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

**Produtividade e comportamento biométrico da cana-de-açúcar sob
aplicação de vinhaça (*in natura*) e adubação mineral via gotejamento
subsuperficial**

Pedro Henrique Chinelato

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2016**

Pedro Henrique Chinelato
Engenheiro Agrônomo

**Produtividade e comportamento biométrico da cana-de-açúcar sob aplicação de
vinhaça (*in natura*) e adubação mineral via gotejamento subsuperficial**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Chinelato, Pedro Henrique

Produtividade e comportamento biométrico da cana-de-açúcar sob aplicação de vinhaça (*in natura*) e adubação mineral via gotejamento subsuperficial / Pedro Henrique Chinelato. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2016.

115 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Gotejamento subsuperficial 2. Fertirrigação 3. Vinhaça 4. Adubação mineral
5. Cana-de-açúcar I. Título

CDD 633.61
C539p

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

Dedico

Aos meus queridos pais,
Pedro Chinelato Filho e Elenice Maria
Possignolo Chinelato, pois sempre deram
força em minha caminhada, apoiaram em
minhas decisões e me ampararam nos
momentos mais difíceis da jornada;

À minha irmã,
Daniela Aparecida Chinelato, pelos
momentos fraternos e de cooperação, um
com outro;

Aos meus avós,
Pedro Chinelato (in memorian) Francelina
Brançalion Chinelato (in memorian), Luis
Jacinto Possignolo e Ondina Neves
Possignolo, pela admiração e amor que
tiveram/têm por mim;

À minha namorada,
Gabriela Cordel Ricci, pelo
companheirismo, força, por acreditar em
meu potencial e por sempre me apoiar
todas as vezes que apresentei
dificuldades;

AGRADEÇO

A Deus, nosso Pai;

À Nossa Senhora de Aparecida, nossa Mãe;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Biossistemas e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade e suporte concedidos;

Ao meu pai, Pedro Chinelato Filho, por nos ceder a área para montagem do experimento, por todo o auxílio prestado durante a colheita do experimento nos dois anos de amostragem e pelo companheirismo.

À CAPES pela concessão da bolsa;

Ao meu orientador Jarbas Honorio de Miranda por ter guiado meus passos nesses oito anos de vivência acadêmica, pela amizade e conselhos dados sou eternamente grato;

Aos professores Sergio Nascimento Duarte, Rubens Duarte Coelho, João Gomes Martines Filho, Tarlei Arriel Botrel, Marcos V. Folegatti pelo ensino, aprendizagem e cooperação em partes do projeto;

Ao professor Ricardo Alves de Olinda (UEPB), pela cooperação estatística do estudo, ensinamentos e amizade.

Ao professor Rubens Duarte Coelho, pelo apoio ao estudo através do projeto PITE – FAPESP/ODEBRECHT AGROINDUSTRIAL 2012/50083-7, sob sua coordenação junto ao Departamento de Engenharia de Biossistemas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, Gilmar Batista Grigolon, Paula Alessandra Bonassa Pedro, Antônio Agostinho Gozzo (Seu Antônio), Luiz Fernando Novello, Ângela Márcia Derigi Silva, Francisco Bernardo Dias, Davilmar Aparecida Colevatti, Hélio de Toledo Gomes, Beatriz Regina Duarte Novaes, Luiz Custódio Camargo, Jesuino Ferrari.

Ao funcionário do Departamento de Produção Vegetal, Osmair Neves, pela cooperação na colheita do experimento.

À Usina Pederneiras, em especial ao Edmar Zambianco pela cooperação no fornecimento de vinhaça ao experimento.

À Associação dos Fornecedores de cana de Piracicaba e Região (AFOCAPI) pela cooperação em equipamentos e análises químicas de fertilidade do solo e tecnológicas.

Aos colegas do GPEAS, Elenilson Moreira Franco, Isaac de Matos Ponciano, Luciano Alves de Oliveira e aos estagiários, Bruno Lima Martins, Sabrina Della Bruna, pela grande ajuda na condução do estudo.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	21
2.1 Fisiologia da cana-de-açúcar	21
2.2 Condições de cultivo.....	24
2.2.1 Cultivo sequeiro.....	24
2.2.2 Irrigação em cana-de-açúcar.....	25
2.2.3 Fertirrigação em cana-de-açúcar - aplicação de vinhaça e fertilizantes minerais.....	27
2.3 Irrigação por gotejamento subsuperficial	31
2.4 Viabilidade da irrigação em cana-de-açúcar.....	33
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1 Caracterização e localização da área	35
3.2 Caracterização climática e do solo.....	36
3.3 Variedade de cana-de-açúcar	42
3.4 Delineamento experimental	44
3.5 Preparo da área e instalação do experimento.....	47
3.5.1 Instalação do sistema de irrigação	49
3.5.2 Manejo da irrigação	54
3.6 Parâmetros avaliados (biometria)	57
3.7 Produtividade dos tratamentos.....	58
3.7.1 Produção de açúcar	59
3.8 Monitoramento das condições físicas e químicas do solo	59
3.9 Análise dos resultados (análise estatística).....	60
3.9.1 Modelo univariado clássico	60
3.9.2 Modelo misto	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1 Teste de Esfericidade – abordagem estatística	65
4.2 Abordagem agronômica.....	71
4.2.1 Características biométricas	71

4.2.2	Características tecnológicas e produtividade agrícola	81
5	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS.....	89
	ANEXOS	97

RESUMO

Produtividade e comportamento biométrico da cana-de-açúcar sob aplicação de vinhaça (*in natura*) e adubação mineral via gotejamento subsuperficial

Devido à crise que o setor sucroenergético vem sofrendo ultimamente, mediante baixas nas cotações de açúcar e etanol nos mercados internacionais, a técnica de irrigação em cana-de-açúcar vem passando por alguns questionamentos quanto a viabilidade de implantação dos sistemas. Diante disso, novos sistemas de irrigação vêm surgindo no meio sucroenergético em busca da redução de perdas de água por evaporação e lixiviação e, também buscando uma maior longevidade de canaviais a fim de obter maior lucro líquido ao longo da vida útil da lavoura. A exemplo disso tem-se o sistema de gotejamento subsuperficial já bastante difundido na Austrália. Outro aspecto é a aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar, cuja técnica vem sendo adotada há muito tempo visto que promove melhorias nas condições físico-química do solo além de promover economias com redução da aplicação de fertilizantes minerais visto que a vinhaça é rica no nutriente potássio. Diante disso, buscou-se conduzir uma pesquisa sobre fertirrigação com aplicação de vinhaça e adubação mineral, em diferentes doses, via gotejamento subsuperficial em um Argissolo vermelho-amarelo com a variedade de cana-de-açúcar CTC15, buscando verificar os seus efeitos na produtividade da variedade e parâmetros biométricos, visto que, irrigação por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar é uma tecnologia relativamente nova para cultura no Brasil. Portanto, foi instalado um experimento de campo em área de aproximadamente 1600 m², composto por 6 tratamentos compostos de diferentes doses de vinhaça, adubação mineral e sequeiro, e 4 repetições, em delineamento inteiramente casualizado, conduzidos por duas safras de cana (2013-2014 e 2014-2015), sendo o T1 sem irrigação e com adubação convencional junto ao plantio, T2 fertirrigado convencionalmente, T3 ½ Dose_{CETESB}, T4 dose calculada a partir dos critérios da norma P4.231/2015 (Dose_{CETESB}), T5 2xDose_{CETESB} e T6 3xDose_{CETESB}. O manejo da irrigação foi realizado por tensiômetros instalados em profundidades de 20, 40 e 60 cm. Os parâmetros avaliados foram: biometria completa da parte aérea (altura de planta, comprimento de limbo foliar, largura de limbo foliar, distância entre internódios, número de colmos, diâmetro de colmos, número de folhas e de perfilhos, clorofila *a*, *b* e *total*), produção por área e avaliação tecnológica (Brix, Pureza, Fibra, Cinzas e ATR). Os parâmetros foram avaliados por análise estatística de variância e teste de comparação entre médias por Tukey a 5% de probabilidade. Diante dos resultados obtidos, comparado à condição de sequeiro (T1), a irrigação exercida no ciclo da cana planta promoveu ganhos em número de perfilhos da ordem de 16%, número de colmos na ordem de 10% e largura de limbo foliar em 15%. A fertirrigação com vinhaça no ciclo de primeira soca, em comparação ao sequeiro (T1), promoveu ganhos de 13% para altura de plantas, 5% para comprimento de folhas, 12% para número de perfilhos e 4% para largura de limbo foliar. E não foram encontradas diferenças estatísticas para clorofila *a*, *b* e *total* e nem para parâmetros tecnológicos nos dois ciclos. O tratamento que melhor respondeu a fertirrigação com vinhaça em produtividade foi T4 (Dose_{CETESB}) obtendo um valor de 190 ton ha⁻¹.

Palavras-chave: Gotejamento subsuperficial; Fertirrigação; Vinhaça; Adubação mineral; Cana-de-açúcar

ABSTRACT

Yield and biometric behavior of sugarcane under subsurface drip application of vinasse (*in natura*) and mineral fertilizer

Due to low sugar and ethanol prices in international markets, questions have arisen about the economic feasibility of implementing new irrigation techniques. Consequently, irrigation systems with reduced leaching and evaporative water loss, and with greater longevity, are being developed to achieve higher net income for sugarcane. The use of subsurface drip is already widespread in Australia, for example. One such management technique is the use of vinasse in sugarcane crops in Brazil. Vinasse has a long history of use in sugarcane production in Brazil, since it promotes improvements in the physical-chemical conditions of the soil and reduces the use of mineral fertilizers, as it is rich the potassium. This research relates to subsurface drip fertigation of the CTC15 variety of sugarcane in a red-yellow Argisol, with vinasse and mineral fertilizer. The objective was to characterize the effect of fertigation on yield and several biometric parameters, since subsurface drip irrigation/fertigation is a relatively new technology for sugarcane production in Brazil. A drip irrigation system was installed in a 1600 m² field, consisting of 4 replications of 6 treatments with different vinasse doses, mineral fertilizer and rainfed conditions, in a completely randomized design. The treatments were T1: No irrigation and conventional fertilization at planting, T2: fertigation at conventional fertilizer levels, T3: fertigation at ½ the standard P4.231/2015 CETESB rate, T4: fertigation at the standard CETESB rate, T5: fertigation at twice the CETESB rate and T6: fertigation at three times the CETESB rate. Data were collected for the 2013-2014 and 2014-2015 sugarcane crops. Irrigation was scheduled based on the moisture content in tensiometers installed at 20, 40 and 60 cm depth. The parameters evaluated were complete shoot biometrics (plant height, leaf blade length, width of leaf blade, the distance between internodes, number of stems, stalk diameter, number of leaves and tillers, chlorophyll a, b and total chlorophyll), crop yield, and sugarcane quality (Brix, Purity, Fiber, Embers and ATR). The parameters were evaluated by statistical analyses of variances, and comparison test of means by Tukey at 5% probability. Based on these results, compared to rainfed condition (T1), irrigation improved tiller number by 16 %, culm number by 10%, and width of leaf blade at 15%. The fertigation with vinasse in the first ratoon cycle, improved plant height by 13%, sheet length by 5%, number of tillers by 12%, and width of leaf blade by 4%. There were no statistical differences in chlorophyll A, chlorophyll B, total chlorophyll and sugarcane quality in either of the two crop cycles. The T4 treatment, fertigation at the standard CETESB rate, had the best yield response to fertigation with vinasse (190 ton ha⁻¹).

Keywords: Subsurface drip irrigation; Fertigation; Vinasse; Mineral fertilization; Sugarcane

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização da área experimental utilizando o aplicativo Google Earth®	35
Figura 2 - Imagem aérea da área experimental – Google Earth®	35
Figura 3 - Linha do tempo de condução do experimento de cana-de-açúcar	39
Figura 4 - Valores médios mensais de precipitação e umidade relativa do ar ocorridos no período do experimento	40
Figura 5 - Valores médios mensais de temperatura e Radiação global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) ocorridos no período do experimento.....	41
Figura 6 - POL % variedades CTC 15, RB 72454 e SP81-3250 (A); Produtividade de 5 cortes variedades CTC 15 e RB72454 (B). <i>Fonte:</i> Centro de tecnologia Canavieira (CTC), 2014	43
Figura 7 - Croqui das parcelas experimentais. T=tratamento. R=repetição	44
Figura 8 - Representação das concentrações das análises químicas da vinhaça ao decorrer das fertirrigações.....	45
Figura 9 - Espaçamento de plantio e espaçamento entre tubos gotejadores.....	47
Figura 10 - Sulcação da área experimental.....	48
Figura 11 - Subsolagem (A) e Sulcação da área experimental (B)	48
Figura 12 - Plantio da cana em sistema combinado (0,9 m x 1,5m) (A), e colocação de tubos gotejadores (B)	49
Figura 13 - Desenvolvimento da cultura (A) e área experimental (B)	49
Figura 14 - Detalhe suporte para tubos gotejadores, acoplado à mesa do sulcador (A), Mesa do sulcador (B), enterrio dos tubos gotejadores na área (C), Separação dos tubos gotejadores entre parcelas experimentais (D).....	50
Figura 15 - Bomba de recalque irrigação do experimento (A); reservatórios para armazenamento de vinhaça e aplicação da fertirrigação (B); instalação linhas laterais (C) e derivação (D)	51
Figura 16 - Instalação de linhas laterais (A) e de derivação na área experimental (B)	52
Figura 17 - Climograma para região do experimento nos dois anos de condução (2013-2014, 2014-2015).....	53
Figura 18 - Reservatório para aplicação de vinhaça (A), tubo gotejador no momento da fertirrigação (B).....	54

Figura 19 - Permeâmetro de carga constante do Departamento de Engenharia de Biossistemas	56
Figura 20 - Leitura de tensiômetros	56
Figura 21 - Análise de clorofila (A), Comprimento foliar (B).....	57
Figura 22 - Corte da cana-de-açúcar (A), pesagem das parcelas experimentais (B)	58
Figura 23 - Pesagem das parcelas experimentais com célula de carga acoplada a maquina ...	59
Figura 24 - Teor de clorofila <i>a</i> na folha (g clorofila/g de folha).....	75
Figura 25 - Teor de clorofila <i>b</i> na folha (g clorofila/g de folha).....	75
Figura 26 - Teor de clorofila <i>total</i> na folha (g clorofila/g de folha)	75
Figura 27 - Representação gráfica do grau Brix em cana planta (A) e cana primeira soca (B)83	
Figura 28 - Representação gráfica do Teor de Fibras (%) em cana planta (A) e cana primeira soca (B).....	83
Figura 29 - Representação gráfica do Teor de Pureza do caldo (%) em cana planta (A) e cana primeira soca (B)	84
Figura 30 - Representação gráfica do Teor de Cinzas (%) em cana planta (A) e cana primeira soca (B)	84
Figura 31 - Representação gráfica dos valores de ATR (kg.TC ⁻¹) em cana planta (A) e em cana primeira soca (B), colmos industrializáveis (ton.ha ⁻¹) em cana planta (C) e cana primeira soca (D).....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos (MARQUES et al., 2006).....	28
Tabela 2 - Valores médios mensais de variáveis meteorológicas ao longo do ciclo do experimento	37
Tabela 3 - Resultados da análise de fertilidade do solo da área experimental (realizada em 2013).....	41
Tabela 4 - Resultados da análise de fertilidade do solo da área experimental (realizada em 2013).....	42
Tabela 5 - Classificação dos teores de macronutrientes para análise química de fertilidade do solo anterior ao plantio	42
Tabela 6 - Classificação dos teores de micronutrientes para análise química de fertilidade do solo anterior ao plantio	42
Tabela 7 - Descrição dos tratamentos.....	44
Tabela 8 - Análise química da vinhaça para as respectivas fertirrigações	45
Tabela 9 - Programação de fertirrigação para cana-de-açúcar da estação (12 meses)	46
Tabela 10 - Quantidade de fertilizante e vinhaça por tratamento.....	47
Tabela 11 - Características do tubo gotejador utilizado	50
Tabela 12 - Valores de umidade de saturação do solo (θ_s) e residual (θ_r), parâmetros da curva de retenção de água do solo do modelo de Van Genuchten (1980) e características físicas do solo	55
Tabela 13 - Teste de esfericidade da estrutura da matriz de variâncias-covariâncias (Σ) para variáveis biométricas de dois anos de condução de cana-de-açúcar (planta e soca), variedade CTC 15.....	65
Tabela 14 - Resultados (p-valores) associados às principais fontes de variação nas análises de variâncias dos ensaios finais de biomassa cana-planta, levando-se em consideração às variáveis: número de folhas por planta, número de perfilhos e número de colmos por planta, considerando tempo como subparcelas (DAP – dias após plantio), para as variáveis que não rejeitamos a hipótese de esfericidade	67
Tabela 15 – Média para número de folhas verdes, número de perfilhos e número de colmos, variáveis biométricas não significativas para interação (T x D) ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana-planta (2013-2014).....	68

Tabela 16 - Resultados (p-valores) associados às principais fontes de variação nas análises de variâncias dos ensaios finais de biomassa cana primeira soca, levando-se em consideração as variáveis clorofila a, clorofila b e clorofila total, largura de limbo foliar (cm), número de colmos por planta, número de folhas por planta, considerando tempo como subparcelas (DAC – dias após corte), para as variáveis que não rejeitamos a hipótese de esfericidade	69
Tabela 17 – Média para número de colmos, variável não significativas para interação (T x D) ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana primeira soca (2014-2015)	70
Tabela 18 - Análise da variância para verificar o efeito dos tratamentos sob as variáveis em estudo e teste de Shapiro-wilk para verificar normalidade dos resíduos com seus respectivos valores de “p”	70
Tabela 19 - Tabela de dupla entrada de médias para número de perfilhos aos 210, 230, 244, 258, 272, e 293 dias após plantio (DAP) em cana-planta (2013-2014)	71
Tabela 20 - Tabela de dupla entrada de médias para número de colmos aos 210, 230, 244, 258, 272, e 293 dias após plantio (DAP) em cana-planta (2013-2014)	72
Tabela 21 - Dupla entrada de médias para largura de limbo foliar (cm) aos 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180 e 195 dias após colheita (DAC) em cana primeira soca (2014-2015)	73
Tabela 22 – Médias para clorofila a, clorofila b e clorofila total, variáveis biométricas não significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana primeira soca (2014-2015)	76
Tabela 23 - Resultados (p-valores) associados às principais fontes de variação nas análises de variâncias dos ensaios finais de biomassa cana planta, levando-se em consideração as variáveis, altura de plantas (m), comprimento foliar (m), largura de folhas (cm), diâmetro de colmos (mm) e distância entre internódios (cm) considerando tempo como subparcelas (DAP – dias após plantio), para as variáveis que rejeitamos a hipótese de esfericidade	77
Tabela 24 – Média para altura de planta, largura de limbo foliar, diâmetro de colmo e distância entre internódios, variáveis biométricas significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana planta (2013-2014)	77
Tabela 25 - Resultados (p-valores) associados às principais fontes de variação nas análises de variâncias dos ensaios finais de biomassa cana planta, levando-se em consideração as variáveis clorofila a, clorofila b e clorofila total considerando	

tempo como subparcelas (DAP – dias após plantio), para as variáveis que rejeitamos a hipótese de esfericidade	78
Tabela 26 - Média para Clorofila a significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana planta (2013-2014)	79
Tabela 27 – Média para Clorofila b significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana planta (2013-2014)	79
Tabela 28 – Média para Clorofila total significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana planta (2013-2014)	79
Tabela 29 - Resultados (p-valores) associados às principais fontes de variação nas análises de variâncias dos ensaios finais de biomassa cana primeira soca, levando-se em consideração as variáveis Altura de planta (m), comprimento foliar (m), número de perfilhos, diâmetro de colmos (mm) e distância entre internódios (cm) considerando tempo como subparcelas (DAC – dias após corte), para as variáveis que não rejeitamos a hipótese de esfericidade.....	80
Tabela 30 - Média para variáveis biométricas significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana primeira soca (2014-2015).....	80
Tabela 31 – Média para parâmetros tecnológicos e produtividade de colmos industrializáveis em cana-planta (2013-2014).....	82
Tabela 32 – Média para parâmetros tecnológicos e produtividade de colmos industrializáveis em cana primeira soca (2014-2015)	82
Tabela 33 – Produtividade de Biomassa total e ponteira em cana planta e primeira soca em ton.ha-1.....	82

1 INTRODUÇÃO

O cultivo de cana-de-açúcar no Brasil ocupa atualmente uma área de 9.716.763 ha, sendo que em 2014 ocupava 9.915.301 ha, ou seja, apresentou um pouco mais de 2% de redução de área. Para 2016, a área plantada e a área a ser colhida apresentaram uma redução de 11,6% e 5,6%, respectivamente, em relação ao ano de 2015, sendo que para 2016 espera-se uma produtividade média de 72,6 ton ha⁻¹ (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE 2016).

A maior região produtora de cana-de-açúcar do Brasil é o sudeste, seguidas pelas regiões centro-oeste e nordeste. Em termos dos principais impasses que ocasionaram a redução da área plantada de cana-de-açúcar no país podem ser citados: 1) aumento no preço dos insumos agrícolas, 2) a redução do valor pago pelo quilograma de Açúcar Total Recuperável (ATR), utilizado para pagamento da tonelada de cana-de-açúcar no sistema CONSECANA e 3) falta de incentivos políticos e fiscais para o setor. Ainda, segundo o IBGE (2016), a região sudeste é a que apresenta melhor rendimento médio de produtividade (77,03 ton ha⁻¹), seguidos pela região sul (75,37 ton ha⁻¹), região centro-oeste (74,94 ton ha⁻¹), região norte (64,82 ton ha⁻¹) e região nordeste (58,81 ton ha⁻¹).

Em sua maior parte, a cana-de-açúcar é cultivada no Brasil em condições de sequeiro, tornando mais presente a técnica da irrigação em grandes propriedades ou em usinas mais tecnificadas. Apesar de comprovado que a utilização de irrigação plena em cana-de-açúcar é viável economicamente e que traz benefícios indiretos como aumento da longevidade do canavial, ainda existe grande receio por parte de produtores e usinas devido às dificuldades econômicas enfrentadas na última década com a cultura.

Atualmente, um novo método de irrigação que está em crescente desenvolvimento no Brasil, no cultivo da cana-de-açúcar, é o sistema por gotejamento subsuperficial. Este sistema, apesar dos altos custos de implantação, é um sistema altamente automatizado, com redução no consumo hídrico, alta uniformidade, reduzida perda atmosférica da água irrigada e baixo consumo de energia devido à necessidade de estações de bombeamento de baixa potência.

A irrigação por gotejamento subsuperficial é uma técnica utilizada há anos na Austrália em cultivos de cana-de-açúcar, sendo muito difundida neste país. No Brasil, estudos cada vez mais avançados vem buscando a adaptação e viabilidade deste sistema a fim de obter maiores produtividades, longevidade e rentabilidade do canavial. Além da vantagem de utilização da fertirrigação aplicando fertilizantes solúveis granulados, estudos sobre a

fertirrigação da cana-de-açúcar em sistema irrigado por gotejamento subsuperficial com vinhaça in natura é crescente, visto que pode trazer economia com adubação potássica da lavoura, além de promover o suprimento do déficit hídrico da cultura.

O sistema de irrigação via gotejamento subsuperficial pode trazer grandes economias em relação à quantidade de fertilizante utilizada na lavoura, além de seu aproveitamento pela planta, o qual pode ser melhorado gradativamente. Com os altos custos com fertilizantes minerais atuais, este sistema vem a colaborar economicamente e ambientalmente para a agricultura brasileira.

A vinhaça, subproduto obtido da produção de etanol, devido à alta concentração de potássio em sua composição química ($2,0 \text{ kg m}^{-3}$ a $4,0 \text{ kg m}^{-3}$) é aplicada via fertirrigação em cana-de-açúcar mediante sistemas de irrigação por autopropelido.

Estudos realizados em cana-de-açúcar dentro de centros de pesquisas e em campo comerciais com grupos usineiros têm mostrado altas produtividades de canaviais da ordem de 180 ton ha^{-1} e aumento da longevidade ultrapassando períodos de 10 anos entre reformas do canavial. Usinas do Oeste Paulista têm encontrado produtividades da ordem de 165 ton ha^{-1} em variedade RB92579 irrigado em sistema de gotejamento enterrado em experimento conduzidos em 140 ha.

Desse modo, fundamentando-se na hipótese de que a produtividade da cana-de-açúcar é sensível à aplicação de diferentes doses de vinhaça, a presente pesquisa teve como principal objetivo estudar o efeito de diferentes lâminas de fertirrigação com vinhaça na produtividade da cana-de-açúcar, buscando confrontar situações de sequeiro e irrigado, também mediante aplicação de adubação convencional (fertilizantes minerais), bem como, avaliar o aumento de produção e fatores biométricos (teor de clorofila, altura de plantas, diâmetro de colmos, distância entre internódios, largura de limbo foliar, comprimento de limbo foliar, nº de colmos, nº de folhas e nº de perfilhos) da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), por meio de sistema de irrigação via gotejamento subsuperficial.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Fisiologia da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta monocotiledônea, alógama e perene, provavelmente originária das regiões da Indonésia e Nova Guiné, pertencente à família *Poaceae*. Seus atuais cultivares são híbridos interespecíficos, sendo que nas constituições genéticas participam as espécies *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule*.

Trata-se de uma planta de reprodução sexuada quando cultivada comercialmente, porém, é multiplicada assexuadamente, por propagação vegetativa. É caracterizada pela inflorescência do tipo panícula, flor hermafrodita, caule em crescimento cilíndrico composto de nós e entrenós, folhas alternas, opostas, presas aos nós dos colmos, com lâminas de sílica em suas bordas, e bainha aberta. É cultivada em regiões tropicais e subtropicais, em mais de 90 países, em uma ampla faixa de latitude de 35°N a 30°S, podendo se adaptar a diversas condições de clima e solo, exigindo precipitações pluviométricas entre 1.500 a 2.500 mm por ciclo vegetativo (RODRIGUES, 1995 apud ROCHA, 2013).

O sistema radicular é altamente ramificado do tipo fasciculado, melhor observado em sua parte superficial onde 85% encontram-se nos 50 primeiros centímetros e 60% nos primeiros 20 a 30 centímetros de forma orientada para baixo em sentido vertical (SEGATO et al., 2006).

O colmo representa a parte econômica no cultivo da cana-de-açúcar. Ele constitui-se num reservatório onde, em condições favoráveis à maturação, ocorre o acúmulo de grande quantidade de sacarose. O colmo da cana-de-açúcar é uma haste sem ramificações, com secção transversal aproximadamente circular, diferenciadas em segmentos compostos por um nó, que consiste em uma gema lateral situada junto à inserção foliar contendo primórdios radiculares e anel de crescimento, e um entrenó, que chegam de 15 a 25 cm, dependendo das condições meteorológicas experimentadas pela planta, onde ocorre o acúmulo de sacarose da planta (MARIN et al., 2009).

A folha da cana-de-açúcar é constituída por duas partes: bainha que liga a folha ao colmo da planta na base dos nós e a lâmina foliar que faz o processo de transpiração vegetal, respiração e fotossíntese. Trata-se de coletar a energia do meio externo, podendo chegar a 150 cm de comprimento e 10 cm de largura, sendo uma das partes das plantas que diferem as variedades de cana-de-açúcar. Outras variações ainda podem ocorrer em alguns elementos da bainha como a lígula, a aurícula e o “*dewlap*” (JAMES, 2004).

Segundo Inman-Bamber et al. (2002) a fração da biomassa, pertencente ao colmo, aumenta conforme ocorre o aumento da biomassa total, sendo que esta fração é nula antes do início do crescimento do colmo e atinge seu valor máximo quando ocorre a maturação da cultura. Esta fração é afetada diretamente por estresse hídrico, temperatura e cultivar. Keating et al. (1999) considera como constante o valor de 70% para fração do colmo na planta colhida, já na literatura podem-se encontrar valores entre 59% a 73%.

Durante o ciclo da cultura, ocorre um intenso período de produção de colmos, com pico entre o 3º e 5º mês após o plantio de cana-de-açúcar de “ano e meio”, mas em seguida 50% destes são extintos e a população se estabiliza perto dos 9 meses de idade (BULL, 1975).

Diola e Santos (2010) descrevem que o perfilhamento inicia-se em torno de 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias, sendo um processo fisiológico de ramificação subterrânea contínua das juntas nodais compactadas ao broto primário. Ele proporciona ao cultivo o número de colmos necessários para uma boa produção. Perfilhos formados mais cedo ajudam a produzir talos mais grossos e mais pesados, enquanto os formados tardiamente “morrem” ou permanecem curtos ou imaturos. A população máxima é alcançada entre 90 e 120 dias. Aos 150 a 180 dias, pelo menos 50% dos perfilhos são eliminados e uma população estável é estabelecida. Embora de 6 a 8 perfilhos sejam produzidos a partir de uma gema, observa-se atualmente que 1,5 a 2 perfilhos por gema permanecem para formar a planta adulta.

Segundo Doorenbos e Kassam (1994 apud ROCHA, 2013), a cana-de-açúcar é cultivada em várias regiões localizadas principalmente entre os paralelos de 35°N e 35°S e em altitudes que variam do nível do mar até 1000 metros de altitude (MAGALHÃES, 1987), o que engloba diversos tipos de clima.

Como a cana-de-açúcar é uma planta do tipo C4, as altas eficiências fotossintéticas devem-se às altas intensidades luminosas. Diante de elevadas taxas de radiação, os colmos são mais grossos e curtos, as folhas são mais longas e verdes e o perfilhamento é mais intenso. Em condições de baixa irradiância, os colmos são mais finos e longos e as folhas são mais estreitas e amarelas (RODRIGUES, 1995 apud ROCHA, 2013). Quanto maior a quantidade luminosa, mais fotossíntese será realizada pela cultura e, logicamente, maior o seu desenvolvimento e acúmulo de açúcares (BARBIERI, 1981).

A temperatura é, provavelmente, o fator ambiental que mais influencia no desempenho da cana-de-açúcar. De acordo com Fauconier e Bassereau (1975), temperaturas abaixo de 25°C ocasionam um crescimento lento da planta; entre 30 e 34°C a planta alcança o crescimento máximo e, acima de 35°C, volta a ser lento, tornando-se praticamente nulo sob

temperaturas superiores a 38°C. Segundo Barbieri et al. (1979 apud ROCHA, 2013), a temperatura ideal para germinação das gemas da cana-de-açúcar situa-se entre 32 e 38°C. O crescimento ótimo é obtido com temperaturas médias diárias entre 22 a 30°C e, acima de 38°C, o crescimento é muito lento. A taxa de crescimento se reduz com temperaturas abaixo de 20°C, sendo essa a temperatura basal para a cultura. Para a maturação e colheita, são desejáveis temperaturas relativamente baixas, entre 10 e 20°C, pois o tempo frio retarda a taxa de crescimento vegetativo e o enriquecimento da sacarose na cana.

A cana-de-açúcar, por se tratar de uma espécie de grande eficiência fotossintética, tem seu ponto de saturação luminosa elevado. Assim, quanto maior a intensidade luminosa, mais fotossíntese será realizada pela cultura e o crescimento e desenvolvimento da cultura serão mais eficientes e haverá um maior acúmulo de açúcares. Segundo Barbieri (1981), o fotoperíodo é um importante fator para o desenvolvimento das culturas e afeta o comprimento dos colmos. Em fotoperíodos que variam entre 10 e 14 horas há um aumento no tamanho dos colmos. No entanto, em fotoperíodos longos, entre 16 a 18 horas, o colmo sofre redução em seu tamanho.

O aumento da concentração de CO₂ pode afetar os processos biológicos em diferentes níveis de organização (MOONEY et al., 1999). Segundo Warrick (1988), os efeitos de maiores concentrações de CO₂ sobre o crescimento e produtividade das plantas são benéficos e se originam dos efeitos de processos que ocorrem ao nível da folha. O acréscimo de CO₂, também chamado de efeito de fertilização por CO₂, aumenta a resposta fotossintética. Além disso, a elevação do CO₂ reduz a transpiração. Os estômatos das folhas se abrem para permitir a sua entrada para a fotossíntese, mas, ao fazê-lo, a planta inevitavelmente perde umidade por meio da transpiração. Concentrações maiores de CO₂ no ambiente fazem com que os estômatos se fechem parcialmente, o que reduz a condutância estomatal e, portanto, a perda de água. Essa resposta ocorre tanto nas plantas C3 como C4 (KIMBALL; IDSO, 1983; CURE, 1985; MORISON, 1987). O aumento nas taxas fotossintéticas e a melhoria nas relações hídricas observados nas plantas cultivadas em elevadas concentrações de CO₂, normalmente geram incrementos de biomassa e altura nessas plantas (POORTER; PÉREZ-SOBA, 2002; SOUZA, 2007).

O desenvolvimento do sistema radicular de culturas perenes e semi-perenes, como a cana-de-açúcar, apresenta um agravante, no que se refere à renovação de raízes entre ciclos, ou no mesmo ciclo, tornando-se necessária a identificação de raízes vivas ou metabolicamente ativas em uma massa total amostrada (FARONI, 2004). Depois do corte da cana-planta, o

sistema radicial antigo mantém-se em atividade por algum tempo e, durante esse período, é substituído pelas raízes dos novos perfilhos da soqueira, sendo esse processo lento e gradual. As raízes da soqueira são mais superficiais que as da cana-planta pelo fato dos perfilhos das soqueiras brotarem mais próximos à superfície que os da planta (FARONI, 2006).

Segundo Araújo (2006), a escolha do cultivar é um dos pontos que merece especial atenção, não só pela sua importância econômica, como geradora de massa verde e riqueza em açúcar, mas também pelo seu processo dinâmico, pois anualmente surgem novas cultivares, sempre com melhorias tecnológicas quando comparadas com aquelas que estão sendo cultivadas. No Brasil, assim como em outros países produtores de cana-de-açúcar, os cultivares tem sido continuamente testado com o objetivo de aumentar a produtividade, obter maior resistência às pragas e doenças e melhor adaptação às variações de clima, tipos de solos, técnicas de corte ou manejo.

Atualmente, vem surgindo outras formas de comercialização da cana em mudas e por gemas vegetativas, estando esta tecnologia ainda no início da implantação, mas que já vem sendo muito estudada no meio agrônomo.

2.2 Condições de cultivo

2.2.1 Cultivo sequeiro

O déficit hídrico afeta vários aspectos do crescimento vegetal. Os efeitos mais evidentes do estresse hídrico referem-se à redução do tamanho das plantas, de sua área foliar e da produtividade da cultura (KRAMER, 1983; TAIZ; ZEIGER, 2002). O grau de injúria causado pelo déficit hídrico depende consideravelmente do estágio fenológico em que ele ocorre na planta e da duração do estresse. Segundo Barlow et al. (1980), o crescimento vegetal depende da divisão celular, do crescimento e da diferenciação celular e todos esses processos são afetados por déficits hídricos, mas não necessariamente na mesma proporção.

Segundo Frizzone (2001), praticamente, toda a cana produzida no Estado de São Paulo é cultivada em condições de sequeiro, isto é, sem o emprego da técnica de irrigação. A tradição do cultivo de cana de sequeiro é alicerçada no paradigma de que a irrigação de cana-de-açúcar é economicamente inviável nas condições edafoclimáticas do Estado de São Paulo.

O efeito do estresse hídrico nas diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar ainda não é bem elucidado na literatura (WIEDENFELD, 2000). Contudo, sabe-se que o grau

de injúria promovido pelo estresse depende consideravelmente do estágio fenológico da planta e da duração do estresse (FARIAS et al., 2008a).

A irrigação em cana-de-açúcar no Brasil ainda é pouco expressiva, apesar de essa cultura ter grande importância econômica na agricultura do país e na balança comercial brasileira. A área expressiva com cana-de-açúcar irrigada não ultrapassa a 5% do total da área cultivada com cana-de-açúcar. Na maioria das áreas irrigadas o método mais utilizado é por aspersão utilizando fertirrigação com vinhaça após o corte da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é uma cultura bem adaptada às condições tropicais e subtropicais com alta disponibilidade de água, nutrientes e radiação (PARK et al., 2005; GILBERT et al., 2006; TEJERA et al., 2007), produzindo grande quantidade de biomassa. Contudo, o estresse hídrico durante as fases críticas (perfilhamento e início do desenvolvimento de colmos) pode resultar em reduções expressivas no rendimento de colmos e de açúcar; entretanto, quando bem aplicado (especificamente durante a fase de maturação), o estresse hídrico aumenta a concentração de sacarose nos colmos (ROBERTSON et al., 1999; INMAN-BAMBER, 2004 apud ROCHA, 2013). Em decorrência disso, percebe-se que um manejo de água adequado e estratégico durante todo o ciclo da cana-de-açúcar, torna-se um aspecto de grande importância que visa melhorar o planejamento e a tomada de decisão da irrigação e, consequentemente, aumentar a eficiência de uso da água do sistema de produção (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

2.2.2 Irrigação em cana-de-açúcar

O principal objetivo da irrigação é suprir as necessidades hídricas das culturas. Essa técnica não funciona isoladamente, mas, sim, conjugada com outras práticas de manejo da cultura. A irrigação, além de proporcionar incremento na produtividade das culturas, permite ampliar o tempo de exploração da planta e o número de colheitas.

Segundo Bernardo (2006 apud ROCHA, 2013), o consumo diário da cultura varia entre 2 a 6 mm dia⁻¹, considerando: diferentes regiões produtoras do país, variedades, estágio de desenvolvimento da cultura e demanda evapotranspirométrica em função do mês e da região (variação temporal e espacial).

Em regiões semiáridas, a água é um recurso de fundamental relevância para a produção de cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER; MCGLINCHEY, 2003; WATANABE et al., 2004; WIEDENFELD, 2004), ao passo que poucas são as informações sobre a eficiência

do uso de água no sistema de produção agrícola, sobretudo no que se refere à produção de sacarose e de álcool (INMAN-BAMBER et al., 1999; INMAM-BAMBER; SMITH, 2005). Muitos pesquisadores têm proposto indicadores para avaliar a eficiência do uso da água (BOS et al., 1994; MOLDEN et al., 1998). Esses indicadores consideram a resposta produtiva da cultura e o desempenho da aplicação de água no sistema de produção em relação à demanda hídrica máxima requerida (PEREIRA et al., 2002).

Soares et al. (2003) em seu estudo consideraram que para a região do semi-árido, o uso da irrigação, na cultura da cana-de-açúcar, constitui-se numa alternativa potencial para o sucesso da produção sucroalcooleira. De acordo com Mاتيoli (1998) praticamente toda a cana-de-açúcar produzida em São Paulo é cultivada em condições de sequeiro.

O primeiro grupo de indicadores está associado à produtividade da água da cultura (PAC), que expressa a relação entre a quantidade produzida e o volume de água aplicado ou consumido pela cultura (IGBADUN et al., 2006; KAHLOWN et al., 2007). Comumente, este indicador é conhecido como uso eficiente de água; no entanto, a PAC considera a fração econômica do rendimento (DETAR, 2008; DI PAOLO; RINALDI, 2008). O segundo grupo de indicadores tem sido utilizado em diferentes áreas agrícolas e considera o suprimento relativo de água (SRA), a evapotranspiração relativa (ER), a fração de redução de água (FRA) e o déficit hídrico da cultura (DHC) (AHMAD et al., 2009; BASTIAANSEN et al., 2001; BOS et al., 2005; KARATAS et al., 2009).

A irrigação plena em cana-de-açúcar ainda é pouco difundida, porém seus benefícios para a cultura são vários. Mاتيoli et al. (1996) definiram os benefícios da irrigação em cana-de-açúcar em diretos e indiretos. Os benefícios diretos consistem nos aumentos de produtividade agrícola e longevidade das soqueiras, e os benefícios indiretos são aqueles relacionados com a redução de custos no processo produtivo agrícola, proporcionados, por exemplo, pela dispensa de arrendamentos de terras. Soma-se, também, como benefício indireto, a redução com o transporte da cana, no caso de área arrendada mais distante da unidade industrial do que a área irrigada.

Entre todos esses benefícios citados, a possibilidade da aplicação de adubo, principalmente nitrogênio e potássio, via fertirrigação, é outra vantagem, trazendo benefícios indiretos ao planejamento da cultura.

2.2.3 Fertirrigação em cana-de-açúcar - aplicação de vinhaça e fertilizantes minerais

O uso da vinhaça in natura como fertilizante é vantajoso devido a sua riqueza em matéria orgânica, potássio, cálcio e enxofre. Porém, há a possibilidade de utilização em sua forma concentrada, cuja vantagem adicional da concentração é que reduz os custos de transporte a grandes distâncias, principalmente quando a localização de destilarias é muito afastada de áreas agrícolas. A alternativa mais viável para descarte desse resíduo é a aplicação da vinhaça aos solos cultivados com cana-de-açúcar (FREIRE; CORTEZ, 2000).

A vinhaça é um subproduto amplamente utilizado na cultura da cana-de-açúcar, sendo sua aplicação realizada por diversas formas, como por exemplo, por caminhões-tanque, por sulcos de infiltração, por aspersão (LEME, 1993) e, atualmente, existe a possibilidade de aplicação desse resíduo diluído por meio de pivôs centrais.

A riqueza da vinhaça em nutrientes varia de acordo com o tipo de mosto utilizado na destilaria, sendo a quantidade alta de potássio, uma das principais razões do seu uso como fertilizante. Assim, da aplicação de vinhaça resultam efeitos benéficos no aumento da produtividade agrícola, sendo mais pronunciado em solos arenosos, principalmente quando eles se caracterizam por apresentar baixo conteúdo de nutrientes (COELHO; AZEVEDO, 1986). Por outro lado, nos locais onde são feitas aplicações de doses elevadas podem ocorrer problemas devido ao aumento no teor de cinzas do caldo (prejudicando a cristalização do açúcar), reduzindo a pureza do caldo, mostrando assim um efeito negativo da vinhaça sobre a maturação da cana (SILVA et al., 1978).

Dependendo de sua composição, a vinhaça poderá substituir em termos parciais ou integrais a adubação mineral da cana, especialmente em solos que não respondem ao nitrogênio. Mesmo que essa substituição seja parcial, a economia de adubos é importante (MELO, 2010). Além disso, o uso da vinhaça como adubo traz alguns benefícios ao solo, tais como, o aumento da matéria orgânica, do pH, da disponibilidade de nutrientes, da retenção de cátions e da atividade microbiana, além de melhorar a estrutura física do solo (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983 apud ROCHA, 2013).

Dentre os componentes químicos da vinhaça, destacam-se, a matéria orgânica e o potássio, podendo-se observar que a quantidade de nutrientes é maior na vinhaça de mosto de melaço e menor na vinhaça de mosto de caldo (Tabela 1).

Praticamente 60% da vinhaça produzida provêm de mosto de caldo e 40% de mosto misto. Após analisarem a composição química de diferentes tipos de vinhaça produzidas em diferentes regiões do Brasil, Silva e Orlando Filho (1983) mostraram que a vinhaça é muito

rica em matéria orgânica e nutrientes minerais, tais como o potássio e cálcio. Estes mesmos autores constataram que a composição química da vinhaça é muito heterogênea, em função do tipo de matéria-prima e outros aspectos, concluindo que o potássio é o elemento predominante, seguindo-se do cálcio, enxofre (sulfato), nitrogênio, fósforo e magnésio; dos micronutrientes, o ferro é o que aparece em maior concentração, seguido do manganês, cobre e zinco, em pequenas concentrações.

Tabela 1 - Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos (MARQUES et al., 2006)

Elementos	Vinhaça de mosto		
	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2-5,0	3,7-4,6	4,4-4,6
Temperatura	80-100	80-100	80-100
DBO (mg L ⁻¹ O ₂)	25.000	6.000 - 16.500	19.800
DQO (mg L ⁻¹ O ₂)	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg L ⁻¹)	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg L ⁻¹)	21.500	3.700	12.700
N (mg L ⁻¹ N)	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710
P ₂ O ₅ (mg L ⁻¹)	100 - 290	10 - 210	9 - 200
K ₂ O (mg L ⁻¹)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
CaO (mg L ⁻¹)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
MgO (mg L ⁻¹)	420 - 1.520	200 - 490	580.700
SO ₄ ⁻ (mg L ⁻¹)	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
C (mg L ⁻¹)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria orgânica (mg L ⁻¹)	63.400	19.500	3.800
Subst. redutoras (mg L ⁻¹)	9.500	7.900	8.300

No estado de São Paulo existe uma normativa técnica que tem como objetivo dispor sobre os critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar.

Segundo a norma técnica CETESB (P4.231), 3ª edição de Fevereiro de 2015 a quantidade de vinhaça é obtida mediante a aplicação da eq. (1).

$$VV = \frac{[(0,05.CTC - ks).3744 + 185]}{kvi} \quad (1)$$

em que:

- VV - Volume de vinhaça a ser aplicado, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$
- 0,05 - 5% da CTC;
- CTC - capacidade de troca catiônica, expressa em cmolc dm^{-3} a pH 7,0;
- ks - concentração de potássio no solo, expresso em cmolc dm^{-3} , à profundidade de 0,80 metros;
- 3744 - constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc dm^{-3} ou $\text{meq } 100 \text{ cm}^{-3}$, para kg de potássio em um hectare por 0,80 metros de profundidade;
- 185 - kg de K_2O extraído pela cultura por ha, por corte; e
- kvi - concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de $\text{K}_2\text{O m}^{-3}$, apresentada em boletim de resultado analítico, assinado por responsável técnico.

A fertirrigação com vinhaça é bastante difundida nas regiões canavieiras com resultados satisfatórios em relação às alterações químicas no solo, como o aumento de matéria orgânica, teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) trocáveis. Quando aplicada adequadamente, cerca de $150 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ de vinhaça equivale a uma adubação de 61 kg ha^{-1} de nitrogênio, 343 kg ha^{-1} de K e 108 kg ha^{-1} de Ca (MEDEIROS et al., 2003).

A aplicação de vinhaça nas lavouras de cana-de-açúcar, bem como a aplicação da técnica da fertirrigação, são práticas adotadas por várias usinas, sendo tecnologias conhecidas e bem definidas com inúmeros ensaios que comprovam os resultados positivos obtidos na produtividade agrícola, associados à economia dos adubos minerais (PENATTI et al., 1988).

Porém, as altas doses de vinhaça empregadas nas lavouras de cana-de-açúcar da região centro-sul podem trazer desequilíbrios entre os cátions cálcio, potássio e magnésio presentes no solo. Um amplo estudo da calibração de cálcio e magnésio para a camada superficial dos solos cultivados com cana-de-açúcar foi desenvolvido por Benedini (1988 apud GARCIA, 2014), concluindo que a cana-de-açúcar foi pouco sensível à acidez do solo, sendo pouco influenciada pelo pH, saturação por bases, saturação por alumínio e teores de alumínio trocável, porém respondendo positivamente ao calcário devido ao aumento nos teores de cálcio e magnésio no solo. Ainda, segundo Quaggio (1986 apud GARCIA, 2014), a resposta da cultura da cana-de-açúcar à calagem depende também do clima, pois em determinadas situações, baixas produções são observadas, principalmente por déficit hídrico, o que compromete a avaliação dos efeitos da calagem.

Segundo Rosseto et al (2004 apud GARCIA, 2014), relatam que os acréscimos na produtividade da cana-de-açúcar em resposta à calagem são esporádicos. Quando esses ocorrem, são obtidos em condições de severa acidez, na presença de alumínio em níveis tóxicos, e principalmente na ausência de teores adequados de cálcio e magnésio no solo. Grande variabilidade na resposta da produtividade da cana à calagem ocorre em condições de

fertilidade de solo mais restritivas, indicando forte adaptação das variedades às condições de acidez do solo. Dessa forma, os mesmos autores, estudando a calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica na produtividade de cana, instalaram seis experimentos em algumas regiões do Estado de São Paulo, concluindo que houve resposta da calagem na produtividade da cana apenas em duas situações, quando os solos apresentaram baixa fertilidade e acidez elevada, caracterizada por pH menor que 4,4 e teores de Ca^{+2} próximos a $6 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$. O aumento de produtividade devido à calagem, nessas condições, manteve-se entre 8 a 13 t ha^{-1}

Devido aos altos teores de potássio, normalmente dispensa-se a aplicação desse nutriente nas áreas onde o subproduto é aplicado. Então, nas áreas fertilizadas com vinhaça e devido inconstância na obtenção de respostas positivas à adubação nitrogenada da cana-planta (CARNAÚBA, 1990), usualmente as unidades de produção sucroalcooleira aplicam apenas o fertilizante fosfatado no sulco do plantio de cana. Nas soqueiras, mesmo com a adição de quantidades significativas de nitrogênio junto com a vinhaça, respostas positivas são observadas devido à complementação nitrogenada, sendo então usual a aplicação de fertilizantes nitrogenados nas soqueiras (ESPIRONELLO et al, 1981).

Em seu estudo sobre efeito residual da adubação fosfatada e torta de filtro na brotação de soqueiras de cana-de-açúcar, variedade RB867515, Santos et al. (2012) encontraram que doses de fósforo associados a torta de filtro no plantio, favorecem a brotação da primeira soqueira. Doses de $4,0 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ de torta de filtro, aplicados com fósforo mineral elevam a brotação das soqueiras, assim como doses de P_2O_5 , a partir de 50 kg ha^{-1} .

A torta de filtro é um resíduo composto da mistura de bagaço moído e lodo da decantação, proveniente do processo de clarificação do caldo (SANTOS et al., 2010 apud SANTOS, 2012). Segundo Nunes Junior (2008 apud SANTOS, 2012) a torta de filtro é um excelente produto orgânico para a recuperação de solos exauridos ou de baixa fertilidade, que sai da filtragem com 75% a 80% de umidade. Possui altos teores de matéria orgânica e fósforo, além de nitrogênio, cálcio, potássio, magnésio e micronutrientes. O fósforo existente na torta de filtro é orgânico, sendo que sua liberação e do nitrogênio se dá gradativamente por mineralização e por ataque de microorganismos no solo. O cálcio que aparece em grande quantidade é resultado da chamada caleação do caldo durante o processo de clarificação. Já o fósforo provem da adição de produtos auxiliares de floculação das impurezas do caldo.

Brito et al. (2005) verificaram que doses crescentes de vinhaça aumentam a concentração de K trocável, em especial nas camadas mais superficiais do Argissolo estudado. Semelhantemente, Camargo et al. (1983), estudando os efeitos de diferentes doses

de vinhaça provenientes de mosto misto sobre dois diferentes tipos de solo, também observaram acréscimo de bases trocáveis e pH na camada superior e em profundidade, quando aplicaram a dose mais elevada.

Segundo Paula et al. (1999), os elevados teores de K no complexo sortivo do solo podem acarretar acréscimos também na solução do solo, propiciando lixiviação dos nutrientes em profundidade. A aplicação inadequada de vinhaça pode contribuir para o aumento dos elementos químicos no solo, principalmente de K e sódio (Na) que influenciam o aumento da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (BRITO et al., 2005).

Em relação ao íon nitrogênio, Da Silva et al. (2013) encontrou em experimento com variedade SP 791011 submetido a adubação química nitrogenada que quando submetida a irrigação, a cultura apresentou melhor rendimento em todas as variáveis avaliadas, quando comparado na ausência de irrigação. Entre os parâmetros de crescimento estudados, apenas o comprimento do colmo foi influenciado a 5% de probabilidade pela interação irrigação *versus* adubação.

2.3 Irrigação por gotejamento subsuperficial

Dentre os métodos de irrigação existentes, o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial (IGS) adapta-se ao tipo de cultivo da cana-de-açúcar. Bui e Kinoshita (1985), na estação experimental dos plantadores de cana-de-açúcar do Havaí, começaram a testar a viabilidade do gotejamento, iniciando as instalações em plantios comerciais em 1970. Segundo os autores, no final de 1984, a área irrigada de cana-de-açúcar superava 45.400 ha. Desse total, 34.800 ha eram irrigados via IGS.

Independentemente do sistema de irrigação utilizado, a literatura é unânime ao enfatizar a importância de se controlar adequadamente a aplicação, otimizando o custo de água e energia e de outros fatores envolvidos na condução de uma cultura irrigada (FARIA; REZENDE, 1997).

A irrigação por gotejamento subsuperficial caracteriza-se pela aplicação localizada de água diretamente na zona radicular da cultura, apresentando elevado potencial de utilização devido à eficiência no uso da água. Na produção de cana-de-açúcar o gotejamento enterrado é uma prática recente e ainda pouco divulgada no país, a técnica tem elevado custo inicial de implantação e há escassez de informações, tanto do manejo técnico do sistema de irrigação quanto do retorno econômico (BARBOSA et al., 2009 apud ROCHA, 2013).

O gotejamento, por si só, pode ser uma alternativa adicional para aplicação de vinhaça, principalmente em áreas de expansão onde há necessidade de irrigação. Atualmente há mais de 7 mil hectares irrigados por gotejamento superficial no Brasil (COELHO et al., 2009).

O sistema de aplicação por aspersão com carretel enrolador, embora represente um menor investimento inicial frente a outros sistemas de irrigação, é o que apresenta o maior custo operacional para seu funcionamento (HERNANDEZ, 2006).

Algumas vantagens relevantes no sistema de gotejamento subsuperficial é a razão de não possuir mais molhamento sobre a superfície do solo, com isso a perda direta de água por evaporação do solo é reduzida ao mínimo, com acréscimo na eficiência do uso da água e redução no consumo de energia, pois o sistema opera com menor pressão do que outros sistemas pressurizados (LAMM et al., 2007). Além de possibilitar a aplicação da água diretamente no sistema radicular, em pequena intensidade e alta frequência, possibilita manter o solo mais próximo à capacidade de campo, aumentando a eficiência do uso da água e diminuindo o escoamento superficial.

Em estudo com irrigação via gotejamento subsuperficial em Nitossolo Vermelho transição para Latossolo, textura média/argilosa com variedade de cana RB72454 fertirrigada foi constatado que em dois ciclos de cultivo (soca e ressoca) houve incrementos na produção de Açúcar Total Recuperável (ATR) da ordem de 38,4% e 72,9% para soca e ressoca respectivamente. Ainda, a irrigação por gotejamento subsuperficial não alterou as características tecnológicas avaliadas da cana-de-açúcar nos dois ciclos estudados, sendo que a fertirrigação com nitrogênio e potássio proporcionou efeito positivo na produção de colmos e de ATR, quando se aumentou a adubação (DALRI; CRUZ, 2008 apud ROCHA, 2013).

Além das características relacionadas a aumento de produtividade e melhorias nas características tecnológicas da cana-de-açúcar, vale lembrar que a irrigação via gotejamento subsuperficial traz melhorias nas dimensões do bulbo molhado ao redor do sistema radicular da planta. Em seu estudo com gotejamento subsuperficial, Nogueira et al. (2000) encontrou que para as condições experimentais do estudo, a localização dos emissores abaixo da superfície mostrou-se mais eficiente que a localização superficial, no que tange a reserva de umidade disponível no solo.

A frequência da irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar não se mostra com grandes diferenças em cana-de-açúcar. Em seu estudo Dalri e Cruz (2002) notaram que não ocorreram diferenças quando variando a frequência de irrigação da cana-de-açúcar variedade RB72454 para alta, média ou baixa, o qual considerou

10 mm, 20 mm e 30mm de evapotranspiração da cultura, respectivamente. Porém notou-se em relação a testemunha, um aumento médio maior que 45% de produção de massa fresca, de colmo e folhas.

Segundo Rocha (2013), a adoção de um sistema de irrigação localizada é um grande salto tecnológico para uma propriedade agrícola e as adaptações necessárias no sistema de produção exigem um elevado grau de conhecimento e informações.

2.4 Viabilidade da irrigação em cana-de-açúcar

A agricultura irrigada exige alto investimento, principalmente em obras e aquisição de equipamentos, em transporte, em controle e distribuição de água, além de gastos com energia e mão-de-obra para operação do sistema, que representam importantes custos adicionais, que devem ser pagos pelo incremento de produtividade proporcionado pela irrigação (RODRIGUEZ, 1990).

Segundo Frizzone (2011), o custo total tem dois componentes: o custo fixo, que será incorrido independentemente do nível de produção que seja obtido pela empresa, e o custo variável que varia conforme o nível de produção. Dependendo das circunstâncias, os custos fixos podem incluir dispêndios com manutenção, seguro e um número mínimo de funcionários. Especificamente para um sistema de recalque de água são considerados custos fixos, principalmente, a depreciação dos componentes do sistema, o custo das obras de construção civil e a remuneração do capital investido.

De acordo com Favetta (1998), devem ser considerados no cálculo dos custos fixos os custos de serviços de construção, de instalação das tubulações e abertura de valas para assentamento e serviços de instalações elétricas necessárias aos transformadores e condutores. Sobre os custos avaliados, se for o caso, devem também incidir os respectivos impostos (IPI, ISS, ICMS).

De acordo com Frizzone (2001), em um estudo sobre irrigação suplementar para cana-de-açúcar, concluiu-se que existe potencial de viabilidade técnica e econômica para a irrigação suplementar de cana soca, do início até meados da safra (maio a julho), considerando-se os benefícios diretos do aumento da produtividade agrícola e da maior longevidade das soqueiras, e que, quando se consideraram os benefícios indiretos da irrigação, proporcionados pelo aumento da produtividade agrícola (redução de custos com arrendamento, preparo de solo e plantio, tratos culturais e transporte), a viabilidade econômica

da irrigação suplementar da cana soca, do início até meados da safra (maio a julho), tornou-se mais evidente. De modo geral, a irrigação suplementar, ou de salvamento da cana soca apresentou-se economicamente inviável, quando aplicada de meados até o final da safra (setembro a novembro). Deve-se lembrar de que este tipo de irrigação visa apenas a suprir a necessidade hídrica da cultura nos momentos de maior déficit hídrico, evitando a morte do canavial ou grandes quedas de produção.

Na agricultura irrigada, uma produção eficiente e rentável deve constituir o principal objetivo econômico, buscando sempre receitas maiores que os custos ou, no mínimo, que as receitas e despesas sejam iguais. Desta maneira, é importante conhecer o grau de risco envolvido na aquisição de novas tecnologias. Estes riscos são decorrentes de incertezas econômicas proporcionadas pela variação do preço de venda do produto, taxa de juros, custos da água, vida útil do sistema de irrigação e taxa de manutenção ocorrida com o manejo do sistema de irrigação, bem como variação na produtividade ao longo dos anos. Entretanto, a viabilidade econômica é um fator indispensável para sua adoção entre os agricultores (FRIZZONE et al., 1994; BASTOS et al., 2000).

Assim, a irrigação é uma tecnologia que requer investimentos significativos e está associada à utilização intensiva de insumos, tornando importante a análise econômica dos componentes envolvidos no sistema (SILVA et al., 2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização e localização da área

A pesquisa foi conduzida em uma área experimental localizada no Sítio São Francisco, propriedade rural da região de Piracicaba, SP ($22^{\circ}49'$ de latitude sul e $47^{\circ}45'$ de longitude oeste, altitude de 550 m), coordenadas UTM (Long.: 216865.43m E; Lat.: 7474133.64m S) (Figura 1 e 2).

Figura 1 - Localização da área experimental utilizando o aplicativo Google Earth®

Figura 2 - Imagem aérea da área experimental – Google Earth®

3.2 Caracterização climática e do solo

O clima da região é do tipo Cwa no sistema Koppen, denominado subtropical úmido, com temperatura média de 18°C a 22°C e pluviosidade anual de 1257 mm.

Foram utilizados dados meteorológicos a partir da estação meteorológica localizada no Posto Agrometeorológico do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP), a qual possui sensores de radiação global, radiação líquida, velocidade de vento, temperatura e umidade relativa do ar. Os dados pluviométricos para a área do experimento em questão foram coletados por um pluviômetro localizado na propriedade rural.

Com os dados obtidos, foi possível estimar a evapotranspiração de referência seguindo o método de Penman-Monteith parametrizado por Allen et al. (1998) eq.(2), e então, a evapotranspiração de cultura eq.(3) no decorrer dos estádios fenológicos e desenvolvimento do experimento. O método de Penman-Monteith foi utilizado apenas para correlacionar com o manejo de irrigação, o qual foi feito por tensiometria.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (2)$$

em que: Δ é a declividade da curva de pressão de vapor na saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n é a radiação líquida ou saldo de radiação ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), T é a temperatura média diária à 2 m de altura ($^\circ\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m.s^{-1}), $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor (kPa).

$$ET_{c_{aj}} = (K_s \cdot K_{cb} + K_e) ET_o \quad (3)$$

em que: $ET_{c_{aj}}$ é a evapotranspiração de cultura ajustada, K_s é o coeficiente de estresse hídrico, K_{cb} é o coeficiente de cultura basal e K_e é o coeficiente de evaporação do solo.

Na Tabela 2 são apresentados os dados climáticos ocorridos para o ciclo da cana planta (ago/2013 a jul/2014) e para o ciclo da cana primeira soca (ago/2014 a jul/2015).

Tabela 2 - Valores médios mensais de variáveis meteorológicas ao longo do ciclo do experimento

Ano	Mês	Temperatura			Umidade relativa	Vel. Vento	Rad. Global	Rad. Líquida	Chuva
		Max	Med	Min	-----Média mensal-----				
		°C			%	m.s ⁻¹	(MJ/m².d)	(MJ/m².d)	mm
2013	Ago	28,7	19,5	11,1	80,5	1,1	18,73	6,8	2,6
	Set	30,1	21,9	14,5	79,6	1,3	20,59	7,57	30,1
	Out	31,1	23,5	17,5	85,4	1,6	23,55	9,88	148,7
	Nov	31,6	24,7	18,8	86,5	1,6	23,32	10,04	105,6
	Dez	32,9	26	20,4	86,2	1,5	25,53	11,32	106,6
	TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	393,6
2014	Jan	34,4	26,8	20,5	83,9	1,1	28,84	12,86	77,4
	Fev	33,5	26,3	20,3	78,3	1,2	26,71	11,78	51,1
	Mar	31,7	24,6	19,2	90,9	1	22,77	10,21	114,5
	Abr	29,5	22,6	16,8	89,8	1,1	19,53	7,32	51,3
	Mai	27,1	19,8	13,6	88,1	0,8	15,87	5	34,4
	Jun	27	19,2	12,6	88	0,9	15,43	4,77	1,7
	Jul	26,1	18,4	11,8	84,9	1	14,96	4,42	24,1
	Ago	29	20	11,8	73,9	1,3	19,53	6,28	7,6
	Set	31,1	22,8	16,1	78,7	1,3	20,98	7,64	111
	Out	32,6	24,3	16,6	71	1,7	26,26	9,93	32
	Nov	31,5	24,6	19,4	87,7	1,4	22,25	9,35	154
	Dez	33,2	25,9	20,7	90,6	1,2	24,29	10,79	269,5
TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	928,6	
2015	Jan	35,3	27,6	22	87,6	1,1	26,59	12,14	128
	Fev	33,4	26	21,2	95,3	0,8	21,89	9,65	305,5
	Mar	31,6	25	20,7	95,8	0,7	18,1	7,29	117
	Abr	30,2	23,2	17,6	92,5	0,9	19,6	7,81	33
	Mai	27,1	20,4	15,1	95,3	0,7	14,37	4,85	79,4
	Jun	26,9	19,5	13,5	91,5	0,8	14,56	4,88	1,9
	Jul	26,5	19,6	14,1	92,3	0,6	12,51	3,93	39,3
	Ago	29,4	20,6	12,7	78,8	0,9	19,54	6,69	33
	TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	737,1

Nota-se que nos primeiros dois meses após o plantio da cana-de-açúcar (ago/2014 e set/2014) ocorreram baixíssimos índices pluviométricos na região de Piracicaba com índices elevados de temperatura, sinalizando baixa taxa de desenvolvimento das plantas no período de estabelecimento do canavial na área. Este fator fez com que houvesse algumas falhas nas linhas de plantio das parcelas, o que veio a ser contornados com replantio desses pontos.

O primeiro ciclo da condução do experimento foi sinalizado com baixos índices pluviométricos devido à seca histórica ocorrida na região sudeste do Brasil. Contabilizando os meses de ago/2013 a jul/2014, teve-se um total pluviométrico de 748,1 mm, com altas temperaturas mesmo nas estações de outono e inverno do ano de 2014. Devido a este fator, o início da safra para o ano de 2014 atrasou para o mês de Junho na região devido a falta de cana madura e isso fez com que faltasse vinhaça para aplicação no experimento. Diante disso,

a cana planta foi conduzida sem vinhaça, característica similar a utilizada nas usinas, pois não se aplica vinhaça em cana planta.

Pela Figura 3 pode ser conferida a linha do tempo de condução do experimento com as fases de preparação da área para plantio, plantio, instalação de sistema de irrigação e tensiômetros além de tratos culturais, coleta de dados e fertirrigação.

Figura 3 - Linha do tempo de condução do experimento de cana-de-açúcar

Já para o ciclo primeira soca (ago/2014 a mai/2015), os índices pluviométricos foram melhores para a região de Piracicaba, SP, estando em 1591,5 mm para o ciclo todo da cana-de-açúcar. Vale lembrar que o segundo ciclo do experimento foi conduzido até apenas o mês de maio de 2015 devido aos fortes vendavais ocorridos na região do experimento, que vieram a acamar as parcelas experimentais, impossibilitando de seguir com as coletas biométricas.

Mesmo estando o período para primeira soca com índices de precipitação melhores do que o ciclo anterior, a precipitação total para o ano de 2014 foi muito abaixo da média histórica anual para a região de Piracicaba que está em torno de 1200 mm.

As temperaturas para todo o ciclo cana planta e cana primeira soca estiveram ótimas ao desenvolvimento da cultura, entre 22 °C e 30 °C no período vegetativo de desenvolvimento do canavial, possibilitando alongamento de gema apical e multiplicação de perfilhos.

Pela Figura 4 podem ser conferidos os valores médios mensais de precipitação e umidade relativa do ar ocorridos no período do experimento e pela Figura 5, podem ser conferidos os valores médios mensais de temperatura e Radiação global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) ocorridos no período do experimento.

Figura 4 - Valores médios mensais de precipitação e umidade relativa do ar ocorridos no período do experimento

Figura 5 - Valores médios mensais de temperatura e Radiação global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) ocorridos no período do experimento

O solo foi classificado conforme a classificação brasileira de solos da Embrapa (2006), mediante análise morfológica, como sendo um “Argissolo Vermelho Amarelo”.

Foi realizada, anteriormente à implantação da área experimental, uma análise química de fertilidade do solo a fim de caracterizar o solo da área experimental. Na Tabela 3 e Tabela 4 podem ser conferidos os valores da análise de solo com amostras coletadas no ano de 2013, anterior a instalação do experimento. Pelas Tabela 5 e 6 podem ser conferidas a classificação, segundo Boletim Técnico 100 do IAC, dos parâmetros de fertilidade do solo, em questão, da área experimental.

Tabela 3 - Resultados da análise de fertilidade do solo da área experimental (realizada em 2013)

Prof. (cm)	pH CaCl ₂	M.O. g.dm ⁻³	P mg.dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T
				-----mmol _c .dm ⁻³ -----						
00-20	5,3	14	11	1,6	27	8	0	21	36,6	57,6
20-40	5,4	17	11	2,0	38	11	0	20	51	71
40-60	5,5	12	10	1,8	39	11	0	20	51,8	71,8
60-80	5,5	14	6	1,6	43	12	0	21	56,6	77,6

Tabela 4 - Resultados da análise de fertilidade do solo da área experimental (realizada em 2013)

Prof. (cm)	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	m	V
	-----mg.dm ⁻³ -----						-----%-----	
00-20	9	0,23	1,0	24	1,3	0,8	0	64
20-40	11	0,14	1,6	22	9,1	0,6	0	72
40-60	15	0,12	1,4	21	6,2	0,6	0	72
60-80	19	-	-	-	-	-	0	73

Tabela 5 - Classificação dos teores de macronutrientes para análise química de fertilidade do solo anterior ao plantio

Prof. (cm)	pH CaCl ₂	P mg.dm ⁻³	S	K	Ca	Mg
	5,1-5,5	7-15	>10	1,6-3,0	>7	>8
00-20	Média	Baixo	Médio	Médio	Alto	Alto
20-40	Média	Baixo	Alto	Médio	Alto	Alto
40-60	Média	Baixo	Alto	Médio	Alto	Alto
60-80	Média	Baixo	Alto	Médio	Alto	Alto

Fonte: Boletim Técnico 100 IAC (1997)

Tabela 6 - Classificação dos teores de micronutrientes para análise química de fertilidade do solo anterior ao plantio

Prof. (cm)	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----mg.dm ⁻³ -----				
	0-0,2	>0,8	>12	>5,0	0,6-1,2
00-20	Baixo	Alto	Alto	Alto	Médio
20-40	Baixo	Alto	Alto	Alto	Médio
40-60	Baixo	Alto	Alto	Alto	Médio
60-80	Baixo	Alto	Alto	Alto	Médio

Fonte: Boletim Técnico 100 IAC (1997)

3.3 Variedade de cana-de-açúcar

A variedade escolhida foi a CTC 15, pois apresenta maturação média/tardia, alta tolerância à seca, rústica, indicada para solos fracos, destaque em diversos locais e ambientes de produção com multiplicação acelerada.

Em características agrônômicas destaca-se por ser resistente ao estresse hídrico, porém pode florescer, boa produtividade; maturação média-tardia (antecipar para média pois floresce) e recomendada para ambientes de menor potencial de produção.

Figura 6 - POL % variedades CTC 15, RB 72454 e SP81-3250 (A); Produtividade de 5 cortes variedades CTC 15 e RB72454 (B)

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira – CTC (2014)

Pela Figura 6 podem ser conferidas características tecnológicas e de produtividade de cinco cortes de duas variedades de cana-de-açúcar confrontadas com a variedade CTC 15.

Pode-se notar que a variedade CTC15 apresenta POL% próxima às variedades RB72454, variedade muito cultivada em anos anteriores, porém erradicada devido à alta suscetibilidade à ferrugem alaranjada da cana. Também, quando comparada à variedade CP81-3250, são muito equivalentes sendo que esta é uma variedade de maturação média enquanto que a variedade CTC 15 apresenta maturação mais tardia.

Nota-se ainda, pela Figura 6, que a produtividade da CTC 15 é relativamente mais elevada do que a variedade RB72454 (maturação tardia) ao decorrer de cinco ciclos de colheita mostrando o alto desenvolvimento em cultivos de sequeiro e alta performance com longevidade e produção do canavial.

Considerando resistência a doenças e pragas para a variedade CTC 15, com dados fornecidos pelo Centro Técnico Canavieiro (CTC), é possível inferir que esta variedade é resistente ao carvão, escaldadura, ferrugem, amarelecimento e broca da cana, sendo intermediária para o mosaico.

Já em termos de produtividade, a CTC 15 apresenta baixa exigência em fertilidade do solo com ótima brotação de soqueira, bom perfilhamento em cultivo mecanizado, com médio florescimento, média maturação teor de fibra e sacarose alto.

3.4 Delineamento experimental

Para a instalação da área experimental foi utilizado o delineamento inteiramente aleatorizado, com seis tratamentos e quatro repetições, descritos na Tabela 7. Todos os tratamentos foram fertirrigados, com exceção da testemunha (T1) e diferenciados pelas doses de vinhaça e fertilizante mineral. O volume aplicado de vinhaça foi calculado segundo a eq.(1), norma CETESB P 4.231 (2015) e análise química no momento de aplicação da vinhaça, da sua concentração de potássio, em mg L^{-1} .

A análise química da vinhaça foi feita a partir de uma amostra diluída em 5 vezes e realizada pelo equipamento fotômetro de chamas, junto ao Laboratório de Análise de Água do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP).

Tabela 7 - Descrição dos tratamentos

Tratamento	Descrição
T1	Sem Irrigação + adubação fertilizante mineral granulado(SI)
T2	Fertirrigada + Dose Zero vinhaça (D_0)
T3	Fertirrigada + 1/2x Dose _{CETESB} vinhaça (D_1)
T4	Fertirrigada + Dose _{CETESB} vinhaça (D_2)
T5	Fertirrigada + 2x Dose _{CETESB} vinhaça (D_3)
T6	Fertirrigada + 3x Dose _{CETESB} vinhaça (D_4)

Diante da aleatorização dos tratamentos em parcelas experimentais de 6 metros de comprimento de sulco de plantio e 10,5 metros de largura ($4 \times 0,9\text{m} + 5 \times 1,5\text{m}$), vide Figura 9, montou-se o layout apresentado na Figura 7 em que cada cor representa um tratamento diferente com suas 4 repetições.

Acima da área experimental foi construído um terraço de contenção de água da chuva para evitar possíveis danos às parcelas experimentais através de erosão do solo.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T6R4	T4R2	T1R2	T5R3	T6R1	T3R2	T2R1	T1R3	T3R1	T2R2	T1R1	T5R2	T4R3
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
	T4R1	T2R3	T3R4	T6R2	T2R4	T6R3	T5R4	T4R4	T5R1	T3R3	T1R4	

Figura 7 - Croqui das parcelas experimentais. T=tratamento. R=repetição

Para aplicação da vinhaça, foram utilizados os dados obtidos para concentração do íon potássio da vinhaça convertidos para kg de K_2O , e adotaram-se valores de CTC (Capacidade de Troca Catiônica), expresso em mmolc dm^{-3} a pH 7,0, obtidos da análise do solo juntamente com teor de potássio do solo, expresso em mmolc dm^{-3} .

Antes de toda aplicação de vinhaça ao solo, analisava-se a sua concentração de potássio e então se calculava o volume de vinhaça (VV) a ser aplicado a cada tratamento.

As adubações foram realizadas seguindo as recomendações de RAIJ et al. (1996) com base na fertilidade de solo e produtividade esperada. No tratamento não irrigado a adubação foi realizada junto ao plantio (plantio convencional). Já nos tratamentos irrigados, a fertirrigação com nitrogênio e potássio foi realizada ao longo do ciclo da cultura baseando-se na marcha de absorção de nutrientes pela planta, sugerida por Malavolta (1994), e complementada com a aplicação da vinhaça como fonte de potássio (Tabela 9). Enquanto que a adubação com fósforo foi feita inteiramente no plantio da cultura.

Como dito anteriormente, para cada tratamento e a cada fertirrigação feita com vinhaça, foi realizada a análise da concentração de potássio presente na vinhaça, originada da usina, cujos valores podem ser conferidos na Tabela 8 e Figura 8. Vale notar que as aplicações iniciaram-se no mês de agosto de 2014 e terminaram em outubro de 2014, pois, em julho de 2014, realizou-se a colheita da cana planta e então se iniciou aplicação de vinhaça.

Tabela 8 - Análise química da vinhaça para as respectivas fertirrigações

Aplicação vinhaça	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a
Data	27/08/2014	04/09/2014	10/09/2014	01/10/2014	15/10/2014	22/10/2014	29/10/2014
[K ⁺] mg L ⁻¹	4125	2608	3532	2820	2938,33	4218,33	3885
[K ⁺] Kg m ⁻³	4,13	2,61	3,53	2,82	2,94	4,22	3,89
pH	-	-	4,15	4,25	4,41	5,03	4,9
CE mS	-	-	8,25	7,00	10,43	12,92	12,22

Figura 8 - Representação das concentrações das análises químicas da vinhaça ao decorrer das fertirrigações

Com o valor da concentração de potássio obtido da vinhaça e com as características químicas analisadas do solo, foi feito o cálculo da necessidade de vinhaça a partir da equação da norma CETESB P 4.231, a ser aplicada para o tratamento 4 (T4), que recebe o nome de “dose CETESB”. A complementação da quantidade de potássio, para aplicação na parcela experimental, era feita com fertirrigação a partir de fertilizante químico a base de nitrogênio para todos os tratamentos de acordo as recomendações de RAIJ et al. (1996). A partir disso, foi designada “½ x dose CETESB” (T3), a quantidade da dose de vinhaça referente a 50% da dose CETESB (T4), “dose zero” (T2) a 0% da dose CETESB (T4), ou seja, somente fertilizante químico; “2x dose CETESB” (T5) a 200% da dose CETESB (T4), e “3x dose CETESB” (T6) a 300% da dose CETESB (T4).

Sempre após cada fertirrigação com vinhaça, era feito a limpeza de final de linhas das parcelas deixando passar água livremente nas tubulações até que ficasse apenas água limpa saindo do final de linha. Este tempo era em aproximadamente 5 minutos por parcela.

Tabela 9 - Programação de fertirrigação para cana-de-açúcar da estação (12 meses)

Dias depois do Plantio	Nutrientes (kg/ha/dia)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1-30 Dias	1,50	0,15	0,25
31-80 Dias	1,50	0,60	0,30
81-110 Dias	2,00	1,50	0,50
111-150 Dias	0,75	0,50	1,00
151-190 Dias	--	--	1,80

Fonte: Malavolta (1994)

Tabela 10 - Quantidade de fertilizante e vinhaça por tratamento

Tratamento	Vinhaça $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	N kg ha^{-1}	P_2O_5 kg ha^{-1}	K_2O kg ha^{-1}
T1. SI + AQ	0	90*	170*	110*
T2. Fertirrigado c/ AQ	0	90**	170*	110 **
T3. $\frac{1}{2} \text{D}_{\text{CETESB}}$	139	0	170*	0
T4. D_{CETESB}	278	0	170*	0
T5. $2 \times \text{D}_{\text{CETESB}}$	555	0	170*	0
T6. $3 \times \text{D}_{\text{CETESB}}$	834	0	170*	0

SI – sem irrigação; AQ – adubação química

*100% aplicado no plantio

** 50 % aplicado no plantio e 50% via fertirrigação

3.5 Preparo da área e instalação do experimento

A área experimental apresentou um histórico de cultivo prévio com abóbora seca gigante, durante o período de janeiro a junho de 2013 e anterior a esta, teve-se o cultivo de seis anos com cana-de-açúcar. Conforme Tabela 3, o solo foi corrigido quimicamente, não sendo necessária a prática de calagem anterior ao plantio da cultura.

A cana-de-açúcar foi plantada nos dias 26/08/2013 a 30/08/2013, no espaçamento de 0,9 m x 1,5 m entre sulcos (Figura 9), no qual foram realizadas as operações de dessecação da área de plantio, subsolagem, levantamento de terraço para contenção da água acima da área do experimento (declividade: 12%), gradagem pesada, gradagem leve, sulcação, plantio da cana e cobrimento dos sulcos. Para o plantio foi utilizado um sulcador de duas linhas (Figura 10A e Figura 10B).

Figura 9 - Espaçamento de plantio e espaçamento entre tubos gotejadores

Figura 10 - Sulcação da área experimental

Pela Figura 11, podem ser conferidas as operações de subsolagem (A) com terraços levantados na parte superior da área devido à declividade do terreno de 12%, e operação de sulcação (B) realizada antes do plantio.

Figura 11 - Subsolagem (A) e Sulcação da área experimental (B)

Após realização da subsolagem e sulcação da área do experimento, seguiu-se se com o plantio da cana-de-açúcar manualmente mediante operações de espalhamento da cana nos sulcos, corte dos rebolos em frações de aproximadamente 30 cm de comprimento para facilitar no brotamento das gemas vegetativas e cobrir a área com implemento adequado. A instalação das fitas gotejadoras foi feita após o plantio, como é mostrado na Figura 12 e por fim, apresentada o desenvolvimento da planta e da área experimental (Figura 13).

Figura 12 - Plantio da cana em sistema combinado (0,9 m x 1,5m) (A), e colocação de tubos gotejadores (B)

Figura 13 - Desenvolvimento da cultura (A) e área experimental (B)

3.5.1 Instalação do sistema de irrigação

Após realizadas as operações de preparo do solo para plantio, foi feito o plantio da variedade de cana-de-açúcar CTC 15 e instalados os gotejadores entre os espaçamentos da linha de plantio de 0,9 m.

A irrigação foi realizada pelo sistema de gotejamento subsuperficial, cujas características podem ser conferidas pela Tabela 11.

Os emissores foram instalados a uma profundidade de 30 cm a partir da superfície do solo, espaçados em 2,4 m entre tubos gotejadores e 0,20 m, entre gotejadores. Vale ressaltar que esta distância elevada entre tubos gotejadores se deve ao espaçamento combinado adotado para a cultura, sendo que cada linha de plantio está situada a 0,45 m do tubo gotejador.

O gotejador de 0,20 m apenas foi adotado devido ao tubo gotejador disponibilizado ao experimento no momento da instalação. Sabe-se que para irrigação subsuperficial em cana-de-açúcar são utilizados tubos gotejadores com maior espaçamento entre gotejadores.

Tabela 11 - Características do tubo gotejador utilizado

Espaçamento entre emissores (m)	Vazão (L.h⁻¹)	Diâmetro Interno (mm)	Pressão de Serviço (kgf.cm⁻²)
0,20	1,6	16,2	1,0

O enterrio dos tubos gotejadores foi feito no início do estágio de brotação das plantas, mediante um suporte para apoiar o tubo, acoplado à mesa do sulcador, sem os respectivos sulcadores (Figura 14). Nesse caso, explica-se essa ação devido ao atraso na entrega dos tubos gotejadores pela empresa, ao contrário do que é feito usualmente, em que se enterra os tubos juntamente com a operação de sulcação da área. Porém, tomou-se o devido cuidado de enterrar os tubos seguindo um alinhamento simétrico entre os dois sulcos de plantio, com espaçamento de 0,9 m entre eles, de maneira a não favorecer um ou outro sulco. Foram plantadas 5 linhas duplas por parcelas com 6m de comprimento, totalizando 63,0 m² cada parcela. Para área útil, foram consideradas as três linhas duplas centrais, e desconsiderado 1m no início e no final de cada parcela, resultando em 22,5m² de área útil.

Figura 14 - Detalhe suporte para tubos gotejadores, acoplado à mesa do sulcador (A), Mesa do sulcador (B), enterrio dos tubos gotejadores na área (C), Separação dos tubos gotejadores entre parcelas experimentais (D)

Para instalação do sistema de irrigação, foi necessária a instalação de uma bomba de captação de água no reservatório, com potência de 2cv, para manutenção da irrigação da cultura e uma bomba de 1,5 cv para aplicação de vinhaça e adubo químico nas parcelas experimentais, conforme dimensionamento feito para a área em questão; instalação de rede elétrica e passagem de toda tubulação de PVC irrigação nas linhas laterais e de derivação na área (Figura 15). O tubo gotejador utilizado foi da marca comercial Netafim (Streamline) com diâmetro interno 16,2 mm, espaçamento entre gotejadores de 0,20 m e vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$.

Foi necessária a instalação de dois reservatórios em fibra com capacidade de armazenamento de 3000 L cada um de vinhaça e um reservatório com capacidade de 1000 litros para mistura dos fertilizantes e aplicação da fertirrigação com adubo químico (Figura 15A, B, C e D).

Figura 15 - Bomba de recalque irrigação do experimento (A); reservatórios para armazenamento de vinhaça e aplicação da fertirrigação (B); instalação linhas laterais (C) e derivação (D)

Com os tubos gotejadores instalados na área, seguiu-se ao preparo da área experimental com instalação das linhas laterais (Figura 16A) e linhas de derivação (Figura 16B), além de ter sido feita instalação da estação de captação e bombeamento da água para irrigação. Infelizmente, devido a vários contratemplos ocorridos para instalação do experimento, como disponibilização de área para condução do experimento e obtenção do sistema de irrigação para instalação na área, o progresso foi um pouco lento entre o plantio da cana-de-açúcar e início da irrigação na área.

O plantio da cana-de-açúcar foi finalizado na ultima semana do mês de agosto de 2013 e só foi possível terminar instalação do sistema de irrigação no início de dezembro de 2013 devido a atrasos na entrega do material para instalação dos sistema de irrigação. Então, teve-se aí um déficit de irrigação de quase quatro meses, sendo estes os quatro meses mais importantes para definição da produtividade da cultura (período fenológico de desenvolvimento da cultura). Devido a isso, será possível notar nos resultados que, para alguns parâmetros avaliados, não houve diferenças significativas entre controle e tratamentos irrigados.

Figura 16 - Instalação de linhas laterais (A) e de derivação na área experimental (B)

Com a instalação de todo o sistema na área, iniciou-se as atividades e o manejo da irrigação, conforme descrito a seguir no item 3.5.2. Devido ao fato do período do experimento coincidir com a seca histórica que ocorreu na região de Piracicaba para os anos 2013 e 2014, não foi possível realizar a aplicação de vinhaça para a cana planta, pois houve um atraso no início da safra na região iniciando no mês de junho de 2014. Assim restaram somente dois meses de aplicação de vinhaça para o experimento. Decidiu-se então, por não aplicar vinhaça no primeiro ano de condução do experimento. Apenas fazer irrigação em todos os tratamentos

com mesma lâmina anual, exceto para testemunha (sequeiro). Para melhor ilustrar, são apresentados os gráficos dos dados climáticos para o período de condução do experimento.

Como comentado anteriormente pode-se notar pela Figura 17 que os valores de precipitação média mensal para os meses de 2013 e 2014 ficaram muito abaixo das médias históricas para o ciclo da cana planta (agosto de 2013 a julho de 2014). Tal fato atrasou o início da safra de cana-de-açúcar na região de Piracicaba e consequentemente a produção de vinhaça para utilização no experimento no ciclo da cana-planta.

Figura 17 - Climograma para região do experimento nos dois anos de condução (2013-2014, 2014-2015)

No segundo ano de condução, ocorreu a produção de vinhaça pela usina e então se realizou o cronograma conforme estipulado no projeto.

Na Figura 18 é possível visualizar o reservatório de vinhaça (A) e fertirrigação com vinhaça na linha irrigada de cana (B).

Figura 18 - Reservatório para aplicação de vinhaça (A), tubo gotejador no momento da fertirrigação (B)

3.5.2 Manejo da irrigação

Para obtenção da curva de retenção da água no solo, foram utilizadas as mesas de tensão de 0, 10, 20 e 40 cm de coluna d'água, e a câmara de Richards para as tensões de 100, 330, 500, 1.000, 5.000, 10.000 e 15.000 cm de coluna d'água. Os parâmetros da curva de retenção foram obtidos pelo modelo de van Genuchten (1980) eq. (4), cujo ajuste numérico foi feito a partir do software RETC, desenvolvido pelo US Salinity Laboratory – USDA (VAN GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991).

$$\theta(\phi_m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \cdot |\phi_m|)^n\right]^m} \quad (4)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5)$$

em que:

θ_r - Umidade residual do solo ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cm}^{-3}\text{solo}$)

θ_s - Umidade de saturação do solo ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cm}^{-3}\text{solo}$)

ϕ_m - Potencial mátrico do solo (cm)

α , n e m - Parâmetros de ajuste da equação

$$\phi_m = -T + h_1 + h_2 \quad (6)$$

em que:

T - Leitura da tensão (bar)

h₁ - altura do tensímetro em relação à superfície do solo (cm)

h₂ - Profundidade de instalação da cápsula do tensiômetro (cm)

Mediante os parâmetros da curva do modelo de van Genuchten foram definidas as tensões do solo para manejo da irrigação, conforme são apresentados na Tabela 12. A irrigação foi realizada conforme a tensão da água no solo, correspondente à umidade crítica para a cultura da cana-de-açúcar, adotada aqui como sendo 0,30 ($cm^3 cm^{-3}$), segundo Millar (1984) e capacidade de campo de 0,17($cm^3 cm^{-3}$), conforme curva de retenção realizada anterior a instalação do experimento.

Tabela 12 - Valores de umidade de saturação do solo (θ_s) e residual (θ_r), parâmetros da curva de retenção de água do solo do modelo de Van Genuchten (1980) e características físicas do solo

Camada	θ_s	θ_r	α	m	n	d	Areia	Silte	Argila
(cm)	-----($cm^3 cm^{-3}$)-----					($g.cm^{-3}$)	-----g kg ⁻¹ -----		
0 - 45	0,41	0,17	0,057	0,99	1,29	1,58	743	44	213

A determinação da condutividade hidráulica saturada foi realizada em laboratório, utilizando o permeâmetro de carga constante eq. (7) (Figura 19).

$$K_o = \frac{Q.L}{A.(L + h)} \quad (7)$$

em que:

K_o - Condutividade hidráulica do solo saturado ($cm s^{-1}$)

Q - Vazão ($cm^3 s^{-1}$)

L - Comprimento da amostra medido no sentido do fluxo (cm)

A - Área da seção transversal da amostra (cm^2)

h - Lâmina de água sobre a amostra de solo (cm)

Figura 19 - Permeômetro de carga constante do Departamento de Engenharia de Biossistemas

A umidade do solo foi monitorada com auxílio de tensiômetros que foram instalados em todas as parcelas experimentais em 3 profundidades (0,15; 0,30 e 0,45m), exceto no tratamento controle (T1), com o objetivo de obter a umidade pontual para cada camada de solo da cultura da cana-de-açúcar (Figura 20).

Figura 20 - Leitura de tensiômetros

O manejo da irrigação foi feito considerando a segunda profundidade (0,30 m) devido ao fato que na camada de 0,15 m de profundidade, o secamento do solo era muito rápido. Se considerada a camada de 0,45 m, haveria a necessidade de irrigar com lâminas altas, tornando o sistema inviável. Assim, na camada de 0,30 m, tem-se a maior parte das raízes em plena atividade, e pode-se manter o solo próximo à capacidade de campo sem ocorrer danos à cultura.

A cada três dias eram feitas leituras do potencial mátrico e relacionadas com a umidade do solo. No início do desenvolvimento da cultura, após a colheita, o índice de área foliar é baixo e a cultura apresenta baixa taxa de transpiração.

Com os dados de umidade de solo, foi possível aplicar a lâmina evapotranspirada anteriormente, de maneira que a umidade do solo sempre se mantivesse entre a umidade crítica da cana-de-açúcar e a umidade da capacidade de campo.

3.6 Parâmetros avaliados (biometria)

As coletas biométricas foram realizadas em intervalos de 15 dias, totalizando-se 6 coletas devido ao atraso na instalação do sistema de irrigação, com dados de largura e comprimento foliar, nº de folhas por perfilho, nº de perfilhos, altura de planta e diâmetro de colmo, distância entre internódios e nº de internódios, além de análise de clorofila *total*, *a* e *b* com o equipamento clorofilog (Mod. CFL1030) (Figura 21A e 21B).

(A)

(B)

Figura 21 - Análise de clorofila (A), Comprimento foliar (B)

As medidas de biometria foram feitas quinzenalmente para os seguintes parâmetros:

- a) *Altura da planta*: feita tomando-se como referência a superfície do solo até à última região auricular visível da folha (cartucho);
- b) *Diâmetro de colmo, número de colmos e distância de internódio*: com auxílio de um paquímetro digital foi medido o diâmetro de colmo em 10 plantas por parcela, onde também foram contados os números de colmos e medida a distância de internódios;
- d) *Número de perfilhos*: foi feito do início da fase de perfilhamento até à estabilização natural da cultura.

No final da fase de maturação da cultura, na pré-colheita, foram amostradas 10 folhas por parcela experimental e enviadas ao Laboratório de Tecidos Vegetais do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP para análise de nutrientes nas folhas.

Os teores de clorofila (*a*, *b*, e *total*) nas folhas foram determinados pelo equipamento ClorofiLOG (Falker) com 10 leituras por planta em 10 plantas por parcela, totalizando 100 pontos amostrados por parcela experimental. As leituras foram realizadas quinzenalmente.

3.7 Produtividade dos tratamentos

Para avaliar a produtividade da cana-de-açúcar no primeiro ano de condução (cana planta) foi feita a colheita manual no sistema de cana crua, onde foram colhidas e pesadas todas as parcelas dos tratamentos (Figura 22), em sistema de balança por sapatas em que a carreta é colocada sob duas sapatas posicionadas estrategicamente. Para o segundo ano de condução do experimento (cana primeira soca), a pesagem foi feita com auxílio de uma pá carregadora com célula de carga embutida (Figura 23), devidamente regulada para a operação.

O motivo de ter utilizado diferentes sistemas de pesagem das parcelas nos dois anos de condução do experimento foi pelo fato de no segundo ano (cana primeira soca) a balança de sapatas estar com problemas operacionais. Desta forma, foi utilizado célula de carga da Associação dos Fornecedores de cana de Piracicaba (AFOCAPI), devidamente aferida e regulada.

Figura 22 - Corte da cana-de-açúcar (A), pesagem das parcelas experimentais (B)

Para características tecnológicas foram coletadas 10 plantas por parcela e enviadas ao Laboratório de sacarose da AFOCAPI (Associação dos Fornecedores de cana de Piracicaba), onde foram analisados Brix, Fibra, Pureza, Cinzas e ATR ao fim de cada ciclo de colheita.

A colheita do experimento cana planta foi realizada entre os dias 28/07/2014 a 31/07/2014, e para o segundo ano de condução entre os dias 13/05/2015 e 15/05/2015.

Figura 23 - Pesagem das parcelas experimentais com célula de carga acoplada a máquina

Após corte da cana, colheita, pesagem de colmos e folhas, de maneira separada, foram preparadas amostras de 10 canas por parcela para análise de parâmetros tecnológicos, como °Brix, %Pureza, %Fibra, Cinzas e ATR (Açúcar Total Recuperável).

3.7.1 Produção de açúcar

Para avaliar a quantidade de açúcar branco a ser obtido a partir de 1kg de ATR, utilizou-se o fator de conversão proposto pelo CONSECANA (2006) de 0,95283.

3.8 Monitoramento das condições físicas e químicas do solo

As amostragens de solo para fins das características físicas e químicas foram realizadas, no início e final do experimento, totalizando duas coletas em quatro profundidades (20, 40, 60, 80 cm) e em todos os tratamentos.

Para a primeira análise físico-química de plantio da área, foi utilizado um trado tipo holandês para coleta do solo, em que foram obtidas amostras compostas da área e homogeneizadas para posterior análise em laboratório de fertilidade do solo.

Para a determinação da granulometria foi utilizado o método do densímetro, conhecido também como método do hidrômetro, proposto em 1926 por Bouyoucos. Baseia-se

no princípio de que a matéria em suspensão (silte e argila) confere determinada densidade ao líquido.

3.9 Análise dos resultados (análise estatística)

Tendo em vista que as variáveis foram medidas na mesma parcela ao longo do tempo, foram adotadas duas abordagens de medidas repetidas para as análises estatísticas. Buscou-se com isso avaliar os efeitos da suposição ou não de independência entre os momentos de coleta, sobre os testes estatísticos e sobre as estimativas das médias dos tratamentos. Assim, diferentes estruturas da matriz de covariâncias residual foram avaliadas, a partir do ajuste de modelos sob duas abordagens: parcelas subdivididas no tempo e modelos mistos.

Para avaliar a adequação do modelo estatístico proposto para descrever as observações, foram verificadas a normalidade e independência dos erros. Com este procedimento, estar-se-á buscando condições teóricas para realização das análises estatísticas via técnicas univariadas. Por se tratar da avaliação do desenvolvimento e produção da cana-de-açúcar, fez-se a comparação entre as médias com o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. As análises foram realizadas pelos softwares R (R CORE TEAM, 2015) e SAS (Statistical Analysis System).

3.9.1 Modelo univariado clássico

Para realizar a análise de variância segundo o modelo estatístico associado ao esquema em parcela subdividida no tempo (split-plot), ajustou-se o seguinte modelo eq. (8):

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_i + \gamma_j + (\alpha\gamma)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (8)$$

em que:

y_{ij} - observação do i -ésimo nível do fator tratamento e j -ésimo nível do fator tempo (DAP)

μ - média geral

α_i - efeito devido ao i -ésimo nível do fator tratamento

ε_i - erro associado a parcela (i)

γ_j - efeito devido ao j -ésimo nível do fator tempo (DAP)

$(\alpha\gamma)_{ij}$ - efeito da interação entre os fatores tratamento e tempo (DAP)

ε_{ij} - erro associado a subparcela (ij)

Na avaliação das respostas obtidas, podem-se utilizar as seguintes interpretações, caso as hipóteses testadas sejam significativas:

- a) Quando a hipótese $H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_6 = 0$ é rejeitada, indica-se que existem diferenças verticais entre as curvas dos tratamentos ao longo do tempo;
- b) Quando a hipótese $H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_6 = 0$ é rejeitada, indica-se que as curvas dos tratamentos não são constantes através do tempo; e
- c) Quando a hipótese $H_0: (\tau\gamma)_{11} = (\tau\gamma)_{12} = \dots = (\tau\gamma)_{gt} = 0$ é rejeitada, tem-se indicação de que a forma das curvas ao longo do tempo difere entre os tratamentos.

3.9.2 Modelo misto

A análise dos ensaios via modelo misto teve como objetivo avaliar estruturas da matriz de variâncias-covariâncias diferentes de $\Sigma = \mathbf{I}\sigma^2$ (modelo clássico, de erros independentes). Assim, procedeu-se a análise dos dados a partir do ajustamento do seguinte modelo eq. (9) (FREITAS, 2007):

$$y_i = \mathbf{X}_i\beta + \mathbf{Z}_i\gamma_i + e_i \quad (9)$$

em que:

- y_i - vetor coluna ($n_i \times 1$) das n_i observações tomadas da unidade experimental “i” ao longo do tempo ou condição de avaliação
- β - vetor ($p \times 1$) de parâmetros fixos desconhecidos, em que a dimensão p é o número de níveis de efeitos fixos
- $\mathbf{X}_i$ - matriz ($n_i \times p$) de incidências associadas aos elementos do vetor β
- γ_i - vetor ($g \times 1$) de efeitos aleatórios desconhecidos, assumindo-se $\gamma_i \sim N(0, G_i = \mathbf{I} \sigma_g^2)$, em que σ_g^2 é variância genotípica comum
- $\mathbf{Z}_i$ - matriz ($n_i \times g$) de incidências associadas aos elementos do vetor γ_i
- e_i - vetor ($n_i \times 1$) de erros aleatórios com $e_i \sim N(0, R_i = \Sigma)$, sendo Σ a matriz de variâncias-covariâncias que, neste caso, assumiu diferentes estruturas

Oito estruturas de matriz de variâncias-covariâncias residual ($R=\Sigma$) foram avaliadas, em conformidade com aplicações usuais na literatura de análise de medidas repetidas (XAVIER, 2000; FREITAS, 2007). São elas (assumindo estruturas com $t = 3$ cortes):

- a) Componente de Variância (VC): variâncias diferentes (entre cortes) e observações independentes.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 \end{bmatrix}$$

- b) Simetria Composta (CS): igualdade de variâncias e covariâncias, ou seja, covariâncias constantes entre quaisquer observações de mesma unidade experimental.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} (\sigma^2 + \sigma_1^2) & \sigma_1^2 & \sigma_1^2 \\ \sigma_1^2 & (\sigma^2 + \sigma_1^2) & \sigma_1^2 \\ \sigma_1^2 & \sigma_1^2 & (\sigma^2 + \sigma_1^2) \end{bmatrix}$$

- c) Auto-regressiva de primeira ordem (AR (1)): para dados de séries temporais igualmente espaçados com correlações diminuindo exponencialmente; a covariância entre duas observações decrescendo à medida que se aumenta o intervalo de tempo entre elas (ρ é o parâmetro auto-regressivo, assumindo-se $|\rho| < 1$ para um processo estacionário).

$$\Sigma = \sigma^2 \begin{bmatrix} 1 & \rho & \rho^2 \\ \rho & 1 & \rho \\ \rho^2 & \rho & 1 \end{bmatrix}$$

- d) Toeplitz (TOEP): dados de séries temporais igualmente espaçados, com correlação arbitrária para cada defasagem.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma_1 & \sigma^2 \\ \sigma_1 & \sigma^2 & \sigma_1 \\ \sigma^2 & \sigma_1 & \sigma^2 \end{bmatrix}$$

- e) Simetria Composta Heterogênea (CSH): diferentes parâmetros de variâncias para cada elemento da diagonal principal e produtos da raiz quadrada destes parâmetros por outro de correlação, fora da diagonal principal (σ_i^2 é o i-ésimo parâmetro de variância e ρ o parâmetro de correlação que satisfaz $|\rho| < 1$).

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1\sigma_2\rho & \sigma_1\sigma_3\rho \\ \sigma_2\sigma_1\rho & \sigma_2^2 & \sigma_2\sigma_3\rho \\ \sigma_3\sigma_1\rho & \sigma_3\sigma_2\rho & \sigma_3^2 \end{bmatrix}$$

- f) Huynh-Feldt (HF): similar à estrutura CSH, com mesmo número de parâmetros e heterogeneidade ao longo da diagonal principal; porém, fora da diagonal contém a média aritmética das variâncias, subtraindo-se λ , a diferença entre a média das variâncias e a média das covariâncias.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \frac{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}{2} - \lambda & \frac{(\sigma_1^2 + \sigma_3^2)}{2} - \lambda \\ \frac{(\sigma_2^2 + \sigma_1^2)}{2} - \lambda & \sigma_2^2 & \frac{(\sigma_2^2 + \sigma_3^2)}{2} - \lambda \\ \frac{(\sigma_3^2 + \sigma_1^2)}{2} - \lambda & \frac{(\sigma_3^2 + \sigma_2^2)}{2} - \lambda & \sigma_3^2 \end{bmatrix}$$

- g) Auto-regressiva de 1ª Ordem Heterogênea (ARH (1)): para dados de séries temporais com variâncias e covariâncias desiguais (pé o parâmetro auto-regressivo satisfazendo $|\rho| < 1$).

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1\sigma_2\rho & \sigma_1\sigma_3\rho \\ \sigma_2\sigma_1\rho & \sigma_2^2 & \sigma_2\sigma_3\rho \\ \sigma_3\sigma_1\rho & \sigma_3\sigma_2\rho & \sigma_3^2 \end{bmatrix}$$

- h) Não Estruturada (UN): todas as variâncias e covariâncias podem ser desiguais (especifica uma matriz geral, parametrizada diretamente em termos de variâncias e covariâncias). As variâncias são restritas a valores positivos e as covariâncias não tem restrições.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{21} & \sigma_{31} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{32} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teste de Esfericidade – abordagem estatística

No contexto da análise de medidas repetidas, a pressuposição de independência dos resíduos entre os tempos (fator intra-indivíduos) pode ser mais bem investigada mediante o teste de esfericidade ou circularidade. Esse teste utiliza o critério de Mauchly (1940), para verificar se a estrutura da matriz de variâncias-covariâncias (Σ) satisfaz à condição de esfericidade. Os resultados da aplicação desse teste, para cana-planta e cana primeira soca, encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Teste de esfericidade da estrutura da matriz de variâncias-covariâncias (Σ) para variáveis biométricas de dois anos de condução de cana-de-açúcar (planta e soca), variedade CTC 15

	Variáveis	W ¹	X ²	p-valor
cana-planta (2013-2014)	Clorofila <i>a</i>	0,3661	16,8012	0,0049
	Clorofila <i>b</i>	0,1275	34,4392	<0,0001
	Clorofila <i>total</i>	0,2143	25,7530	<0,0001
	Altura de planta (m)	0,0523	47,4975	<0,0001
	Diâmetro de colmo (mm)	0,0446	50,0683	<0,0001
	Distância entre internódios (cm)	<,0001	600,1770	<0,0001
	Largura de folha (cm)	0,1459	30,9797	0,0056
	Comprimento de folha (m)	0,0913	38,5289	0,0004
	Número de colmos	0,4257	13,7470	0,4687
	Número de folhas	0,2863	20,1349	0,1259
	Número de perfilhos	0,9730	0,4653	0,7924
cana-soca (2014-2015)	Clorofila <i>a</i>	0,0320	50,8857	0,2209
	Clorofila <i>b</i>	0,0470	45,2319	0,4203
	Clorofila <i>total</i>	0,0708	39,1589	0,6788
	Altura de planta (m)	0,0050	81,5852	<0,0001
	Diâmetro de colmo (mm)	0,0131	62,4630	<0,0001
	Distância entre internódios (cm)	0,1577	26,6229	0,0016
	Largura de folha (cm)	0,1450	29,8374	0,3215
	Comprimento de folha (m)	0,0671	41,7285	0,0350
	Número de colmos	0,4095	11,9783	0,2145
	Número de folhas	0,0957	36,2524	0,1099
	Número de perfilhos	0,4716	12,5672	0,0278

¹W: Valores da estatística de Mauchly (1940) resultantes do ajuste do modelo multivariado (MM), para verificação da condição de esfericidade, com os respectivos qui-quadrados e p-valores associados;

²valores de qui-quadrado obtidos no teste da razão de verossimilhanças (relativamente ao modelo univariado clássico), com respectivos p-valores, resultantes do ajuste dos modelos mistos.

Experimentos que levam em consideração o “tempo” como parâmetro de análise (split-plot), como na presente pesquisa, primeiramente deve-se fazer o teste de esfericidade para saber qual decisão será tomada, ou seja, se a realização das análises será pelo modelo univariado clássico (parcelas subdivididas no tempo) ou modelos mistos. Para variáveis não significativas ($p > 0,05$), não se rejeita a hipótese de esfericidade, e então são realizadas análises em parcelas subdivididas no tempo. Para variáveis com teste de esfericidade significativo ($p < 0,05$), rejeita-se a hipótese de esfericidade e então são realizadas análises estatísticas em modelos mistos.

Os resultados da aplicação do teste de esfericidade foram na maioria significativos ($p < 0,01$), indicando desvios da estrutura da matriz de variâncias-covariâncias (Σ) (Tabela 13); ou seja, Σ não pode ser considerada uma matriz do tipo esférica. Logo, o uso do modelo univariado clássico de parcelas subdivididas, sob ($\Sigma = I\sigma^2$), não poderia ser aplicado para fins de inferências acerca das leituras biométricas nesses dois anos de condução do experimento com utilização de vinhaça via gotejamento subsuperficial.

As variáveis em que se rejeitou ($p < 0,05$) a condição de esfericidade para a matriz de variância-covariância foram para cana-planta clorofila *a*, *b* e *total*, altura de planta, diâmetro de colmo, distância entre internódios, largura e comprimento de folha, sendo assim realizados análises em modelos mistos. Para cana-soca as variáveis foram altura de planta, diâmetro de colmo, distância entre internódios, comprimento de folhas e número de perfilhos.

Observou-se com esses resultados que a condição de esfericidade da matriz não deve ser rejeitada para as variáveis, número de colmos (cana-planta), número de folhas (cana-planta), número de perfilhos (cana-planta), clorofila *a* (cana primeira soca), clorofila *b* (cana primeira soca), clorofila *total* (cana primeira soca), largura de folhas (cana primeira soca), número de colmos (cana primeira soca), número de folhas (cana primeira soca). Sendo assim, os testes da análise em parcelas subdivididas são exatos, ou seja, para estas variáveis utiliza-se o esquema em parcela subdividida no tempo.

Pela Tabela 14 podem ser conferidos os valores das análises de variância do experimento, considerando o modelo univariado de parcelas subdivididas clássico, assumindo dias (tempo) como subparcelas. Observou-se que as fontes de variação “tempo” (DAP: dias após plantio), “tratamentos” (T) e interação “tempo (D) $\times$ tratamentos (T)” apresentaram efeitos significativos ($p < 0,05$) para algumas variáveis.

Cabe ressaltar que a análise de variância em cana-planta foi feito apenas para as variáveis número de folhas, número de perfilhos e número de colmos, pois, a partir do teste de esfericidade de Mauchly essas variáveis foram não significativas estatisticamente ao nível de

5%. O mesmo deve-se às variáveis em que foram feitas análises de variância em cana primeira soca.

Tabela 14 - Resultados (p-valores) associados às principais fontes de variação nas análises de variâncias dos ensaios finais de biomassa cana-planta, levando-se em consideração às variáveis: número de folhas por planta, número de perfilhos e número de colmos por planta, considerando tempo como subparcelas (DAP – dias após plantio), para as variáveis que não rejeitamos a hipótese de esfericidade

F.V	Nº de folhas			Nº perfilhos			Nº de colmos		
	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F
Tratamento (T)	5	2,70	0,0255	5	13,37	<,0001	5	5,92	<,0001
Resíduo(a)	18	-	-	18	-	-	18	-	-
DAP (D)	5	27,29	<,0001	5	33,74	<,0001	5	148,80	<,0001
TxD	25	0,82	0,7034	25	1,50	0,0853	25	0,76	0,078
Resíduo(b)	90	-	-	90	-	-	90	-	-
CV(%)	10,56			7,97			5,94		
Shapiro-wilk (Pr<w)	0,98 (0,2975)			0,99 (0,7115)			0,98 (0,2116)		

A partir da análise de variância feita para as variáveis em que realizaram análises em parcelas subdivididas foi verificado se há ou não interação entre tratamento (T) e tempo (DAP ou DAC). Caso tenha ocorrido interação significativa ($p < 0,05$), é realizado teste de Tukey gerando tabelas de dupla entrada (Tratamento x tempo). Caso contrário, é analisado se houve significância apenas para tratamento ou apenas para tempo (DAP ou DAC). Caso tenha ocorrido significância apenas para tratamento, segue com teste de Tukey para tratamentos. Caso tenha ocorrido significância apenas para tempo (DAP ou DAC), segue com análise de regressão. Neste estudo, as análises de regressão para variáveis significativas, apenas para tempo, podem ser conferidas no item “Anexos”.

Como se pode observar pela Tabela 14, houve interação não-significativa ($p > 0,05$) na interação TxD para as três variáveis analisadas, e significativo entre tratamentos separadamente e entre DAPs. Deste modo, a Tabela 15 foi criada a fim de analisar diferenças estatísticas ao nível de 5% para os tratamentos em cana planta. Os gráficos da análise de regressão podem ser verificados no item “Anexos”, pois não era o fator principal de análise do presente estudo.

Tabela 15 – Média para número de folhas verdes, número de perfilhos e número de colmos, variáveis biométricas não significativas para interação (T x D) ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana-planta (2013-2014)

Tratamentos	nº folhas	nº perfilhos	nº colmos
T1	5,46±0,75 a	12,58±1,85 b	11,32±1,77 abc
T2	5,36±0,88 ab	14,25±2,35 a	11,33±1,74abc
T3	5,45±0,93 a	12,96±2,09 b	11,44±1,55 ab
T4	5,02±0,74b	14,27±2,03 a	11,75±0,83 a
T5	5,08±0,74 b	13,11±1,60 b	10,84±1,88c
T6	5,32±0,68 ab	14,44±2,28 a	10,94±1,65 bc

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Pode-se notar pela Tabela 15 que houve diferenças entre número de folhas nos seis tratamentos avaliados para cana planta. Sendo que foram encontradas até 5,5 folhas para T1(sem irrigação e com adubação mineral) e T3. Os menores valores para número de folhas foram 5,02 (T4) e 5,08 (T5). Considerando o contexto de campo, sabe-se que não existe 0,5 folha por planta e desse modo, todos os tratamentos apresentaram em média 5 folhas por planta avaliada. Assim, como no período de cana planta não foi realizada a aplicação de vinhaça devido ao atraso no início da safra 2013-2014, nesse caso estabeleceu-se apenas a irrigação plena dos tratamentos T2 (fertirrigação com fertilizante mineral), T3 (fertirrigação com 1/2 x dose CETESB), T4 (fertirrigação com dose CETESB), T5 (fertirrigação com 2x dose CETESB) e T6 (fertirrigação com 3x dose CETESB) em que foram correlacionados estes tratamentos com o tratamento controle (T1- sem irrigação).

Considerando número de perfilhos em metros lineares, os melhores tratamentos foram 2, 4 e 6 sendo que estes tratamentos foram respectivamente apenas com irrigação. O maior valor encontrado de número de perfilhos foi de 14,27 para T4 enquanto que o menor foi de 12,58 para T1, confirmando que houve ganhos com irrigação em relação ao tratamento controle (T1).

Para número de colmos em cana planta, o menor valor encontrado foi em T5. Encontrou-se 10,84 colmos por planta enquanto que para o tratamento T1 encontrou 11,32 colmos.

Não foram encontradas correlações para estabelecer que a fertirrigação com fertilizante mineral obteve melhores medidas em relação aos tratamentos fertirrigados com vinhaça sendo que para número de colmos e número de folhas a fertirrigação com fertilizantes mineral foi igual ou inferior ao tratamento controle (T1).

Pela Tabela 16 podem ser conferidos os valores aos quais foram submetidas análises em parcelas subdivididas para cana primeira soca, dados estes os quais foram não significativos ao teste de esfericidade ($p > 0,05$).

Notou-se que a interação TxD foi significativa para as variáveis largura de limbo foliar e muito próximo a 0,05 para a variável número de colmos, sendo nessa última adotada a realização do teste de Tukey para comparação de médias dos tratamentos nos diversos tempos de amostragem. Nenhuma das variáveis foi significativa apenas para tratamentos e variáveis número de folhas, clorofila *a*, *b* e *total* foram significativas apenas para variável tempo, nas quais foi submetida à análise de regressão as quais podem ser conferidas no item “Anexos”.

Tabela 16 - Resultados (p-valores) associados às principais fontes de variação nas análises de variâncias dos ensaios finais de biomassa cana primeira soca, levando-se em consideração as variáveis clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila *total*, largura de limbo foliar (cm), número de colmos por planta, número de folhas por planta, considerando tempo como subparcelas (DAC – dias após corte), para as variáveis que não rejeitamos a hipótese de esfericidade

F.V	Largura de limbo foliar			Nº de Folhas			Nº de colmo		
	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F
Tratamento (T)	5	6,52	<0,001	5	0,93	0,4641	5	2,50	0,0385
Resíduo(a)	18	-	-	18	-	-	18	-	-
DAP (D)	7	411,07	<0,001	7	5,00	<0,0001	4	835,70	<0,0001
TxD	35	1,68	0,0196	35	0,38	0,3761	20	0,47	0,0960
Resíduo(b)	126	-	-	126	-	-	69	-	-
CV(%)	6,81			9,31			8,79		
Shapiro-wilk (Pr<w)	0,99 (0,8198)			0,99 (0,8482)			0,99 (0,5167)		

F.V	Clorofila <i>a</i>			Clorofila <i>b</i>			Clorofila <i>total</i>		
	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F
Tratamento (T)	5	0,56	0,7314	5	0,64	0,6670	5	0,62	0,6809
Resíduo(a)	18	-	-	18	-	-	18	-	-
DAP (D)	9	31,40	<0,0001	9	44,11	<0,0001	9	38,29	<0,0001
TxD	45	0,75	0,8726	45	1,15	0,2589	45	0,85	0,7319
Resíduo(b)	162	-	-	162	-	-	162	-	-
CV(%)	5,11			12,60			6,41		
Shapiro-wilk (Pr<w)	0,99 (0,1588)			0,99 (0,3230)			0,99 (0,3036)		

Pela Tabela 17, pode-se notar que o número de colmos teve baixa variação de valores de campo estando entre 5,55 e 5,77 colmos por planta. Ressalta-se aqui que o valor baixo de 5 colmos por planta é devido à média do período dos momentos de coleta de dados (DAC) para análise do teste de Tukey. Para o ciclo da cana primeira soca, a colheita foi realizada com três meses de antecedência à maturação devido aos fortes vendavais que acamaram o experimento.

O teste de Tukey para largura de limbo foliar será apresentado a seguir (item 4.2.1).

Tabela 17 – Média para número de colmos, variável não significativas para interação (T x D) ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana primeira soca (2014-2015)

Tratamentos	nº colmos
T1	5,60±2,98 ab
T2	5,77±2,65 a
T3	5,70±2,96 a
T4	5,63±2,56 ab
T5	5,65±2,89 ab
T6	5,55±2,87 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

É possível notar nas Tabela 14 e Tabela 16 que os coeficientes de variação para as variáveis estudadas foram baixos (<10%), representando a boa uniformidade entre os dados avaliados durante o experimento. Nota-se também que tanto na Tabela 14 como na Tabela 16 os resultados da análise residual para clorofila *a*, *b* e *total*, por meio do teste de Shapiro-Wilk, foram satisfatórios, pois não se rejeitou a hipótese nula de normalidade dos resíduos, corroborando assim, para um bom ajuste do modelo aos dados em estudo.

Pela Tabela 18, podem ser conferidos os valores da análise de variância para as variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar em que é possível observar baixo coeficiente de variação (CV%) e bons resultados da análise residual de Shapiro-Wilk, estando os valores próximos ao valor 1, não rejeitando a normalidade dos resíduos.

Tabela 18 - Análise da variância para verificar o efeito dos tratamentos sob as variáveis em estudo e teste de Shapiro-wilk para verificar normalidade dos resíduos com seus respectivos valores de “p”

	Fontes de variação	G.L.	QM	Estat. F	valor-p	CV (%)	Shapiro-wilk
cana-planta	Produção colmos	5	370,275	0,71	0,6242	11,56	0,9523
	Brix	5	0,9106	0,92	0,4898	5,07	0,9565
	Fibra	5	0,3910	2,42	0,0759	3,28	0,9758
	Pureza	5	4,2136	1,23	0,3356	2,16	0,9811
	ATR	5	73,3583	0,93	0,4859	6,28	0,9669
cana-soca	Produção colmos	5	318,700	1,30	0,3080	8,70	0,9848
	Brix	5	2,4362	1,49	0,2430	8,04	0,9644
	Fibra	5	0,4518	1,73	0,1781	4,53	0,9700
	Pureza	5	8,4880	1,09	0,3998	3,44	0,9529
	ATR	5	124,4404	1,13	0,3815	9,25	0,9537

4.2 Abordagem agrônômica

4.2.1 Características biométricas

Nas Tabelas 19 a 22 estão apresentados os dados de biometria que foram submetidos ao teste de Tukey ao nível de 0,05 de significância a partir das variáveis que não rejeitaram o teste de Mauchly (Tabela 13), não-significativos, não rejeitando a hipótese nula (H_0), realizando análises em parcelas subdivididas, e que apresentaram interação significativa tratamento (T) e DAP (D) discutidos nas Tabela 14 e Tabela 16. Deste modo, estatisticamente falando existem diferenças significativas entre os tratamentos e o tempo.

Nota-se pela Tabela 19, que entre os tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5, T6) para cada DAP de coleta de dados biométricos não houve diferenças significativas (letras minúsculas) entre os tratamentos para a maioria dos DAPs. A partir do DAP 244 começam a se estabilizar, não ocorrendo diferenças significativas entre tratamentos para número de perfilhos em cana-planta, estando os números de perfilhos por metro linear ao redor de 14.

Tabela 19 - Tabela de dupla entrada de médias para número de perfilhos aos 210, 230, 244, 258, 272, e 293 dias após plantio (DAP) em cana-planta (2013-2014)

Trat\ DAP	210	230	244	258	272	293
T1	14,00±1,28 aAB	14,00 ±1,28 aAB	12,58±1,77 aA	12,25±2,17 aA	11,22±2,08 aA	11,45±1,10 aA
T2	15,42±2,73 aAB	15,42±2,73 aAB	15,42±1,64 aA	13,08±1,91 abA	12,44±1,93 bA	13,78±2,32 abA
T3	13,59±2,20 aB	13,59±2,20 aB	14,34±3,36 aA	12,75±1,71 aA	11,50±0,84 aA	12,02±1,09 aA
T4	16,75±0,92 aA	16,75±0,92 aA	13,50±0,88 bA	13,50±0,43 bA	11,48±0,14 bA	13,66±0,27 bA
T5	14,33±0,98 aAB	14,33±0,98 aAB	12,75±1,82 aA	13,42±1,79 aA	11,59±1,03 aA	12,25±1,29 aA
T6	16,25±2,08 aA	16,25±2,08 aA	14,25±2,36 abA	13,83±1,40 abA	13,00±1,36 bA	13,08±2,72 bA

Médias seguidas pela mesma letra na linha (minúsculas - DAP) ou na coluna (maiúsculas - Tratamentos), não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey

Encontrou-se para T4 e T6 os maiores números de perfilhos no início das leituras (210 DAP) sendo encontrados 16,75 e 16,25 perfilhos por metro linear, respectivamente. O menor valor para número de perfilhos foi encontrado no T3 (meia dose CETESB) estando com 13,59 perfilhos por metro linear aos 210 DAP. Analisando aos 293 DAP, todos os tratamentos apresentaram-se estatisticamente iguais para a variável analisada, visto que no decorrer do desenvolvimento da cana-de-açúcar, a cultura apresenta morte natural de perfilhos de menor altura devido ao sombreamento do dossel, ocorrendo assim a estabilização do número de perfilhos para os diferentes tratamentos.

Foi possível notar que a variável número de perfilhos é muito influenciada pela idade do canavial, sendo que para todos os tratamentos o número inicial de perfilhos foi maior que

quando próximo à colheita (293 DAP). Foram contabilizados 14 perfilhos aos 210DAP e 11,45 aos 293DAP para T1; 15,42 perfilhos aos 210DAP e 13,78 perfilhos aos 293DAP para T2; 13,59 perfilhos aos 210DAP e 12,02 aos 293 DAP para T3; 16,75 perfilhos aos 210DAP e 13,66 aos 293 DAP para T4; 14,33 perfilhos aos 210DAP e 12,25 aos 293 DAP para T5 e 16,25 perfilhos aos 210 DAP e 13,08 aos 293 para T6.

Apesar de não ter sido constatado diferenças estatísticas ao nível de 5% de significância no teste de Tukey entre os tratamentos, o T1 (controle) apresentou os menores números de perfilhos no decorrer do período avaliado entre os outros cinco tratamentos. Indo de encontro com o esperado no qual o tratamento em que não foi feito a irrigação, poderia resultar em um menor número de perfilhos e consequente menor produção.

Esses dados corroboram com estudos divulgados pelo CTC (Centro de Tecnologia Canavieira) em que são apresentados dados de perfilhamento para a variedade CTC 15 classificando esta variedade como sendo de perfilhamento médio, ao redor de 14 perfilhos por metro linear.

Analisando-se o comportamento do número de colmos (Tabela 20) para cana planta entre os tratamentos nas seis datas de coleta de dados (210, 230, 244, 258, 272 e 293 DAP), pode-se notar que não houve diferenças estatisticamente significativas ao nível de 0,05 de probabilidade. Rocha (2013) também não encontrou diferenças significativas no número de colmos em experimento entre cana irrigada e diferentes doses de vinhaça e condição de sequeiro, conduzido em Nitossolo Vermelho eutrófico, confirmando que essa variável não sofreu diferenças mediante mudanças de condições de adubação.

Tabela 20 - Tabela de dupla entrada de médias para número de colmos aos 210, 230, 244, 258, 272, e 293 dias após plantio (DAP) em cana-planta (2013-2014)

Trat\DAP	210	230	244	258	272	293
T1	8,75±1,32 A	10,17±0,58 A	11,58±1,45 A	12,25±1,29 A	12,44±1,34 A	12,78±0,42 A
T2	8,58±0,50 bA	9,92±0,99 bA	11,92±0,57 aA	11,58±0,74 abA	12,89±0,31 aA	13,11±0,42 aA
T3	9,09±0,49 bA	10,42±0,92 bA	11,58±1,00 abA	11,75±1,03 abA	12,83±0,41 aA	13,00±0,55 aA
T4	8,83±1,00 cA	10,75±1,10 bA	11,83±0,64 abA	11,92±0,69 abA	13,67±0,82 aA	13,50±0,41 aA
T5	8,00±0,47 cA	9,92±1,10 bA	10,42±0,50 bA	11,08±0,69 abA	12,75±1,26 aA	12,92±0,88 aA
T6	8,42±0,32 cA	10,00±0,82 bA	10,75±0,32 bA	11,17±0,84 abA	12,58±1,00 abA	12,75±0,78 aA

Médias seguidas pela mesma letra na linha (minúsculas - DAP) e coluna (maiúsculas - Tratamentos) não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Foi observado aos 293 DAP que os maiores números de colmos foram os valores de 13,50 por planta para todos os tratamentos. Diante do experimento realizado e considerando as condições ao qual foi submetido, pode-se dizer que a variável, número de colmos, não foi influenciada por irrigação em comparação a sequeiro (T1), pois não houve diferenças

estatísticas entre os tratamentos para todos os DAPs de coleta de dados. Pode-se observar que apesar de ocorrerem valores diferentes de número de colmos entre todos os tratamentos, esses estiveram entre 8 e 9 colmos por perfilho aos 210DAP e, 12 e 13 colmos por perfilho aos 293 DAP.

Notou-se ainda, e já era esperado, que no decorrer dos dias após plantio para todos os tratamentos, ocorreram diferenças estatísticas, pois ocorreu o desenvolvimento do perfilho e consequentemente crescimento da planta.

Assim, entre datas de coleta de dados (DAPs), foi possível notar diferenças significativas passando o número de colmos de 9 em 210 DAP para 13 colmos em 293 DAP, confirmando o esperado que o número de colmos deve aumentar à medida que a planta cresce. Apenas o tratamento T3 apresentou nove colmos por planta aos 210 DAP. Todos os outros estiveram ao redor de oito, porém sem diferenças significativas ao nível de 0,05 de probabilidade.

Em seu experimento entre cana irrigada com diferentes doses de vinhaça com cana-de-açúcar e condições de sequeiro, Barbosa (2010) também não encontrou diferenças estatísticas entre os tratamentos para a variável diâmetro de colmo. O mesmo foi relatado por Magalhães (2010).

Em relação à largura de limbo foliar (cm) em cana primeira soca (Tabela 21) nota-se diferenças significativas entre tratamentos (letras maiúsculas) a partir dos 135 DAC (dias após corte). Até 120 DAC não foi notado diferenças significativas entre os tratamentos (letras minúsculas na mesma linha). Em seu estudo, Rocha (2013) também não encontrou diferenças significativas entre os tratamentos ao nível de 0,05 de probabilidade até os 109 DAP em cana-planta.

Tabela 21 - Dupla entrada de médias para largura de limbo foliar (cm) aos 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180 e 195 dias após colheita (DAC) em cana primeira soca (2014-2015)

DAC/Trat	T1	T2	T3	T4	T5	T6
90	2,09±0,25 aC	2,21±0,14 aC	2,58±0,33 aC	2,27±0,34 aD	2,48±0,13 aC	2,34±0,15 aD
105	2,66±0,26 aDC	2,00±0,25 aC	2,83±0,30 aC	2,74±0,07 aCD	2,85±0,46 aC	2,79±0,20 aCD
120	3,07±0,22 aD	3,01±0,42 aC	3,11±0,30 aC	3,03±0,24 aC	3,11±0,24 aC	3,12±0,15 aC
135	3,89±0,54 abD	3,28±0,51 bC	3,60±0,53 abB	3,79±0,38 abB	3,50±0,39 abB	3,99±0,49 aB
150	4,26±0,12 aCD	4,06±0,28 aB	4,04±0,37 aB	4,29±0,41 aB	4,14±0,38 aB	4,11±0,22 aB
165	4,46±0,09 aC	4,43±0,43 aAB	4,32±0,34 aAB	4,60±0,36 aAB	4,25±0,20 aB	4,59±0,11 aB
180	5,30±0,42 aB	4,7±0,59 aAB	4,79±0,29 aAB	5,31±0,34 aA	5,29±0,30 aA	5,33±0,23 aAB
195	5,38±0,38 abA	4,86±0,24 bA	5,05±0,48 abA	5,18±0,49 abA	5,58±0,22 aA	5,58±0,51 aA

Médias seguidas pela mesma letra na coluna (maiúsculas - DAC) e linha (minúsculas - Tratamentos) não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Foi possível notar que a partir dos 135 DAC o tratamento T1 apresentou os menores índices de largura de limbo foliar estando ao redor de 5,30 cm para os 180 e 195 DAC, e para os tratamentos T5 e T6 estes números chegaram ao redor de 5,58, mostrando que a utilização maior de vinhaça tem efeito positivo na largura de limbo foliar e o déficit hídrico atua negativamente diminuindo a largura foliar das plantas. Smit e Singels (2006) em um estudo sobre respostas do dossel de plantas de cana-de-açúcar mostraram que o surgimento de novas folhas é fortemente afetado pelo déficit hídrico.

Para o T1, menores e maiores valores de largura de limbo foliar foram respectivamente, 2,09 cm e 5,38cm, sendo o ultimo para cana planta adulta. Notou-se que para todos os tratamentos os valores máximos de largura de limbo foliar encontrados foram ao 5,58. Somente o tratamento 2 apresentou menor valor máximo de largura de limbo foliar estando com 4,86 cm aos 195 DAC (dias após o corte).

Porém, não foi possível estabelecer uma relação entre a ausência de irrigação no T1 e menores valores de largura de limbo foliar no T2. Acredita-se, que pelo fato de o experimento ter sido conduzido em um terreno com uma declividade acentuada (12%), possa ter ocorrido movimento da água das parcelas irrigadas para as parcelas sem irrigação (T1), o que de certa forma “mascarou” os dados obtidos biometricamente.

A largura foliar, número de folhas por planta e número de perfilhos por metro linear de plantio estão intrinsicamente ligados à área foliar do dossel da cultura atuando no aumento ou diminuição desta na lavoura. Inman-Bamber (2004, apud ROCHA, 2013) concluiu que tanto o alongamento das folhas e dos colmos são afetados no início do estresse hídrico, e que posteriormente a senescência foliar e a redução no surgimento de novas folhas são fatores que combinados influenciam no número de folhas verdes em relação a plantas não sujeitas ao estresse hídrico.

As Figuras 24, 25 e 26 apresentam os dados de teor de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila *total* medidas na folha +3, respectivamente, em cana primeira soca. Não foram encontradas relações com as doses ministradas de vinhaça e valores de clorofila na planta.

Figura 24 - Teor de clorofila *a* na folha (g clorofila/g de folha)

Figura 25 - Teor de clorofila *b* na folha (g clorofila/g de folha)

Figura 26 - Teor de clorofila *total* na folha (g clorofila/g de folha)

Assim como Rocha (2013), não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos para clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila *total* medidos nas folhas +3 em cana-soca quando da utilização de diferentes doses de vinhaça e condição de sequeiro para cana-de-açúcar. A degradação dos pigmentos clorofilianos está relacionada com a diminuição da

síntese ou da degradação dos carotenoides, pois os carotenoides são pigmentos acessórios na absorção e transferência de energia radiante, e protetores da clorofila no processo de fotooxidação. O estresse hídrico induz a degradação de B-caroteno e a redução na formação de zeaxantina, produzindo diminuição no teor de carotenoides, pigmentos aparentemente envolvidos na proteção contra a fotoinibição (PEREIRA et al., 2008).

Nota-se, a partir da Tabela 22, que os valores de Clorofila *a* estiveram ao redor de 37,26, clorofila *b* 12,43 e clorofila *total* em 50, não ocorrendo diferenças entre tratamentos irrigados e sequeiro (T1) e não obtendo relação entre as diferentes doses de vinhaça aplicada para cada tratamento e sua possível influência no teor de clorofila na folha.

Tabela 22 – Médias para clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total, variáveis biométricas não significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana primeira soca (2014-2015)

Tratamentos	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total
T1	37,76±3,13 a	12,52±3,02 a	50,29±5,79 a
T2	37,26±2,55 a	12,20±2,52 a	49,46±4,62 a
T3	37,67±2,85 a	12,43±2,35 a	50,11±4,82 a
T4	37,65±2,71 a	12,60±2,52 a	50,26±4,78 a
T5	37,25±2,68 a	12,11±2,78 a	49,37±5,07 a
T6	37,35±2,87 a	12,51±2,33 a	49,87±4,86 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

A partir das Tabelas 23 a Tabela 28 são apresentadas as análises referentes aos dados tratados em modelos mistos para variáveis em que se rejeitou a hipótese de esfericidade ($p < 0,05$) para cana planta (2013-2014). Primeiramente, pode ser consultada pela Tabela 23, a análise de variância. Como não foi encontrada interação significativa entre “T” e “D” para nenhuma das variáveis, realizou teste de Tukey para aquelas variáveis que se encontrou significância ao nível de 0,05 entre tratamentos, sendo essas variáveis, altura de planta, largura de limbo foliar, diâmetro de colmos e distância entre internódios.

Tabela 23 - Resultados (p-valores) associados às principais fontes de variação nas análises de variâncias dos ensaios finais de biomassa cana planta, levando-se em consideração as variáveis, altura de plantas (m), comprimento foliar (m), largura de folhas (cm), diâmetro de colmos (mm) e distância entre internódios (cm) considerando tempo como subparcelas (DAP – dias após plantio), para as variáveis que rejeitamos a hipótese de esfericidade

F.V	Altura de planta			Comprimento foliar			Largura de limbo foliar		
	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F
Tratamento (T)	5	2,64	0,0270	5	1,48	0,2018	5	7,35	<,0001
DAP (D)	5	67,59	<,0001	5	10,57	<,0001	5	0,99	<0,4298
TxD	25	0,36	0,9976	25	0,45	0,9885	25	0,49	0,9785

F.V	Diâmetro de colmo			Distância entre internódios		
	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F
Tratamento (T)	5	7,03	<,0001	5	4,42	0,0011
DAP (D)	5	91,34	<,0001	5	10,79	<,0001
TxD	25	0,43	0,9916	25	0,61	0,9192

Para as variáveis em que encontrou significância ao nível de 0,05 para o fator “D” (DAP), realizou a análise de regressão que se encontra apresentada nos “Anexos”. As variáveis em que se submeteu análise de regressão foram altura de planta, comprimento foliar, diâmetro de colmo e distância entre internódios.

Analisando-se a variável altura de planta para cana planta (Tabela 24) foi possível notar que o tratamento que garantiu melhores resultados foi T2 (fertirrigação com fertilizante mineral) da ordem de 2,76m de altura, cabendo ressaltar que altura de planta está intimamente ligada à produção de colmos industrializáveis tendo o T2 produzido 205 ton ha⁻¹. Em geral e considerando a visão de campo a altura de planta esteve entre 2,63 e 2,76m. O resultado de altura de planta que apresentou os menores valores foi o tratamento T3 apresentando as plantas 2,63m em sua maioria.

Tabela 24 – Média para altura de planta, largura de limbo foliar, diâmetro de colmo e distância entre internódios, variáveis biométricas significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana planta (2013-2014)

Tratamentos	Altura de planta (m)	Largura de limbo foliar (cm)	Diâmetro de colmo (mm)	Distância entre internódios (cm)
T1	2,64±0,31b	4,81±0,29b	24,78±2,99c	12,29±2,04c
T2	2,76±0,31a	5,21±0,244a	27,36±3,34a	13,28±1,81ab
T3	2,63±0,27b	4,87±0,39b	25,91±3,28ab	12,13±2,09c
T4	2,73±0,31ab	5,25±0,22a	25,46±3,17a	12,83±2,03cb
T5	2,72±0,31ab	4,91±0,32b	26,36±3,33a	14,02±1,19a
T6	2,65±0,31b	5,05±0,36ab	25,90±3,48ab	13,11±1,64ab

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Para largura de limbo foliar em cana planta, notou-se que o melhor valor encontrado esteve para os tratamentos T2 (fertirrigação com fertilizante mineral) e T4 (fertirrigação dose CETESB). A maior largura de limbo foliar esteve em 5,25 cm e a menor em 4,81cm justificando um aumento de 10% na largura foliar da planta quando da utilização de irrigação.

Considerando-se diâmetro de colmo, foram observadas diferenças entre o T1 (controle) e tratamentos irrigados. O ganho em termos de diâmetro de colmos foi de 10% em relação ao tratamento controle (T1) sendo que este apresentou valores de 24,78 mm enquanto que o tratamento 2 apresentou valor de 27,36mm. Assim, levando-se em conta que os tratamentos T2, T3, T4, T5 e T6 receberam o mesmo tratamento com irrigação e adubação mineral, é possível afirmar que a irrigação promoveu melhoras nestes parâmetros visto que o tratamento controle (T1) apresentou valores de diâmetro de colmo ao redor de 24mm enquanto que os tratamentos irrigados encontraram-se valores da ordem de 26 e 27 mm.

Para variável distância entre internódios, também foram observadas diferenças significativas estatisticamente sendo que o melhor tratamento foi T5 (14,02 cm). Em geral, a irrigação promoveu um aumento das distâncias entre internódios na planta em relação ao tratamento controle (T1) em que foram encontrados aumentos para este parâmetro da ordem de 15% quando na presença de irrigação (comparação entre T5 e T1).

Rocha (2013) em seu estudo com gotejamento subsuperficial em cana variedade CTC 12 e diferentes doses de vinhaça encontrou efeitos positivos apenas nos parâmetros biométricos de altura de planta e largura de limbo foliar.

Pela Tabela 25 pode ser verificada a análise de variância para as variáveis Clorofila *a*, *b* e *total* sendo que foram encontradas interações significativas TxD ($p < 0,05$) para as três variáveis. Deste modo, nas Tabelas 26 a 28 são apresentados os valores de dupla entrada para a interação tratamento versus tempo.

Tabela 25 - Resultados (p-valores) associados às principais fontes de variação nas análises de variâncias dos ensaios finais de biomassa cana planta, levando-se em consideração as variáveis clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila *total* considerando tempo como subparcelas (DAP – dias após plantio), para as variáveis que rejeitamos a hipótese de esfericidade

F.V	Clorofila <i>a</i>			Clorofila <i>b</i>			Clorofila <i>total</i>		
	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F
Tratamento (T)	5	1,29	0,2767	5	4,87	0,0007	5	3,50	0,0069
DAP (D)	3	14,36	<,0001	3	7,47	0,0002	3	10,41	<,0001
TxD	15	1,83	0,0465	15	2,10	0,0196	15	2,10	0,0191

Pela análise da Tabela 26 foi possível notar que os maiores valores de clorofila *a* foram encontrados aos 216 DAP, sendo maiores que 39 g g^{-1} . Aos 265 DAP notam-se valores menores que 38 g g^{-1} de clorofila *a* na folha 3+. Acredita-se que à medida que a planta avança para a maturação, os teores de clorofila tendem a diminuir na folha pela senescência natural da planta, deixando de haver valores altos deste parâmetro. O mesmo pode observado para clorofila *b* (Tabela 27) e clorofila *total* (Tabela 28), visto que todos estes parâmetros são dependentes entre si.

Tabela 26 - Média para Clorofila *a* significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana planta (2013-2014)

Clorofila <i>a</i>	216	236	250	265
T1	39,90±0,75 aA	41,05±0,29 aA	39,30±1,47 abA	37,82±0,81 bA
T2	38,97±2,05 aA	39,84±0,23 aA	39,55±0,48 aA	38,71±0,46 aA
T3	39,57±1,33 aA	38,88±0,63 abA	38,86±0,48 abA	37,54±0,75 bA
T4	39,75±2,00 aA	39,45±1,16 abA	39,24±0,56 abA	37,39±1,35 bA
T5	39,83±1,60 aA	39,03±1,70 aA	38,94±0,35 aA	38,46±1,46 aA
T6	41,36±1,29 aA	38,08±0,48 bA	38,51±1,64 aA	36,48±1,84 bA

Médias seguidas pela mesma letra na linha (minúsculas - DAP) ou na coluna (maiúsculas - Tratamentos), não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey

Tabela 27 – Média para Clorofila *b* significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana planta (2013-2014)

Clorofila <i>b</i>	216	236	250	265
T1	16,73±3,17 bA	20,64±3,09 aA	16,76±2,12 bA	14,86±0,81 bA
T2	15,64±3,24 aA	17,98±0,47 aAB	16,92±0,38 aA	17,39±0,88 aA
T3	16,55±2,74 aA	15,89±1,13 aC	14,92±0,78 aA	14,45±1,11 aAB
T4	15,74±2,73 aA	16,98±2,54 aB	15,97±0,94 aA	13,62±0,95 bB
T5	17,45±3,02 aA	16,36±1,69 aB	15,68±0,40 abA	14,56±1,55 bA
T6	17,73±0,34 aA	13,50±0,81 bC	14,01±2,44 abA	11,99±2,66 cB

Médias seguidas pela mesma letra na linha (minúsculas - DAP) ou na coluna (maiúsculas - Tratamentos), não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey

Tabela 28 – Média para Clorofila *total* significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana planta (2013-2014)

Clorofila <i>total</i>	216	236	250	265
T1	56,63±3,41 bA	61,69±3,35 aA	56,06±3,55 bA	52,68±2,09 bBC
T2	54,60±5,27 aB	57,82±0,55 aA	56,47±0,85 aA	56,10±1,19 aA
T3	56,12±4,07 aA	54,78±1,72 aB	53,78±1,22 aA	51,99±1,85 aC
T4	55,49±4,59 abAB	56,43±3,70 aBA	55,21±1,49 abA	51,01±2,16 bC
T5	57,27±4,61 aA	55,39±3,38 aB	54,62±0,57 aA	53,02±3,00 aB
T6	59,10±1,07 aA	51,58±1,28 bB	52,52±4,08 bA	48,47±4,49 bC

Médias seguidas pela mesma letra na linha (minúsculas - DAP) ou na coluna (maiúsculas - Tratamentos), não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey

Pela Tabela 29 podem ser conferidas as análises referentes aos dados tratados em modelos mistos para variáveis em que se rejeitou a hipótese de esfericidade ($p < 0,05$) para cana primeira soca (2014-2015). Primeiramente é apresentada a análise de variância. Como não foi encontrada interação significativa entre “T” e “D” para nenhuma das variáveis, realizou teste de Tukey para aquelas variáveis que se encontrou significância ao nível de 0,05 entre tratamentos, sendo essas variáveis, altura de planta, comprimento foliar e número de perfilhos.

Tabela 29 - Resultados (p-valores) associados às principais fontes de variação nas análises de variâncias dos ensaios finais de biomassa cana primeira soca, levando-se em consideração as variáveis Altura de planta (m), comprimento foliar (m), número de perfilhos, diâmetro de colmos (mm) e distância entre internódios (cm) considerando tempo como subparcelas (DAC – dias após corte), para as variáveis que não rejeitamos a hipótese de esfericidade

F.V	Altura de planta			Comprimento foliar			Nº de perfilhos		
	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F
Tratamento (T)	5	11,25	<,0001	5	4,03	0,0019	5	4,58	0,0007
DAP (D)	7	1037,87	<,0001	7	377,31	<,0001	7	24,00	<,0001
TxD	35	0,22	1,0000	35	0,54	0,9814	35	0,40	0,9990

F.V	Diâmetro de colmo			Distância entre internódios		
	G.L.	F	Pr>F	G.L.	F	Pr>F
Tratamento (T)	5	1,16	0,3363	5	1,93	0,0980
DAP (D)	4	0,57	0,6874	4	9,25	<,0001
TxD	20	0,48	0,9695	20	0,80	0,7091

Pela Tabela 30 pode ser conferido o teste de Tukey ao nível de 5% de significância para as variáveis altura de planta, comprimento foliar e número de perfilhos.

Tabela 30 - Média para variáveis biométricas significativas ao nível 5% no teste F da análise de variância em cana primeira soca (2014-2015)

Tratamentos	Altura de planta (m)	Comprimento foliar (m)	Nº perfilhos
T1	1,38±0,67b	1,49±0,28ab	21,06±3,09ab
T2	1,29±0,65b	1,44±0,25b	20,44±2,69b
T3	1,39±0,66b	1,47±0,25ab	19,31±2,84b
T4	1,44±0,66a	1,49±0,26ab	21,69±3,79a
T5	1,46±0,69a	1,51±0,26a	21,18±2,76a
T6	1,44±0,68a	1,49±0,27ab	21,62±3,41a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Notou-se que para a altura de plantas os valores foram menores em cana primeira soca do que em cana planta, pois a colheita foi realizada antes da maturação do canavial devido aos fortes vendavais ocorridos neste período.

Foi possível avaliar que não ocorreram diferenças entre tratamento controle (T1) e os tratamentos T2 e T3 (meia dose CETESB) pra altura de planta, porém quando foram ministrados com doses de vinhaça (T4,T5 e T6) ocorreram incrementos da ordem de 13% em ganho de altura de planta. O tratamento que apresentou o menor valor de altura de planta foi T2 com 1,29 e o tratamento que apresentou o maior valor foi T5 com 1,46m constatando que aplicação de vinhaça tem efeitos positivos na altura de plantas de cana-de-açúcar variedade CTC15 em gotejamento subsuperficial.

Em relação a comprimento foliar as diferenças estatísticas constatadas não foram significativas quando foram comparados aplicação de vinhaça e o tratamento controle (T) sendo que o melhor tratamento foi T5 com utilização de 2x dose CETESB apresentando 1,51m de comprimento foliar.

Em relação a número de perfilhos, notou-se efeito positivo na utilização de vinhaça via gotejamento subsuperficial assim como altura de planta pois encontraram valores da ordem de 21 perfilhos por metro linear nos tratamentos T4, T5 e T6, enquanto que para o tratamento T3, foram encontrados 19 perfilhos por metro linear apenas, reforçando que a utilização de vinhaça junto as raízes das plantas, além de fornecer matéria orgânica em quantidade, promove o aumento da umidade e manutenção desta junto as raízes.

4.2.2 Características tecnológicas e produtividade agrícola

Dados do teste entre médias para características tecnológicas e produtividade agrícola podem ser conferidos pelas Tabelas 31 e 32 para o primeiro e segundo ciclo de coleta de dados, respectivamente. Para o primeiro ano de condução do experimento (2013-2014) os valores encontrados foram condizentes com os utilizados pelas indústrias de açúcar e etanol para industrialização, aos quais garantem boa produção de açúcar branco, como é o caso do teor de cinzas no caldo ao redor de 0,85%.

Tabela 31 – Média para parâmetros tecnológicos e produtividade de colmos industrializáveis em cana-planta (2013-2014)

Trat.	°Brix	POL %	Fibra %	Pureza %	Cinzas %	ATR Kg.TC ⁻¹	Colmos ind. ton.ha ⁻¹	AR %	ART %	ton. açúcar/ha
T1	20,22a	14,77a	12,65a	87,19a	0,65a	147,27a	197,25a	0,65a	14,10a	27,68a
T2	19,36a	14,01a	11,81a	85,06a	0,72a	140,58a	205,25a	0,72a	13,59a	27,49a
T3	19,22a	13,87a	12,06a	85,23a	0,72a	139,12a	185,00a	0,72a	13,42a	24,52a
T4	19,60a	14,05a	12,06a	84,73a	0,74a	138,86a	196,25a	0,74a	13,60a	25,97a
T5	20,04a	14,56a	12,43a	86,33a	0,68a	145,40a	211,50a	0,68a	13,96a	29,30a
T6	19,00a	13,52a	12,42a	84,59a	0,74a	135,86a	190,50a	0,74a	13,06a	24,66a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Tabela 32 – Média para parâmetros tecnológicos e produtividade de colmos industrializáveis em cana primeira soca (2014-2015)

Trat.	°Brix	POL %	Fibra %	Pureza %	Cinzas %	ATR Kg.TC ⁻¹	Colmos ind. ton.ha ⁻¹	AR %	ART %	ton. açúcar/ha
T1	16,71a	11,70a	11,54a	81,99a	0,83a	119,14a	186,00a	0,83a	11,58a	21,11a
T2	16,24a	11,03a	11,43a	79,16a	0,92a	113,39a	168,75a	0,92a	11,05a	18,23a
T3	16,63a	11,74a	11,56a	82,57a	0,81a	119,36a	169,50a	0,81a	11,59a	19,28a
T4	15,13a	10,55a	10,73a	80,42a	0,88a	108,54a	190,00a	0,88a	10,64a	19,65a
T5	14,83a	10,23a	10,97a	79,85a	0,90a	105,59a	180,75a	0,90a	10,33a	18,19a
T6	15,91a	11,28a	11,26a	82,45a	0,82a	114,97a	185,00a	0,82a	11,20a	20,27a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Tabela 33 – Produtividade de Biomassa total e ponteira em cana planta e primeira soca em ton.ha⁻¹.

Trat.	Cana planta (ton.ha ⁻¹)		Cana primeira soca (ton.ha ⁻¹)	
	Biomassa total	Ponteira	Biomassa total	Ponteira
T1	250,32	53,02	238,12	52,09
T2	265,08	59,68	216,28	47,31
T3	240,24	55,24	217,04	47,48
T4	251,59	55,56	240,79	50,79
T5	269,13	57,46	231,52	50,64
T6	250,48	60,00	244,25	59,21

Já para o segundo ano de condução (2014-2015), devido ao fato de ter sido realizada a colheita alguns meses antes do período ideal de maturação, pois houve acamamento do canavial devido a fortes vendavais ocorridos na área, estes valores estiveram um pouco abaixo dos utilizados pelas indústrias. Caracterizando a planta como ainda imatura para colheita. Para ambos os cortes, os dados de °Brix, %Fibra, %Pureza, %Cinzas e ATR não apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade.

Para caracterização do grau de maturação da cana-de-açúcar, adotou-se o valor de °Brix de 18 (MARQUES et al., 2001). Pode-se notar que para cana planta (2013-2014) os valores de °Brix estiveram entre 19,00 (T6) e 20,22 (T1) (Figura 27A). Vale lembrar que o valor de 20,22 para o tratamento 1 (sem irrigação e adubação com fertilizante mineral) foi o

maior entre eles, pois o déficit hídrico no final do ciclo da cana-de-açúcar favorece a maturação da mesma e acúmulo de açúcares redutores. Para cana primeira soca (2014-2015), esses valores foram todos inferiores a 18 evidenciando que o canavial ainda não tinha atingido o grau de maturação para efetuar a colheita (Figura 27B).

Figura 27 - Representação gráfica do grau Brix em cana planta (A) e cana primeira soca (B)

Para cana-planta (2013-2014), os teores de fibra estiveram entre 11,81(T2) e 12,65 (T1) sendo esses teores de fibra adequados para industrialização, segundo Meade (1963), o qual considera entre 11 e 16% valores ótimos. Para cana primeira soca (2014-2015), esses valores foram um pouco menores, encontrando índices de 10,73 e 10,97 para T4 e T5, que já era esperado visto que no referido ano o canavial foi colhido antecipadamente ao período de maturação. Os maiores teores de fibra para cana primeira soca foram para T1 e T3, 11,54 e 11,56, respectivamente. A representação gráfica do teor de fibras para cana planta e primeira soca pode ser conferida pelas Figuras 28A e 28B, respectivamente.

Figura 28 - Representação gráfica do Teor de Fibras (%) em cana planta (A) e cana primeira soca (B)

Segundo Marques et al. (2010), os valores mínimos necessários de porcentagem de pureza, para industrialização, deve estar entre 80 e 85%. Os valores de %P (Pureza) do caldo

para cana-planta variaram entre 84,59 (T6) e 87,19 (T1) considerando-os todos satisfatórios. Teve-se como maior valor de pureza 87,19 no T1 e menor valor de pureza de 84,59 no T6 (maior dose de vinhaça). Para cana primeira soca, todos os tratamentos apresentaram valores de %P menores do que 85%, sendo o menor valor encontrado de 79,16 para T2 e maior valor de 82,57 para T3. Desta forma, acredita-se que a aplicação de vinhaça possa ter influenciado negativamente no teor de pureza do caldo, pois no segundo ano foi ministrado vinhaça aos tratamentos T3, T4, T5, T6, porém sem diferenças significativas ao nível de 5% de significância entre eles. A representação gráfica para teor de pureza (%) para cana planta e primeira soca pode ser conferida pelas Figuras 29A e 29B, respectivamente.

Figura 29 - Representação gráfica do Teor de Pureza do caldo (%) em cana planta (A) e cana primeira soca (B)

O teor de cinzas não diferenciou significativamente entre os tratamentos para os dois anos de condução do experimento, porém, nota-se que da cana-planta para cana primeira soca os teores de cinzas aumentaram comprovando que existe relação do potássio da vinhaça com aumento do teor de cinzas do caldo. Essa questão é muito levantada dentro de usinas de processamento de cana-de-açúcar, relacionando com maiores teores de cinzas em áreas de sacrifício de aplicação de vinhaça ou área com altas doses de vinhaça aplicada (Figuras 30A e 30B).

Figura 30 - Representação gráfica do Teor de Cinzas (%) em cana planta (A) e cana primeira soca (B)

O teor de cinzas no caldo apresenta correlação direta com o potássio (FREIRE; CORTEZ, 2000), que é o nutriente mais extraído pela cana-de-açúcar concentrando a maior parte nos colmos, em torno de 55% (ROSSETTO et al., 2010). O teor de cinzas no caldo é um fator importante no processo de industrialização pelos efeitos negativos na cristalização do açúcar, devido ao fator melassigênico e devido à formação de falsos núcleos. Por outro lado o maior teor de cinzas favorece a produção de etanol devido à ação nutricional às leveduras (ROCHA, 2013).

No primeiro ano de condução do experimento (2013-2014) não foi realizada a aplicação de vinhaça na área devido ao fato das usinas da região terem iniciado a safra de cana-de-açúcar no mês de junho de 2014, ou seja, ocorreu um atraso em relação ao histórico para o setor, o qual se inicia no mês de abril a maio. Desse modo, como a instalação do sistema de irrigação foi concluída apenas em dezembro de 2013, mês ao qual a safra termina no estado de São Paulo, e então o início do ano-safra seguinte, teve um atraso, decidindo-se por utilizar tratamentos com vinhaça apenas no segundo ciclo de condução (2014-2015).

Pelas Figuras 31A e 31B notou-se que em relação à ATR, não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos, para os dois anos de condução do experimento, foi possível notar que no segundo ciclo (2014-2015). Os valores de ATR estiveram expressivamente menores para cana-planta, caracterizando mais uma vez a colheita da cana ainda “verde” devido ao vendaval ocorrido na área do experimento. Valores considerados satisfatórios para industrialização estão ao redor de 140 kg ATR toncana⁻¹ e, foram encontrados em cana planta em relação a valores ao redor de 110 kg ATR toncana⁻¹ para cana primeira soca. Apesar de terem sido obtidos valores muito baixos de ATR em cana primeira soca, devido à colheita prematura do canavial, foi possível observar que no tratamento T1, conduzido sob condições de sequeiro, os valores de ATR foram maiores (119,14 kg ATR toncana⁻¹) evidenciando o papel do déficit hídrico na maturação do canavial.

Medina et al. (2002) estudando efeito de diferentes doses de vinhaça na produtividade de colmos de cana-de-açúcar observaram que ocorreu acréscimo significativo em relação ao tratamento sem vinhaça, sendo que entre doses de vinhaça não ocorreram diferenças.

Barbosa (2010) não encontrou diferença de produtividade de colmos para diferentes doses de vinhaça, mas encontrou diferença entre os tratamentos irrigados com o tratamento de sequeiro para cana planta. Já na colheita da primeira soca o autor não encontrou diferenças significativas entre tratamentos irrigados com sequeiro.

Apesar de ter sido encontrado valores de produtividade de colmos industrializáveis em sequeiro muito aquém ($197,25 \text{ ton ha}^{-1}$) em cana planta e cana primeira soca (186 ton ha^{-1}), dos valores encontrados em cultivos comerciais (ao redor de 120 ton ha^{-1}), Rocha (2013) também não encontrou diferenças significativas entre tratamentos irrigados e sequeiro para cana primeira soca e encontrou produtividades de 184 ton ha^{-1} em cana primeira soca para cultivo de sequeiro, corroborando com os resultados aqui encontrados (Figura 31 C e 31D).

Figura 31 - Representação gráfica dos valores de ATR (kg.TC⁻¹) em cana planta (A) e em cana primeira soca (B), colmos industrializáveis (ton.ha⁻¹) em cana planta (C) e cana primeira soca (D)

5 CONCLUSÕES

Diante das condições experimentais ao qual o experimento foi conduzido e diante dos resultados obtidos, pôde-se concluir que:

- a) Em cana planta, houve ganhos de até 16% com irrigação para o parâmetro número de perfilhos por metro linear, ganhos de até 10% em número de colmos e largura de limbo foliar e até de 15% para distância entre internódios não encontrando diferenças de campo para número de folhas;
- b) Não foram encontradas correlações estatísticas entre aplicação de vinhaça, adubação mineral e a tratamento controle em cana primeira soca para Clorofila *a*, *b* e *total* no período avaliado;
- c) A fertirrigação com vinhaça via gotejamento subsuperficial promoveu efeitos positivos apenas em altura de planta, comprimento de folhas, número de perfilhos e largura de limbo foliar da ordem de 13%, 5%, 12% e 4%, respectivamente em comparação ao controle (T1);
- d) A utilização de vinhaça via fertirrigação por gotejamento subsuperficial não promoveu ganhos para parâmetros tecnológicos (Brix, Fibra, Cinzas, Pureza e ATR);
- e) A utilização de vinhaça via fertirrigação por gotejamento subsuperficial promoveu aumento do teor de cinzas no ciclo cana primeira soca, com valores de ATR e Pureza menores em tratamentos fertirrigados com vinhaça;
- f) O tratamento T4 (dose CETESB) apresentou melhor resposta para produtividade de colmos industrializáveis com utilização de vinhaça via fertirrigação por gotejamento subsuperficial com 190 ton.ha⁻¹;
- g) Não foram encontrados diferenças expressivas entre fertirrigação com vinhaça e fertirrigação com fertilizante mineral via gotejamento subsuperficial em variedade CTC15;

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. D.; TURRAL, H.; NAZEER, A. Diagnosing irrigation performance and water productivity through satellite remote sensing and secondary data in a large irrigation system of Pakistan. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 551-564, 2009.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; PAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 328 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARAÚJO, N.C. **Cana-de-açúcar: resposta técnica**. 2006. Disponível em: <<http://www.agrobyte.com.br/cana.htm>>. Acesso em: 04 ago. 2010.
- BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1981. 82 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.
- _____. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 142 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.
- BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979. Mossoró. **Anais...** Mossoró: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1979. p. 6-8.
- BARBOSA, E.A.A. **Fertirrigação e aplicação de vinhaça via gotejamento subsuperficial na produção de cana-de-açúcar**. 2010. 91 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produção Agrícola) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2010.
- BARBOSA, E.A.A.; PIRES, R.C.M.; SILVA, A.T.J.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E. Efeito da fertirrigação por gotejamento subsuperficial e do espaçamento na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro. **Anais**. Juazeiro: SBEA, 2009. 1 CD-ROM.
- BARLOW, E.W.R.; MUNNS, R.E.; BRADY, L.J. Drought responses of apical meristems. In: TURNER, N.C.; KRAMER, P.J. (Ed.). **Adaptation of plants to water and high temperature stress**. New York: Wiley, 1980. p. 191-205.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; BRITO, R.A.L.; BOS, M.G.; SOUZA, R.A.; CAVALCANTI, E.B.; BAKKER, M.M. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. **Irrigation Drainage System**, Amsterdam, v. 15, p. 53-79, 2001.
- BASTOS, E.A.; FOLEGATTI, M.V.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; CARDOSO, M.J.; FARIA, R.T. Manejo econômico da irrigação de feijão-caupi via modelo de simulação. **Irriga**, Botucatu, v. 5, n. 2, p.84-98, 2000.

BERNARDO, S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. **Alcoolbrás**, São Paulo, n. 106, p. 72-80, out. 2006.

BOS, M.G.; BURTON, M.A.; MOLDEN, D.J. Performance indicators for irrigation and drainage, In: _____. **Irrigation and drainage performance assessment, practical guidelines**. Cambridge: CABI Publ., 2005. p. 26-61.

BOS, M.G.; MURRAY-RUST, D.H.; MERREY, D.J.; JOHNSON, H.G.; SNELLEN, W.B. Methodologies for assessing performance of irrigation and drainage management. **Irrigation and Drainage Systems**, Amsterdam, v. 5, p. 231-261, 1994.

BRITO, F.L.; ROLIM, M.M.; PEDROSA, E.M.R. Teores de potássio e sódio no lixiviado e em solos após a aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, p. 52-56, 2005. Suplemento.

BUI, W.; KINOSHITA, C.M. Has drip irrigation in Hawaii lived up to expectations? In: INTERNATIONAL DRIP/TRICKLE IRRIGATION CONGRESS, 3., 1985, Fresno. **Proceedings...** Fresno: American Society of Agricultural Engineers, 1985. p. 84-89.

BULL, T.A.; GLASZIOU, K.T. Sugarcane. In: EVANS, L.T. (Ed.). **Crop physiology some case histories**. Cambridge: Cambridge University Press, 1975. p. 51-72.

CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; GERALDI, R.N. **Características químicas e físicas de solo que recebeu vinhaça por longo tempo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 30 p. (IAC. Boletim, 76).

CARNAUBA, B.A.A. O nitrogênio e a cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 8, n. 3/4, p. 24-41, jan./abr. 1990.

COELHO, M.B.; AZEVEDO, H.J. Utilização de vinhaça na irrigação da cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 4, n. 5, p. 49-52, maio/jun. 1986.

COELHO, R.D.; LELIS NETO, J.A.; BARROS, A.C. Cana irrigada produz mais, mas custo de produção aumenta. In: FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrianual 2009: anuário da agricultura brasileira**. São Paulo, 2009. p. 240-242.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica: P4.231**. São Paulo, 2015. 14 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2013/2014: terceiro levantamento**. Brasília, 2013. 15 p.

COSTA, V.M. Irrigação em cana-de-açúcar: uma realidade ainda oculta no Brasil. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 30, n. 2, p. 15-17, nov./dez. 2011.

CURE, J. D. Carbon dioxide doubling response: a crop survey. In: STRAIN, B.R.; CURE, J.D. (Ed.). **Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation**. Washington: U.S. Department of Energy, Carbon Dioxide Research Division, 1985. p. 99-116.

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, jul./set. 2008.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Efeito da frequência de irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 1, p. 29, 2002.

DA SILVA, C.T.S.; AZEVEDO, H.M. de; AZEVEDO, C.A.V. de; DANTAS NETO, J.; CARVALHO, C.M. de; GOMES FILHO, R.R. Crescimento da cana-de-açúcar com e sem irrigação complementar sob diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 3, n. 1, p. 3-12, 2013.

DETAR, W.R. Yield and growth characteristics for cotton under various irrigation regimes on sandy soil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 69-76, 2008.

DI PAOLO, E.D.; RINALDI, M. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 105, p. 202-210, 2008.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.). **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool; tecnologias e perspectivas**. Viçosa, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de H.R. Gheyi et al. Campina Grande: FAO, 1994. 306 p. (FAO. Irrigação e Drenagem, 33).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, SPI, 2006. 306 p.

ESPIRONELLO, A.; CAMARAGO, A.P.; NAGAI, V.; LEPSCH, I.F. Efeitos de nitrogênio e fosforo como complementação de vinhaça em soca de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇÚCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 2., 1981, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: STAB. 1981. p. 128-139.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, A.H. **La canã de azucar**. Barcelona: Blume, 1975. 433 p.

FARIA, M.A.; REZENDE, F.C. **Cafeicultura empresarial: produtividade e qualidade; irrigação na cafeicultura**. Lavras: UFLA, FAEPE, 1997. 110 p. (Curso de Especialização *Lato Sensu* por Tutoria a Distância).

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J. 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, p. 356-362, 2008.

FARONI, C.E. **Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 68 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1007-1013, 2006.

FREIRE, W.J.; CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p.

FRIZZONE, J.A.; Análise de custos de sistemas de recalque de água. In: **Análise de decisão econômica em irrigação**. Série didática nº 17. Piracicaba, 2011. Cap. 5.

FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; FREITAS, H.A.C. Análise comparativa dos custos de irrigação por pivô-central, em culturas de feijão, utilizando energia elétrica e óleo diesel. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.5, n.1, p.34-53, jul. 1994.

FRIZZONE, J.A.; MATIOLI, C.S.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A.G. Viabilidade econômica da irrigação suplementar da cana-de-açúcar *Saccharum spp.*, para a região Norte do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1131-1137, 2001.

GARCIA, J.C. Efeitos da adubação orgânica, associada ou não à adubação química, calagem e fosfatagem, nos rendimentos agrícola e de aguardente teórica da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). 2014.

GILBERT, R.A.; SHINE JR., J.M.; MILLER, J.D.; RAINBOLT, C.R. The effect genotype, environmental and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 95, p. 156-170, 2006.

GLÓRIA, N.A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação da vinhaça como fertilizante. **Boletim Técnico do PLANALSUCAR**, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 5-38, 1983.

GOES, T.; MARRA, R. **A expansão da cana-de-açúcar e sua sustentabilidade**. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2008/A%20expansao%20da%20cana-de-acucar%20e%20a%20sua%20sustentabilidade.pdf>>. Acesso em: 03 set. 2013.

HERNANDEZ, F.B.T. Irrigação aumenta produtividade e qualidade da cana. **Revista Campo e Negócio**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 78-79, abr. 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <<http://ibge.gov.br>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

IGBADUN, H.E.; MAHOO, H.F.; TARIMO, A.K.P.R.; BAANDA, A.S. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 85, p. 141-150, 2006.

IGLESIAS, E.; GARRIDO, A.; GÓMEZ-RAMOS, A. Evaluation of drought management in irrigated areas. **Agricultural Economics**, Washington, v. 29, n. 2, p. 211-229, Oct. 2003.

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

INMAN-BAMBER, N.G.; MCGLINCHEY, M.G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 83, p. 125-138, 2003.

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

INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. **Efficient use of water resources in sugar production**: a physiological basis for crop response to water supply. Aitken vale: CSIRO Tropical Agriculture, 1999. 38 p.

JAMES, G. **Sugarcane**. 2nd ed. Oxford: Blackwell, 2004. 216 p.

KAHLOWN, M.A.; RAOOF, A.; ZUBAIR, M.; KEMPER, W.D. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 87, p. 292-298, 2007.

KARATAS, B.S.; AKKUZU, E.; UNAL, H.B.; ASIK, S.; AVCI, M. Using satellite remote sensing to assess irrigation performance in water user associations in the lower Gediz Basin, Turkey. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 982-990, 2009.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

KIMBALL, B.A.; IDSO, S.B. Increasing atmospheric CO₂: effects on crop yield, water use and climate. **Agriculture and Water Management**, Connecticut, v. 7, p. 55-72, 1983.

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

LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production**: design, operation and management. Amsterdam: Elsevier, 2007. 618 p.

LÓPEZ, C.C. (Coord.) **Fertirrigacion**: cultivos horticolas y ornamentales. Barcelona: Mundi-Prensa, 1998. 475 p.

MAGALHÃES, A.C.N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo de carbono na planta. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Coord.). **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 113-118.

MAGALHÃES, V.R. **Influência de doses de vinhaça nas características agronômicas de variedades de cana-de-açúcar, cana planta e atributos químicos do solo**. 2010. 89 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, 2010.

MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J. Cana de açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. p. 111-130.

MATIOLI, C.S. **Irrigação suplementar da cana-de-açúcar: modelo de análise de decisão para o Estado de São Paulo**. 1998. 122 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

MATIOLI, C.S.; PERES, F.C.; FRIZZONE, J.A. Análise de decisão sobre a viabilidade da irrigação suplementar de cana-de-açúcar colhida no mês de julho na região de Ribeirão Preto - SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25., CONGRESSO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA AGRÍCOLA, 2., 1996, Bauru. **Resumos...** Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. p. 386.

MEDEIROS, S.C.L.; RIBEIRO, S.R.; CONEGLIAN, C.M.R.; BARROS, R.M.; BRITO, N.N.; DRAGONI SOBRINHO, G.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. Impactos da agroindústria canavieira sobre o meio ambiente. In: FÓRUM DE ESTUDOS CONTÁBEIS, 3., 2003, Rio Claro. **Anais...** Rio Claro: UNICAMP, 2003. 1 CD-ROM.

MELO, A.S.S.A.; SILVA, M.P. **Estimando o valor da “externalidade positiva” do uso da vinhaça na produção de cana-de-açúcar: um estudo de caso**. Disponível em: <http://www.ecoeco.org.br/pdf/e4_m4_a2.pdf>. Acesso em: 01 set. 2010.

MILLAR, A.A. **Manejo racional da irrigação: uso de informações básicas sobre diferente culturas**. Brasília: Instituto Interamericano de Cooperação para Agricultura, 1984. 57 p. (Série Publicações Miscelâneas, 461)

MOLDEN, D.J.; SAKTHIVADIVEL, R.; PERRY, C.J.; FRAITURE, C.; KLOEZEN, W.H. **Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems**. Sri Lanka: International Water Management Institute, 1998. 34 p.

MOONEY, H.A.; CANADELL, J.; CHAPIN, F.S.; EHLERINGER, J.R.; KÖRNER, C.; McMURTIE, R.E.; ARTON, W.J.; PITELKA, L.F.; SCHULZE, E.D. Ecosystem physiology responses to global change. In: _____. **The terrestrial biosphere global change**. London: Cambridge University Press, 1999. p. 141-189.

MORISON, J.I.L. Intercellular CO₂ concentration and stomata response to CO₂. In: ZEIGER, E.; FARQUHAR, G.D.; COWAN, I.R. (Ed.). **Stomata function**. Stanford: Stanford University, 1987. p. 229-251.

NOGUEIRA, C.C.P.; COELHO, E.F.; LEÃO, M.C.S. Características e dimensões do volume de um solo molhado sob gotejamento superficial e subsuperficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 315-320, 2000.

PARK, S.E.; ROBERTSON, M.; INMAN-BAMBER, N.G. Decline in the growth of a sugarcane crop with age under high input conditions. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 92, p. 305-320, 2005.

PAULA, M.B.; HOLANDA, F.S.R.; MESQUITA, H.A.; CARVALHO, V.D. Uso da vinhaça no abacaxizeiro em solo de baixo potencial de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 7, p. 1217-1222, 1999.

PENATTI, C.P.; ARAÚJO, J.V.; FORTI, J.A.; RIBEIRO, R. Efeitos da aplicação de vinhaça e nitrogênio na soqueira da cana-de-açúcar. **Boletim Técnico COPERSUCAR**, São Paulo, v. 44, p. 32-38, 1988.

POORTER, H.; PÉREZ-SOBA, M. Plant growth at elevated CO₂. In: _____. **Encyclopedia of global environmental change**. Chichester: John Wiley, 2002. p. 489-496.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1996. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiological analysis of early season deficit and sugarcane productivity. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 64, p. 211-227, 1999.

ROCHA, F.J. **Desenvolvimento e produtividade de cana-de-açúcar submetida a diferentes doses de vinhaça**. 95 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: Instituto de Biociência, 1995. 101 p. Apostila.

RODRIGUEZ, F. Custos e benefícios da irrigação no Brasil. **ITEM: Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 41, p. 6-11, 1990.

SANTOS, D.H.; TIRITAN, C.S.; FOLONI, J.S.S. Efeito residual da adubação fosfatada e torta de filtro na brotação de soqueiras de cana-de-açúcar. **Agrarian**, Dourados, v. 5, n. 15, p. 1-6, 2012.

SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar, In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 19-36.

SILVA, A.L.; FARIA, M.A.; REIS, R.P. Viabilidade técnico-econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 34-74, 2003.

SILVA, G.M.A.; CASTRO, L.J.P. de; SANCHES, A.C.; GUIMARÃES, E.; GURGEL, M.N.A. Efeitos da aplicação da vinhaça como fertilizante em cana-de-açúcar. **Boletim Técnico COOPERSUCAR**, São Paulo, n. 7, p. 9-14, nov. 1978.

SOARES, J.M.; VIEIRA, V.J.D.S.; GOMES JÚNIOR, W.F.; ARAÚJO FILHO, A. A. Agrovale, uma experiência de 25 anos em irrigação da cana-de-açúcar na região do submédio São Francisco. **ITEM: Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 60, p. 55-64, 2003.

SOUZA, A.P. **A cana-de-açúcar e as mudanças climáticas**: efeitos de uma atmosfera enriquecida em CO₂ sobre o crescimento, desenvolvimento e metabolismo de carboidratos de *Saccharum spp*. 2007. 85 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular e Estrutural) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 3rd ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. 798 p.

TEJERA, N.A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 102, p. 64-72, 2007.

THOMPSON, G.D. Water use by sugarcane. **The South African Sugar Journal**, Durban, v. 60, n. 11, p. 592-600, 1976.

van GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**: version 1.0. Riverside: USDA, ARS, Salinity Laboratory, 1991. 93 p. (EPA Report, 600/2-91/065).

WARRICK, R.A. Carbon dioxide, climatic change and agriculture. **The Geographical Journal**, Oxford, v. 154, n. 2, p. 221-233, 1988.

WATANABE, K.; YAMAMOTO, T.; TAKASHI YAMADA, L. Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 67, p. 133-143, 2004.

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

_____. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 64, p. 169-181, 2004.

ANEXOS

Anexo A - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à clorofila a em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	216DAP	236DAP	250DAP	265DAP
216DAP (Pr>F)	1,0000	-	-	-
236DAP (Pr>F)	-0,3578 (0,1325)	1,0000	-	-
250DAP (Pr>F)	0,2338 (0,3352)	0,2019 (0,4070)	1,0000	-
265DAP (Pr>F)	0,2510 (0,2999)	0,5273 (0,0203)	0,7175 (0,0005)	1,0000

Anexo B - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à clorofila b em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	216DAP	236DAP	250DAP	265DAP
216DAP (Pr>F)	1,0000	-	-	-
236DAP (Pr>F)	-0,3382 (0,1566)	1,0000	-	-
250DAP (Pr>F)	-0,1538 (0,5295)	0,0047 (0,9845)	1,0000	-
265DAP (Pr>F)	0,0557 (0,8206)	0,1757 (0,4717)	0,8592 (<,0001)	1,0000

Anexo C - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à clorofila total em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	216DAP	236DAP	250DAP	265DAP
216DAP (Pr>F)	1,0000	-	-	-
236DAP (Pr>F)	-0,3915 (0,0973)	1,0000	-	-
250DAP (Pr>F)	0,0093 (0,9697)	0,0546 (0,8242)	1,0000	-
265DAP (Pr>F)	0,1614 (0,5092)	0,3179 (0,1847)	0,8170 (<,0001)	1,0000

Anexo D - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à altura de planta (m) em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	210DAP	230DAP	244DAP	258DAP	272DAP	293DAP
210DAP (Pr>F)	1,0000	-	-	-	-	-
230DAP (Pr>F)	0,9319 (<,0001)	1,0000	-	-	-	-
244DAP (Pr>F)	0,7783 (<,0001)	0,7546 (0,0002)	1,0000	-	-	-
258DAP (Pr>F)	0,9061 (<,0001)	0,9305 (<,0001)	0,8227 (<,0001)	1,0000	-	-
272DAP (Pr>F)	0,6359 (0,0034)	0,7408 (0,0003)	0,5455 (0,0157)	0,6605 (0,0021)	1,0000	-
293DAP (Pr>F)	0,5918 (0,0076)	0,7146 (0,0006)	0,4335 (0,0637)	0,6413 (0,0031)	0,9370 (<,0001)	1,0000

Anexo E - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à diâmetro de colmo (mm) em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	210DAP	230DAP	244DAP	258DAP	272DAP	293DAP
210DAP (Pr>F)	1,0000	-	-	-	-	-
230DAP (Pr>F)	0,7379 (0,0003)	1,0000	-	-	-	-
244DAP (Pr>F)	0,8665 (<,0001)	0,8796 (<,0001)	1,0000	-	-	-
258DAP (Pr>F)	0,8360 (<,0001)	0,9347 (<,0001)	0,9049 (<,0001)	1,0000	-	-
272DAP (Pr>F)	0,4860 (0,0348)	0,7525 (0,0002)	0,6729 (0,0016)	0,7518 (0,0002)	1,0000	-
293DAP (Pr>F)	0,5567 (0,0133)	0,3308 (0,1665)	0,4915 (0,0326)	0,3897 (0,0990)	0,2943 (0,2213)	1,0000

Anexo F - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à distância entre internódios (cm) em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	210DAP	230DAP	244DAP	258DAP	272DAP	293DAP
210DAP (Pr>F)	1,0000	-	-	-	-	-
230DAP (Pr>F)	1,0000 (<,0001)	1,0000	-	-	-	-
244DAP (Pr>F)	0,3530 (0,1381)	0,3530 (0,1381)	1,0000	-	-	-
258DAP (Pr>F)	-0,0192 (0,9376)	-0,0192 (0,9376)	0,2239 (0,3566)	1,0000	-	-
272DAP (Pr>F)	0,3799 (0,1086)	0,3799 (0,1086)	0,4367 (0,0615)	0,5065 (0,0269)	1,0000	-
293DAP (Pr>F)	-0,0538 (0,8266)	-0,0538 (0,8266)	0,2459 (0,3101)	0,3202 (0,1814)	0,4796 (0,0377)	1,0000

Anexo G - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à largura de limbo foliar (cm) em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	210DAP	230DAP	244DAP	258DAP	272DAP	293DAP
210DAP (Pr>F)	1,0000	-	-	-	-	-
230DAP (Pr>F)	0,7794 (<,0001)	1,0000	-	-	-	-
244DAP (Pr>F)	0,6609 (0,0021)	0,6455 (0,0028)	1,0000	-	-	-
258DAP (Pr>F)	0,4132 (0,0786)	0,1116 (0,6491)	0,2858 (0,2355)	1,0000	-	-
272DAP (Pr>F)	0,3243 (0,1754)	-0,0134 (0,9565)	0,2807 (0,2443)	0,6960 (0,0009)	1,0000	-
293DAP (Pr>F)	0,1403 (0,5665)	0,0099 (0,9676)	0,2317 (0,3397)	0,4413 (0,0585)	0,3834 (0,1052)	1,0000

Anexo H - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à comprimento de limbo foliar (m) em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	210DAP	230DAP	244DAP	258DAP	272DAP	293DAP
210DAP (Pr>F)	1,0000	-	-	-	-	-
230DAP (Pr>F)	0,4579 (0,0486)	1,0000	-	-	-	-
244DAP (Pr>F)	0,5070 (0,0267)	0,8641 (<,0001)	1,0000	-	-	-
258DAP (Pr>F)	0,6905 (0,0011)	0,0911 (0,7107)	0,2340 (0,3349)	1,0000	-	-
272DAP (Pr>F)	0,4456 (0,0559)	0,2715 (0,2607)	0,4123 (0,0794)	0,6994 (0,0009)	1,0000	-
293DAP (Pr>F)	0,1880 (0,4407)	0,1742 (0,4755)	0,3522 (0,1391)	0,0581 (0,8130)	-0,1027 (0,6755)	1,0000

Anexo I - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à número de colmos em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	210DAP	230DAP	244DAP	258DAP	272DAP	293DAP
210DAP (Pr>F)	1,0000	-	-	-	-	-
230DAP (Pr>F)	-0,2001 (0,4114)	1,0000	-	-	-	-
244DAP (Pr>F)	0,4346 (0,0630)	0,0886 (0,7182)	1,0000	-	-	-
258DAP (Pr>F)	0,3523 (0,1390)	0,2668 (0,2695)	0,6162 (0,0050)	1,0000	-	-
272DAP (Pr>F)	0,5401 (0,0170)	0,3059 (0,2027)	0,5751 (0,0100)	0,6048 (0,0061)	1,0000	-
293DAP (Pr>F)	0,4120 (0,0796)	0,2098 (0,3885)	0,3867 (0,1019)	0,3707 (0,1181)	0,6778 (0,0014)	1,0000

Anexo J - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à número de folhas em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	210DAP	230DAP	244DAP	258DAP	272DAP	293DAP
210DAP (Pr>F)	1,0000	-	-	-	-	-
230DAP (Pr>F)	0,2668 (0,2693)	1,0000	-	-	-	-
244DAP (Pr>F)	0,2950 (0,2201)	0,3725 (0,1162)	1,0000	-	-	-
258DAP (Pr>F)	0,0542 (0,8256)	0,1231 (0,6154)	0,1647 (0,5002)	1,0000	-	-
272DAP (Pr>F)	-0,5074 (0,0266)	0,1028 (0,6752)	0,0485 (0,8437)	0,2094 (0,3895)	1,0000	-
293DAP (Pr>F)	-0,2719 (0,2600)	0,1080 (0,6598)	-0,0518 (0,8329)	0,0809 (0,7419)	0,6158 (0,0050)	1,0000

Anexo K - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à número de perfilhos em cana-de-açúcar planta, variedade CTC 15 (2013-2014)

Tempos	210DAP	244DAP	272DAP
210DAP (Pr>F)	1,0000	-	-
244DAP (Pr>F)	0,5525 (0,0141)	1,0000	-
272DAP (Pr>F)	0,5152 (0,0239)	0,5656 (0,0116)	1,0000

Anexo L - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à clorofila *a* em cana-de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	60DAC	77DAC	90DAC	105DAC	120DAC	135DAC	150DAC	165DAC	180DAC	195DAC
60DAC (Pr>F)	1,0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77DAC (Pr>F)	0,0517 (0,8335)	1,0000	-	-	-	-	-	-	-	-
90DAC (Pr>F)	-0,0206 (0,9333)	0,0239 (0,9225)	1,0000	-	-	-	-	-	-	-
105DAC (Pr>F)	-0,1302 (0,5952)	-0,0997 (0,6844)	0,6406 (0,0031)	1,0000	-	-	-	-	-	-
120DAC (Pr>F)	-0,2834 (0,2396)	-0,3489 (0,1431)	-0,1628 (0,5052)	-0,0203 (0,9341)	1,0000	-	-	-	-	-
135DAC (Pr>F)	-0,2365 (0,3295)	0,3827 (0,1058)	0,2071 (0,3948)	0,1064 (0,6646)	-0,2006 (0,4101)	1,0000	-	-	-	-
150DAC (Pr>F)	-0,2022 (0,4064)	-0,1068 (0,6634)	-0,0755 (0,7586)	0,1061 (0,6653)	0,3324 (0,1644)	-0,1298 (0,5962)	1,0000	-	-	-
165DAC (Pr>F)	0,1917 (0,4315)	-0,0557 (0,8206)	0,4668 (0,0439)	0,2764 (0,2519)	-0,1185 (0,6288)	0,0087 (0,9715)	-0,0015 (0,9951)	1,0000	-	-
180DAC (Pr>F)	0,3668 (0,1223)	0,1848 (0,4486)	0,2862 (0,2349)	0,0818 (0,7391)	-0,4592 (0,0479)	0,1237 (0,6137)	-0,2568 (0,2885)	-0,2493 (0,3033)	1,0000	-
195DAC (Pr>F)	-0,0724 (0,7681)	-0,1623 (0,5065)	0,1700 (0,4863)	0,1537 (0,5297)	0,1565 (0,5223)	0,4546 (0,0505)	0,0850 (0,7293)	0,0556 (0,8209)	0,0427 (0,8621)	1,0000

Anexo M - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à clorofila *b* em cana-de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	60DAC	77DAC	90DAC	105DAC	120DAC	135DAC	150DAC	165DAC	180DAC	195DAC
60DAC (Pr>F)	1,0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77DAC (Pr>F)	0,0493 (0,8411)	1,0000	-	-	-	-	-	-	-	-
90DAC (Pr>F)	0,1945 (0,4247)	0,3013 (0,2099)	1,0000	-	-	-	-	-	-	-
105DAC (Pr>F)	-0,1350 (0,5813)	-0,0802 (0,7441)	0,4538 (0,0510)	1,0000	-	-	-	-	-	-
120DAC (Pr>F)	-0,0177 (0,9426)	-0,0465 (0,8499)	0,3388 (0,1559)	0,2796 (0,2463)	1,0000	-	-	-	-	-
135DAC (Pr>F)	0,1442 (0,5558)	-0,0557 (0,8206)	0,3526 (0,1386)	-0,0333 (0,8920)	0,1179 (0,6307)	1,0000	-	-	-	-
150DAC (Pr>F)	0,3202 (0,1814)	0,0320 (0,8965)	0,0256 (0,9171)	0,0479 (0,8453)	0,4929 (0,0320)	-0,2871 (0,2332)	1,0000	-	-	-
165DAC (Pr>F)	-0,3551 (0,1357)	0,0757 (0,7580)	0,3082 (0,1991)	0,4387 (0,0602)	0,1982 (0,4158)	0,0049 (0,9839)	-0,0596 (0,8084)	1,0000	-	-
180DAC (Pr>F)	0,0807 (0,7425)	0,1784 (0,4649)	-0,0229 (0,9255)	0,1535 (0,5303)	-0,1976 (0,4172)	0,2439 (0,3142)	-0,1904 (0,4349)	-0,1512 (0,5366)	1,0000	-
195DAC (Pr>F)	-0,1430 (0,5591)	0,0935 (0,7034)	0,2260 (0,3520)	0,2188 (0,3681)	0,1111 (0,6504)	-0,1822 (0,4552)	0,2801 (0,2453)	0,1193 (0,6264)	0,1236 (0,6141)	1,0000

Anexo N - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à clorofila *total* em cana-de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	60DAC	77DAC	90DAC	105DAC	120DAC	135DAC	150DAC	165DAC	180DAC	195DAC
60DAC (Pr>F)	1.0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77DAC (Pr>F)	0.1089 (0.6572)	1.0000	-	-	-	-	-	-	-	-
90DAC (Pr>F)	0.0860 (0.7262)	0.1634 (0.5039)	1.0000	-	-	-	-	-	-	-
105DAC (Pr>F)	-0.1443 (0.5555)	-0.0903 (0.7131)	0.5922 (0.0075)	1.0000	-	-	-	-	-	-
120DAC (Pr>F)	-0.1819 (0.4560)	-0.2111 (0.3855)	0.0686 (0.7801)	0.1454 (0.5523)	1.0000	-	-	-	-	-
135DAC (Pr>F)	-0.1465 (0.5494)	0.1969 (0.4189)	0.2149 (0.3769)	0.0565 (0.8182)	-0.0864 (0.7251)	1.0000	-	-	-	-
150DAC (Pr>F)	0.0103 (0.9664)	-0.0763 (0.7560)	-0.0503 (0.8378)	0.0803 (0.7436)	0.4868 (0.0345)	-0.3288 (0.1693)	1.0000	-	-	-
165DAC (Pr>F)	-0.1401 (0.5672)	0.0330 (0.8931)	0.4394 (0.0597)	0.3456 (0.1472)	0.0622 (0.8002)	0.0544 (0.8248)	-0.0264 (0.9146)	1.0000	-	-
180DAC (Pr>F)	0.2984 (0.2146)	0.2805 (0.2447)	0.2247 (0.3548)	0.1030 (0.6748)	-0.4020 (0.0879)	0.2502 (0.3014)	-0.2173 (0.3713)	-0.2448 (0.3124)	1.0000	-
195DAC (Pr>F)	-0.2316 (0.3399)	-0.0933 (0.7038)	0.3187 (0.1835)	0.2374 (0.3276)	0.2101 (0.3879)	0.2334 (0.3361)	0.1944 (0.4250)	0.1293 (0.5976)	0.0611 (0.8036)	1.0000

Anexo O - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à altura de planta (m) em cana-de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	90DAC	105DAC	120DAC	135DAC	150DAC	165DAC	180DAC	195DAC
90DAC	1,0000							
(Pr>F)		-	-	-	-	-	-	-
105DAC	0,8679	1,0000						
(Pr>F)	(<,0001)		-	-	-	-	-	-
120DAC	0,7924	0,9480	1,0000					
(Pr>F)	(<,0001)	(<,0001)		-	-	-	-	-
135DAC	0,6169	0,7863	0,8407	1,0000				
(Pr>F)	(0,0049)	(<,0001)	(<,0001)		-	-	-	-
150DAC	0,7576	0,8465	0,8923	0,7805	1,0000			
(Pr>F)	(0,0002)	(<,0001)	(<,0001)	(<,0001)		-	-	-
165DAC	0,7114	0,7856	0,8161	0,7077	0,9235	1,0000		
(Pr>F)	(0,0006)	(<,0001)	(<,0001)	(0,0007)	(<,0001)		-	-
180DAC	0,7944	0,7579	0,7700	0,6785	0,8754	0,9490	1,0000	
(Pr>F)	(<,0001)	(0,0002)	(0,0001)	(0,0014)	(<,0001)	(<,0001)		-
195DAC	0,6292	0,6101	0,6892	0,7331	0,8043	0,8198	0,8380	1,0000
(Pr>F)	(0,0039)	(0,0055)	(0,0011)	(0,0004)	(<,0001)	(<,0001)	(<,0001)	

Anexo P - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à diâmetro de colmo (mm) em cana-de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	135DAC	150DAC	165DAC	180DAC	195DAC
135DAC	1,0000				
(Pr>F)		-	-	-	-
150DAC	0,4053	1,0000			
(Pr>F)	(0,1065)		-	-	-
165DAC	0,2143	0,7415	1,0000		
(Pr>F)	(0,4088)	(0,0007)		-	-
180DAC	0,2774	0,7815	0,7964	1,0000	
(Pr>F)	(0,2810)	(0,0002)	(0,0001)		-
195DAC	0,3128	0,6183	0,6306	0,7049	1,0000
(Pr>F)	(0,2215)	(0,0082)	(0,0066)	(0,0016)	

Anexo Q - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à distância entre internódios (cm) em cana-de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	135DAC	150DAC	165DAC	180DAC	195DAC
135DAC	1,0000				
(Pr>F)		-	-	-	-
150DAC	0,5259	1,0000			
(Pr>F)	(0,0301)		-	-	-
165DAC	0,0140	0,2541	1,0000		
(Pr>F)	(0,9572)	(0,3249)		-	-
180DAC	0,0332	0,2742	0,3087	1,0000	
(Pr>F)	(0,8991)	(0,2868)	(0,2279)		-
195DAC	0,2125	0,5246	0,2269	0,1630	1,0000
(Pr>F)	(0,4128)	(0,0306)	(0,3811)	(0,5318)	

Anexo R - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à largura de limbo foliar (cm) em cana-de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	90DAC	105DAC	120DAC	135DAC	150DAC	165DAC	180DAC	195DAC
90DAC	1,0000							
(Pr>F)		-	-	-	-	-	-	-
105DAC	0,4442	1,0000						
(Pr>F)	(0,0567)		-	-	-	-	-	-
120DAC	0,4089	0,6762	1,0000					
(Pr>F)	(0,0821)	(0,0015)		-	-	-	-	-
135DAC	0,2379	0,3296	0,7003	1,0000				
(Pr>F)	(0,3267)	(0,1681)	(0,0008)		-	-	-	-
150DAC	0,0020	0,2120	0,4534	0,6021	1,0000			
(Pr>F)	(0,9934)	(0,3834)	(0,0512)	(0,0064)		-	-	-
165DAC	0,1449	0,2355	0,5649	0,4756	0,4228	1,0000		
(Pr>F)	(0,5538)	(0,3316)	(0,0117)	(0,0396)	(0,0713)		-	-
180DAC	0,1536	0,2673	0,6289	0,5416	0,4340	0,6258	1,0000	
(Pr>F)	(0,5300)	(0,2685)	(0,0039)	(0,0166)	(0,0633)	(0,0042)		-
195DAC	0,0518	0,1741	0,4446	0,5712	0,4553	0,5149	0,6818	1,0000
(Pr>F)	(0,8330)	(0,4757)	(0,0564)	(0,0106)	(0,0501)	(0,0241)	(0,0013)	

Anexo S - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à comprimento de limbo foliar (m) em cana - de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	90DAC	105DAC	120DAC	135DAC	150DAC	165DAC	180DAC	195DAC
90DAC	1,0000	-	-	-	-	-	-	-
(Pr>F)								
105DAC	0,7091	1,0000	-	-	-	-	-	-
(Pr>F)	(0,0007)							
120DAC	0,6789	0,7230	1,0000	-	-	-	-	-
(Pr>F)	(0,0014)	(0,0005)						
135DAC	0,6727	0,4075	0,8391	1,0000	-	-	-	-
(Pr>F)	(0,0016)	(0,0833)	(<,0001)					
150DAC	0,3458	0,2666	0,5229	0,6332	1,0000	-	-	-
(Pr>F)	(0,1469)	(0,2699)	(0,0216)	(0,0036)				
165DAC	0,1847	0,2679	0,4037	0,3235	0,3511	1,0000	-	-
(Pr>F)	(0,4489)	(0,2674)	(0,0865)	(0,1767)	(0,1404)			
180DAC	0,5051	0,6847	0,7708	0,6573	0,4390	0,4797	1,0000	-
(Pr>F)	(0,0274)	(0,0012)	(0,0001)	(0,0022)	(0,0600)	(0,0376)		
195DAC	0,4583	0,4816	0,5731	0,3885	0,2488	0,4481	0,6029	1,0000
(Pr>F)	(0,0484)	(0,0368)	(0,0103)	(0,1002)	(0,3043)	(0,0543)	(0,0063)	

Anexo T - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à número de colmos em cana-de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	135DAC	150DAC	165DAC	180DAC	195DAC
135DAC	1,0000	-	-	-	-
(Pr>F)					
150DAC	0,4096	1,0000	-	-	-
(Pr>F)	(0,1151)				
165DAC	-0,2860	-0,1523	1,0000	-	-
(Pr>F)	(0,2828)	(0,5732)			
180DAC	-0,2702	0,1660	0,4947	1,0000	-
(Pr>F)	(0,3114)	(0,5388)	(0,0514)		
195DAC	0,0831	0,4428	0,4793	0,4157	1,0000
(Pr>F)	(0,7595)	(0,0858)	(0,0603)	(0,1093)	

Anexo U - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à número de folhas em cana-de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	90DAC	105DAC	120DAC	135DAC	150DAC	165DAC	180DAC	195DAC
90DAC (Pr>F)	1,0000	-	-	-	-	-	-	-
105DAC (Pr>F)	0,1367 (0,5766)	1,0000	-	-	-	-	-	-
120DAC (Pr>F)	0,0000 (,)	0,3706 (0,1183)	1,0000	-	-	-	-	-
135DAC (Pr>F)	0,0754 (0,7589)	0,3817 (0,1068)	0,4905 (0,0330)	1,0000	-	-	-	-
150DAC (Pr>F)	0,3796 (0,1089)	0,0000 (,)	-0,3086 (0,1986)	0,0662 (0,7876)	1,0000	-	-	-
165DAC (Pr>F)	0,0632 (0,7969)	-0,1601 (0,5126)	-0,2057 (0,3981)	-0,1766 (0,4695)	0,3888 (0,0999)	1,0000	-	-
180DAC (Pr>F)	0,0335 (0,8915)	-0,2830 (0,2403)	0,1091 (0,6566)	0,2341 (0,3346)	0,2946 (0,2208)	0,3142 (0,1901)	1,0000	-
195DAC (Pr>F)	-0,3676 (0,1215)	0,2480 (0,3058)	0,1195 (0,6260)	0,2564 (0,2891)	-0,2581 (0,2858)	0,2151 (0,3764)	0,1369 (0,5762)	1,0000

Anexo V - Correlações residuais entre diferentes tratamentos (matriz R) e respectivos p-valores (entre parênteses), relativos à número de perfilhos em cana-de-açúcar soca, variedade CTC 15 (2014-2015)

Tempos	90DAC	120DAC	150DAC	180DAC
90DAC (Pr>F)	1,0000	-	-	-
120DAC (Pr>F)	-0,3872 (0,1014)	1,0000	-	-
150DAC (Pr>F)	-0,1846 (0,4492)	0,1200 (0,6244)	1,0000	-
180DAC (Pr>F)	0,2593 (0,2836)	0,1589 (0,5158)	0,1667 (0,4952)	1,0000

Anexo W - Análise de regressão em número de colmos, número de folhas e número de perfilhos em cana-planta (2013-2014)

Anexo X - Análises de regressão para número de colmos, número de folhas, número de perfilhos, largura de folhas e clorofila *a* e *b* em cana primeira soca (2014-2015)