. 308 p.

MOURA, M. V. P. S.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, C. A. V.; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, H. M.; PORDEUS, R. M. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 753-760, 2005.

NG KEE KWONG, K. F.; PAUL, J. P.; DEVILLE, J. Drip-fertigation - a means for reducing fertilizer nitrogen to sugarcane. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 35, n. 1, p. 31-37, 1999.

NG KEE KWONG, K. F.; DEVILLE, J. Application of ¹⁵N-labelled urea to sugar cane through a drip-irrigation system in Mauritius. **Fertilizer Research**, London, v. 39, p. 223-228, 1994.

OLIVEIRA, E. C. A. **Balço nutricional da cana-de-açúcar relacionada a adubação nitrogenada**. 2011. 213 p. Tese (Doutorado Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1343-1352, 2010.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBOM, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; ZUFFELATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S.; SILVA, D. K. T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta no estado do Paraná: taxas de crescimento. **Scientia Agrária**, Curitiba, v. 6, p. 85-89, 2004.

PEREIRA, W. **Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas**. 2011, 70 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 185, p. 83-89, 2000.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phased drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 185, p. 249-258, 2000.

RENOUF M. A.; WEGENER M. K.; NIELSEN L. K. An environmental life cycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. **Biomass Bioenergy**, Oxford, v. 32, p. 1144–1155, 2008.

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

ROCHA, R. N. C.; GALVÃO, J. C. C.; TEIXEIRA, P. C.; MIRANDA, G. V.; AGNES, E. L.; PEREIRA, P. R. G.; LEITE, U. T. Relação do índice spad, determinado pelo clorofilômetro, com teor de nitrogênio na folha e rendimento de grãos em três genótipos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete lagoas, v. 4, p. 161-171, 2005.

ROZANE, D. E.; PRADO, R. M.; ROMUALDO, L. M.; PANCELLI, M. A.; FRANCO, C. F. Amostragem de folha em cana-de-açúcar submetida a adubação nitrogenada. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 83, p. 8-18, 2008.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; BETTANY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I. Eficiência de utilização de uréia ^{15}N em aplicação única ou parcelada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, n. 8, p. 943-949, 1984.

SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: PROL, 2006. 415 p.

SILVEIRA, J. A. G. **Interações entre assimilação de nitrogênio e o crescimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) cultivada em condições de campo**. 1985. 152 p. Tese (Doutorado Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

SINGH, P. N.; MOHAN, S. C. Water use and yield response of sugarcane under different irrigation schedules and nitrogen levels in a subtropical region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 26, p. 253-264, 1994.

SMEETS, E. M. W.; BOUWMANW, L. F.; STEHFEST, E. VAN VUUREN, D. P.; POSTHUMA, A. Contribution of N_2O to the greenhouse gas balance of first generation biofuels. **Global Change Biology**, Oxford, v. 15, p. 1–23, 2009.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 91-97, 2006.

THORBURN, P. J.; DART, I. K.; BIGGS, I. M.; BAILLIE, C. P.; SMITH, M. A.; KEATING, B. A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 22, p. 201-209, 2003.

URIBE, R. A. M. **Produtividade e estimativa do acúmulo de biomassa em soqueira de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento com diferentes doses de N-fertilizante.** 2010. 67 p. Tese (Doutorado em Agronomia Irrigação e Drenagem) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu, 2010.

VITTI, C. A.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C. P.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; FRANCO, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007.

WIEDENFELD, B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid south Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 665-671, 2008.

WIEDENFELD, R. P. Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield and quality. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 43, p. 101-108, 1995.

WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 43, p. 173-182, 2000.

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

3 FRACIONAMENTO DOS ISÓTOPOS ESTAVEIS DE CARBONO E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR FERTIRRIGADA COM DOSES DE N

RESUMO

A determinação do fracionamento isotópico de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) em folhas plantas de ciclo C_4 pode ser usada como um método para avaliar a disponibilidade de nitrogênio (N) nas plantas em ambientes sem restrição hídrica, por apresentar boa correlação com a produtividade das culturas. Vários pesquisadores, em diversos países, utilizaram e validaram essa técnica em culturas como milho, sorgo e cana-de-açúcar. No entanto, existem poucos estudos para as condições de solo, clima e cultivares de cana-de-açúcar do Brasil. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar se a disponibilidade de N no manejo irrigado (baixo estresse hídrico) modifica o $\Delta^{13}\text{C}$, e se há correlação desse fracionamento com a produtividade de colmos em soqueira de cana-de-açúcar. O experimento foi desenvolvido no município de Jaú-SP, em um Latossolo Vermelho. Os tratamentos constaram de quatro doses de N: 50, 100, 150 e 200 kg ha^{-1} de N, além de um tratamento controle, sem aplicação de N. Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Avaliou-se o quarto ciclo do cultivar SP80-3280. Foram feitas amostragens de folhas +1 e de colmos aos 121, 208, 291 e 381 dias após o corte para a determinação do $\Delta^{13}\text{C}$ e da produtividade de colmos. No final do ciclo agrícola da soca foi quantificada a produtividade e os atributos tecnológicos da cultura. Com esse resultados foram realizadas regressões. O $\Delta^{13}\text{C}$ (‰) apresentou correlação negativa com a produtividade de colmos ($R^2= 0,69$, $p<0,05$) e a massa seca da parte aérea ($R^2= 0,68$, $p<0,05$) nas diferentes doses de N aplicadas. Verificou-se aumento linear na produtividade de colmos e de açúcar com um incremento respectivamente de 60 e 8 Mg ha^{-1} em função das doses de N aplicadas junto à irrigação. A adubação nitrogenada reduziu os valores de PCC do caldo.

Palavras-chaves: $\Delta^{13}\text{C}$, plantas C_4 , irrigação, nitrogênio, açúcar

ABSTRACT

The determination of isotopic fractionation of ^{13}C (Δ) on C_4 cycle plants leaves can be used as a method to assess the N availability of plants, by presenting good correlation with the crop yields. Several researchers have used and validated this technique in corn, sorghum and sugarcane in several countries. However, to date no work was performed under the conditions of the soil, climate and sugarcane cultivars of Brazil. Accordingly, the aim of this study was to assess whether the availability of nitrogen in irrigated management (low water stress) modifies the ^{13}C , correlating with productivity of culms in sugarcane ratoon. The experiment was developed in the municipality of Jaú-SP, in a Rhodic Eutrudox. The treatments were four doses of N: 50, 100, 150 and 200 kg ha^{-1} N, and control treatment, without N. Was used in randomized blocks, with four repetitions. N doses (in urea form) were applied via subsuperficial drip. Assessed-if the fourth cycle of SP80-3280 cultivar. Leaf and stalks samples were taken at 121, 208, 291 and 381 days after cutting for the determination of ^{13}C and stalk yield. During the harvest were determined the stalks yield and technological attributes of the crop. The $\Delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ presented correlation with the stalks yield ($R^2=0,69$, $p<0,05$) and dry matter production ($R^2=0,68$, $p<0,05$) related to N doses applied. Verified an linear increase in productivity of stalk and sugar with an respectively increment of 60 and 8 Mg ha^{-1} as a function of applied doses of N along the irrigation. The nitrogen fertilization reduced PCC juice of sugarcane.

Key-words: $\Delta^{13}\text{C}$, C_4 plants, irrigation, nitrogen, sugar

3.1 INTRODUÇÃO

O fracionamento isotópico de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) em folhas de plantas, avaliado pela medida de $\delta^{13}\text{C}$ constitui-se em um indicador de estresse ambiental que pode monitorar e identificar plantas em condições de estresse hídrico e deficiência ou excesso de N (MEINZER; ZHU, 1998; CLAY et al., 2001a; CLAY et al., 2001b; FAVOLINI et al., 2002; SMELTEKOP et al., 2002; MONNEVEUX et al., 2007).

O entendimento do valor de $\Delta^{13}\text{C}$ em cana-de-açúcar é mais complexo comparando-se com plantas de ciclo C_3 , pois não depende somente da pressão interna e externa de CO_2 na folha (p_i/p_a). Em plantas C_4 , como a cana-de-açúcar, o $\Delta^{13}\text{C}$ depende também do vazamento (*leakiness*) de CO_2 descarboxilado das células do feixe da bainha (Φ) que não é fixado pela enzima RuBisCo, sendo direcionado às células do mesófilo foliar para a ser refixado pela enzima PEPcase (FARQUHAR, 1983; FARQUHAR et al., 1989; HENDERSON et al., 1992). As atividades das enzimas RuBisCo e PEP carboxilase são dependentes da nutrição nitrogenada do vegetal. O mecanismo fotossintético das espécies C_4 apresenta maior eficiência na fixação do CO_2 comparando-se com plantas C_3 (MEINZER; ZHU, 1998). Plantas C_4 também apresentam taxa fotossintética maior ou igual que plantas C_3 com menores teores foliares de N (BROWN, 1978; BOLTON; BROWN, 1980). Contudo, quando a disponibilidade de N é extremamente baixa a eficiência fotossintética de plantas C_3 pode ser maior que em C_4 (BROWN; WILSON, 1983).

Outro fator que está relacionado com o $\Delta^{13}\text{C}$ em plantas C_4 é a concentração de CO_2 nas células da bainha, que é substancialmente maior que nas células do mesófilo foliar e no ar atmosférico. Isso porque a enzima PEP carboxilase (PEPC) tem uma afinidade maior e velocidade máxima de reação superior a da RuBisCO. Esse mecanismo de concentração de CO_2 aumenta a taxa de carboxilação da RuBisCO, diminuindo a fotorespiração, pela inibição da atividade oxigenase dessa enzima (RANJITH et al., 1995; MEINZER; ZHU, 1998). Henderson et al. (1992) afirmam que o Φ pode ser usado para medir o grau de carboxilação da PEPC.

Embora o mecanismo fotossintético C_4 apresente inúmeras vantagens na fixação de carbono (C), nem todo o CO_2 transportado para as células da bainha é imediatamente fixado pela RuBisCO, pois parte vaza para as células do mesófilo

onde é re-fixado pela PEPC (MEINZER; ZHU, 1998). O vazamento de CO₂ (Φ) é uma fração que pode variar de 0 a 1, reduzindo a eficiência desse sistema por representar um gasto de energia adicional à planta, que necessita de ATP para regenerar a PEPC (HATCH; OSMOND, 1976).

O modelo conceitual do $\Delta^{13}\text{C}$ em plantas de ciclo C₄ é representado pela Eq. 3.1, desenvolvida por Farquhar (1983) e Henderson et al. (1992):

$$\Delta^{13}\text{C}_4 = a + [b_4 + \Phi(b_3 - s) - a] \cdot p_i/p_a \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Em que o parâmetro **a** significa fracionamento na difusão do CO₂ atmosférico pelo estômato como nas plantas C₃ (4,4‰); **b3** é o fracionamento que ocorre na carboxilação pela RuBisCo (29‰); **b4** significa o fracionamento durante a dissolução e conversão para HCO₃⁻ e fixação pela PEPC (-5,7‰); **s** é o fracionamento de CO₂ que volta para o feixe da bainha e difunde para o mesófilo foliar (1,8 ‰); Φ é o vazamento de CO₂ do feixe da bainha e ***pi/pa*** é a razão da pressão de CO₂ do espaço intracelular (câmara estomática) e do ambiente.

De acordo com Farquhar (1983) e Henderson et al. (1992), a condutância do CO₂ para as células da bainha e o gradiente de CO₂ entre as células da bainha e mesófilo são os dois fatores que mais determinam o valor de Φ e, conseqüentemente, no $\Delta^{13}\text{C}$ em plantas C₄. Outro fator que interfere no valor de Φ e no $\Delta^{13}\text{C}$ é a disponibilidade de N à planta (RANJITH et al., 1995; MIENZER; ZHU, 1998 e CLAY et al., 2001b). Sob condições limitantes de N a atividade da RuBisCO diminui em maior proporção do que a atividade da PEPC, aumentando o Φ e, conseqüentemente, o $\Delta^{13}\text{C}$ (RANJITH et al., 1995). As atividades da PEPC e da RuBisCo são afetadas porque o N é o principal componente dessas duas enzimas (RANJITH et al., 1995). Mienzer e Zhu, (1998) observaram que com o aumento do Φ ocorreu aumento linear no $\Delta^{13}\text{C}$ em folhas de cana-de-açúcar, sendo a correlação entre os fatores significativa ($R^2=0,94$, $p<0,001$).

A determinação do $\Delta^{13}\text{C}$ em plantas de ciclo C₄ e sua relação com a produtividade, eficiência de uso de água e nutrientes das culturas de ciclo C₄ foram objeto de estudo de vários pesquisadores (HUBICK, et al., 1990; RANJITH et al.,

1995; SALIENDRA et al., 1996; BUCHMANN et al., 1996; MEINZER; ZHU, 1998; WILLIAMS et al., 2001; CLAY et al., 2001b).

Pelo exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar se a disponibilidade de N no manejo irrigado (baixo estresse hídrico) modifica o $\Delta^{13}\text{C}$, correlacionando esse valor com produtividade de colmos em soqueira de cana-de-açúcar.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização da área experimental tratamentos e delineamento

O experimento foi desenvolvido na unidade da APTA Centro Oeste, localizada no município de Jaú Estado de São Paulo que possui coordenadas geográficas de 22°17'S 48°34'O e a uma altitude média de 580 m em relação ao nível do mar. Avaliou-se o quarto ciclo agrícola de um plantio de cana-de-açúcar (terceira rebrota ou soca), na safra 2009/2010. O cultivar utilizado foi o SP80-3280, muito adotado nos canaviais comerciais dos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul (CHAPOLA et al., 2011).

O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2006), cujas características químicas e físicas determinadas nas camadas de 0-25 e 25-50 cm estão apresentadas na Tabela 3.1.

Os tratamentos do estudo foram constituídos de quatro doses de N, (50, 100, 150, 200 kg ha⁻¹ de N), além de um tratamento controle. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com quatro repetições. As doses de N foram aplicadas na forma de uréia duas vezes por semana por gotejamento subsuperficial em pequenas porções durante o ciclo, sendo que a cada mês forneceu-se a cultura uma porcentagem da dose conforme estágio de crescimento das plantas; quatro meses antes da colheita foi interrompida a aplicação do fertilizante nitrogenado, fase essa correspondente a de maturação da cana-de-açúcar (Figura 3.1). Todos os tratamentos receberam dose de 150 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio distribuído ao longo do ciclo, sendo interrompida essa aplicação três meses antes da colheita (Figura 3.1).

Tabela 3.1 - Características químicas e físicas do solo da área experimental

Prof. cm	pH	COT g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K -----mmol _c dm ⁻³ -----	Ca	Mg	CTC	V %	Areia -----g kg ⁻¹ -----	Silte	Argila
0-25	5,2*	8,7	30	1,7	15	7,5	70	56	660**	70	270
0 - 50	4,8	7,5	20	1,2	9	4,0	32	44	560	100	320

*Análise realizada segundo metodologia de RAIJ (2001), ** Análise realizada segundo metodologia da EMBRAPA, (1997). ¹COT= Carbono orgânico total.

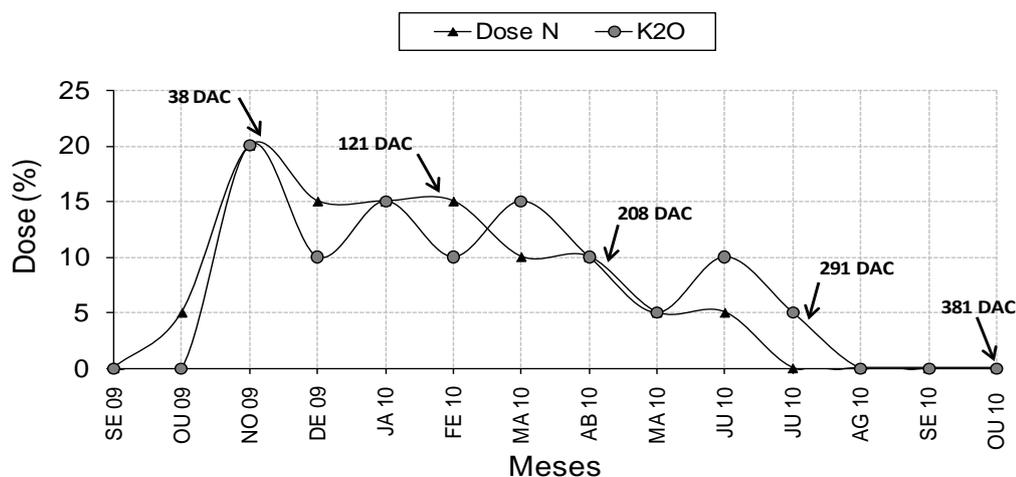


Figura 3.1 - Distribuição em porcentagem das doses de N e K₂O aplicadas por fertirrigação durante o ciclo de desenvolvimento de soqueira de cana-de-açúcar. As setas com o tempo em dias após o último corte (DAC) indicam os estádios em que foram realizadas avaliações biométricas e fisiológicas na cultura

3.2.2 Espaçamento e manejo da irrigação

As parcelas se constituíram de cinco linhas de cana-de-açúcar de 40 m de comprimento divididas em três subparcelas de 10 metros. Duas subparcelas foram utilizadas para realizar as avaliações fisiológicas e biométricas temporais, e uma para a determinação da produtividade final. Em todos os tratamentos foi utilizado o plantio em linha dupla (plantio “em W” ou plantio “abacaxi”), com espaçamento de 1,80 m entre as linhas duplas, e 0,4 m entre linhas de cana onde no centro instalou-se o tubo gotejador da irrigação. O tubo gotejador modelo (DRIPNET PC 22135 FL,

Adana, Turquia) possuindo vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$, com gotejadores a cada $0,5 \text{ m}$ foram enterrados a 25 cm de profundidade da superfície do solo. (Figura 3.2).

A pluviosidade total durante o ciclo da cultura foi de 1.435 mm , bem próxima da média histórica registrada para esse período, que é de 1.460 mm . A água aplicada por meio da irrigação foi de 390 mm , distribuída ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura repondo 100% a evapotranspiração da cultura (ETC), segundo o método de Penman-Monteith (HOWELL; EVETT, 2004). A evapotranspiração da cultura (ETC) acumulada foi de 1.320 mm , ocorrendo um déficit hídrico de apenas 28 mm . As temperaturas máximas e mínimas médias observadas durante o ciclo de desenvolvimento de 381 DAC foram de $29,2$ e $16,4 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente.

A frequência de irrigação foi realizada contabilizando-se o suprimento de água ao solo, pela precipitação (P) e da demanda atmosférica pela evapotranspiração da cana-de-açúcar (ETC), considerando uma capacidade de água disponível do solo (CAD) de 70 mm . Desse modo foi elaborado a estimativa do balaço hídrico descendial e calculada a deficiência hídrica (DEF)(Figura 3.3).

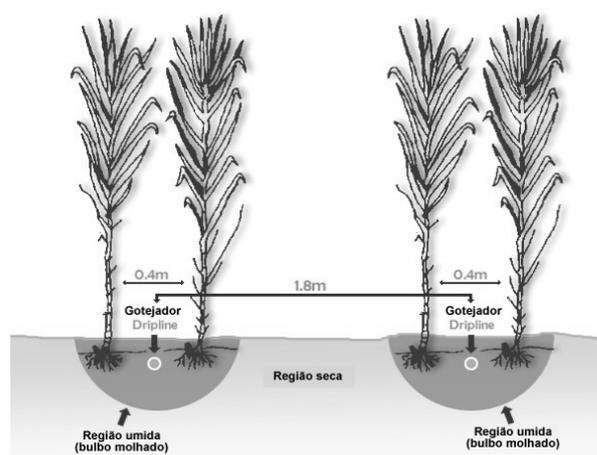


Figura 3.2 - Detalhe do espaçamento utilizado entre as linhas de cana-de-açúcar.

Fonte: Gava et al. (2011)

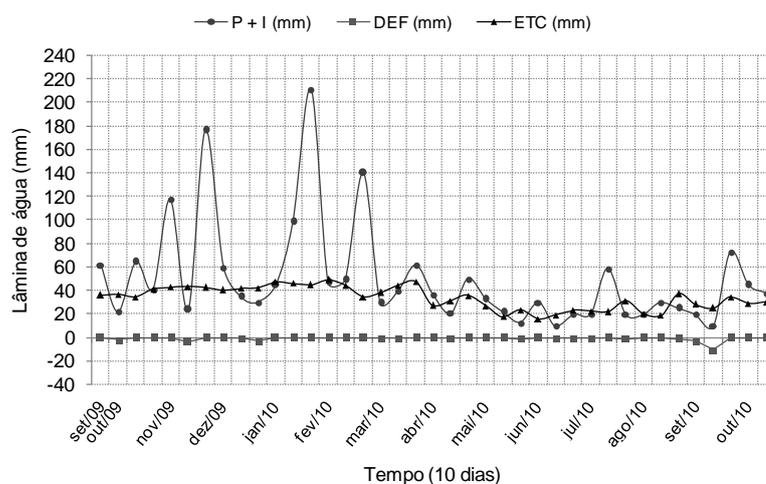


Figura 3.3 - Balanço hídrico decenal no manejo irrigado no período de 2009/2010

3.2.3 Avaliações realizadas e análise estatística

Para a determinação do $\Delta^{13}\text{C}$ realizaram-se quatro amostragens de folha+1 (primeira folha com lígula visível) segundo Mienzer e Zhu (1998), aos 121, 208, 291 e 381 DAC. O procedimento de coleta foi realizado sempre no período da manhã preferencialmente às 09:00 h e consistiu da retirada de 15 lâminas foliares de folhas +1 por parcela de cada tratamento. Após a colheita, foi realizada a eliminação da nervura central e separação de 20 cm da região mediana, que depois de terem sido lavadas em água corrente, foram colocadas sob secagem em estufa com circulação forçada de ar. Posteriormente, as amostras foram moídas em moinho tipo Willey e armazenadas em recipientes de plástico com tampa de pressão, para evitar o umedecimento das mesmas. A composição isotópica $\delta^{13}\text{C}$ e o teor de N total das amostras foram determinadas em espectrômetro de massas (modelo ANCA-GSL Hydra 20-20 SERCON Co., Crewe, GBR) acoplado a um analisador automático de C e N (BARRIE; PROSSER, 1996). Para a obtenção dos valores de $\Delta^{13}\text{C}$ (‰) utilizou-se a Eq. 3.2 descrita por Farquhar (1983) e Henderson et al. (1992).

$$\Delta = (\delta^{13}\text{C}_a + \delta^{13}\text{C}_p) / (1 + (\delta^{13}\text{C}_p/1000)) \quad (\text{Eq.3.2})$$

em que:

$\delta^{13}\text{C}_a$ = Composição isotópica do ar atmosférico quantificada $-8,0 \pm 0,01\text{‰}$;

$\delta^{13}\text{C}_p$ = Composição isotópica das plantas (folha +1) de cana-de-açúcar;

Foram feitas estimativas de produtividade de colmos nos períodos de 121, 208, 291 DAC a partir da colheita de 2 m de linha de cana-de-açúcar. Em cada período de amostragem, todos os colmos presentes na faixa de 2 m foram despalhados e pesados, sendo realizada a conversão para toneladas de colmos por hectare (TCH), considerando que existem 5.556 m de cana-de-açúcar em um hectare. Na colheita final (381 DAC), coletou-se 2 m de linha de cana-de-açúcar para determinação da massa seca da parte aérea (MSPA); depois de pesado a biomassa fresca, toda a amostra foi triturada em picadora de forragem, sendo retirada uma subamostra, em que se determinou a fitomassa seca após secagem em estufa de circulação forçada a 65 °C. Posteriormente, 30 m de cana-de-açúcar foram despalhados e cortados manualmente (sem despalha a fogo), e pesados para determinação da produtividade. Na mesma ocasião, coletou-se 10 colmos em cada parcela, para determinação dos atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, após a coleta triturou-se os colmos de cana-de-açúcar em picadora de forragem, na sequência foi extraído o caldo com auxílio de uma prensa hidráulica para então determinar as quantidades de fibra, pol do caldo corrigido (PCC), teor de sólidos solúveis (Brix) e açúcares totais recuperáveis (ATR) (CONSECANA, 2003).

A partir dos resultados obtidos realizou-se a análise de variância utilizando-se o teste F ($p < 0,05$). A seguir, os dados foram submetidos à análise de regressão, sendo elaboradas curvas por meio de programa científico SigmaPlot (Versão 11.0, Systat Software inc., San Jose, EUA).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Produtividade de colmos e açúcar

Verificou-se resposta linear significativa às doses de N aplicadas por meio da irrigação na produtividade de colmos TCH, em todas as avaliações realizadas e na colheita final para a produtividade de açúcar (TPH) (Tabela 3.2) (Figuras 3.4A e 3.4B). Esses resultados indicaram que a demanda por N em soqueira de cana-de-açúcar irrigada pode ser superior a dose atualmente recomendada no manejo de sequeiro, que varia de 100 a 120 kg ha⁻¹ de N para produtividades esperadas acima de 100 Mg ha⁻¹ de colmos (RAIJ; CANTARELLA, 1996). No entanto, cabe ressaltar que a irrigação proporciona alguns benefícios em relação aos manejos convencionais de sequeiro, como suprimento adequado de água, possibilidade de parcelamento dos nutrientes N e K, redução dos tratos culturais entre outros (DALRI; CRUZ, 2008; NG KEE KWONG et al., 1999).

Wiedenfeld e Enciso (2008) observaram respostas positivas na produtividade de colmos e açúcar com doses crescentes de N aplicadas por gotejamento subsuperficial, para soqueiras de cana-de-açúcar em clima subtropical semi-árido no Texas-EUA. Thorburn et al. (2003) utilizando tratamento controle e doses de 80, 120, 160 e 240 kg ha⁻¹ de N obtiveram incrementos de produtividade de colmos utilizando irrigação por gotejamento com a cultivar Q124, por quatro ciclos consecutivos, no leste da Austrália. Estes resultados indicaram que o parcelamento do N por meio do sistema de gotejamento subsuperficial (Figura 3.3), pode elevar a eficiência de utilização do N-fertilizante quando comparado com uma única aplicação em faixas (WIEDENFELD; ENCISO, 2008; NG KEE KWONG et al., 1999).

A elevação da dose de 50 para 200 kg ha⁻¹ de N aumentou a produtividade de colmos em 60% nas condições deste estudo. Wiedenfeld e Enciso (2008) observaram incrementos menores de 27% com o aumento da dose de 60 para 180 kg N ha⁻¹ de N aplicada por gotejamento subsuperficial, em Chernossolos do Texas-EUA. Com a irrigação por gotejamento subsuperficial, a resposta da cultura ao N intensifica-se, (SINGH; MOHAN, 1994; WIEDENFELD, 1995; WIEDENFELD;

ENCISO, 2008), devido à diminuição da restrição hídrica e também pela elevação da concentração de N-NH_4^+ e N-NO_3^- , na solução do solo principalmente na região do bulbo úmido (STANLEY et al., 1990; THORBURN et al., 2003; KÖLLN et al., 2010), ao longo do período e desenvolvimento da cana-de-açúcar. Além deste fato, uma das funções do nitrogênio nas plantas é aumentar a multiplicação e a diferenciação celular (TAIZ; ZEIGER, 2004) que irá resultar em produtividade de colmos na cana-de-açúcar.

A produtividade de açúcar é a resultante da percentagem bruta de açúcar do caldo PCC (%) e da quantidade de colmos. Neste trabalho verificou-se que a elevação da dose de N de 0 até 200 kg ha^{-1} , o PCC reduziu em 2% (Tabela 3.3) (Figura 3.7). Entretanto, mesmo com a redução no PCC, a produtividade de açúcar TPH elevou-se de 10 para 18 Mg ha^{-1} (Tabela 3.2 e Figura 3.4 b). Isto ocorreu porque a produtividade de colmos superou a queda do PCC, gerando assim maior TPH. Resultados semelhantes ao deste trabalho foram obtidos por Singh; Mohan (1994); Wiedenfeld (1995); Wiedenfeld (2000). De acordo com Ng Kee Kwong et al. (1999) a irrigação por gotejamento, quando bem empregada, pode aumentar a eficiência de utilização de água e de nutrientes, entre eles o N para a planta, resultando em elevação na produtividade de colmos e de açúcar.

Houve aumento na produtividade de colmos em função das épocas de avaliação (Tabela 3.2), esse incremento está relacionado ao maior acúmulo de biomassa da parte aérea que se concentra, em grande parte, nos colmos. Entretanto, o teor de N na folha+1 (Tabela 3.2), decresceu com o desenvolvimento da cana-de-açúcar, devido ao efeito diluição (FARONI, 2008; OLIVEIRA, 2011).

Tabela 3.2 - Fracionamento isotópico de carbono $\Delta^{13}\text{C}$, teor de N na folha+1, produtividade de colmos por hectare e produtividade de açúcar em função de doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

dose kg ha ⁻¹	época DAC	$\Delta^{13}\text{C}$ ‰	N folha+1 g kg ⁻¹	TCH -----Mg ha ⁻¹ -----	TPH
0	121	4,16 d	18,2 a	7,2 c	-
	208	5,38 a	13,6 b	31,1 b	-
	291	4,64 c	10,8 c	36,1 b	-
	381	5,21 b	9,2 c	59,2 a	10,1
50	121	4,07 d	19,0 a	8,3 c	-
	208	5,26 a	14,0 b	38,0 b	-
	291	4,46 c	11,3 c	52,8 b	-
	381	5,06 b	10,1 c	75,3 a	12,0
100	121	4,12 d	21,1 a	16,4 c	-
	208	5,21 a	16,8 b	54,1 b	-
	291	4,41 c	14,2 c	83,9 a	-
	381	5,06 b	11,6 d	90,7 a	15,9
150	121	4,14 d	22,1 a	24,7 c	-
	208	5,16 a	17,5 b	68,0 b	-
	291	4,35 c	14,3 c	85,1 b	-
	381	4,96 b	11,3 d	109,3 a	18,4
200	121	4,11 d	21,7 a	22,6 c	-
	208	5,09 a	18,2 b	74,1 b	-
	291	4,27 c	14,2 c	91,5 b	-
	381	4,92 b	12,6 c	120,5 a	18,9
Média	121	4,12 d	20,4 a	15,7 d	-
	208	5,22 a	16,0 b	53,1 c	-
	291	4,43 c	12,9 c	69,9 b	-
	381	5,04 b	10,9 d	91,0 a	15,0
Int. dose x DAC	-	1,89*	1,09*	3,17**	-
R ² R. L.	121	ns	Ns	0,85*	-
	208	0,89*	0,73**	0,97**	
	291	0,91*	0,68*	0,87**	
	381	0,96**	0,76**	0,99**	0,95**
R ² R. Q.	-	ns	Ns	ns	ns
CV (%)	-	1,78	8,6	17,0	13,0

**p<0,01, *p<0,05, ns=não significativo, (DAC) = dias após o corte, $\Delta^{13}\text{C}$ fracionamento isotópico de carbono (‰), TCH= tonelada de colmos por hectare, TPH = toneladas de açúcar por hectare (RL)= regressão linear, (RQ) = regressão quadrática.

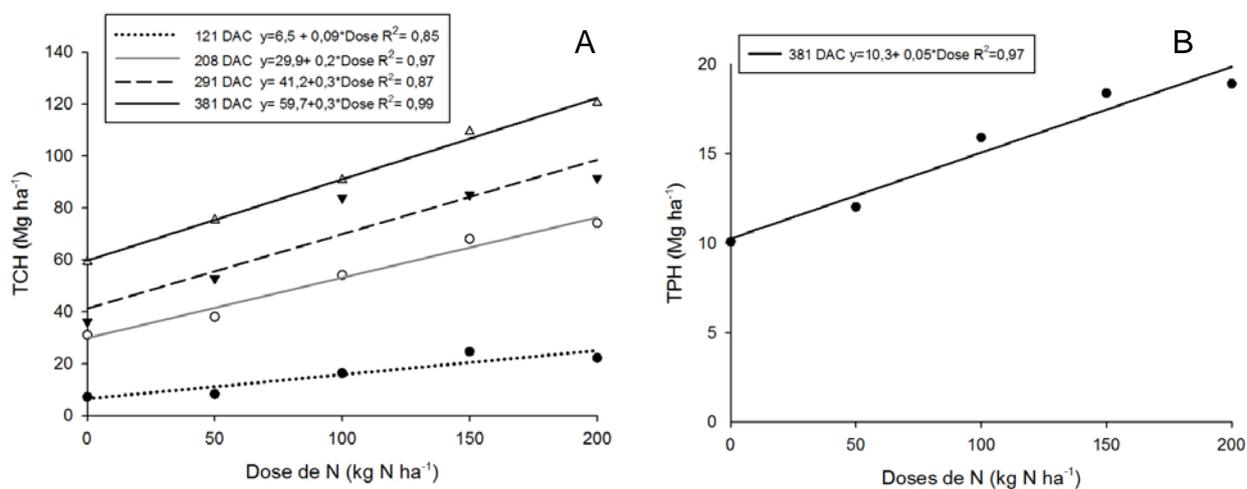


Figura 3.4 - Produtividade de colmos TCH em diferentes fases de crescimento (A) e produtividade de açúcar TPH na colheita final (B) em função de doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

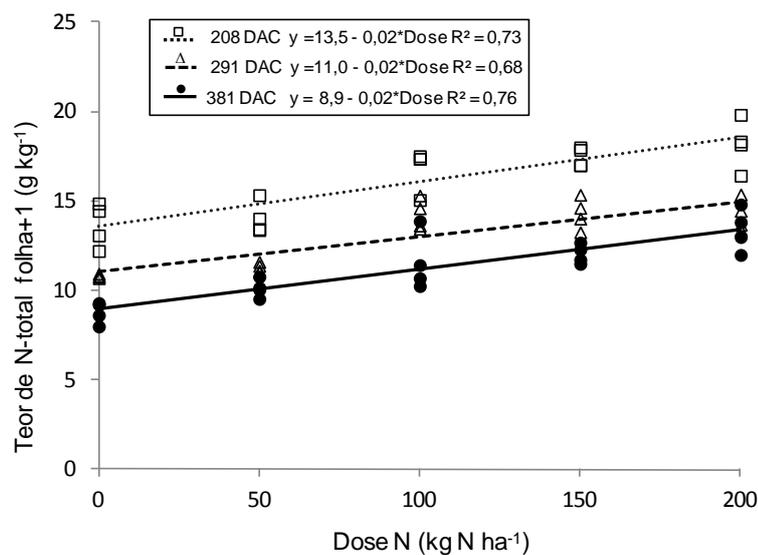


Figura 3.5 - Correlação entre teor de N na folha +1 e doses de N aplicadas por gotejo subsuperficial em diferentes épocas do ciclo de desenvolvimento de soqueira de cana-de-açúcar

3.3.2 Fracionamento isotópico de carbono

Houve decréscimo no $\Delta^{13}\text{C}$ ‰ em função das doses de N aplicadas, com diferenças de -0,062, -0,323 e -0,285 (Δ ‰) do tratamento controle em relação a maior dose de N (200 kg ha⁻¹), respectivamente, para épocas de 208, 291 e 381 DAC (Tabela 3.2). Esses resultados evidenciam uma diminuição de -0,002 ‰ no $\Delta^{13}\text{C}$ para cada kg de N aplicado por meio da irrigação. A redução no $\Delta^{13}\text{C}$, provavelmente ocorreu devido a maior atividade das enzimas PEPC e RuBisCo nos tratamentos com maior disponibilidade de N nas plantas, como se verifica pelo teor de N foliar (Figura 3.5 e Tabela 3.2). A deficiência de N diminui a atividade das enzimas PEPC e RuBisCO, aumentando o vazamento (Φ) e, conseqüentemente, o $\Delta^{13}\text{C}$ (MIENZER; ZHU, 1998). Ranjith et al. (1995) verificaram que o valores de $\Delta^{13}\text{C}$ reduziram-se de 4,4 à 3,8 ‰ conforme o concentração de N nas folhas se elevou de 2,85 para 6,35 mg m⁻². A taxa de fixação de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) da RuBisCo, e a produção de matéria seca desse estudo, apresentaram o mesmo comportamento sendo elevadas para um $\Delta^{13}\text{C}$ de 3,7‰ (menor) e baixas para um $\Delta^{13}\text{C}$ de 4,9‰ (maior) (RANJITH et al., 1995).

Na cultura do milho, Clay et al. (2001a) verificaram que o $\Delta^{13}\text{C}$ diminuiu quando a adubação nitrogenada aumentou de 0 para 168, 201 e 234 kg ha⁻¹ de N respectivamente para 3 anos de avaliação, com três disponibilidades de água: baixo, médio e alto na região norte dos EUA. De acordo com Clay et al. (2001a), para cada kg de N adicionado, quando a água não se apresentava como limitante (alto), houve decréscimo de -0,01 ‰ no $\Delta^{13}\text{C}$ das plantas de milho.

Verificou-se neste trabalho que os maiores valores de $\Delta^{13}\text{C}$, ocorreram aos 208 DAC (abril/2010) coincidindo com fase de máximo crescimento da cana-de-açúcar. Esse comportamento ocorreu porque a demanda de N nesse período foi elevada, conseqüentemente, aumentando o estresse por deficiência do nutriente e, por conseqüência o $\Delta^{13}\text{C}$. Por outro lado, os menores valores de $\Delta^{13}\text{C}$ foram obtidos aos 121 DAC (fevereiro/2010), fase em que a cana-de-açúcar apresentava baixo crescimento e menor exigência de N (Tabela 3.2). Observou-se redução nos valores de $\Delta^{13}\text{C}$ aos 291 DAC, sendo que essa queda pode estar relacionada à época do ano (julho/2010), que correspondeu a um período de baixa precipitação, baixa

umidade relativa do ar (%), além de temperaturas mais amenas, fazendo com que ocorresse menor fotossíntese bruta, diminuindo, portanto, os valores $\Delta^{13}\text{C}$ em todas as doses de N comparativamente aos 208 DAC, e posterior 381 DAC (Tabela 3.2) (Figura 3.6).

Foi obtida correlação entre os valores de $\Delta^{13}\text{C}$ e a produtividade de colmos ($R^2=0,69$, $p<0,05$) e a produção de MSPA ($R^2=0,68$, $p<0,05$) sendo que os valores se relacionaram inversamente (Figura 3.7). Com esses resultados pode-se inferir que o $\Delta^{13}\text{C}$ apresentou correlação com a disponibilidade de N na planta, pois tanto para a parte biológica (MSPA) como para a produtividade industrial (colmos) verificou-se decréscimo do $\Delta^{13}\text{C}$ à medida que se elevou a disponibilidade de N. Resultados semelhantes foram observados por Meinzer e Zhu (1998) em quatro clones comerciais e quatro não comerciais de cana-de-açúcar cultivados com diferentes doses de N no Hawaii, EUA. Estes autores verificaram que os valores de $\Delta^{13}\text{C}$ ‰ nas folhas +1 de cana-de-açúcar diminuíram linearmente ($R^2=0,84$, $p<0,05$) com o aumento do rendimento quântico (absorção de fótons) das plantas. Clay et al. (2001a) na cultura do milho cultivada com três níveis de irrigação e três níveis de adubação com N também obtiveram correlação linear inversa ($R^2=0,84$ $p<0,01$) entre $\Delta^{13}\text{C}$ e produtividade de grãos de milho.

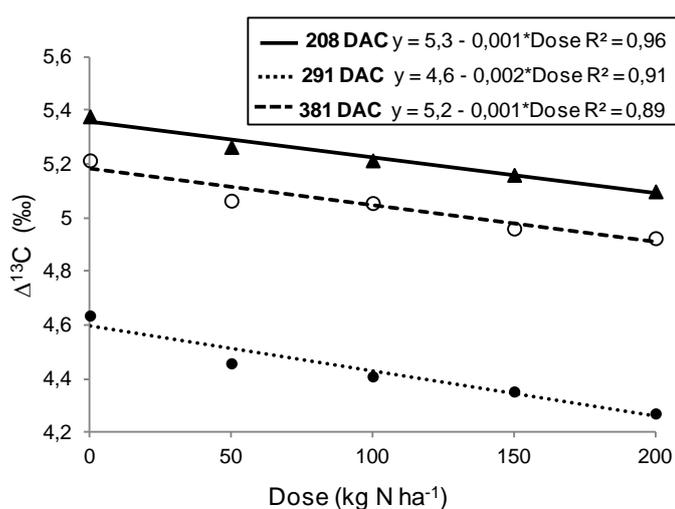


Figura 3.6 - Fracionamento isotópico de carbono $\Delta^{13}\text{C}$ em folha de cana-de-açúcar em diferentes épocas de crescimento em função de doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

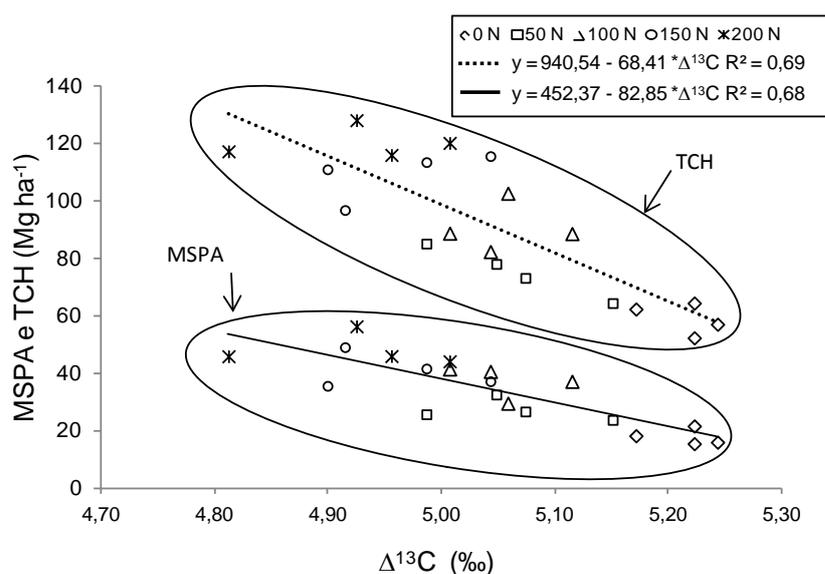


Figura 3.7 - Correlação entre produtividade de massa seca da parte aérea MSPA, produtividade de colmos TCH e $\Delta^{13}C$ em diferentes doses de N aos 381 DAC

3.3.3 Qualidade tecnológica

A elevação da dose de N não modificou os teores de fibra, Brix e ATR dos colmos. Estes resultados estão de acordo com Dalri e Cruz, (2008), que não obtiveram diferenças utilizando diferentes doses de N e K com irrigação por gotejamento subsuperficial no Estado de São Paulo. Resultados semelhantes também foram obtidos Franco (2008) e Bologna-Campbell (2007) com cana-de-açúcar cultivada sem irrigação.

O teor de açúcar da matéria prima (PCC) correlacionou-se negativamente com o aumento da dose de N (Figura 3.7). Essa redução ocorrida pode ser devido ao fato de que doses crescentes de nitrogênio podem elevar a atividade da enzima invertase responsável pela degradação de açúcares redutores convertendo-os em açúcares (glucose e frutose) (SINGH; MOHAN, 1994). O fornecimento elevado de N também faz com que a cana-de-açúcar tenha mais capacidade de produzir carboidratos (biomassa), estimulando o crescimento vegetativo, e diluindo a concentração de açúcares no colmo, com conseqüente queda de sua qualidade industrial (MUCHOW et al., 1996).

Muchow et al. (1996), trabalhando com diferentes doses de N em sistema de sequeiro, observaram que os valores de PCC diminuíram de 16,1 para 13,1% quando se aumentou a dose de N de 56 para 268 kg ha⁻¹.

Tabela 3.3 - Fibra, Brix, Pol de cana corrigido PCC, e açúcares totais recuperáveis ATR, em função de doses crescentes de N aplicadas por gotejo subsuperficial

dose kg ha ⁻¹	fibra -----% -----	PCC -----	Brix °	ATR ----- kg t ⁻¹ ----
0	16,8	17,0	24,3	166,2
50	15,8	16,0	23,6	164,1
100	16,3	17,5	24,3	170,5
150	16,0	16,8	23,6	164,4
200	15,7	15,7	22,6	154,1
R ² R. L.	ns	0,44*	Ns	ns
R ² R.Q.	ns	ns	Ns	ns
CV (%)	4,8	5,8	5,3	5,52

*p<0,05, ns=não significativo, (DAC) = dias após o corte, PCC= pol de cana corrigido, ATR= açúcares totais recuperáveis, CV= coeficiente de variação, (RL)= regressão linear, (RQ) = regressão quadrática.

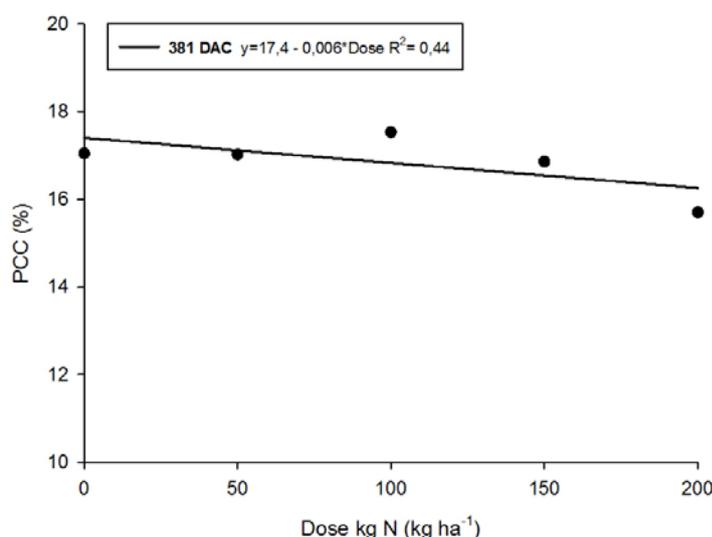


Figura 3.7 - Pol do caldo corrigido (PCC) submetido á doses crescentes de N em cana-de-açúcar, aplicadas via gotejamento subsuperficial

3.4 CONCLUSÕES

1. Os valores de $\Delta^{13}\text{C}$ em folhas +1 de cana-de-açúcar correlacionaram com resultados de produtividade de colmos e de massa seca da parte aérea no ambiente sem deficiência hídrica (manejo irrigado);
2. A adubação nitrogenada aplicada por meio do sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial elevou em 60 e 8 Mg ha⁻¹ a produtividade de colmos e de açúcar respectivamente com o incremento da dose de N de 0 para 200 kg ha⁻¹ para a cultivar SP80-3280;
3. A fertilização com N por meio de gotejamento subsuperficial reduziu os valores de pol de cana, no entanto não influenciou no ATR, Brix e fibra da cana-de-açúcar.

Referências

- BARRIE, A.; PROSSER, S.J. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T. W.; YAMASAKI, S. (Ed.). **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 1-46.
- BOLOGNA-CAMPBELL, I. **Balanço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**. 2007. 112 f. Tese (Doutorado Ciência do Solo e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- BOLTON, J. K.; BROWN, R. H. Photosynthesis of grass species differing in carbon dioxide fixation pathways. **Plant Physiology**, Chicago, v. 66, p. 97–100, 1980.
- BROWN, R. H.; WILSON, J. R. Nitrogen response of *Panicum* species differing in CO₂ fixation pathways. II. CO₂ exchange characteristics. **Crop Science**, Madison, v. 23, p. 1154–1159, 1983.
- BROWN R. H. A difference in N use efficiency in C₃ and C₄ plants and its implications in adaptation and evolution. **Crop Science**, Madison, v. 18, p. 93–98, 1978.
- BUCHMANN, N.; BROOKS, J. R.; RAPP, K. D.; EHLERINGER, J. R. Carbon isotope composition of C₄ grasses is influenced by light and water supply. **Plant, Cell and Environment**, Amsterdam, v. 19, p. 392-402, 1996.

CHAPOLA, R. G.; HOFFMANN, H. P.; BASSINELLO, A. I.; FERNANDES Jr, A. R.; VIEIRA, M. A. S. Censo varietal 2010 de cana-de-açúcar nos estados de São Paulo e Mato Grosso do sul. **STAB – Açúcar, e Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 29, p. 42-45, 2011.

CLAY D. E.; CLAY S. A.; LIU Z.; REESE C. Spatial variability of C-13 isotopic discrimination in corn (*Zea mays*). *Common. Agronomy Journal*, Madison, v. 32, p. 1813-1827, 2001a.

CLAY D. E.; ENGEL R.; LONG D. S.; LIU Z. Nitrogen and water stress Interact to influence carbon-13 discrimination in wheat. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 65, p. 1823-1828, 2001b.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CONSECANA. **Manual de Instruções**. 4. ed. Piracicaba, 2003. 115 p.

DALRI. A. B.; CRUZ, R. L; Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 516-524, 2008.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FARONI, C. A. **Eficiência agrônômica das adubações nitrogenadas de plantio e após o primeiro corte avaliada na primeira soca da cana-de-açúcar**. 2008. 190 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FARQUHAR G. D.; EHLERINGER J. R.; HUBICK K.T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis, **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 40, p. 530–537, 1989.

FARQUHAR, G. D. On the nature of carbon isotope discrimination in C4 species. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 10, p. 205-26, 1983.

FAVOLINI, A.; WILLIAMS, D. G.; THOMPSON, T. L. Carbon isotope discrimination and bundle sheath leakiness in three C4 subtypes grown under variable nitrogen, water and atmospheric CO2 supply. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 53, p. 2261-2269, 2002.

FRANCO, H. C. J. **Eficiência agrônômica da adubação nitrogenada de cana-planta**. 2008. 112 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

HATCH, M. D.; OSMOND, C. B. Compartmentation and transport in C₄ photosynthesis. In: STOCKING, C. R.; HEBER, U. (Ed.). **Encyclopedia of Plant Physiology. New Series**. Transport in plants. III. Intracellular interactions and transport processes. Berlin: Springer-Verlag, 1976. v. 3, p. 144–184.

HENDERSON, S. A.; CAEMMERER, S. V.; FARQUHAR, G. D. Short-term measurements of carbon isotope discrimination in several C₄ species. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 19, p. 263-285, 1992.

HOWELL, T. A.; EVETT, S. R. **The Penman-Monteith method**. Washington, DC: USDA-Agricultural Research Service, Conservation & Production Research Laboratory, 2004. 14 p.

HUBICK, K. T.; HAMMER, G. L.; FARQUHAR, G. D.; WADE, L. J.; VON CAEMMERER, S.; HENDERSON, S. A. Carbon isotope discrimination varies genetically in C₄ species. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 91, p. 534-537, 1990.

KÖLLN, O. T.; GAVA, G. J. C.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Disponibilidade de N-(NH₄⁺ NO₃⁻), em um bulbo úmido com diferentes doses de N-fertilizante no sistema de fertirrigação por gotejamento. In: SIMPÓSIO CIENTÍFICO DOS PÓS-GRADUANDOS NO CENA/USP, 3., 2010, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Cena/USP, 2010. 1 CD ROM.

MEINZER, F. C.; ZHU, J. Nitrogen stress reduces the efficiency of the C₄CO₂ concentrating system, and therefore quantum yield, in *Saccharum* (sugarcane) species. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v. 49, p. 1227-1234, 1998.

MONNEVEUX, P.; SHESHAYEE, M. S.; AKHTER, J.; RIBAUT, J. M. Using carbon isotope discrimination to select maize (*Zea mays* L.) inbred lines and hybrids for drought tolerance. **Plant Science**, Amsterdam, v. 173, p. 390-396, 2007.

MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J.; WOOD, A. W. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. II. Sucrose accumulation and commercial yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, p. 26-37, 1996.

NG KEE KWONG, K. F.; PAUL, J. P.; DEVILLE, J. Drip-fertigation - a means for reducing fertilizer nitrogen to sugarcane. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 35, n. 1, p. 31-37, 1999.

OLIVEIRA, E. C. A. **Balço nutricional da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada**. 2011. 213 p. Tese (Doutorado Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

PEREIRA, W. **Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas**. 2011. 70 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, A. J.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. p. 8-13. (Boletim Técnico, 100).

RANJITH, S. A.; MEIZER, F. C.; PERRY, M. H.; THOM, M. Partitioning of carboxylase activity in nitrogen-stressed sugarcane and its relationship to bundle sheath leakiness to CO₂, photosynthesis and carbon isotope discrimination. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 22, p. 903-911, 1995.

SALIENDRA, N. Z.; MEINZER, F. C.; PERRY, M.; THOM, M. Associations between partitioning of carboxylase activity and bundle sheath leakiness to CO₂, carbon isotope discrimination, photosynthesis, and growth in sugarcane. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, p. 907-914, 1996.

SINGH, P. N.; MOHAN, S. C. Water use and yield response of sugarcane under different irrigation schedules and nitrogen levels in a subtropical region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 26, p. 253-264, 1994.

SMELTEKOP, H.; CLAY, D. E.; CLAY, S. A. The impact of intercropping annual 'Sava' snail medic on corn production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 917-924, 2002.

STANLEY, C. D.; GREEN, R. E.; KHAN, M. A.; SANTO, L. T. Nitrogen fertilization rate on soil nitrate distribution for microirrigated sugarcane. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 1, p. 217-222, 1990.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2004, 719 p.

THORBURN, P. J.; DART, I. K.; BIGGS, I. M.; BAILLIE, C. P.; SMITH, M. A.; KEATING, B. A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 22, p. 201-209, 2003.

WIEDENFELD. B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid South Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 665-671. 2008.

WIEDENFELD. R. P. Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield and quality. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 43, p. 101, 1995.

WIEDENFELD. R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 43, p. 173-182, 2000.

WILLIAMS, D. G.; GEMPKE, V.; FRAVOLINI, A.; LEAVITT, S. W.; WALL, G. W.; KIMBALL, B. A.; PINTER JUNIOR, P. J.; LAMORTE, R.; OTTMAN, M. Carbon isotope discrimination by *Sorghum bicolor* under CO₂ enrichment and drought. **New Phytologist**, Cambridge, v. 150, p. 285-293, 2001.

4 PERDA DE PRODUTIVIDADE EM CANA-DE-AÇÚCAR POR DEFICIÊNCIA HÍDRICA E DE NITROGÊNIO

RESUMO

A disponibilidade de água e de nitrogênio aos vegetais são fatores determinantes da produtividade das culturas, devido suas importâncias no desenvolvimento vegetal. A estimativa da perda de rendimento causada por esses fatores com métodos de experimentação convencionais são difíceis, podendo gerar resultados insatisfatórios. Objetivou-se com este trabalho verificar a influência da interação da disponibilidade de água e de nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar e, isolar, caracterizar e correlacionar o efeito da deficiência destes dois fatores, utilizando o fracionamento dos isótopos de carbono ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$; $\Delta^{13}\text{C}$) e o acúmulo de matéria seca de colmos (potencial de fixação líquida de carbono na planta). O experimento foi desenvolvido na Unidade da APTA Centro Oeste no município de Jaú, em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições, com os seguintes tratamentos: T1-sequeiro não fertilizado com N; T2-irrigado não fertilizado com N; T3-sequeiro e fertilizado com N; e T4-irrigado e fertilizado com N. O experimento foi conduzido por dois ciclos agrícolas de cultivo: 2008/2009 e 2009/2010, utilizando o cultivar SP80-3280. Houve efeito positivo da irrigação associado a fertilização com N na produtividade de colmos por hectare (TCH), produtividade de açúcar por hectare (TPH) e no acúmulo de massa seca dos colmos (MSC) com incrementos de 60,4, 9,5 e 18,5 Mg ha⁻¹ respectivamente do T1 em relação ao T4, médias dos dois ciclos. Os teores de N nos colmos não foram influenciados pelo manejo (sequeiro ou irrigado), porém elevaram-se com a fertilização nitrogenada. Os maiores valores de fracionamento dos isótopos de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) foram obtidos para o tratamento com deficiência de N e elevado déficit hídrico (T1), enquanto que para o tratamento T4 (adubação com N e baixo déficit hídrico) foram verificados valores de $\Delta^{13}\text{C}$ inferiores. As medidas de fracionamento isotópico de carbono mostraram-se eficiente na avaliação de estresse da cana-de-açúcar, podendo ser utilizado como um indicador de déficit hídrico e deficiência de N nessa cultura.

Palavras-chave: fracionamento de carbono, déficit hídrico, índice de perda.

ABSTRACT

The availability water and nitrogen to plants are determinants of crop yields, due to their importance in plant development. The estimated losses of income caused by these factors with conventional testing methods are difficult and may produce unsatisfactory results. This study aimed to evaluate the influence of the interaction of water availability and nitrogen on yield of sugarcane, and to isolate, characterize and correlate the effect of deficiency of these two factors, using the fractionation of carbon isotopes ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$; $\Delta^{13}\text{C}$) and dry matter accumulation of stalks (Potential of carbon liquid fixation in the plant). The experiment was conducted at the unit of APTA in the midwest city of Jaú, in a randomized block design with four replications, with the following treatments: T1- dryland not fertilized with N, T2- drip not fertilized with N, T3 – dryland and fertilized with N and T4- drip and fertilized with N. The experiment was conducted by two cycles of agricultural crops: 2008/2009 and 2009/2010 using the cultivar SP80-3280. There was a positive effect of irrigation associated with N fertilization in the crop yield per hectare (TCH), sugar yield per hectare (TPH) and the dry mass of stem (MSC) with increments of 60.4, 9.5 and 18.5 Mg ha^{-1} respectively from T1 to T4, averages of two cycles. The content of N in the stalks were not influenced by management (dryland or drip), but increased with nitrogen fertilization. The highest values of carbon isotope fractionation ($\Delta^{13}\text{C}$) were obtained for treatment with N deficiency and high water stress (T1), while for T4 (N fertilization and low water stress) were found lower values $\Delta^{13}\text{C}$. Measurements of carbon isotopic fractionation were efficient in assessing stress from sugar cane, can be used as an indicator of water deficit and deficiency of N in this culture.

Keywords: Carbon fractionation, water deficit, rate of loss

4.1 INTRODUÇÃO

A água e o nitrogênio são os fatores que mais limitam o desenvolvimento e a produtividade da cana-de-açúcar na agricultura de sequeiro (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; SALIENDRA et al., 1996; GAVA et al., 2010; GAVA et al., 2011). Entretanto as interações entre esses dois fatores na produtividade da cultura da cana-de-açúcar não são bem compreendidas, apesar de sua importância para a planta (GAVA et al., 2010).

A água é constituinte de mais de 70% da massa dos vegetais é componente vital para a fotossíntese estando diretamente ligada à abertura e fechamento de estômatos (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A deficiência hídrica modifica o metabolismo, a fisiologia e a morfologia das plantas, causando redução na taxa de fotossíntese e no desenvolvimento vegetal (SALIENDRA et al., 1996; INMAM-BAMBER et al., 2005). Segundo Saliendra et al. (1996) o déficit hídrico provoca a diminuição da atividade das enzimas Ribulose 1,5 bisfosfato carboxilase oxigenase (RUBISCO) e da Fosfoenol pirúvico carboxilase (PEPcase), das trocas gasosas especialmente de CO₂, e sua condução para as folhas, mitigando a fixação de CO₂ atmosférico, com consequente queda de crescimento da cana-de-açúcar.

O efeito da deficiência hídrica depende do estágio fenológico da planta e da duração do estresse (INMAM-BAMBER et al., 2005). De acordo com Ramesh e Mahadevaswamy (2000), o déficit hídrico durante o período de brotação e perfilhamento diminui a produtividade de colmos, reduz o "stand" de plantas e a divisão celular (INMAM-BAMBER; SMITH, 2005). Inmam-Bamber (2004) observou perdas de até 35% na produção de biomassa de cana-de-açúcar em um período de alta demanda evaporativa em plantas jovens.

O nitrogênio, por sua vez, é parte fundamental de todos ácidos nucléicos e aminoácidos que são precursores das proteínas. A baixa disponibilidade desse nutriente, geralmente limita a produtividade dos vegetais em ecossistemas naturais e agrícolas (EPSTEIN; BLOON, 2004).

Na cultura da cana-de-açúcar, em condições ambientais de nitrogênio limitante, constatou-se que a atividade das enzimas RUBISCO e da PEPcase,

também diminuíram drasticamente, reduzindo a eficiência fotossintética (fixação de CO₂) e a taxa de crescimento da cultura (RANJITH et al., 1995).

Diferente do manejo de sequeiro, em que as respostas a fertilização nitrogenada são variáveis (SAMPAIO et al., 1984; VITTI et al., 2007; FARONI, 2008; PEREIRA, 2011), a prática da adubação nitrogenada da cana-de-açúcar irrigada (baixa deficiência hídrica) apresentou maior potencial de resposta, sendo que na maioria dos trabalhos foram constatados efeito positivo da interação (SINGH; MOHAN, 1994; NG KEE KWONG et al., 1999; THORBURN et al., 2003; WIEDENFELD; ENCISO, 2008; GAVA et al., 2010).

A produção de biomassa em plantas de ciclo C₄ foi fortemente afetada pela limitação de água e de nitrogênio como verificaram Ranjith et al. (1995), Saliendra et al. (1996), Fravolinil et al. (2002), Clay et al. (2005). Ranjith et al. (1995) e Mienzer e Zhu (1998) constataram correlação positiva entre a disponibilidade de água e nitrogênio com as variáveis: atividade das enzimas RuBisCo e PEPcase; com a taxa de fixação de carbono; e a produção de biomassa (resultante da fotossíntese líquida); em contrapartida verificaram correlação negativa com as variáveis: fracionamento isotópico de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) e o vazamento de CO₂ da bacia (Φ).

Uma possível forma de identificação e quantificação de perdas de produtividade da cana-de-açúcar, por deficiência hídrica ou de nitrogênio, bem como o déficit conjunto destes dois fatores de crescimento, seria correlacionar o fracionamento dos isótopos estáveis de carbono ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) com a resultante da fotossíntese líquida de um vegetal (produtividade de massa de matéria seca), em ambientes com ou sem limitação de nitrogênio e ou água (FRAVOLINIL et al., 2002; CLAY et al., 2005).

Os objetivos deste trabalho foram: i) verificar a influência da interação hídrica e de nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar e ii) isolar, caracterizar e correlacionar o efeito da deficiência destes dois elementos, utilizando o fracionamento dos isótopos de carbono ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) e o acúmulo de matéria seca dos colmos (potencial de fixação líquida de carbono na planta).

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi desenvolvido na Unidade da APTA Centro Oeste no município de Jaú, Estado de São Paulo, em local posicionado nas coordenadas geográficas latitude de 22°17' S, longitude 48°34' O. O estudo foi realizado durante os períodos de 2008/09 e 2009/10, correspondendo a segunda e terceira soqueira do cultivar SP80-3280. O primeiro ciclo de produção teve duração de 367 dias, correspondendo ao período de setembro de 2008 a setembro de 2009. O segundo ciclo de produção teve duração de 290 dias, compreendendo ao período de setembro de 2009 a junho de 2010, sendo mais curto devido a um incêndio acidental ocorrido na área experimental (14/07/2010) que levou a finalização prematura do experimento. O solo do local foi classificado como Latossolo Vermelho, segundo Embrapa (2006), cujas características químicas e físicas determinadas nas camadas de 0-25 e 25-50 cm estão apresentadas na Tabela 4.1.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições, com os tratamentos descritos na Tabela 4.2 constituindo-se em um fatorial 2x2.

Tabela 4.1 - Características químicas e físicas do solo da área experimental

Prof. cm	pH	COT g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K -----mmol _c dm ⁻³ -----	Ca	Mg	CTC -----	V %	Areia -----g Kg ⁻¹ -----	Silte	Argila
0-25	5,2*	9	17	1,7	15	7	70	56	660**	70	270
0 - 50	4,8	7	20	1,2	9	4	32	44	560	100	320

*Análise realizada segundo metodologia de RAIJ(2001), ** Analise realizada segundo metodologia da EMBRAPA, (1997).

Tabela 4.2 - Caracterização dos tratamentos experimentais

Tratamentos	Manejo	1º ciclo	2º ciclo
		Dose de N kg ha ⁻¹	
-N / -Água - T1	sequeiro	0	0
-N /+Água - T2	irrigado	0	0
+N /-Água - T3	sequeiro	140	150
+N /+Água - T4	irrigado	140	150

As parcelas constituíram-se de cinco linhas de cana-de-açúcar de 30 m, totalizando 270 m² parcela⁻¹. Em todos os tratamentos foi utilizado o plantio em linha dupla (plantio “em W” ou plantio em “abacaxi”), com espaçamento de 1,80 m entre as linhas duplas, e 0,40 m entre os sulcos de cana. Nos tratamentos irrigados o tubo gotejador modelo (DRIPNET PC 22135 FL, Adana Turquia) com vazão de 1,0 L h⁻¹, possuindo gotejadores a cada 0,5 m, foi enterrado a 25 cm de profundidade da superfície do solo entre as linhas simples de cana-de-açúcar.

Nos dois ciclos de produção, em todos os tratamentos, a dose de potássio aplicada ao solo foi de 150 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio (KCl). As doses de N foram aplicadas na forma de uréia. A aplicação de N e K nos tratamentos irrigados foi realizada por meio de fertirrigação, ao longo do desenvolvimento da cultura. Nos tratamentos não irrigados (sequeiro), a fertilização com N e K foi realizada aos 30 DAC enterrando o adubo na entrelinha com cultivador (Figura 4.1).

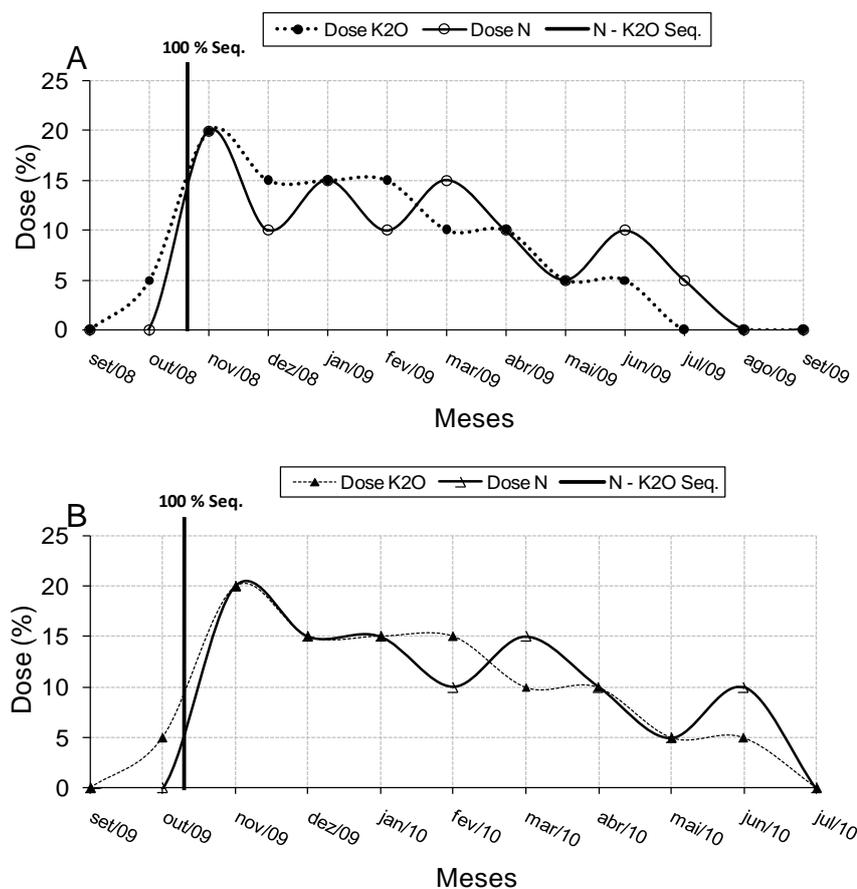


Figura 4.1 - Distribuição percentual dos fertilizantes primeiro ciclo de cultivo 2008/09 A, e segundo ciclo de cultivo 2009/10 B

4.2.2 Caracterização climática e manejo da irrigação

Nos tratamentos irrigados a frequência de irrigação foi realizada contabilizando-se o suprimento de água ao solo pela precipitação (P) e da demanda atmosférica pela evapotranspiração da cana-de-açúcar (ETC), com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD) de 70 mm. Desse modo foi elaborada a estimativa dos balanços hídricos por decêndio e calculada a deficiência hídrica (DEF) nos anos agrícolas de 2008/09 e 2009/10 (Figuras 4.2A, B, C, D).

O manejo da irrigação foi realizado levando-se em consideração a ETC buscando repor 100% da lâmina evapotranspirada, segundo o método de Penman-Monteith (HOWELL; EVENTT, 2004). A umidade do solo também foi controlada por quatro baterias de tensiômetros instalados na área experimental, nas profundidades de: 20, 40 e 60 cm.

No primeiro ciclo de produção (2008/2009) a precipitação foi de 1.740 mm. A evapotranspiração da cultura no manejo de sequeiro foi de 1.006 mm (Figura 4.2A). Nesse mesmo período, para os tratamentos irrigados foi aplicada uma lâmina de água de 293 mm, totalizando 2.033 mm (precipitação mais irrigação). A evapotranspiração da cultura elevou-se para 1.250 mm (Figura 4.2B).

O segundo ciclo de produção (2009/2010) teve duração de 291 dias, com ocorrência de precipitação de 1.279 mm e uma evapotranspiração da cultura de 890 mm no manejo de sequeiro (Figura 4.2C). No manejo irrigado, precipitação e irrigação somaram 1.559 mm, (lâmina de irrigação de 280 mm) com evapotranspiração da cultura de 1.065 mm (Figura 4.1D).

As médias de temperaturas máximas e mínimas registradas foram respectivamente de 29,3 °C e 15,2 °C para 2008/2009 e 29,1 °C e 17,5 °C para o ciclo de 2009/2010 (Figuras 4.3A e B). Verificou-se que no período de 2008/2009 os meses de janeiro, fevereiro e março (verão), período que geralmente coincide com a fase de maior crescimento da cana-de-açúcar, as temperaturas mínimas ficaram abaixo dos 20 °C, enquanto que no ciclo seguinte essa tendência não foi constatada.

Essas temperaturas influenciaram consequentemente, na temperatura média desses meses, sendo que essa diferença chegou a 2,5 °C.

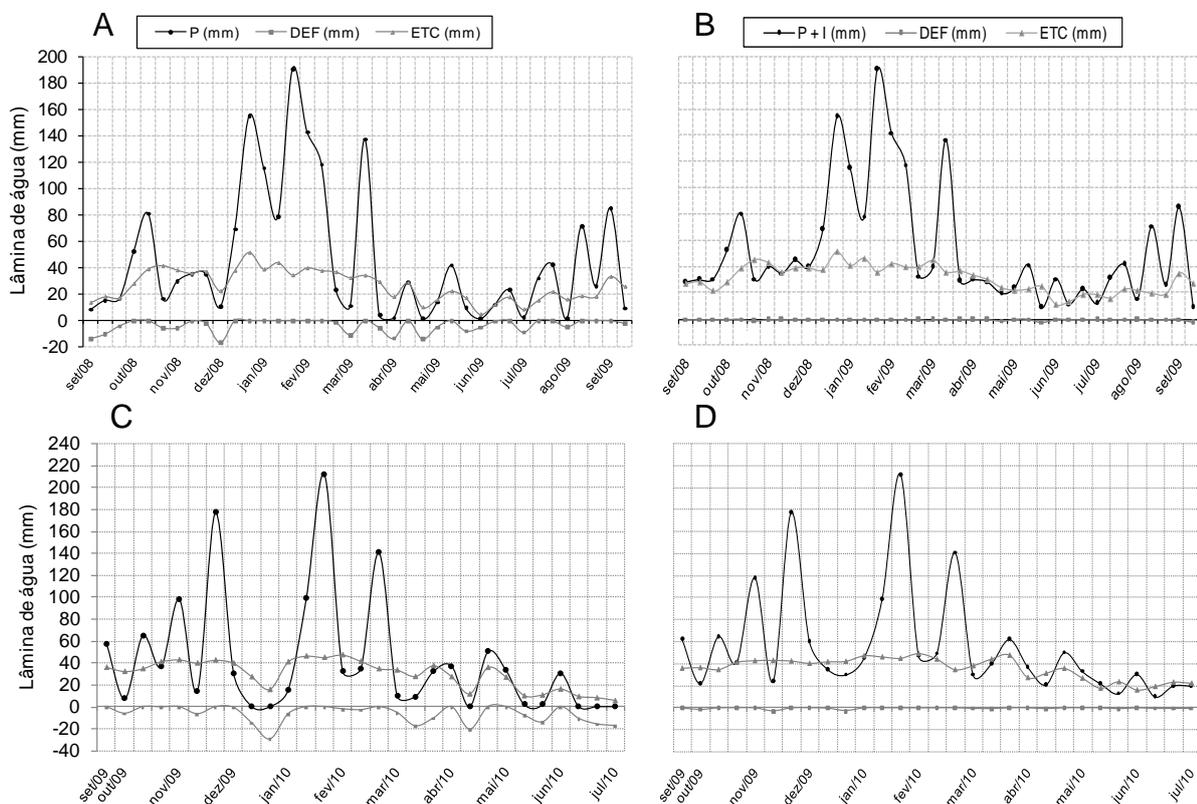


Figura 4.2 - Balanço hídrico decendial da cana-de-açúcar no manejo de sequeiro (A); (C) e irrigado (B); (D) no períodos de 2008/2009 e 2009/2010

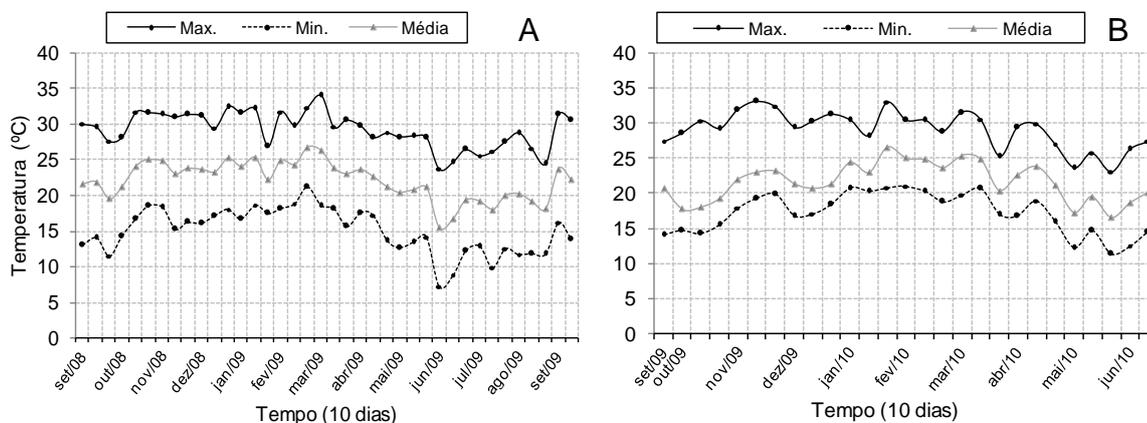


Figura 4.3 - Temperaturas máxima, mínima e média nos período de: 2008/2009 (A) e 2009/2010 (B)

4.2.3 Avaliações

Para determinar o fracionamento isotópico de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) coletaram-se, segundo Meinzer e Zhu (1998), folhas +1 (primeira folha com lígula visível) da cana-de-açúcar, previamente à colheita, aos 355 DAC no primeiro ciclo de produção (2008/09), e aos 280 DAC, no segundo ciclo (2009/10 terceira soqueira). O procedimento de coleta foi realizado sempre no período da manhã preferencialmente às 9:00 h e consistiu da retirada de 15 lâminas foliares de folhas +1 por parcela de cada tratamento. Após a colheita foi realizada a eliminação da nervura central e separação de 20 cm da região mediana, que depois de terem sido lavadas em água corrente, foram colocadas sob secagem em estufa com circulação forçada de ar. Posteriormente, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley e armazenadas em frascos de plástico com tampa de pressão, para evitar o umedecimento das mesmas. Em seguida, a composição isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) das amostras de folhas +1 de cana-de-açúcar foram quantificadas em espectrômetro de massas, modelo ANCA-GSL Hydra 20-20 SERCON Co., Crewe, GBR, utilizando-se a equação 4.1 seguindo a metodologia proposta por Barrie e Prosser (1996).

$$\delta^{13}\text{C} = ((R \text{ amostra}/R \text{ padrão}) - 1) \cdot 1000 \quad [\text{Eq.4.1}]$$

em que:

R = é uma razão entre $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$;

O $\delta^{13}\text{C}$ é um valor relativo, em permil, da razão $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra comparado com a razão do padrão internacional de carbonato de cálcio VPDB (Viena Pee-dee belemnite) (CRAIG, 1957).

Para a obtenção dos valores de fracionamento dos isótopos de carbono: $\Delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$ utilizou-se a Eq. 4.2 descrita por Farquhar, (1983) e Henderson et al. (1992).

$$\Delta^{13}\text{C} \text{ ‰} = (\delta^{13}\text{C}_a + \delta^{13}\text{C}_p) / (1 + (\delta^{13}\text{C}_p/1000)) \quad [\text{Eq.4.2}]$$

em que:

$\delta^{13}\text{C}_a$ = Composição isotópica do ar atmosférico quantificada $-8,0 \pm 0,01\%$;

$\delta^{13}\text{C}_p$ = Composição isotópica das plantas (folha +1) de cana-de-açúcar;

Para a determinação de acúmulo de matéria seca e do nitrogênio de colmos foram colhidos 2 m de sulco de cana-de-açúcar. Depois de coletados, os colmos de cada amostra, após a determinação da massa total de matéria com umidade natural, triturou-se em picadora de foragem, e retirou-se uma subamostra, que foi levada para estufa de circulação forçada a 65 °C para determinação da umidade e posteriormente a massa de matéria seca de colmos (MSC). Com esses resultados, considerando a existência de 5.556 m lineares de cana-de-açúcar em um hectare, foi estimada a produção média da massa de material seco (Mg ha^{-1}).

Nas sub-amostras de colmos após serem secas procedeu-se a moagem em moinho tipo Wiley, para a determinação dos teores de N (g kg^{-1}), segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997). Com esses resultados, foi estimada a acumulação de N (kg ha^{-1}) nos colmos da cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos.

Para a produtividade de colmos (TCH) e de açúcar (TPH) na colheita final para os dois ciclos de cultivo, 40 m de cana-de-açúcar foram colhidos manualmente em uma subparcela (5 linhas de 8 metros localizada no centro da parcela maior), pesados para determinação da produtividade. Com esses resultados, considerando a existência de 5.556 m lineares de cana-de-açúcar em um hectare, foram estimados a produção de colmos (TCH) e de açúcar (TPH) em Mg ha^{-1} .

Na mesma época, da colheita final, coletou-se 10 colmos em cada parcela para determinação dos atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, os colmos foram triturados em picadora de foragem, na sequência foi extraído o caldo com auxílio de uma prensa hidráulica para então determinar as quantidades de fibra, pol do caldo corrigido (PCC), teor de sólidos solúveis (Brix) e açúcares totais recuperáveis (ATR) (CONSECANA, 2003).

Para quantificar as perdas causadas pelas deficiências de nitrogênio (-N/+Água); de água (+N/-Água) e a influência conjunta das duas (-N/-Água) calculou-se o índice de perdas de massa seca de colmos (IPMSC) segundo Clay et al. (2005), descrita pela Eq. 4.3.

$$IPMSC(\%) = (P(Ts) - P(Td)/P(Ts))x100 \quad [Eq.4.3]$$

em que:

IPMS: Índice de perdas massa seca de colmos em %;

P(Ts): MSC do tratamento sem deficiência de N e água, nesse caso +N/+A em Mg ha⁻¹;

P(Td): MSC do tratamento com deficiência de água e ou nitrogênio (+N/-Água; -N/+Água e -N/-Água) em Mg ha⁻¹.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas com o teste Tukey ($p < 0,05$) usando o programa estatístico *SAS statistical software*®. Posteriormente foi realizada a correlação entre o fracionamento isotópico de carbono ($\Delta^{13}C$ em ‰) com o acúmulo de biomassa nos colmos nas condições de deficiência hídrica (+N/-Água) de nitrogênio (-N/+Água) e da ação conjunta destas deficiências (-N/-Água). Com as equações de correlações entre os fatores avaliados, foi realizado um estudo de funções, determinando-se a taxa de variação (Δs) ($\Delta^{13}C$ MSC⁻¹) obtida pela (Eq 4.4), segundo Ferreira (1999):

$$\Delta s = X_1 - X_2 / Y_1 - Y_2 \quad [Eq.4.4]$$

Em que:

X1: delta inicial, x2: delta final, y1: MSC inicial, y2: MSC final.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 A interação entre água e nitrogênio na produtividade, no acúmulo de matéria seca de colmos, nitrogênio e no fracionamento isotópico de carbono em cana-de-açúcar

Observou-se efeito positivo da irrigação associado à dose de N para os dois ciclos de cultivo 2008/2009 e 2009/2010 na produtividade de colmos por hectare TCH, produtividade de açúcar por hectare TPH e do acúmulo de massa seca dos colmos MSC. Os maiores valores foram obtidos para o tratamento sem deficiência hídrica e de N, (+N/+Água), (Tabelas 4.3 e 4.4). Resultados semelhantes ao deste trabalho foram obtidos em diversos trabalhos utilizando irrigação e doses de N-fertilizante (SINGH; MOHAN, 1994; GAVA et al., 2010; TEODORO, 2011).

A produtividade de colmos para o tratamento -N/-Água foi de 64 e 32 Mg ha⁻¹ para primeiro e segundo ciclos de produção respectivamente, porém, sem deficiência hídrica (-N/+Água) as produtividades foram de 83 e 38 Mg ha⁻¹ nos dois ciclos de cultivo respectivamente. Em relação ao N verificou-se produtividades de 91 e 57 Mg ha⁻¹ no tratamento +N/-Água aumentando para 133 e 85 Mg ha⁻¹ sem restrição hídrica, respectivamente, para segunda e terceira soqueira.

Singh e Mohan, (1994) estudando laminas de irrigação e doses de N em uma região subtropical da Índia, constataram valores de produtividade de colmos semelhantes. Esse pesquisadores obtiveram produtividade de colmos de 47 Mg ha⁻¹ no tratamento com deficiência hídrica e de nitrogênio (-N/-Água), elevando-se para 69 Mg ha⁻¹ de colmos no tratamento com deficiência de N (-N/+Água) e uma lâmina de irrigação com reposição de 100% da evapotranspiração da cultura (ETC). Por outro lado, para o tratamento com aplicação de N (200 kg N ha⁻¹) as produtividades de colmos foram de 65 e 105 Mg ha⁻¹ sem utilização de irrigação (+N/-Água) e com irrigação (+N/+Água), repondo 100% da ETC da cana-de-açúcar.

Tabela 4.3 - Massa seca de colmos (MSC), teor e acúmulo de N nos colmos, pol de caldo corrigido (PCC) produtividade de colmos (TCH), e açúcar (TPH) com e sem N, no manejo irrigado e de sequeiro 2008/2009

Manejo	Dose N	Nitrogênio colmos			PCC	Produtividade	
		MSC	Teor	Acúmulo		TCH	TPH
	kg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	----- Mg ha ⁻¹ -----	
Irrigado (I)	0	24,1 b	1,2 b	28,9 b	17,3	83,6 b	14,4 b
	140	39,9 a	2,7 a	107,7 a	16,3	132,8 a	22,3 a
Sequeiro (S)	0	17,6 b	1,2 b	21,2 b	16,7	64,7 b	10,8 b
	140	26,9 a	2,2 a	59,2 a	16,8	91,3 a	15,3 a
Manejo (I)	-	31,9 a	2,0	63,8 b	16,7	108,2 a	18,4 a
Manejo (S)	-	22,2 b	1,7	37,7 a	16,7	77,9 b	13,0 b
F Manejo	-	38,9**	ns	3,1*	ns	18,8**	23,0**
F Dose	-	23,4**	59,9**	40,0**	ns	29,6**	31,5**
F M x D	-	ns	ns	14,4**	ns	Ns	ns
CV (%)	-	14,01	17,8	20,7	3,2	14,9	10,5

**p<0,01, *p<0,05, ns=não significativo, DAC=dias após o corte, C=colmo, PCC= pol de cana corrigido, TCH= tonelada de colmos por hectare, TPH = toneladas de pol por hectare.

Tabela 4.4 - Massa seca de colmos (MSC), teor e acúmulo de N nos colmos, pol de caldo corrigido (PCC) produtividade de colmos (TCH), e açúcar (TPH) com e sem N, no manejo irrigado e de sequeiro 2009/2010

Manejo	Dose N	MSC	Nitrogênio colmos		PCC	Produtividade	
			teor	acúmulo		TCH	TPH
	kg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	----- Mg ha ⁻¹ -----	
Irrigado (I)	0	12,2 b	1,4 b	17,1 b	16,1	38,2 b	6,1 b
	150	25,4 a	2,8 a	71,2 a	15,3	85,1 a	12,9 a
Sequeiro (S)	0	10,6 b	1,4 b	14,8 b	16,6	32,5 b	5,4 b
	150	18,5 a	2,9 a	53,6 a	16,2	56,7 a	9,1 a
Manejo (I)	-	18,8 a	2,1	39,5	15,7	61,6 a	9,5 a
Manejo (S)	-	14,5 b	2,1	30,4	16,4	44,6 b	7,3 b
F Manejo	-	19,5**	ns	ns	ns	32,2**	39,0**
F Dose	-	119,3**	2,9*	46,7**	ns	140,1**	216,5**
F M x D	-	27,2*	ns	ns	ns	14,4*	18,3**
CV (%)	-	11,6	26,2	25,2	4,1	11,3	8,5

**p<0,01, *p<0,05, ns=não significativo, DAC=dias após o corte, C=colmo, PCC= pol de cana corrigido, TCH= tonelada de colmos por hectare, TPH = toneladas de pol por hectare.

Teodoro (2011) estudou doses de N de 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N e lâminas de irrigação aplicadas por gotejo subsuperficial em soqueira de cana-de-açúcar, em condições distintas a deste trabalho (região nordeste). O autor constatou, que as respostas à adubação nitrogenada foram superiores no manejo irrigado (baixa deficiência hídrica) em relação ao manejo de sequeiro (manejo com déficit hídrico), verificando um incremento de TCH da ordem de 2 e 14 Mg ha⁻¹ no manejo de sequeiro e irrigado respectivamente.

Os incrementos obtidos com a fertilização nitrogenada neste trabalho foram superiores ultrapassando as 45 Mg ha⁻¹ de colmos no manejo sem déficit hídrico (+N/+Água), e próximas de 25 Mg ha⁻¹ com déficit hídrico moderado (+N/-Água) nos dois ciclos de cultivo. De modo geral, as produtividades de colmos TCH e de açúcar TPH foram inferiores para o segundo ciclo, devido a menor duração do ciclo de cultivo (291 dias). Segundo Monteith (1978), existe uma estreita relação entre produção e duração do período de crescimento em plantas de ciclo fotossintético C₄.

Constatou-se elevação da MSC em função da dose de N e também do manejo irrigado para os dois ciclos de cultivo (Tabelas 4.3 e 4.4). No manejo irrigado por gotejamento subsuperficial os incrementos verificados em função da elevação da dose de N (0 para 140 kg ha⁻¹ 2008/09) e (0 para 150 kg ha⁻¹ 2009/10) foram de 40 e 52% respectivamente para o 1º e 2º ciclo de cultivo. No entanto, no manejo com déficit hídrico (sequeiro) a adubação nitrogenada elevou a produtividade de colmos em 35 e 43% respectivamente para o 1º e 2º ciclos. Ng Kee Kwong et al. (1999), verificou um incremento de 44% na MSC elevando a dose de N de 0 para 120 kg ha⁻¹ de N no manejo de gotejamento subsuperficial nas Ilhas Maurício com a cultivar R.570.

Os teores de N (g kg⁻¹) nos colmos de cana-de-açúcar não foram alterados pela aplicação de água por meio da irrigação, no entanto verificou-se um acréscimo no teor de N dos colmos com a aplicação de N-fertilizante nos dois ciclos de cultivo (Tabelas 4.3 e 4.4).

Em relação ao acúmulo de N nos colmos constatou-se um aumento no estoque de N em função da irrigação e também da fertilização nitrogenada. Wiedenfeld e Enciso (2008) avaliando doses de N em sistema de irrigação e verificaram uma interação entre esses dois fatores. Esses autores afirmam que o N aplicado por gotejamento subsuperficial ao longo do ciclo da cultura, possibilitou as plantas acumular uma maior quantidade desse nutriente elevando a produtividade por unidade de N aplicada. De acordo com Wiedenfeld (1995), o estoque de N na planta está diretamente relacionado com a produção de biomassa, que é elevada na ausência de déficit hídrico.

O aumento no estoque de N devido à adubação nitrogenada foi de 74 e 68% para o manejo irrigado e de sequeiro respectivamente (média dos ciclos). Por outro lado, os acréscimos percentuais relacionados à irrigação foram de 40 e 23% respectivamente para o 1º e 2º ciclo respectivamente (Tabelas 4.4 e 4.5). O acúmulo de N nos tratamentos irrigados foi maior porque o N entra em contato com as raízes quase que exclusivamente por fluxos de massas, e para que ocorra esse processo é necessário água. Estes resultados indicam que mesmo ocorrendo um maior déficit hídrico no período de 2009/2010 os incrementos relacionados ao uso da irrigação deste ciclo foram menores, possivelmente em função da antecipação da colheita devido o fogo acidental.

Pereira (2011) avaliou doses de N em soqueira de cana-de-açúcar no manejo de sequeiro em condições edafoclimáticas semelhantes à deste trabalho (região de Jaú-SP), com a mesma cultivar SP80 3280, constatando incrementos no acúmulo de N nos colmos com diferentes doses de N. Esse autor verificou um acréscimo da ordem de 60% no estoque de N nos colmos elevando a dose de N de 0 para 150 kg ha⁻¹.

Não houve diferenças no teor de açúcar dos colmos (PCC) devido à elevação da disponibilidade de água (irrigação) e N para os dois ciclos de produção avaliados. Esses resultados discordam dos obtidos por Wiedenfeld (1995) que constatou diminuição no conteúdo de açúcar dos colmos (PCC) de 3,5% com a elevação da dose de N de 0 para 168 kg ha⁻¹ por duas safras consecutivas (soqueiras). Singh e Mohan (1994) constataram diminuição no pol de cana, quando a dose de N foi acrescida de 0 para 300 kg N ha⁻¹. Essa redução pode ter ocorrido devido ao fato que doses crescentes de nitrogênio podem elevar a atividade da enzima invertase responsável pela degradação de açúcares redutores convertendo-os em açúcares (glucose e frutose) (SINGH; MOHAN, 1994). Por outro lado, Weidenfeld (1995) observaram que o conteúdo de açúcar dos colmos, foi elevado com a utilização de irrigação.

Uma vez que, para os dois ciclos produtivos no manejo irrigado e de sequeiro não foram verificadas diferenças no PCC, sendo este, um parâmetro tecnológico que representa a quantidade de açúcar no caldo, pode-se inferir que a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar não diminui com o a irrigação, como relatado por Moura et al. (2005).

Verificou-se interação entre a fertilização com N e irrigação (N - água) para acúmulo de N nos colmos no primeiro ciclo de cultivo, MSC, TCH e TPH para o segundo ciclo de cultivo. Wiedenfeld e Enciso (2008) constataram interação entre doses de N e irrigação por gotejamento subsuperficial no Texas EUA.

Embora não tenha ocorrido interação entre (N - água) para MSC, TCH e TPH no segundo ciclo de cultivo constatou-se aumento de MSC, acúmulo de N nos colmos, TCH e TPH para os dois ciclos de cultivo quando foi aplicado N no manejo com baixo déficit hídrico (+N/+água). Esse fato pode ser explicado pelo aumento da absorção de N com o fornecimento de água (SINGH; MOHAN, 1994, NG KEE KWONG et al., 1999), pois o contato do N com a raiz ocorre quase que exclusivamente por fluxo de massas, processo esse dependente de água. Segundo Wiedenfeld (1995), quando água é limitante a cana-de-açúcar não responde a aplicação de N. Não foram verificados aumentos nas variáveis PCC, e teor de N nos colmos no manejo com baixo déficit hídrico (+N/+água) e (-N/+água).

Os maiores valores de $\Delta^{13}\text{C}$ foram observados para o tratamento -N/-Água 4,9657 e 4,903‰ para o 1º e 2º ciclo de produção respectivamente, enquanto que para o tratamento +N/+Água foram verificados valores de $\Delta^{13}\text{C}$ inferiores de 4,417 e 4,353‰ respectivamente no 1º e 2º ciclo de produção (Tabela 4.5).

O $\Delta^{13}\text{C}$ em plantas de ciclo C_4 (cana-de-açúcar) é determinado principalmente pelo Φ (vazamento) e pelo aumento do gradiente das pressões parciais de CO_2 do espaço intercelular e da atmosfera (p_i/p_a) (FARQUHAR, 1983; SALIENDRA et al., 1996). A deficiência de nitrogênio por sua vez, reduz a produção e a atividade das enzimas PEPC e RuBisCo. Com isso, parte do CO_2 fixado pela PEPC e transportado para as células da bainha não é fixado pela RuBisCo retornando para o mesofilo aumentando o Φ e o $\Delta^{13}\text{C}$ (FARQUHAR, 1983; FARQUHAR et al., 1989; HENDERSON et al., 1992; MEINZER; ZHU, 1998). Saliendra et al. (1996), avaliou

como a disponibilidade de água no solo afetou a produção e partição de fotoassimilados, o crescimento das plantas e a atividade das enzimas correlacionando estas variáveis com os valores de $\Delta^{13}\text{C}$. Esses autores concluíram que o $\Delta^{13}\text{C}$ aumentou quando o período de irrigação foi menor em quatro cultivares de cana-de-açúcar, no entanto a atividade das enzimas PEPC e RuBisCo diminuíram na mesma proporção.

O $\Delta^{13}\text{C}$ para os tratamentos $-N/+Água$ e $+N/-Água$ foram similares, a deficiência de N e o déficit hídrico causam elevação no $\Delta^{13}\text{C}$, afetando negativamente a produtividade de massa seca de colmos.

Os resultados obtidos nesse estudo mostraram que o $\Delta^{13}\text{C}$ foi eficiente para quantificar os estresses de N e água das plantas de cana-de-açúcar, sendo que esta técnica pode ser utilizada para selecionar plantas tolerantes ao déficit hídrico e sensíveis a deficiência de N.

Tabela 4.5 - Fracionamento isotópico de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$), com e sem N, no manejo irrigado e de sequeiro 2008/09 e 2009/10

Manejo	Dose N	1º ciclo	2º ciclo	Média
----- $\Delta^{13}\text{C}$ -----				
		---‰ --	---‰---	---‰---
		kg ha ⁻¹		
Irigado (I)	Sem N	4,660 a	4,636 a	4,648 a
	Com N	4,417 b	4,353 b	4,385 b
Sequeiro (S)	Sem N	4,957 b	4,903 a	4,930 a
	Com N	4,755 a	4,829 b	4,792 b
Manejo (I)	-	4,538 b	4,494 b	4,516 b
Manejo (S)	-	4,856 a	4,866 a	4,860 a
F Manejo	-	1,5*	40,1**	38,4**
F Dose	-	ns	9,2*	14,6*
F M x D	-	ns	Ns	ns
CV (%)	-	5,1	2,5	2,32

**p<0,01, *p<0,05, ns=não significativo, $\Delta^{13}\text{C}$ = fracionamento isotópico de carbono.

4.3.2. Perda de produtividade da cana-de-açúcar por deficiência hídrica e de nitrogênio, relacionada com o acúmulo de matéria seca dos colmos e o fracionamento isotópico de carbono

O fracionamento isotópico de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) em folhas de plantas de ciclo C_4 constitui-se em um indicador de estresse ambiental que pode monitorar e identificar plantas em condições de déficit hídrico e deficiência a N (MEINZER; ZHU, 1998; CLAY et al., 2001a; 2001b; FRAVOLINIL et al., 2002; SMELTEKOP et al., 2002).

Com os resultados obtidos neste estudo em duas soqueiras de cana-de-açúcar (ciclos agrícolas: 2008/09 e 2009/10), verificou-se que no manejo irrigado (baixo déficit hídrico), para cada aumento de 0,1‰ no $\Delta^{13}\text{C}$ devido a deficiência de N, houve uma queda de produtividade de MSC de 4,8 Mg ha^{-1} ($R^2=0,50$, $p<0,05$) (Figura 4.4A). Por outro lado, quando N não foi limitante (140 e 150 kg ha^{-1} de N 08/09 e 09/10 respectivamente) foi constatado que um aumento de 0,1‰ $\Delta^{13}\text{C}$ resultou em diminuição de 2,4 Mg ha^{-1} de MSC ($R^2=0,47$, $p<0,05$) (Figura 4.4 B).

Constatou-se que no manejo irrigado (baixo déficit hídrico) com e sem N (Figura 4.4A) a taxa de variação (Δs) foi de $-0,02 \Delta^{13}\text{C MSC}^{-1}$; porém, quando nitrogênio não foi limitante no manejo irrigado e de sequeiro (Figura 4.4B) o Δs foi de $-0,04 \Delta^{13}\text{C MSC}^{-1}$, valor este menor comparado a primeira situação.

Saliendra et al. (1996) verificaram que a taxa de produção de matéria seca ($R^2=0,93$, $p<0,05$) e a taxa de assimilação de CO_2 ($R^2=0,92$, $p<0,05$) diminuíram com a elevação do $\Delta^{13}\text{C}$ causado pela diminuição da frequência de irrigação (maior déficit hídrico). Os autores constataram também que cerca de 85% do Φ de CO_2 das células da bainha estaria associado com a razão da atividade das enzimas RuBisCo/PEPC, pois a atividade da enzima RuBisCo localizada nas células da bainha diminui em maior proporção que a atividade da enzima PEPC localizada no mesofilo, aumentando o Φ e, conseqüentemente, o $\Delta^{13}\text{C}$.

Ao estudarem o $\Delta^{13}\text{C}$ em plantas de ciclo C_4 , Clay et al. (2001a) verificaram que a técnica poderia ser usada para avaliar a redução de produtividade do milho, causado pelo estresse hídrico. Os resultados obtidos nessa pesquisa mostraram que

o decréscimo de 1% da produtividade de milho devido ao estresse hídrico, provocou um aumento no $\Delta^{13}\text{C}$ da ordem de 0,0117‰.

Meinzer e Zhu (1998) verificaram que o $\Delta^{13}\text{C}$ diminuiu linearmente ($R^2= 0,84$, $p<0,05$) quando o rendimento quântico das plantas (absorção de fótons) reduziu em função da menor disponibilidade de N para clones de cana-de-açúcar. Esses autores constaram também uma correção ($R^2=0,94$, $p<0,05$) entre $\Delta^{13}\text{C}$ e Φ .

Considerando que o $\Delta^{13}\text{C}$ está correlacionado com o Φ , e este com a diminuição da atividade das enzimas RuBisCo/PEPC (MIEZER; ZHU, 1998), a avaliação do $\Delta^{13}\text{C}$ em folhas +1 de plantas de ciclo C_4 é capaz de quantificar os níveis de estresse causado pelo déficit hídrico e deficiência de N.

Os índices de perdas de massa seca de colmos IPMSC foram elevados nos tratamentos T1, T2 e T3, no entanto foram maiores no tratamento com deficiência de N e água -N/-Água (T1) 48% em relação ao tratamento -N/+Água (T2) 41% e +N/-Água (T3) 36% média de dois ciclos de cultivo.

Tanto o déficit hídrico como a deficiência de N causaram perdas de produtividade em cana-de-açúcar, pois alteraram o sistema fotossintético da planta conforme verificado na Figura 4.4, na avaliação com $\Delta^{13}\text{C}$ e confirmado pelos índices de perdas de massa seca de colmos (Figura 4.5). Assim, um fator relevante a ser considerado, em experimentos de sequeiro que utilizaram diferentes níveis de N-fertilizante, seria que deficiência hídrica pode mascarar as respostas da adubação nitrogenada (SAMPAIO et al., 1984; FARONI, 2008). A taxa de crescimento da cana-de-açúcar também é afetada pela disponibilidade de água do solo, ou seja, quando a deficiência hídrica aumenta e a resposta a fertilização nitrogenada diminui (DANTAS NETO et al., 2006; WIEDENFELD, 2008; GAVA et al., 2010).

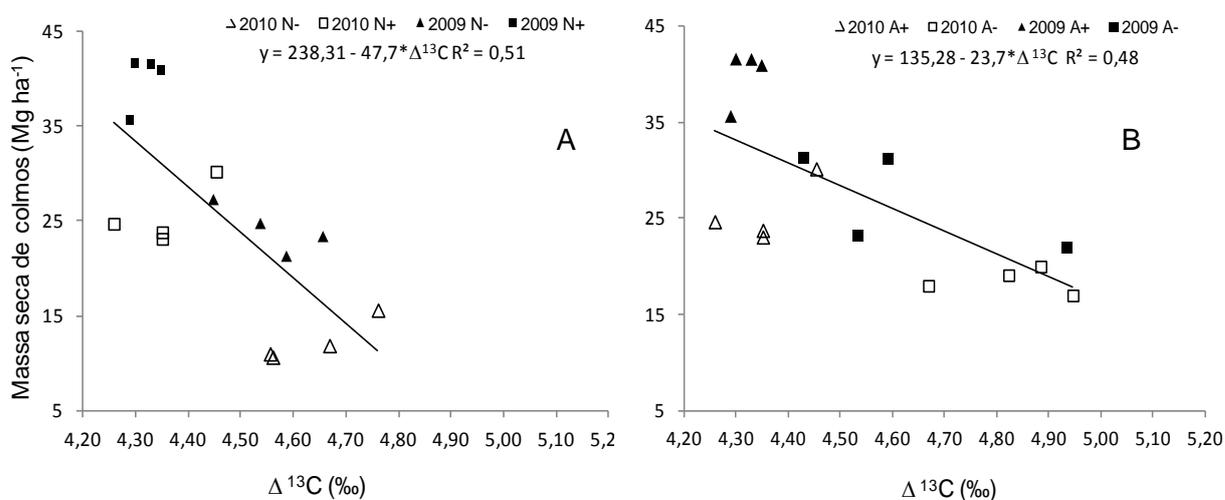


Figura 4.4 - Correlação entre massa seca de colmos (MSC) e fracionamento de carbono $\Delta^{13}C$ com N (140 kg ha⁻¹ 2008/09 e 150 kg ha⁻¹ 2009/10) e sem N no manejo irrigado (A) e com N (140 kg ha⁻¹ 2008/09 e 150 kg ha⁻¹ 2009/10) nos manejos de sequeiro e irrigado (B) em dois ciclos de cultivo 2008/09 e 2009/10

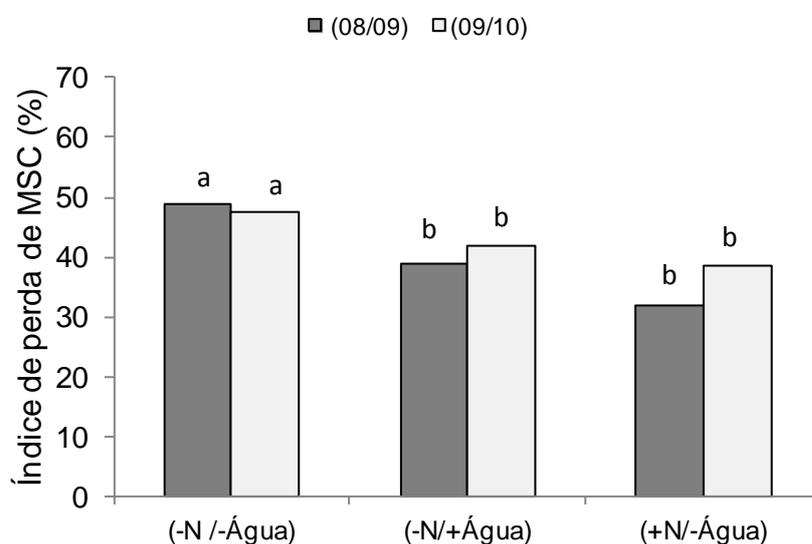


Figura 4.5 - Índice de perda de massa seca de colmos (IPMSC), devido á deficiência hídrica e de nitrogênio em cana-de-açúcar em dois ciclos de produção

4.4 CONCLUSÕES

1. A fertilização com N associada à irrigação elevou a produtividade de colmos, açúcar e massa seca de colmos de soqueira de cana-de-açúcar.
2. O fracionamento isotópico de carbono mostrou-se eficiente na avaliação de estresse da cana-de-açúcar, podendo ser utilizado como um indicador de déficit hídrico e deficiência de N nessa cultura.
3. A deficiência hídrica e de nitrogênio causaram alterações de $\Delta^{13}\text{C}$ nas folhas e perdas de produtividade semelhantes em cana-de-açúcar.

Referências

BARRIE, A.; PROSSER, S. J. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T. W.; YAMASAKI, S. (Ed.). **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 1-46.

CLAY, D. E.; CLAY, S. A.; LIU, Z.; and REESE. Spatial variability of C-13 isotopic discrimination in corn (*Zea mays*). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, p. 1813-1827, 2001a.

CLAY D. E.; ENGEL R.; LONG D. S.; LIU Z. Nitrogen and Water Stress Interact to Influence Carbon-13 Discrimination in Wheat. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1823-1828, 2001b.

CLAY, D. E.; CLAY, S. A.; LYON, D. J.; BLUMENTHAL, J. M. ^{13}C discrimination in corn grain can be used to separate and quantify yield losses due to water and nitrogen stresses. **Weed Science**, Ithaca, v. 53, p. 23-29, 2005.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CONSECANA. **Manual de instruções**. 4. ed. Piracicaba, 2003. 115 p.

CRAIG, H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, New York, v. 12, p. 133-149, 1957.

DANTAS NETO, J.; FIGUREDO, J. L.; FARIAS, C. H.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 283-288. 2006.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. Sunderland: Sinauer Associates, 2004. 400 p.

FARONI, C. A. **Eficiência agrônômica das adubações nitrogenadas de plantio e após o primeiro corte avaliada na primeira soca da cana-de-açúcar**. 2008. 190 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FARQUHAR G. D.; EHLERINGER J. R.; HUBICK K.T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis, **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 40, p. 530–537, 1989

FARQUHAR, G. D. On the nature of carbon isotope discrimination in C₄ species. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 10, p. 205-26, 1983.

FRAVOLINIL, A.; WILLIAMS, D. G.; THOMPSON, T. L. Carbon isotope discrimination and bundle sheath leakiness in three C₄ subtypes grown under variable nitrogen, water and atmospheric CO₂ supply. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 53, p. 2261-2269, 2002.

FERREIRA, R. S. **Matemática aplicada às ciências agrárias: análise de dados e modelos**. Viçosa: UFV, 1999. 333 p.

GAVA, G. J. C.; KÖLLN, O. T.; URIBE, R. A. M.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H. Interação entre água e nitrogênio na produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*). In: CRUSCIOL, C. A. (Org.). **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. 1. ed. Botucatu: FEPAF, 2010. v. 1, p. 49-66.

GAVA, G. J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, M. A.; SILVA, R. C.; JERONIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; KÖLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011.

HENDERSON, S. A.; CAEMMERER. S. V.; FARQUHAR, G. D. Short-term measurements of carbon isotope discrimination in several C₄ species. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 19, p. 263-285, 1992.

HOWELL, T. A.; EVETT S. R. **The Penman-Monteith method**. Washington, DC: USDA-Agricultural Research Service, Conservation & Production Research Laboratory, 2004. 14 p.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 107-122, 2004.

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

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: Princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafós, 1997. 308 p.

MEINZER, F. C.; ZHU, J. Nitrogen stress reduces the efficiency of the C4 CO₂ concentrating system, and therefore quantum yield, in *Saccharum* (sugarcane) species. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, p. 1227-1234, 1998.

MONTEITH, L. L. Reassessment of maximum growth rates for C3 and C4 crops. **Experimental Agriculture**, London, v. 14, p. 1-5, 1978.

MOURA, M. V. P. S.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, C. A. V.; DANTAS, J. N.; AZEVEDO, H. M.; PORDEUS, R. V. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Ciência e Agrotécnica**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 753-760, 2005.

NG KEE KWONG, K. F.; PAUL, J. P.; DEVILLE, J. Drip-fertigation - a means for reducing fertilizer nitrogen to sugarcane. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 35, n. 1, p. 31-37, 1999.

PEREIRA, W. **Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas**. 2011. 70 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RANJITH, S. A.; MEIZER, F. C.; PERRY, M. H.; THOM, M. Partitioning of carboxylase activity in nitrogen-stressed sugarcane and its relationship to bundle sheath leakiness to CO₂, photosynthesis and carbon isotope discrimination. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 22, p. 903-911, 1995.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phasedrought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 185, p. 249-258, 2000.

SALIENDRA, N. Z.; MEINZER, F. C.; PERRY, M.; THOM, M. Associations between partitioning of carboxylase activity and bundle sheath leakiness to CO₂, carbon isotope discrimination, photosynthesis, and growth in sugarcane. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, p. 907-914, 1996.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; BETTANY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I. Eficiência de utilização de uréia ¹⁵N em aplicação única ou parcelada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, n. 8, p. 943-949, 1984.

SINGH, P. N.; MOHAN, S. C. Water use and yield response of sugarcane under different irrigation schedules and nitrogen levels in a subtropical region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 26, p. 253-264, 1994.

SMELTEKOP, H.; CLAY, D. E.; CLAY, S. A. The impact of intercropping annual "Sava" snail medic on corn production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 4, p. 917-924, 2003.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2004. 719 p.

TEODORO, I. **Respostas técnico-econômicas da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e adubação nitrogenada**. 2011. 100 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2011.

THORBURN, P. J.; DART, I. K.; BIGGS, I. M.; BAILLIE, C. P.; SMITH, M. A.; KEATING, B. A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Irrigation Science**, Berlin, v. 22, n. 3-4, p. 201-209, 2003.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; FRANDO, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007.

WIEDENFELD, R. P. Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield and quality. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 43, p. 101-108, 1995.

WIEDENFELD, B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid South Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 665-671, 2008.

APÊNDICES



a



b



c



d



e



f



G



h



I



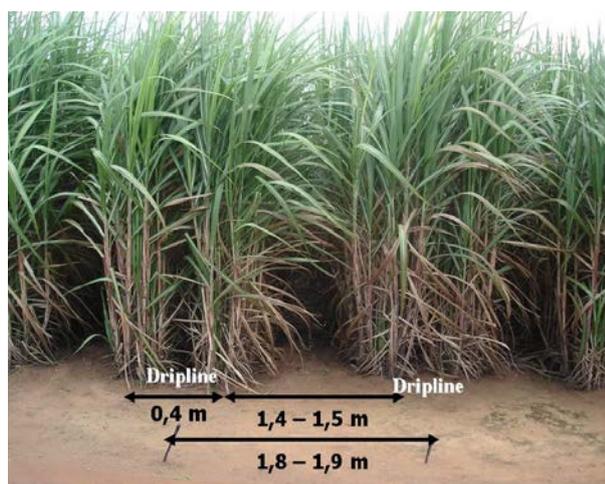
j



K



l



m



n



o



p

Apêndice 1. Etapas envolvidas na implantação e condução do experimento de irrigação em campo iniciado em 2006, a: instalação das linhas de controles dos tratamentos; b: detalhe dos relógios de controle de fluxos; c: bomba de recalque; d: abertura das valas para colocação das linhas principais; e: detalhe das linhas principais; f: chicotes de derivação das linhas secundárias; g: finalização da colocação das linhas principais; h: sulcação e colocação dos tubos gotejadores; i: distribuição das mudas, j: conserto dos vazamentos; k: brotação inicial da cana-de-açúcar; l: controle da umidade por tensiometria; m: cana-de-açúcar estabelecida; n: coleta de dados meteorológicos; o: avaliações fisiológicas; p: pesagem final dos colmos.