

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**EFEITO DO TRÁFEGO AGRÍCOLA NA PRODUTIVIDADE DA
CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* spp.) NOS
ESPAÇAMENTOS 1,4 E 1,5m**

DAVID AUGUSTO PEIXOTO CASIERO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de mestre em Agronomia
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP
Janeiro – 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**EFEITO DO TRÁFEGO AGRÍCOLA NA PRODUTIVIDADE DA
CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* spp.) NOS
ESPAÇAMENTOS 1,4 E 1,5m**

DAVID AUGUSTO PEIXOTO CASIERO

Orientador: Prof. Dr. Kleber Pereira Lanças

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de mestre em Agronomia
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP
Janeiro – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

C339e Casiero, David Augusto Peixoto, 1983-
Efeito do tráfego agrícola na produtividade da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) nos espaçamentos 1,4 e 1,5m / David Augusto Peixoto Casiero. - Botucatu : [s.n.], 2014
x, 87 f. : ils. color., tabs., grafs., fots. color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2014
Orientador: Kleber Pereira Lanças
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar - Espaçamento. 2. Compactação do solo. 3. Máquinas agrícolas. I. Lanças, Kleber Pereira. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "EFEITO DO TRÁFEGO AGRÍCOLA NA PRODUTIVIDADE DA
CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum spp.*) NOS
ESPAÇAMENTOS 1,4 E 1,5m"

ALUNO: DAVID AUGUSTO PEIXOTO CASIERO

ORIENTADOR: PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS

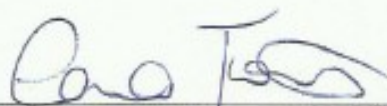
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS



PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE C. CRUSCIOL



PROF. DR. CAIO FORTES

Data da Realização: 31 de janeiro de 2014.

Dedico

A minha querida avó **Maria de Lourdes Fazterra Peixoto** (in memoriam)

Pelo exemplo de vida, amor incondicional,

apoio e inspiração.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, meu protetor.

Ao **Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças** do Departamento de Engenharia Rural da FCA-UNESP, por acreditar no meu trabalho, por ser um orientador dedicado e acolhedor, um exemplo na vida acadêmica e acima de tudo um grande amigo.

Ao amigo **Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol** do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal da FCA-UNESP, por me incentivar a fazer o mestrado e me auxiliar na vida acadêmica e profissional, meu eterno obrigado.

Aos meus pais **Pietro Casiero** e **Maria Eugênia Peixoto Casiero** pela educação, carinho e incentivo dados em todos os momentos da minha vida.

A minha tia **Tereza Cristina Peixoto**, por ser minha mentora em todas as etapas da minha vida e carreira profissional, sendo um exemplo a ser seguido.

Ao meu querido e ilustre avô **Mário Augusto Peixoto** pelo seu exemplo de força, alegria e iluminação, sendo minha eterna fonte de inspiração.

Ao meu irmão **Daniel Augusto Peixoto Casiero**, por sempre estar ao meu lado nos momentos tristes e felizes desta vida.

A minha companheira **Camila Chiaratto Bandeira**, pelo carinho, amor, dedicação e apoio em todos os momentos desta vida.

A **República Pinga Pura** pela adorável convivência.

Ao amigo **Nilceu Piffer Cardozo**, pelo companheirismo e compartilhamento de idéias sobre a dissertação.

Ao amigo **Caio Fortes**, pela sua imensa contribuição na revisão da dissertação, ensinamentos e conselhos dados desde o início da minha carreira profissional.

Aos amigos **Mário Henrique Ferreira do Amaral Dal Pogetto** (Fid Rola), **Guilherme Torres** (Veiaco) e **Felipe Curcelli** (Bitoca), por me ajudar nas análises estatísticas e revisar meus erros.

Aos amigos: **Mateus Varriano**, **Marcelo Pissolatto**, **Augusto Strini Paixão** e **Heitor Ayres** por me ajudar nas amostragens de campo, auxílio na colheita, ou seja, nas tarefas mais árduas do trabalho.

Aos colegas do Centro de Tecnologia Canavieira: **Ivo Francisco Belinasso**, **Marcos Virgílio Casagrande**, **Claudimir Pedro Penatti**, **Fernando César Bertolani** e **José Guilherme Peticarrari** pelo auxílio e amizade.

A **unidade Santa Cândida – Grupo Tonon**, à sua diretoria e gerência por permitirem a instalação do experimento em seu território. Aos colegas **Jorge Fogolin** e **Carlos Tristão** pela valiosa ajuda no planejamento do experimento, desde a escolha da área, e por designarem funcionários e máquinas durante os 4 anos de condução do experimento, sem falar da amizade construída durante esse período.

Aos colegas **NEMPA –Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroflorestais**: **Fabício Campos Masiero**, **Emanuel Rangel Spadim**, **Carlos Renato Guedes Ramos**, **Gabriel Albuquerque de Lyra** e **Indiamara Marasca**, pela apoio e ajuda nas amostragens de solo com a UMAS (Unidade Móvel de Amostragem de Solo).

A todos os funcionários dos Departamentos de Engenharia Rural e Solos e Recursos Ambientais pela atenção, amizade e serviços prestados.

Às secretárias da Seção de Pós-graduação da FCA-UNESP, Câmpus de Botucatu pela atenção e atendimento.

Ao **Centro de Tecnologia Canavieira**, por me dar a oportunidade de fazer o mestrado.

A **Monsanto do Brasil**, em especial ao **Fábio Pereira**, por me apoiar e incentivar a concluir o mestrado.

A todas as pessoas que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
1 RESUMO	III
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 Origem e importância econômica da cana-de-açúcar	7
4.2 Aspectos agronômicos da cana-de-açúcar	9
4.3 Espaçamento de plantio em cana-de-açúcar	11
4.3.1 Efeito do espaçamento de plantio na produtividade	12
4.3.2 Efeito do espaçamento de plantio nas características tecnológicas.	14
4.3.3 Interações entre mecanização, espaçamento de plantio e produtividade.	15
4.4 Atributos do solo cultivado com cana-de-açúcar	17
4.4.1 Compactação do solo.	18
4.4.1.1 Metodologias para avaliação da compactação do solo.....	20
4.4.1.2 Resistência do solo à penetração	22
4.4.2 Densidade do solo.	25
4.4.3 Matéria orgânica.....	26
5 MATERIAL E MÉTODOS	29
5.1 Localização e caracterização edafoclimática da área experimental.....	29
5.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	30
5.3 Caracterização das cultivares de cana-de-açúcar.....	32
5.4 Preparo da área experimental.....	32
5.5 Instalação e condução do experimento	33
5.6 Avaliações.....	34
5.6.1 Balanço hídrico climatológico.	34
5.6.2 Parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar.....	35
5.6.2.1 Pol.....	35
5.6.2.2 Fibra.....	36

5.6.3 Parâmetros de produtividade da cana-de-açúcar.....	36
5.6.3.1 Produtividade de colmos.....	36
5.6.3.2 Produtividade de açúcar.....	38
5.6.4 Atributos do solo.....	38
5.6.4.1 Densidade e índice de cone do solo.....	39
5.6.4.2 Teor de água do solo.....	42
5.6.4.3 Carbono orgânico do solo.....	42
5.7 Análise estatística.....	43
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
6.1 Condições climáticas.....	44
6.2 Parâmetros tecnológicos e de produtividade da cana-de-açúcar.....	45
6.2.1 Produtividade de colmos.....	45
6.2.2 Pol da cana-de-açúcar.....	46
6.2.3 Fibra da cana-de-açúcar.....	47
6.2.4 Produtividade de açúcar.....	49
6.3 Atributos do solo.....	50
6.3.1 Teor de água e índice de cone do solo (IC).....	50
6.3.2 Densidade do solo (Ds).....	54
6.3.3 Carbono orgânico do solo (CO).....	55
6.3.4 Correlações entre os atributos do solo.....	57
7 CONCLUSÕES.....	59
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1. Análise dos atributos do solo nas faixas de profundidade de 0 a 0,2; 0,2 a 0,4 e 0,8 a 1,0m.....	30
2. Análise química do solo nas faixas de profundidade de 0 a 0,2; 0,2 a 0,4 e 0,8 a 1,0m .	30
3. Análise por safra dos valores médios de toneladas de colmos por hectare ($Mg\ ha^{-1}$) entre os espaçamentos de plantio e as cultivares de cana-de-açúcar.....	46
4. Análise por safra dos valores médios de Pol % cana-de-açúcar entre os espaçamentos de plantio e as cultivares de cana-de-açúcar	47
5. Análise por safra dos valores médios de Fibra (%) entre os espaçamentos de plantio e as cultivares de cana-de-açúcar.....	48
6. Análise por safra dos valores médios de toneladas de Pol por hectare (TPH) entre os espaçamentos de plantio e as cultivares de cana-de-açúcar	49
7. Valores médios de teor de água do solo, em $m^3\ m^{-3}$, entre os espaçamentos de plantio e as faixas de profundidade nas posições da linha da cultura e à 0,1m da linha, em paralelo	50
8. Valores médios de teor de água do solo, em $m^3\ m^{-3}$, entre os espaçamentos de plantio e as posições amostrais nas faixas de profundidade de 0 a 0,2m e de 0,2 a 0,4m.....	51
9. Valores médios do índice de cone do solo, em Mpa, entre os espaçamentos de plantio e as faixas de profundidade nas posições da linha da cultura e à 0,1m da linha, em paralelo	52
10. Valores médios do índice de cone do solo, em Mpa, entre os espaçamentos de plantio as posições amostrais nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4m.....	53
11. Valores médios de densidade do solo, em $g\ cm^{-3}$, entre os espaçamentos de plantio e as faixas de profundidade nas posições da linha da cultura e à 0,1m da linha, em paralelo....	54
12. Valores médios de densidade do solo, em $g\ cm^{-3}$, entre os espaçamentos de plantio e as posições amostrais nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4m	55

- 13.** Valores médios de carbono orgânico do solo, em g dm^{-3} , entre os espaçamentos de plantio e as faixas de profundidade nas posições da linha da cultura e à 0,1m da linha, em paralelo 56
- 14.** Valores médios de carbono orgânico do solo, em g dm^{-3} , entre os espaçamentos de plantio e as posições amostrais nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4m..... 57
- 15.** Correlação linear simples de Pearson entre o carbono orgânico, o teor de água, a densidade e o índice de cone do solo nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4m 58

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Efeito do tráfego da colhedora de rodados de esteiras no solo LATOSSOLO VERMELHO, textura muito argilosa sob condições de baixo (A) e alto (B) teor de água	19
2. Perfil esquemático da camada compactada, com os respectivos pontos de amostragem e os valores de densidade do solo em g cm ⁻³	21
3. Perfil do LATOSSOLO VERMELHO distrófico com camada compactada	22
4. Caracterização gráfica da área experimental	31
5. Caracterização por imagem de satélite da área experimental	31
6. Plantio manual das unidades experimentais (A) e desinfecção dos instrumentos de corte (B)	33
7. Colhedora de cana-de-açúcar utilizada no experimento	37
8. Colheita mecânica da cana-de-açúcar durante o experimento	37
9. Visor de identificação de pesagem posicionado dentro da cabine do caminhão transbordo instrumentado	38
10. Posições de amostragem na linha da cultura e 0,1m da linha, em paralelo	39
11. Unidade móvel de amostragem de solo (UMAS) utilizada no experimento	39
12. Penetrômetro hidráulico-eletrônico (A) e o sistema hidráulico-mecânico de retirada de amostras indeformadas (B)	40
13. Disposições dos anéis de amostragem no tubo interno do sistema hidráulico-mecânico	41
14. Componentes do balanço hídrico climatológico dividido em decêndios do município de Bocaina - SP	45

1 RESUMO

Na última década, o setor sucroenergético brasileiro vem intensificando a mecanização de plantio e, principalmente, da colheita. Essa evolução tecnológica fez com que o setor questionasse o espaçamento de plantio adotado em função do aumento da compactação do solo e a diminuição da longevidade do canavial. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do tráfego de máquinas agrícolas na produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar em dois espaçamentos de plantio. O experimento de campo foi conduzido durante quatro safras (2008 à 2012) na usina Santa Cândida, localizada no município de Bocaina - SP. Os tratamentos foram distribuídos seguindo o delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições em esquema fatorial 2 x 3, sendo dois espaçamentos de plantio e três cultivares de cana-de-açúcar. Durante as quatro safras avaliou-se os parâmetros de produtividade (toneladas de colmos e Pol por hectare) e tecnológicos (Pol e fibra da cana-de-açúcar) das cultivares CTC9, RB966928 e RB925211 nos espaçamentos de 1,4 e 1,5m. Após a última safra avaliou-se a densidade, o teor de água, o carbono orgânico e o índice de cone do solo na posição da linha da cultura (LC) e à 0,1m da linha, em paralelo (LP), nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e 0,2 a 0,4m de ambos espaçamentos de plantio. Os resultados mostraram que os valores médios de Pol cana-de-açúcar (%), toneladas de colmos por hectare (TCH) e toneladas de Pol por hectare (TPH) foram semelhantes entre os espaçamentos de plantio nas quatro safras, incluindo a média. Os espaçamentos de plantio de 1,4 e 1,5m apresentaram influência nos valores de fibra da cana-de-açúcar (%), dependendo da safra e da cultivar. De acordo com a safra, os parâmetros tecnológicos e de produtividade das cultivares de cana-de-açúcar

diferenciaram-se dentro de cada espaçamento de plantio. Entretanto, não houve interações significativas entre os espaçamentos de plantio e os parâmetros tecnológicos e de produtividade das cultivares. Os espaçamentos de plantio de 1,4 e 1,5m não influenciaram os valores médios de densidade, carbono orgânico e teor de água do solo nas duas posições amostrais (na linha e a 0,1m dela) e nas faixas de profundidade (0 a 0,2m e 0,2 a 0,4m). Entretanto, na faixa de profundidade de 0,2 a 0,4m, os valores de índice de cone do solo do espaçamento de plantio de 1,5m foram superiores ao de 1,4m, em ambas posições amostrais. Independente do espaçamento de plantio, as condições físico-hídricas da posição de linha da cultura foram superiores à posição de 0,1m da linha, na faixa de profundidade de 0 a 0,2m.

AGRICULTURAL TRAFFIC EFFECTS ON SUGAR CANE (*Saccharum spp.*) YIELD IN ROW SPACINGS OF 1,4 AND 1,5m. Botucatu, 2014. 87p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: David Augusto Peixoto Casiero

Adviser: Kleber Pereira Lanças

2 SUMMARY

In the last decade, the Brazilian sucroenergetic sector is intensifying the mechanization in the planting and, mainly, in the harvest operation. The evolution in the farming technologies leads the sector to question itself about the current planting method due to the increase in the soil compaction and crop longevity. The aim of this study was to evaluate the farm machinery traffic effect in the sugar cane yield of three cultivars in two different row spacings. The field experiment was conducted during four years (2008 to 2012) in the Santa Candida Mill, located in the city of Bocaina - SP. The treatments were conducted in a randomized block design with four repetitions in factorial 2x3, with two different row spacings and three sugar cane cultivars. During four crop seasons were assessed the yield (tons of stalks and Pol per hectare) and technological (Pol and fiber content (%)) parameters of cultivars CTC9, RB966928 and RB925211 in the row spacings of 1,4 and 1,5m. After the last crop season were assessed the bulk density, the gravimetric water content, the organic carbon and the soil cone index along the position of crop lines (LC) and 0,1m from the row (LP) at the range of depth of 0 to 0,2m and 0,2 to 0,4m in both row spacings. The results showed that the average values of Pol (sucrose content), tons of stalks per hectare (TCH) and tons of Pol per hectare (TPH) were similar between the row spacings in four crop seasons, including the average. The row spacings of 1.4 and 1.5 m showed influences in the values of fiber content, depending on the crop season and cultivar. According to the crop season, the yield and technological parameters of sugar cane cultivars differed within each row spacing. However, there were no significant interactions between the row spacings and the yield and technological parameters of sugar cane cultivars. The row spacings of 1.4 and 1.5m did not affect the values of bulk density, organic carbon and gravimetric water content of the soil within the

two sample positions (on the planting row and 0,1m from the row) and ranges of depth (0 to 0,2m and 0,2 to 0,4m). However, in the depth range of 0.2 to 0.4 m, the values of soil cone index of the row spacing of 1.5 m were higher than the row spacing of 1.4 m, in both sampling positions. For both row spacings, the hydro-physical soil conditions at the position of the crop line were significantly better than position of the 0.1 from the row, in the range of depth of 0 to 0.2m.

Keywords: Sugar cane, row spacing, soil compaction.

3 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) tem um papel importante na economia brasileira desde o período dos engenhos coloniais, assumindo grande importância socioeconômica, sendo a terceira cultura em área plantada no Brasil, ficando atrás somente do milho e da soja. Seus subprodutos, açúcar, etanol, aguardente e, mais recentemente, a eletricidade e os bioplásticos exercem um papel fundamental na economia nacional e internacional. O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar no mundo e compartilha a liderança mundial na produção de etanol com os Estados Unidos da América.

O mercado de etanol no Brasil se consolidou com o Programa Nacional do Álcool (ProÁlcool), na qual foi criado a partir da crise do petróleo. Infelizmente, a falta de incentivos governamentais aliada à queda do preço internacional do petróleo culminou numa crise de abastecimento de etanol e o fim deste programa. Com o advento da tecnologia de carros “flex”, lançada em 2003, a utilização de etanol aumentou consideravelmente no país.

Com a crescente demanda dos subprodutos da cana-de-açúcar, o setor sucroenergético brasileiro investiu na expansão dos canaviais e na construção de novas usinas. Paralelo a isso, o setor intensificou a mecanização da lavoura em função da escassez de mão-de-obra, aumento nos custos de produção e, também, da legislação ambiental de alguns estados produtores, que obriga a eliminação do uso do fogo como método facilitador do corte da cana-de-açúcar, segundo um cronograma estabelecido.

O crescimento da colheita mecanizada de cana-de-açúcar no Brasil fez com que o setor questionasse o espaçamento de plantio adotado em função do aumento da compactação e diminuição da longevidade do canavial. Atualmente, os principais espaçamentos de plantio adotados no Brasil variam entre 0,9 à 1,6m, podendo ser duplo (combinado) ou simples.

Os estudos sobre espaçamentos de plantio em cana-de-açúcar foi pesquisado no passado, tendo como propósito esclarecer quais deles resultavam em maiores produtividades, contemplando o desempenho da cultivar, mato-competição, níveis de irrigação e ambientes edafoclimáticos. A maior parte destes estudos convergiram para melhores resultados de produtividade em espaçamentos de plantio menores. Entretanto, a adoção de espaçamentos de plantio menores vem sendo muito questionada em função da intensificação do tráfego de colhedoras e transbordos sobre os canaviais nas suas diversas fases, na qual podem alterar as propriedades físico-hídricas e biológicas do solo e, conseqüentemente, prejudicar o desenvolvimento da planta.

O trabalho avaliou o efeito do espaçamento de plantio considerando que o menor poderia apresentar uma maior compactação e, conseqüentemente, uma menor produtividade agrícola após quatro safras de colheita mecanizada. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar nos espaçamentos de plantio de 1,4 e 1,5m em função do tráfego agrícola.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Origem e importância econômica da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é originária do sudeste Asiático, região central de Nova Guiné e Indonésia (JAMES, 2004; SEGATO et al., 2006). A cultura foi usada inicialmente para a produção de xarope, mas a primeira evidência do açúcar em sua forma sólida aconteceu por volta do ano 500, na Pérsia (SEGATO, 2006). Na época das invasões, os árabes foram responsáveis pela propagação da cana-de-açúcar no norte da África e sul da Europa. Nesse mesmo período, os chineses a levaram para Java e Filipinas. A partir do século VIII, os árabes disseminaram o cultivo da cana-de-açúcar nas margens do mar Mediterrâneo (MOZAMBANI et al., 2006). Os portugueses e espanhóis introduziram a cana-de-açúcar nas ilhas do Cabo Verde, Canárias, Madeira, São Tomé e na África Ocidental (LANDELL et al., 2006).

Em 1532, Martim Afonso de Souza introduziu as primeiras mudas de cana-de-açúcar no Brasil, provenientes da Ilha da Madeira, impulsionando a formação dos primeiros engenhos no país. Essas instalações foram responsáveis pelo desenvolvimento da produção e comércio no Nordeste brasileiro, onde foi implantado o primeiro centro açucareiro do país. No final do século XVI, os estados de Pernambuco e Bahia lideravam a produção mundial de açúcar, com grande repercussão no mercado europeu. No século XVII, a cultura disseminou-se pelo planalto paulista, destacando-se a região de Itu como maior centro açucareiro do estado de São Paulo até meados do século XIX (MOZAMBANI et al., 2006).

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2008), a cana-de-açúcar é produzida comercialmente em mais de 110 países, sendo o Brasil o maior produtor mundial. Na safra 2012/2013, a área de cana-de-açúcar colhida no Brasil foi de aproximadamente 8,5 mil hectares (ha), sendo o Estado de São Paulo, o maior produtor com 51%, seguido por Goiás, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso do Sul, Alagoas e Pernambuco (CONAB, 2012).

A moagem de cana-de-açúcar da safra brasileira de 2012/2013 foi de aproximadamente 602 milhões de toneladas, sendo 49,8% destinados à produção de açúcar e o restante etanol. A produção total de açúcar e etanol foi estimada em 39 milhões de toneladas e 24 bilhões de litros, respectivamente (CONAB, 2012).

A demanda por biocombustíveis deverá continuar crescendo em vários países motivado por preocupações ambientais e metas para reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Conforme o United States Department Agriculture (USDA, 2012), os Estados Unidos da América (EUA), Brasil, União Européia (UE), Argentina, Canadá e China foram responsáveis por 90% da produção mundial de biodiesel e 97% da produção de etanol em 2010. Para atender a demanda interna e a exportação crescente para Europa e EUA, o Brasil, segundo maior produtor mundial de biocombustíveis, está projetando entre o período de 2012 a 2021 um aumento de 90% na produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar destaca-se como uma das melhores opções de fonte de energia renovável, cuja as perspectivas são favoráveis a médio e longo prazo. Além disso, o etanol proveniente da cana-de-açúcar reduz as emissões de gases do efeito estufa em até 90% quando utilizado em substituição à gasolina (SEABRA, 2008).

Atualmente, o milho é a principal matéria-prima utilizada na produção de etanol nos EUA, considerado o maior produtor mundial de etanol. Todavia, quando comparamos o balanço energético entre o milho e a cana-de-açúcar na produção de etanol, verificamos que para cada unidade de energia consumida na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar se produz 8 unidades de energia equivalentes por unidade de energia consumida, enquanto o milho, a produção é de apenas 1,3 unidades (CANA DE AÇÚCAR, 2008). Isso demonstra que o etanol produzido no Brasil é mais eficiente energeticamente em comparação ao etanol obtido através do milho.

4.2 Aspectos agronômicos da cana-de-açúcar

Pertencente à família *Poaceae* e ao gênero *Saccharum*, a cana-de-açúcar é uma planta alógama, de ciclo semiperene com habilidade de acumular sacarose nos colmos (JAMES, 2004; SEGATO et al., 2006). Segundo Chen e Chou (1993), a cana-de-açúcar moderna é considerada um híbrido complexo entre duas ou mais espécies do gênero *Saccharum* (*S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. barberi*, *S. sinense*, *S. edule* e *S. robustum*).

O cultivo da cana-de-açúcar predomina-se em áreas tropicais e subtropicais entre 15° e 30° de latitude, podendo se estender desde 35° norte e 30° sul da linha do equador em altitudes que variam desde o nível do mar até 1000 metros (RODRIGUES, 1995), sendo a duração do período de crescimento vegetativo variável entre 9 a 10 meses nos EUA (Louisiana, Texas e Flórida) e de até dois anos no Peru, África do Sul e Havaí (AUDE, 1993). No Brasil, o período de crescimento vegetativo varia entre 12 e 18 meses, podendo haver alterações em função do clima, manejo agrônômico ou condições de mercado.

A cana-de-açúcar é uma planta de ciclo fotossintético C4, ou seja, tem maior capacidade em relação às plantas C3 de transformar a energia solar em fotoassimilados, sendo adaptada às condições de moderado déficit hídrico, alta luminosidade e elevadas temperaturas (CASTRO; KLUNGE, 2001). Tanto as características das cultivares de cana-de-açúcar quanto as variações climáticas que ocorrem durante o desenvolvimento da cultura influenciam na atividade fotossintética da planta (RODRIGUES, 1995). Segundo Câmara (1993), as cinco primeiras folhas do ápice são consideradas as mais eficientes no processo fotossintético.

A cana-de-açúcar se desenvolve em forma de touceira, sendo a parte aérea formada por colmos, folhas, inflorescências e frutos. A parte subterrânea é formada por raízes e rizoma, na qual são responsáveis pela formação da touceira (SEGATO et al., 2006).

A parte morfológica da cana-de-açúcar de interesse comercial é o colmo, que possui sacarose industrializável. A composição química dos colmos é variável em função de diversos fatores como: cultivar, idade fisiológica, condições climáticas, maturação, propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo, tipo de cultivo, entre outros (MARQUES et al., 2001).

Conforme Chen e Chou (1993), a cana-de-açúcar é constituída por 73 a 76% de água e 24 a 27 % sólidos, sendo os sólidos subdivididos em sólidos solúveis, como açúcares, sais e ácidos orgânicos e não açúcares, e, também, em fibras, como celulose e lignina. Os teores de sólidos solúveis e fibra podem variar entre 10 a 16% (CESAR; SILVA, 1993).

Definido por Gascho e Shih (1983), a cana-de-açúcar apresenta quatro estágios fenológicos, sendo representados por brotação e estabelecimento, perfilhamento, período de crescimento dos colmos e fase de maturação.

A brotação dos toletes pode ser prejudicada pela falta ou excesso de umidade no solo (CASAGRANDE, 1991). Conforme os trabalhos realizados no Havaí e citados por Câmara (1993) e Camargo (1976), a melhor faixa de temperatura para brotação das gemas de cana-de-açúcar está entre 34 e 37°C, sendo que os valores abaixo de 21°C e acima de 44°C são limitantes. Por outro lado, Barbieri (1981) cita que a temperatura ótima para brotação das gemas é de 32 a 38°C, sendo que a brotação é paralisada quando a temperatura for inferior a 20°C. Para Aude (1993), o processo de brotação é significativamente prejudicado em temperaturas inferiores a 19°C.

O processo de perfilhamento consiste na brotação sequencial de gemas a partir do colmo primário, que origina os secundários e assim sucessivamente, até um limite (RIPOLI et al., 2006). De acordo com Casagrande (1991) e Liu et al. (1998), assim como a brotação das gemas, o perfilhamento é muito influenciado por variações de temperatura, sendo que a formação e crescimento de perfilhos, o diâmetro e número de entrenós são favorecidos pelo aumento da temperatura até o máximo de 30°C. Quanto aos fatores que afetam o perfilhamento, Ripoli et al. (2006) mencionaram a temperatura, radiação, teor de água, aeração do solo e nutrientes. Câmara (1993), Camargo (1976) e Segato et al. (2006) citam que a época de plantio, a profundidade de sulcação, o espaçamento de plantio, o manejo de adubação, a presença de plantas infestantes, as doenças e as pragas, podem interferir no perfilhamento da cana-de-açúcar.

A etapa de crescimento dos colmos é extremamente dependente da disponibilidade hídrica do solo (CÂMARA, 1993). Heerden et al. (2010) e Sinclair et al. (2004) citam que a eficiência do crescimento da cana-de-açúcar é determinada pela quantidade de radiação solar interceptada e sua conversão em matéria seca. A temperatura e a radiação são os principais fatores responsáveis pela regulação do dossel, o qual ainda

pode sofrer interferência da cultivar, espaçamento de plantio, estado hídrico e nutricional da planta (SINGELS et al., 2005).

Casagrande (1991) e Planalsucar (1986) afirmam que as temperaturas ideais para o desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar situam-se entre 20°C e 35°C, e, que, as temperaturas abaixo de 20°C, o crescimento é menor (DOOREMBOS; KASSAM, 1979) e se torna prejudicial em temperaturas superiores à 38°C (FAUCONIER; BASSEREAU, 1975). Para Almeida et al. (2008), a faixa de temperatura de 25°C a 33°C é a mais favorável ao desenvolvimento vegetativo.

A necessidade hídrica da cana-de-açúcar está relacionada com a fase vegetativa da cultura e da cultivar, demandando em média 1500 a 2500mm por ciclo vegetativo (DANTAS NETO, 2008). De acordo com Inmam-Bamber e Smith (2005), uma precipitação pluvial de 1000mm é suficiente para obtenção de altas produções, quando distribuída de maneira adequada em todas as fases do ciclo.

Segundo Segato et al. (2006), a maturação dos colmos representa a última etapa do ciclo fenológico da cana-de-açúcar e determina a qualidade da matéria-prima dos colmos industrializáveis, devido ao acúmulo de sacarose na parte inicial, terço médio e final dos colmos (RIPOLI et al., 2006). De acordo com Rodrigues (2005), a temperatura amena e a baixa precipitação favorecem o processo de maturação da cana-de-açúcar.

As cultivares de cana-de-açúcar se classificam em precoces, médias e tardias em função da época em que acumulam sacarose, tendo os períodos de maturação distintos (AUDE, 1993).

O conhecimento das relações água-solo-plantat-atmosfera é fundamental para melhorar o manejo de qualquer cultura. Portanto, a alocação correta de uma cultivar de cana-de-açúcar no ambiente edafoclimático que a favoreça, aliada ao manejo agrônômico adequado, é uma estratégia fundamental para incrementar a produtividade.

4.3 Espaçamento de plantio em cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar tem sido cultivada nos mais variados espaçamentos de plantio nos países produtores, sendo que o tamanho destes podem variar de 0,3 à 2,4m.

Para Galvani et al. (1997), um dos fatores que contribui para a produtividade final da cana-de-açúcar é a distância entre as fileiras de plantio. No entanto, o Brasil carece de estudos sobre o impacto da colheita mecanizada na produtividade desta cultura nos espaçamentos de plantio utilizados atualmente. De acordo com o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC, 2012), 76% da colheita de cana-de-açúcar foi realizada mecanicamente na região Centro sul do Brasil, na safra 12/13.

4.3.1 Efeito do espaçamento de plantio na produtividade

Coleti et al. (1987), Irvine e Benda (1980), após avaliar uma série de experimentos em diversos países, verificaram que, de modo geral, a diminuição do espaçamento de plantio resultou em aumento de produtividade devido ao maior número de plantas por área, embora haja um decréscimo no peso e número de colmos por touceira. Além disso, Banerjee et al. (2012), Parasuraman e Sudhagar (2010) observaram uma redução no número e comprimento dos entrenós, diâmetro e altura dos colmos nos menores espaçamentos de plantio.

Stubbs (1892) citado por Webster (1931), um dos pioneiros a estudar espaçamento de plantio em cana-de-açúcar, concluiu que os espaçamentos entre 0,9 e 1,5m produziam significativamente mais que os situados entre 2,0 e 2,4m.

Perticarrari e Ide (1988) mostraram que a produtividade de colmos por hectare (TCH) se eleva com a redução do espaçamento de plantio, variando de 2 a 55%, com estimativa geral de acréscimo na produção de 1% para cada 0,03m de redução no espaçamento, e, complementam que, embora seja extremamente desejável que se maximize a produtividade sabe-se que os espaçamentos de plantio menores dificultam a mecanização da cultura, principalmente no que diz respeito à colheita.

No Brasil, uma das primeiras pesquisas com espaçamento de plantio em cana-de-açúcar foi realizada por Veiga e Amaral (1952), com as cultivares CP27-139 e Co421 e os espaçamentos de plantio de 0,9, 1,3, 1,5 e 1,8m, na qual concluíram que a maior produtividade agrícola foi obtida no espaçamento de plantio de 0,9m na análise conjunta de três safras. Entretanto, os autores constataram que a influência do espaçamento sobre a produtividade da cultura é maior na primeira safra e, praticamente, desaparece na terceira safra, confirmando os resultados de Richard et al. (1991) que avaliaram o efeito dos espaçamentos de plantio (0,9, 1,2 e 1,8m) na produtividade de seis

cultivares de cana-de-açúcar colhidas mecanicamente ao longo de três safras e, concluíram que na primeira safra os espaçamentos menores (0,9 e 1,2m) produziram significativamente mais do que o espaçamento de 1,8m, porém tal diferença não foi observada na média geral de três safras.

Durante três safras, Arruda (1961) estudou os espaçamentos de plantio de 1,0, 1,2, 1,4, 1,6 e 1,8m com as cultivares CP34-120, Co290 e Co419 e, concluiu que os espaçamentos de plantio de 1,0 e 1,2m foram superiores em produtividade de colmos e açúcar por hectare. No entanto, foi observado diferença significativa somente entre os espaçamentos de plantio de 1,0 e 1,8m, corroborando os resultados de Kanwar e Sharma (1974) que utilizaram a cultivar Co346 nos espaçamentos de plantio de 0,6, 0,9, 1,2, 1,5 e 1,8m, e, identificaram que apenas o espaçamento 1,8m produziu significativamente menos que os demais. Pereira Júnior (1984) observou que a redução do espaçamento de plantio de 1,8 para 1,0m acarretou acréscimos na produtividade agrícola, da ordem de 23%.

Souza (2012) avaliou os componentes morfológicos e a produtividade da cultivar SP81-3250 nos espaçamentos de plantio simples (1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8 e 2,0m) e duplos (1,4 x 0,4, 1,4 x 0,6, 1,2 x 0,4, 1,2 x 0,6 e 1,2 x 0,8m). Na variável produtividade, os espaçamentos simples produziram, em média, 18 Mg ha⁻¹ a mais do que os duplos, sendo significativa tal diferença. O Autor relatou um incremento de 30 Mg ha⁻¹ a cada metro reduzido no espaçamento de plantio simples.

Singels e Smit (2002) investigou o efeito do espaçamento de plantio no perfilhamento, interceptação da radiação, acúmulo de biomassa e produtividade da cana-de-açúcar em condições irrigação, onde concluiu que o fechamento das entrelinhas da cultura foi 26% maior no espaçamento de 0,5m quando comparado ao de 1,5m e, também, que a cada 1,0m de redução no espaçamento houve um aumento de 13% na produtividade. Além disso, os mesmos autores relataram que a adoção de espaçamentos de plantio reduzidos pode favorecer o controle de plantas infestantes.

Figueiredo (1995) avaliou os efeitos dos espaçamentos de plantio na produtividade das cultivares de cana-de-açúcar (RB72-454 e SP70-1143) com cinco intensidades de capina de plantas infestantes e, concluiu que não houve diferença nas características tecnológicas e na produtividade da cana-de-açúcar entre os espaçamentos de plantio de 1,40 e 1,15m.

Parasuraman e Sudhagar (2010) avaliaram o efeito da produtividade de cana-de-açúcar nos espaçamentos de plantio de 0,45, 0,80, 0,90, 1,20 e 1,50m, e, observaram que a maior produtividade de colmos e açúcar por hectare foi obtida no espaçamento de plantio de 1,2m. Segundo os autores, tal produtividade foi devido as condições edafoclimáticas favoráveis.

Segundo Banerjee et al. (2012), as cultivares de cana-de-açúcar da Índia com alto teor de açúcar são geralmente menos produtivas. Com a finalidade de aumentar a produtividade, os autores avaliaram a produtividade de três cultivares com alto teor de açúcar nos espaçamentos de plantio de 0,6, 0,9 e 1,1m em duas safras, e, observaram que a maior produtividade de colmos e açúcar por hectare foi obtida no espaçamento de plantio de 0,9m.

Os produtores devem avaliar os custos adicionais que podem ocorrer nos menores espaçamentos de plantio, a fim de equilibrá-los com o acréscimo de produtividade alcançado. Segundo Barbieri et al. (1987) e Basile et al. (1993), o aumento no custo de produção está associado a maior quantidade de muda utilizada nos espaçamentos menores. Segundo Xavier (2013), a muda representa em torno de 19% do custo total de insumos em áreas de expansão e 17% em áreas tradicionais.

Nos trabalhos sobre espaçamento de plantio em cana-de-açúcar, Arruda (1961), Chen (1966), Freeman (1968), Guimarães et al. (1981), Paranhos (1972), Pereira Júnior (1984) e Veiga (1952) não obtiveram interação significativa entre as cultivares e os espaçamentos de plantio. Entretanto, Banerjee et al. (2012), Barbieri (1981), Espironelo et al. (1987), Fernandez (1980), Herbert (1967), Ortega (1966) e Richard et al. (1991) obtiveram significância nesta interação.

4.3.2 Efeito do espaçamento de plantio nas características tecnológicas

Para Matherne (1972), Ortega e Manzon (1966) existe um espaçamento de plantio ótimo para cada cultivar no qual este atinge o máximo de produção. Dillewijn (1952) salienta que as cultivares com folhas eretas tem uma resposta superior nos espaçamentos de plantio menores, por ser mais eficiente na captação de radiação solar assegurando um maior desempenho nos processos fotossintéticos.

Algumas pesquisas indicaram que o teor de açúcar nos colmos pode decrescer com a redução dos espaçamentos de plantio (BANERJEE et al., 2012;

GAMAL et al., 1986; GUIMARÃES et al., 1981; PARANHOS, 1971,1972; VEIGA, 1950) ou manter-se inalterado (COSTA et al., 1981; ERNANDES, 2005; FIGUEIREDO, 1995; FREEMAN, 1968; KANWAR; SHARMA, 1974; MANDLOI et al., 1989; MATHERNE, 1972; PEREIRA JÚNIOR, 1984; ROUILLARD, 1969; URGEL et al., 1966; VEIGA, 1950).

Paranhos (1971) constatou que os espaçamentos de plantio de 1,3, 1,6 e 1,9m obtiveram maiores teores de açúcar por tonelada de cana-de-açúcar quando comparados aos espaçamentos duplos de 1,0 x 0,5 e 1,5 x 0,5m e simples de 1,0m. Veiga e Amaral (1952) observaram uma diminuição no teor de açúcar da cultivar CP27-39 quando o espaçamento de plantio foi reduzido de 1,5m para 0,9m. Porém, tais autores ressaltaram que pode haver diferenças entre as cultivares quanto ao comportamento do teor de açúcar em determinados espaçamentos de plantio.

Salata et al. (1993) avaliaram os espaçamentos de plantio de 0,90, 1,10 e 1,35m em seis cultivares de cana-de-açúcar, e, verificaram que não houve influência do espaçamento sobre a porcentagem de fibra, corroborando os resultados de Pereira Júnior (1984), na qual observou que os parâmetros de Pol e fibra (%) não foram influenciados pela variação dos espaçamentos de plantio.

Ernandes (2005) avaliou o comportamento de cultivares de cana-de-açúcar nos espaçamentos simples (1,1 e 1,4m) e duplos (1,8 x 0,4 e 1,7 x 0,4m), e, concluiu que os espaçamentos de plantio não influenciaram significativamente os valores de fibra e Pol, sendo observado diferença significativa somente entre as cultivares para a variável fibra.

Parasuraman e Sudhagar (2010) avaliaram o teor de açúcar da cultivar de cana-de-açúcar Co86032 em cinco espaçamentos de plantio (0,45, 0,80, 0,90, 1,20 e 1,50m), e, concluíram que os espaçamentos de plantio não influenciaram significativamente os teores de açúcar.

4.3.3 Interações entre mecanização, espaçamento de plantio e produtividade

A indústria canvieira mundial se caracteriza por sofrer um grande desencontro de espaçamentos de plantio e bitola de equipamentos (COX, 2006). Braunack e Peatey (1999) e Braunack (2004) relataram que tal desencontro entre o espaçamento

adotado e a largura dos equipamentos pode resultar no aumento do tráfego sobre a linha da cultura e, também, na quebra dos colmos, resultantes da aproximação dos equipamentos.

O uso da agricultura de precisão pode mitigar os danos causados pelo tráfego agrícola nas lavouras. Muitas empresas estão reconhecendo isso e adotando o sistema de tráfego controlado, na qual separam o espaço destinado ao crescimento da cultura da zona de tráfego (BRAUNACK et al., 2006; KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011; ROQUE et al., 2010).

O conceito de tráfego controlado não é novo, sendo observado por Halkett em 1858. O sistema envolve a melhor combinação entre o espaçamento da cultura e largura dos equipamentos por meio de ajustes na bitola, na qual garante que todo o tráfego ocorra no mesmo local, melhorando o sistema de tração sem danificar a cultura (KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011).

A utilização do tráfego controlado vem sendo promovida na Austrália para mitigar os prejuízos da compactação do solo. Para incorporar o tráfego controlado, os espaçamentos de plantio vêm sendo ampliados. No entanto, há um ceticismo entre os produtores em adotar espaçamentos de plantio maiores devido à possível redução de produtividade. Para responder tais preocupações, Garside et al. (2009) investigaram em diversos locais os espaçamentos de plantio que mais se adaptavam ao tráfego e, também, o efeito destes na produtividade da cana-de-açúcar. Concluíram que o espaçamento duplo de 1,8 x 0,5m pode substituir o convencional de 1,5m, sem haver penalizações na produtividade. No entanto, os pesquisadores ressaltaram que algumas cultivares não se adaptaram ao espaçamento de plantio duplo.

A utilização de direção assistida (piloto automático) é um complemento ao controle de tráfego, na qual auxilia as máquinas agrícolas nas operações de campo, de tal forma que o deslocamento ocorra sempre em paralelo a uma linha de referência, resultando num maior paralelismo de sulcação, melhor aproveitamento do terreno e menor tráfego sobre a linha da cultura (VERMEULEN; MOSQUERA, 2009).

Campos et al. (2008) trabalharam na avaliação e identificação de variáveis críticas no processo de produção de cana-de-açúcar, e, concluíram que, dentre as dezessete variáveis estudadas, o espaçamento irregular de plantio foi o de maior criticidade, independentemente dos sistemas de orientação utilizados, manual ou piloto automático. Os autores enfatizaram que mesmo não atendendo às especificações, o sistema de piloto

automático apresentou percentual maior de espaçamentos de plantio dentro dos limites estabelecidos.

Souza et al. (2012a) estudaram o efeito do tráfego agrícola na compressibilidade do solo e no sistema radicular da cana-de-açúcar no espaçamento de plantio de 1,5m, e, concluíram que o ajuste da bitola do conjunto trator-transbordo para 3,0m e o uso de piloto automático contribuíram no desenvolvimento do sistema radicular e na preservação da qualidade estrutural do solo.

A limitação da colheita mecanizada em espaçamentos de plantio menores está sendo superada, com o lançamento de colhedoras de duas linhas, que conta com a maior distância entre eixos e a capacidade de colheita de espaçamentos de plantio de até 1,1m. Grandes grupos do setor sucroenergético vêm adotando o espaçamento alternado nas configurações 0,9 x 1,5 e 0,9 x 1,6m com a finalidade de aumentar a longevidade dos canaviais, melhorar a trafegabilidade dos equipamentos mecanizados, aumentar o rendimento das colhedoras, diminuir o consumo de combustível e, também, reduzir a compactação. Porém, ainda existe a necessidade da evolução dos projetos das colhedoras de duas linhas existentes no mercado em função do baixo desempenho operacional destas em canaviais de médio a alta produtividade.

Stolf (1986) relata que o espaçamento de plantio duplo é utilizado amplamente em outros países, podendo ser a solução na redução do pisoteio e tráfego nos canaviais. Rao et al. (2012) mencionam que os problemas de compactação do solo em cana-de-açúcar podem ser minimizados com utilização do espaçamento duplo na configuração de 1,8 x 0,5m.

Todavia, os resultados são conflitantes entre os espaçamentos de plantio simples e duplo. Cervegni (2005), Magro (2002) e Misra (1965) relataram maior produtividade de colmos nos espaçamentos duplos, enquanto Ernandes (2005), Mathur et al. (1968) e Souza (2012) nos espaçamentos simples. Sendo que, Berto et al. (1981), Salunkhe et al. (2001) e Tang (1956) não encontraram diferenças significativas entre os espaçamentos de plantio simples e duplos.

4.4 Atributos do solo cultivado com cana-de-açúcar

Os atributos do solo que influenciam o crescimento das plantas podem ser classificados quanto à sua natureza em físicos, químicos e biológicos. Dentre os

atributos de natureza física, destacam-se a estrutura e a textura do solo; dentre os atributos de natureza química, a composição mineralógica, a reação do solo (pH), a disponibilidade de nutrientes, a presença de elementos potencialmente tóxicos e as reações de sorção, precipitação, oxidação e redução; dentre os atributos de natureza biológica, destaca-se o teor de matéria orgânica (MEURER, 2007).

4.4.1 Compactação do solo

Pesquisadores têm demonstrado que a compactação aumenta a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração (ARVIDSSON, 2001; DIAS JÚNIOR et al., 1999), provocando diminuição da porosidade e modificações na continuidade dos poros (DIAS JÚNIOR, 2000; FLOWERS; LAL, 1998), dificultando a infiltração de água, a aeração do solo e o crescimento das raízes, tendo como consequência um sistema radicular superficial e uma redução na disponibilidade de nutrientes essenciais ao desenvolvimento da planta (ARVIDSSON, 2001; BELLINASSO et al., 1994; KULLI et al., 2003; LANÇAS et al., 1990).

O crescimento da colheita mecanizada no Brasil pode estar contribuindo para o aumento dos índices de compactação do solo, sendo que uma colhedora pode pesar entre 147 a 199 kN, dependendo do modelo e tipo de rodado (pneu ou esteira). Para Magalhães (1990), os veículos que transitam, em média, com 25 toneladas de carga nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar provocam compactação nas camadas que se concentram 70 a 80% das raízes. Segundo Silva et al. (2006a), o tráfego do conjunto trator-transbordo na colheita e de máquinas autopropelidas na aplicação de insumos são os principais responsáveis pela compactação nos canaviais, pois apresentam uma menor área de contato pneu-solo, ao exercer pressões na superfície do solo que podem ultrapassar 0,45 MPa.

Solos sob longo cultivo de cana-de-açúcar possuem uma pobre estrutura e compactação generalizada (BELL et al., 2001; BRAUNACK et al., 1999). Isto é devido uma combinação de fatores os quais incluem o intenso preparo de solo para o plantio, utilização de equipamentos pesados durante a operação de colheita (BELL et al., 2001) e o descompasso entre os espaçamentos de plantio e as bitolas dos maquinários agrícolas (BRAUNACK et al., 1999). Além disso, outro fator que está contribuindo para o aumento da compactação no Brasil é a redução do período da entressafra canavieira, na

qual a colheita mecanizada de cana-de-açúcar vem sendo realizada na estação chuvosa (SEVERIANO et al., 2010).

Robotham (2000) relata que os efeitos da compactação do solo na produtividade de cana-de-açúcar podem ser complexos e dependem da carga aplicada por eixo, tipo do rodado, pressão de inflação do pneu, tipo de solo e histórico dos cultivos anteriores. Sendo que, a intensidade de compactação pode variar em função do número de passadas de veículos sobre o terreno (DURUOHA, 2000), quantidade de matéria orgânica incorporada e em cobertura, teor de água e textura do solo (STONE; EKWUE, 1993; SILVA et al., 2000).

Dias Júnior (1994), Dias Júnior e Pierce (1996) e Silva (2002), ressaltam que o teor de água do solo é responsável pela intensidade de deformação do solo, sendo que, em condições de solo seco, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo não ser significativa. Entretanto, sob condições de umidade crítica, ou seja, próximo à capacidade de campo, o solo deforma-se facilmente, formando camadas compactadas (Figura 01).

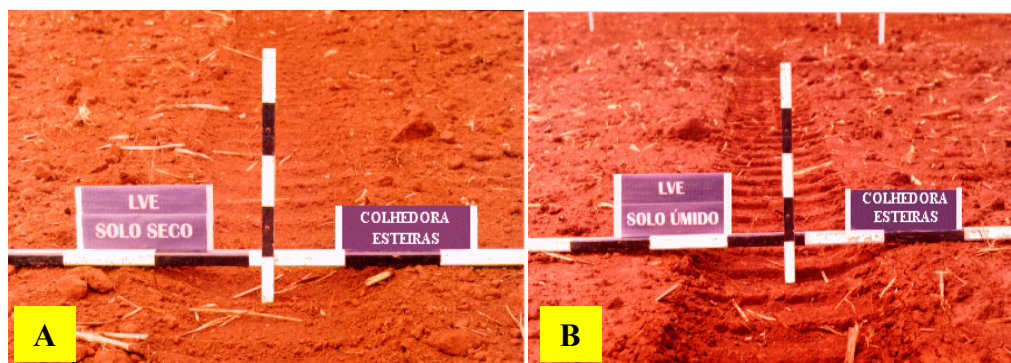


Figura 01. Efeito do tráfego da colhedora de rodados de esteiras no solo LATOSSOLO VERMELHO, textura muito argilosa sob condições de baixo (A) e alto (B) teor de água.

Fonte: Bellinaso et al., 1994.

Pinto e Bellinaso (2000) relataram reduções de produtividade da cana-de-açúcar na ordem de 11,5% na linha e 7% na entrelinha, quando submetidas ao tráfego de veículos em condições de solo úmido. Torres e Villegas (1993) relataram perdas de até 40% na produtividade em condições semelhantes. Em condição de solo seco, Swinford e Boevey (1984) observaram perdas de até 30 % quando tráfego de colhedoras ocorreu sobre a linha da cultura, e, 10% quando o tráfego foi restrito às entrelinhas. Contudo, Braunack et al. (1993) e Cheong et al. (2009) não observaram impacto na

produtividade da cana-de-açúcar quando o tráfego ocorreu somente nas entrelinhas de plantio.

Braunack et al. (2006) estudaram o efeito da colheita mecanizada na linha, entrelinha e próximo a linha de plantio sob as propriedades física do solo em quatro cultivares de cana-de-açúcar. Concluíram que as cultivares respondem de forma diferente ao efeito do tráfego, e, que, as perdas foram maiores quando a colheita ocorreu sobre a linha da cultura seguido do tráfego próximo da linha e entrelinha. Nestas condições foram observados aumento da densidade do solo, resistência do solo à penetração e redução da condutividade hidráulica.

4.4.1.1 Metodologias para avaliação da compactação do solo

A compactação de um solo pode ser avaliada utilizando curvas de retenção de água (DEXTER; BIRD, 2001), pressão de pré-consolidação (MIRANDA, 2006; SILVA et al., 2009), intervalo hídrico ótimo (TORMENA et al., 1999), limites de liquidez, plasticidade e contração (HILLEL, 1980) e perfis culturais (TAVARES FILHO et al., 1999). Tais metodologias são preconizadas em instituições de pesquisa devido o controle dos dados, entretanto, são demoradas e de alto custo (DEXTER; BIRD, 2001).

Imhoff et al. (2001) trabalharam com as variáveis de Intervalo Hídrico Ótimo e Pressão de Pré-consolidação, e, definiram um novo indicador, conhecido como Pressão crítica (Pcr) para os crescimento das plantas. Segundo os autores, a quantificação de Pcr permite definir a pressão máxima que pode ser aplicada ao solo para diferentes teores de água e densidade crítica, auxiliando a seleção de sistemas de manejo sustentáveis, sendo útil na escolha de equipamentos agrícolas, bem como na definição do momento oportuno para a realização das atividades de preparo do solo e tráfego de equipamentos agrícolas.

A compactação pode ser identificada por outros atributos do solo, como, por exemplo, a resistência do solo à penetração (SILVA et al., 1994), a densidade do solo (CAMPBELL, 1994), a porosidade total (VEENHOF; MCBRIDE, 1996), a estabilidade de agregados (SOANE, 1990) e a infiltração de água no solo (BELLINASSO et al., 1994). Porém, o efeito da compactação na produção das culturas é complexo, sendo difícil estabelecer limites para a densidade do solo, a porosidade, a resistência do solo à

penetração e a infiltração, pois tais variáveis dependem das condições edafoclimáticas do local (SALVADOR; GRANATO, 1999).

O ensaio de Proctor normal, na qual determina a relação existente entre a densidade do solo, o teor de água e a energia de compactação de um solo com estrutura alterada vêm sendo difundido e utilizado como ensaio de referência devido ao baixo custo dos equipamentos, a praticidade e a rapidez (FIGUEIREDO et al., 2000; KLEIN, 2008; THOMAS et al., 1996). Com o ensaio de Proctor obtém-se a densidade máxima, denominada de teor de água ótimo de compactação para um determinado nível de energia aplicada (BUENO; VILAR, 1998).

Os métodos de avaliação de compactação do solo podem ser divididos em três grupos: métodos visuais, subjetivos ou grosseiros: sulcos de erosão, fenda nos rastros dos rodados, crostas superficiais, raízes mal formadas, sistema radicular raso, subdesenvolvimento e coloração deficiente da planta; métodos precisos: densidade do solo, porosidade total, condutividade hidráulica; e métodos intermediários: avaliação de resistência do solo à penetração utilizando penetrômetros ou penetrógrafos (LANÇAS, 1996).

Barbiere et al. (1984) desenvolveu uma metodologia prática para identificação da compactação, cujo método consiste na abertura de uma trincheira com um metro de largura, um metro de profundidade e o comprimento correspondente a duas entrelinhas de cana-de-açúcar. As camadas compactadas são separadas de maneira qualitativa em função da resistência à penetração de um objeto pontiagudo (faca), sendo que esta camada é transcrita para uma folha de papel e amostras são retiradas para a determinação da densidade do solo (Figuras 02 e 03).

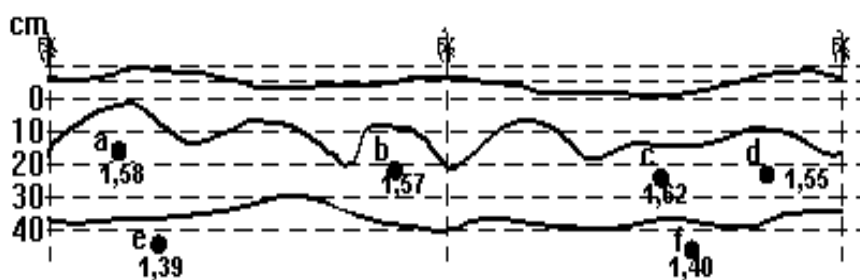


Figura 02. Perfil esquemático da camada compactada, com os respectivos pontos de amostragem e os valores de densidade do solo em g cm^{-3} .

Fonte: Barbiere et al., 1984.

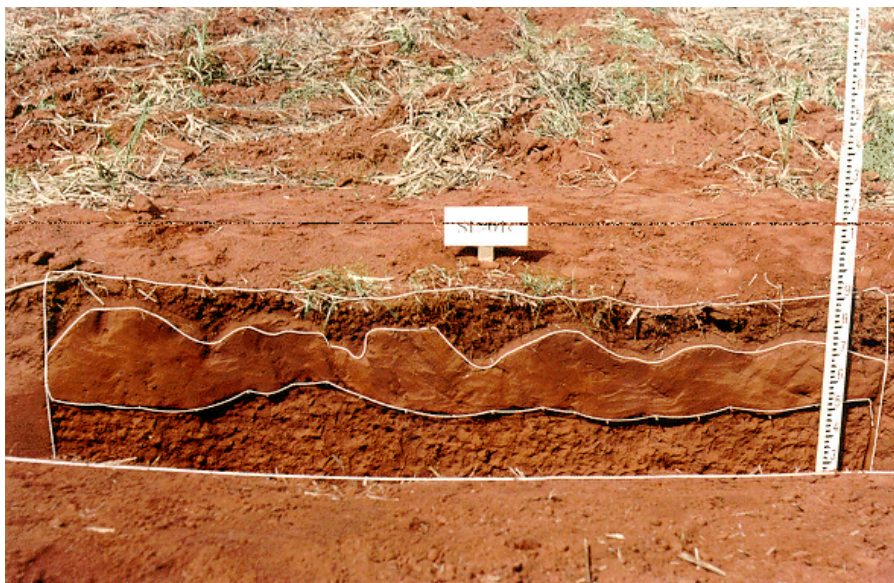


Figura 03. Perfil do LATOSSOLO VERMELHO distrófico com camada compactada.
Fonte: Barbieri et al., 1984.

A maioria dos pesquisadores sugerem que a compactação do solo seja identificada através da densidade do solo, estabilidade de agregados e resistência do solo à penetração. (ACOSTA, 2008).

Cada metodologia empregada na identificação da compactação apresenta vantagens e desvantagens, porém é importante associar pelo menos duas metodologias para reduzir a possibilidade de erro.

4.4.1.2 Resistência do solo à penetração

Segundo Bengough e Mullins (1990), a resistência do solo à penetração (Índice de cone do solo) é uma medida do impedimento mecânico que o solo oferece às raízes. O impedimento mecânico ao crescimento radicular é fortemente correlacionado com a resistência mecânica do solo medida com os penetrômetros.

Para Weaich et al. (1992), a resistência mecânica do solo à penetração é uma das propriedades físicas do solo que influenciam diretamente no desenvolvimento das raízes e na parte aérea das plantas. Eavis et al. (1969), Taylor e Ratliff (1969) afirmam que a pressão de crescimento que a raiz pode exercer sobre os solos é variável de acordo com a espécie, com valores médios de pressão axial e radial que se situam entre 0,9 e 1,3 MPa e 0,5 e 0,7 MPa, respectivamente. Valores elevados de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em

comprimento, diâmetro (MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular (IIJIMA; KONO, 1991).

A resistência mecânica do solo à penetração é utilizada para avaliar os sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (KLEIN, 2008). Para Bengough e Mullins (1990), Lanças (1991), Tormena e Roloff, (1996), a penetrometria é considerada um método apropriado para avaliar a resistência à penetração de raízes no solo, sendo rápido e fácil à obtenção de resultados, além da possibilidade de realizar um maior número de repetições. Os resultados são normalmente expressos em termos de força por unidade de área do cone de dimensões padronizadas instalado na ponta da haste do penetrômetro ou penetrógrafo.

Segundo Machado et al. (1999), a resistência do solo à penetração pode ser utilizada para a caracterização das condições físico-mecânicas do solo, estimativas das interações solo-máquina (trafegabilidade, compactação e métodos de preparo do solo) e solo-raiz (impedimento mecânico, restrição ao crescimento). No entanto, a dependência do teor de água (LIBARDI; JONG van LIER, 1999) e a densidade do solo dificulta a interpretação dos resultados (CASSEL et al., 1978). Para Klein et al. (1998), a determinação da resistência do solo à penetração não deve ser realizada apenas quando solo se encontra na capacidade de campo, pois grandes variações de densidade do solo poderão não ser detectadas.

Os níveis críticos de resistência à penetração para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo, o teor de água e a espécie cultivada (MATERECHERA et al., 1991; KLEIN et al., 1998; TAYLOR et al., 1966). Materechera et al. (1991) consideraram que o crescimento das raízes foi nulo quando os valores de resistência do solo à penetração atingiram 5 MPa. Hadas (1997) relatou um intervalo de 1,6 MPa para o milho e 3,7 MPa para cevada, enquanto Petter (1990) verificou que o valor resistência do solo à penetração de 2,8 MPa foi limitante ao crescimento radicular da soja. Arshad et al. (1996) afirmam que os valores entre 2,0 e 4,0 MPa dificultam o desenvolvimento radicular das culturas. Nesmith (1987) e Taylor et al. (1966) adotaram o valor de 2 MPa como valor limitante ao crescimento das raízes.

Otto et al. (2011) observaram que o desenvolvimento das raízes de cana-de-açúcar não foi afetado quando resistência à penetração atingiu valores abaixo de 0,75 MPa, mas diminui consideravelmente entre 0,75 e 2,0 MPa, sendo severamente restritivo quando os valores foram acima de 2,0 MPa. Nesse mesmo trabalho foi observado

uma correlação positiva e significativa entre a resistência do solo à penetração e a densidade do solo.

Silva et al. (2008) verificaram dependência da resistência do solo à penetração em relação ao teor de argila, corroborando os resultados de Harper e Gilkes (2004), Silva e Kay (1997), Zou et al. (2000). Neste mesmo trabalho, não foi verificada a influência dos teores de carbono orgânico do solo na curva de resistência do solo à penetração, contrariando os resultados obtidos por Fidalski (2004), Silva e Kay (1997), Smith et al. (1997) e To e Kay (2005). No entanto, os autores explicam que a presença da variável teor de argila pode ter incorporado os efeitos do carbono orgânico do solo indiretamente, em face da estreita relação de dependência entre essas variáveis.

Para Rosolem et al. (1999), quanto mais argila no solo, maior a resistência à penetração no mesmo nível de densidade do solo e, complementa que a secagem do solo aumenta a resistência à penetração em solos com mais de 40% de argila.

Ohu et al. (1985) avaliaram a resistência do solo à penetração em diferentes teores de matéria orgânica e água no solo, e, verificaram que, em condições de baixo teor de água, a resistência do solo à penetração diminuiu com o incremento da matéria orgânica.

Souza et al. (2005) avaliaram os sistemas de colheita (com e sem a queima prévia do canavial) e manejo de palhicho (com e sem incorporação) em cana-de-açúcar, e, concluíram que o sistema sem a queima prévia do canavial com incorporação do palhicho diferiu estatisticamente dos demais sistemas, apresentando menores valores para a resistência do solo à penetração. No entanto, os autores ressaltaram que independentemente do sistema de colheita houve um aumento da resistência do solo à penetração até a profundidade de 0,3m, atingindo valores restritivos ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar nas faixas de profundidades de 0,1 a 0,2m e de 0,3 a 0,4m, corroborando com os resultados de Braunack et al. (2006) e Swinford e Boevey (1984). Segundo Salire et al. (1994), os sistemas com pouco revolvimento do solo e tráfego de máquinas pesadas podem promover compactação do solo até 0,4m de profundidade.

Laia et al. (2006) avaliou a resistência do solo à penetração em dois tipos de solos cultivados com cana-de-açúcar em diferentes safras, e, concluíram que a resistência do solo à penetração foi dependente do tipo de solo e da safra, sendo que a compactação observada em profundidades elevadas foi relacionada com a frequência do tráfego.

4.4.2 Densidade do Solo

A densidade está intimamente relacionada com a textura e a estrutura do solo. Em geral, quanto maior a densidade em solos de textura semelhante, mais compacto é o solo, sua estrutura é menos definida, os espaços porosos são menores e a taxa de crescimento diário das raízes é reduzida devido ao menor volume de água disponível e a concentração de O₂ no solo (MEURER, 2007).

Em condições naturais, a densidade dos solos podem variar entre 0,2 até 1,6 g cm⁻³. (MEURER, 2007). Para solos agrícolas, a densidade pode situar entre 0,9 a 1,8 g cm⁻³ dependendo da textura e do teor de matéria orgânica do solo (KLEIN, 2008). Segundo Bueno e Vilar (1998) e Libardi (2005), os solos arenosos apresentam densidade do solo superior aos argilosos, sendo os siltosos de densidade intermediária.

As principais alterações na densidade do solo estão geralmente associadas ao manejo do sistema de plantio e colheita. Tais alterações afetam propriedades físico-hídricas importantes, como a porosidade, a taxa de infiltração de água e a resistência do solo à penetração (KLEIN, 2008).

A densidade do solo é a medida quantitativa mais direta no diagnóstico da compactação, porém a influência da textura e estrutura do solo nesse atributo limita a escolha de um valor absoluto de referência (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Silva et al. (2008) afirmam que a densidade do solo pode ser crítica a partir do momento em que a resistência do solo à penetração atinge o valor de 2 MPa, sendo dependentes do teor de argila e água do solo. Os autores comentam que o teor de água do solo apresenta elevada variabilidade espacial e temporal.

Trouse Júnior (1967) determinou seis estádios de degradação de raízes de cana-de-açúcar em quatro tipos de solo do Havaí. No primeiro estádio, em que as densidades variaram de 1,03 a 1,07 g cm⁻³, as raízes jovens e as mais desenvolvidas eram normais; no segundo, com as densidades de 1,11 a 1,17 g cm⁻³, não foram observadas variações nas estruturas das raízes jovens e desenvolvidas; no terceiro, com as densidades de 1,20 a 1,27 g cm⁻³, algumas raízes jovens apresentavam ligeiro achatamento e uma tendência de desenvolvimento angular; no quarto, com as densidades de 1,33 a 1,39 g cm⁻³, a maioria das raízes jovens e algumas mais desenvolvidas eram achatadas; no quinto estádio, com as densidades de 1,39 a 1,49 g cm⁻³, a proliferação de raízes mais

desenvolvidas era inadequada para a agricultura e as raízes mais jovens achatadas; no último estágio, com densidades de 1,51 a 1,57 g cm⁻³, poucas raízes desenvolvidas e jovens capazes de penetrar no solo, sendo achatadas e confinadas nas fraturas do solo.

Otto et al. (2011) observaram que após três anos de colheita mecânica consecutiva de cana-de-açúcar, os valores de densidade do solo não diferiram nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4m. Porém, em função do tráfego agrícola, os valores de densidade do solo nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4m foram superiores à faixa de profundidade de 0,4 a 0,6m.

4.4.3 Matéria Orgânica

Produzida a partir da decomposição de planta e animais, a matéria orgânica é formada por diversos compostos da molécula de carbono em vários graus de alteração, na qual interagem com outras fases do solo. A maioria dos solos tropicais compõe menos que 5% da fase sólida, porém apresenta uma alta capacidade de interagir como os demais componentes, alterando, assim, as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo as quais afetam o desenvolvimento das plantas (MEURER, 2007).

Para Castro Filho et al. (2002) e Rachid et al. (2001), após a decomposição dos resíduos orgânicos há um aumento na estabilidade de agregados, consequentemente, uma redução na compactação do solo (BARZEGAR et al., 1996; BAUMGART; HORN, 1991).

A matéria orgânica pode desempenhar um papel importante na agregação do solo, uma vez que, os ácidos húmicos, polissacarídeos, compostos aromáticos, raízes e hifas fúngicas são importantes agentes cimentantes (TIDALL; OADES, 1982). Silva e Mielniczuk (1997) enfatizaram que a matéria orgânica proveniente da decomposição das raízes de cana-de-açúcar pode melhorar a estabilidade de agregados. Caravaca et al. (2002) e Hartel (2005) afirmaram que a estabilidade de agregados é maior na região da rizosfera devido a contribuição do material orgânico oriundo da biomassa radicular, além da associação de fungos micorrízicos que atuam na ligação dos agregados.

Diversos estudos indicam que os resíduos orgânicos, tais como: turfa (ZHANG et al., 1997), palha de trigo (GUE'RIF, 1979) e milho (GUPTA et al., 1987) podem diminuir a compactação do solo. Segundo Huang et al. (2005), os sistemas que

visam à manutenção e aumento de matéria orgânica estão geralmente associados à uma melhoria da agregação do solo.

Importante ressaltar que os compostos orgânicos são principais agentes estabilizantes dos agregados em regiões de clima temperado, sendo que em solos intemperizados, os óxidos sobrepõem o efeito dos materiais orgânicos (SIX et al., 2002; ZOTARELLI et al., 2005). Contudo, a matéria orgânica adiciona-se à estabilização conferida pelos óxidos, atuando fortemente em fases posteriores da agregação e na formação de macroagregados dos solos com intemperismo avançado (BASTOS et al., 2005; SILVA; MENDONÇA, 2007).

Para Silva et al. (2006b), a redução da matéria orgânica nos solos cultivados pode reduzir o limite de plasticidade e a faixa de friabilidade, refletindo em aumento da compactação. Segundo Torres et al. (1990), as raízes de cana-de-açúcar estão distribuídas principalmente nas camadas superficiais, sendo que a compactação nesta camada pode ser reduzida com incorporação da matéria orgânica (BARZEGAR et al., 2000).

O teor de matéria orgânica tem uma forte influência sobre a densidade do solo e pode afetar a resistência do solo à penetração (EKWUE, 1990; GUPTA; LARSON, 1982; MCBRIDE, 1989; SOANE, 1990). De acordo com Keller e Hakansson (2010), o incremento da matéria orgânica pode diminuir a densidade do solo e aumentar a resistência do solo às tensões mecânicas.

Krzić et al. (2003) estudaram o efeito do carbono orgânico na densidade do solo, e, concluíram que, independentemente da textura do solo, o incremento de 1% de carbono orgânico reduz em cerca de 11% a densidade do solo em função do efeito positivo na estabilidade estrutural do solo e pelo fato do material orgânico apresentar baixa densidade, menor do que os sólidos minerais do solo (LIBARDI, 2005).

De acordo com Pankhurst et al. (2003), entre dez e dezesseis toneladas de palhicho por hectare são deixadas sobre a superfície do solo a partir da colheita mecanizada sem a queima prévia do canavial. Porém, em apenas um ano, 80% deste palhicho é perdido por processos de decomposição (ROBERTSON; THORNBURN, 2000). Para Negrisoli et al. (2007), o acúmulo de palhicho na superfície do solo pode exceder 20 Mg ha⁻¹.

Barzegar et al. (2000) estudaram o efeito do palhicho proveniente da cana-de-açúcar sob diversas condições de umidade e níveis de carga aplicado ao solo.

Concluíram esses autores que a compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas pesadas pode ser reduzida através da incorporação de 60 Mg ha⁻¹ de resíduos da cana-de-açúcar, quando o teor de água é inferior ao limite de plasticidade do solo.

Dominy et al. (2002) concluíram que o sistema de colheita de cana-de-açúcar com a queima prévia do canavial diminuiu os teores de matéria orgânica do solo na faixa de profundidade de 0 a 0,1m. Os autores comentaram que a prática de colheita sem a queima prévia do canavial, plantio direto e uso de adubos verdes podem minimizar o problema. Souza et al. (2012b) e Wood (1991) observaram os benefícios da colheita mecânica sem a queima prévia do canavial na conservação do solo, na redução da erosão, no aumento do teor de matéria orgânica e, sobretudo, na melhoria da estrutura do solo.

Vasconcelos (2002) estudou o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea da cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: mecanizada e manual. O autor verificou uma redução na amplitude térmica do solo e um incremento no teor de água e na matéria orgânica do solo, quando o sistema de colheita foi alterado de manual queimado para mecanizado sem a queima prévia do canavial.

Graham e Haynes (2006) estudaram o efeito da matéria orgânica no sistema de colheita com e sem a queima prévia do canavial; e observaram um aumento na quantidade de matéria orgânica, atividade microbiana e estabilidade de agregados na linha e entrelinha do sistema de colheita sem queima, além da maior proliferação de raízes nas camadas superficiais do solo.

Olu et al. (1994) avaliaram o efeito da incorporação da matéria orgânica num solo compactado na região norte da Nigéria. Os resultados obtidos indicaram que o incremento da matéria orgânica neste solo resultou na redução da densidade do solo e na resistência deste à penetração, além de ter proporcionado um aumento na condutividade hidráulica e, conseqüentemente, uma maior retenção de água no solo.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização e caracterização edafoclimática da área experimental

O plantio do experimento foi realizado no dia 27/03/2008, na fazenda Maria Tereza Ariosto, talhão 9, na unidade Santa Cândida pertencente ao Grupo Tonon Bioenergia, localizada no município de Bocaina - SP. As coordenadas geográficas da área experimental são latitude 22° 10' S, longitude 48°27' W e altitude de 686 metros.

Conforme dados do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI, 2012), o clima da região é classificado como tropical chuvoso com inverno seco, Aw, segundo Köppen, com temperaturas médias anuais entre 19 e 25°C e a precipitação anual média de 1254mm. O mês de janeiro é, historicamente, o de maior precipitação com um total de 221mm, sendo o mês de agosto com a menor probabilidade de precipitação, totalizando 22,5mm.

Antes da instalação do experimento foi coletada uma amostra composta de solo para cada faixa de profundidade (0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,8 a 1,0m), sendo realizadas as análises física, química e biológica para a classificação do solo e a caracterização do ambiente produção (Tabela 1 e 2). Mediante o levantamento detalhado realizado pelo Centro Tecnologia Canavieira (CTC) e utilizando-se o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 1999), o solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico, textura média, acentuadamente drenado, relevo suave ondulado e caracterizado como ambiente de produção C, segundo Joaquim et al. (1997).

Tabela 1. Análise dos atributos do solo nas faixas de profundidade de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,8 a 1,0m.

Profundidade (m)	Composição Granulométrica					Relação Textural			
	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	Silte/ argila	RC	TC	Carbono orgânico
	-----%-----						cmol _c dm ⁻³	arg	g dm ⁻³
0 - 0,2	18	4	31	47	78	0,2	14,2	24,2	5,8
0,2 - 0,4	21	4	29	46	75	0,2	9,6	17,7	4,1
0,8 - 1,0	23	10	27	40	67	0,4	5,1	11,7	2,3

Carbono orgânico: Método de Walkley–Black (ALLISON, 1965).

RC: Retenção de cátions da argila

TC: Capacidade troca cátions da argila

Tabela 02. Análise química do solo nas faixas de profundidade de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,8 a 1,0m.

Profundidade (m)	pH	P mg kg ⁻¹	Cátions Trocáveis							Saturação		
			Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	Al ³⁺	H ⁺	T	V	m
	H ₂ O		-----cmol _c dm ⁻³ -----							-----%-----		
0 - 0,2	6,0	9	-	0,15	1,8	0,6	2,6	0	1,8	4,4	58,6	0
0,2 - 0,4	5,7	5	-	0,12	1,4	0,5	2,0	0	1,7	3,7	54,3	0
0,8 - 1,0	6,0	2	-	0,08	0,8	0,3	1,2	0	1,5	2,7	44,0	0

P, K, Ca e Mg: Extração da resina trocadora de ânions (CANTARELLA et al., 1998).

Al: Extração com 1 N KCl (RAIJ et al., 2001)

H + Al: Solução tampão SMP (QUAGGIO et al., 1985).

SB: Soma de bases.

T: Capacidade de troca de cátions.

V: Saturação por bases.

m: Saturação em alumínio.

5.2 Delineamento experimental e tratamentos

Os tratamentos do experimento foram distribuídos seguindo o delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições em esquema fatorial 2 x 3, sendo dois espaçamentos de plantio (1,4 e 1,5m) e três cultivares de cana-de-açúcar (CTC9, RB966928 e RB925211).

Cada unidade experimental foi constituída de seis linhas de plantio com vinte metros de comprimento. Para as avaliações foram utilizadas somente as quatro linhas centrais, sendo considerado como bordadura as duas linhas laterais das unidades experimentais (Figuras 04 e 05).

Sentido da sulcação →

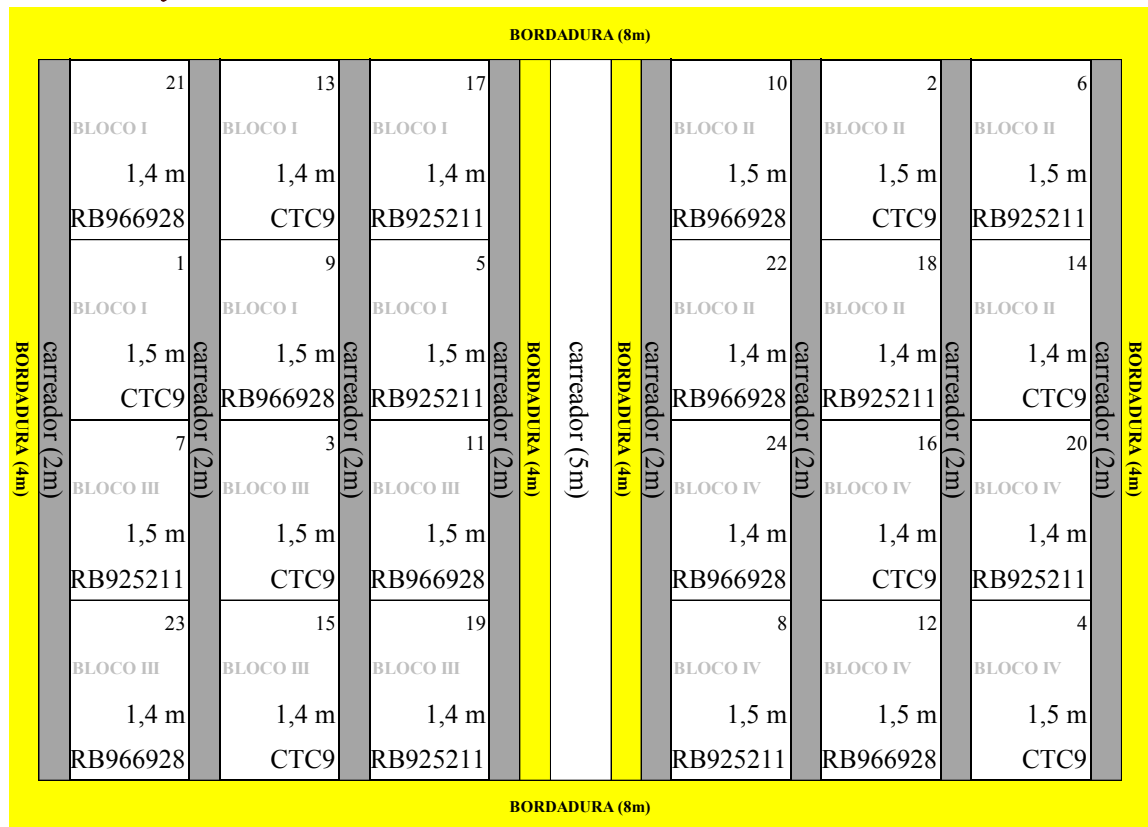


Figura 04. Caracterização gráfica da área experimental.



Figura 05. Caracterização por imagem de satélite da área experimental.

Fonte: Google Earth.

5.3 Caracterização das cultivares de cana-de-açúcar

A cultivar CTC9 tem como característica um bom fechamento de entrelinhas, hábito de crescimento levemente decumbente, colmos de diâmetro médio, com despalha média e entrenós de comprimento médio (CTC, 2006). Como características principais, apresenta boa produtividade, exigência média em fertilidade do solo, florescimento raro com pouca isoporização, teor de fibra médio e alto teor de sacarose. Recomenda-se o plantio desta cultivar em ambientes de alto a médio potencial produtivo e colheita no início da safra.

A cultivar RB925211, conforme Hoffmann et al. (2006), apresenta desenvolvimento médio e fechamento de entrelinhas excelente, hábito de crescimento semidecumbente, colmos de diâmetros médios, com fácil despalha e entrenós de comprimento médio. Como características principais, apresenta boa produtividade, florescimento raro com pouca isoporização, teor de fibra médio, alto teor de sacarose, tolerância a nematóides e resistente as principais doenças. O autor recomenda o plantio desta cultivar em ambientes de alto a médio potencial produtivo e colheita no início e meio da safra.

A cultivar RB966928 apresenta desenvolvimento e fechamento de entrelinhas excelente, hábito de crescimento semidecumbente, colmos de diâmetros médios, com fácil despalha e entrenós de comprimento médio. Como características principais, apresenta excelente produtividade, florescimento alto com pouca isoporização, teor de fibra médio, alto teor de sacarose e resistente as principais doenças. Recomenda-se o plantio desta cultivar em ambientes de alto a médio potencial produtivo e colheita no início da safra (HOFFMANN, 2006).

5.4 Preparo da área experimental

No dia 10/01/2008, realizou-se a dessecação das plantas presentes na área experimental com 3 kg ha⁻¹ do ingrediente ativo (i.a.) do herbicida glifosato (Roundup original¹). Essas aplicações foram realizadas com pulverizador de barras tratorizado equipado com pontas de pulverização de jato plano AXI 110 02 espaçadas de 0,50m, utilizando um volume de aplicação de 200 L ha⁻¹.

¹ A citação de marcas e modelos comerciais ao longo do trabalho não implica em recomendação do autor.

Após 20 dias, foi realizada a aplicação de 3,6 t ha⁻¹ de calcário dolomítico e de 1,4 t ha⁻¹ de gesso agrícola, seguidos da operação de incorporação utilizando uma grade pesada na profundidade de até 0,2m e uma subsolagem de 5 hastes parabólicas equipadas com ponteiros aladas (Stara) trabalhando na profundidade de até 0,5m. Posteriormente, realizou-se uma operação de gradagem leve (Marchesan) para o nivelamento do terreno.

5.5 Instalação e condução do experimento

No dia 27/03/2008, foi realizada, por um sulcador, a abertura dos sulcos e a distribuição do adubo. Conforme recomendações da equipe técnica da usina, a adubação de plantio foi similar em todos os tratamentos com a aplicação de 1,5 t ha⁻¹ da forma líquida da formulação NPK 2,5-10-10.

No plantio foram utilizadas mudas sob condições de idade e vigor semelhantes, sendo garantida a sanidade e identidade genética destas cultivares através da operação de “roguing”.

O plantio das unidades experimentais foi realizado manualmente, sendo que os instrumentos de corte utilizados para secção dos colmos foram desinfectados com cloreto de benzalcônio na solução de 0,2% (Figura 06) para evitar a disseminação de raquitismo da soqueira (*Leifsonia xyli* subsp. *xyli*) e escaldadura das folhas (*Xanthomonas albilineans*).



Figura 06. Plantio manual das unidades experimentais (A) e desinfecção dos instrumentos de corte (B).

Aproximadamente 60 dias após a colheita, a adubação e os tratos culturais das soqueiras foram realizados da seguinte forma:

Em 2009 (1^a. safra), realizou-se a adubação líquida com aplicação de 1 t ha⁻¹ da formulação NPK 10-00-08 e aplicação de 2 kg ha⁻¹ do herbicida diuron + hexazinone (Velpar K WG).

Em 2010 (2^a. safra), realizou-se a adubação sólida, com aplicação de 1 t ha⁻¹ da formulação NPK 10-05-10 e aplicação de 1,8 kg ha⁻¹ do herbicida diuron + hexazinone (Velpar K WG) e 1,2 kg ha⁻¹ do herbicida Amicarbazone (Dinamic). Também, foi realizada uma aplicação aérea de 0,2 kg ha⁻¹ do fungo entomopatogênico *Metharhizium anisopliae* e 0,8 kg ha⁻¹ do inseticida tiametoxam (Actara 250 WG) para o controle da cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva fimbriolata*).

Em 2011 (3^a. safra), realizou-se a adubação sólida com aplicação de 0,8 t ha⁻¹ da formulação NPK 20-00-20 e aplicação de 1,8 kg ha⁻¹ do herbicida diuron + hexazinone (Velpar K WG).

Em 2012 (4^a. safra), foi realizada a mesma adubação e manejo de plantas infestantes do ano anterior.

Para as adubações das soqueiras utilizou-se o cultivador sem a incorporação do adubo sobre a linha da cultura e os herbicidas foram aplicados na pré-emergência das plantas infestantes. A pulverização foi realizada com pulverizador de barras, tracionado por trator, com volume de calda de 200 L ha⁻¹, pressão de trabalho de 60 lbf pol², equipado com pontas de pulverização de jato plano 8004, espaçados em 0,5m, entre si.

5.6 Avaliações

5.6.1 Balanço hídrico climatológico

Para a análise de disponibilidade hídrica decennial das quatro safras do experimento (2008 a 2012) realizou-se o balanço hídrico climatológico, proposto por Thornthwaite e Mather (1955), com o auxílio do programa "BHnorm", elaborado em planilha Excel por Rolim et al. (1998), assumindo-se uma capacidade máxima de armazenamento de água no solo (CAD) igual a 100 mm. A evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948).

Os dados meteorológicos do município de Bocaina – SP foram obtidos nas estações meteorológicas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

5.6.2 Parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar

Para avaliação dos parâmetros tecnológicos foram coletados dez colmos sequenciais em cada unidade experimental, sendo os colmos submetidos ao desponte na altura da gema apical (ponto de quebra) e, posteriormente, encaminhados para o laboratório de análise tecnológica da própria usina para determinação dos valores de Pol (porcentagem aparente de sacarose contida numa solução de açúcares) e fibra da cana-de-açúcar. A coleta dos colmos foi realizada no dia anterior à colheita do experimento para as quatro safras.

5.6.2.1 Pol

A Pol (sacarose) é o principal parâmetro de qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, na qual refere-se ao açúcar diretamente cristalizável no processo de fabricação (FERNANDES, 2003), sendo obtida através da equação 1:

$$P = P_c (1 - 0,01F)C \quad (1)$$

em que:

P = Pol da cana-de-açúcar (%)

P_c = Pol do caldo (%)

F = Fibra da cana-de-açúcar (%)

C = Coeficiente de transformação da Pol do caldo extraído em Pol do caldo absoluto

O valor de C foi obtido pela equação 2:

$$C = 1,0313 - 0,00575F \quad (2)$$

5.6.2.2 Fibra

A fibra é a matéria insolúvel em água contida na cana-de-açúcar. (FERNANDES, 2003). No sistema de pagamento aos fornecedores de cana-de-açúcar pelo teor de sacarose, a fibra é estimada através de uma equação de regressão linear que correlaciona o peso do bagaço úmido (PBU) resultante da prensagem à 24,5 MPa por 1 minuto de 0,5kg de amostra de cana-de-açúcar desfibrada e homogeneizada.

De acordo com o Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (CONSECANA, 2001), o teor de fibra (F) foi estimado através da equação 3:

$$F = 0,08PBU + 0,876 \quad (3)$$

em que:

F = Fibra da cana-de-açúcar (%)

PBU = Peso do bagaço úmido da prensa, em gramas

5.6.3 Parâmetros de produtividade da cana-de-açúcar

5.6.3.1 Produtividade de colmos

A produtividade da cana-de-açúcar, em toneladas de colmos por hectare (TCH), foi obtida através da colheita e pesagem simultânea das quatro linhas centrais (área útil) de cada unidade experimental, sendo que as duas linhas laterais restantes foram consideradas bordadura.

Durante as quatro safras, a colheita das unidades experimentais foi realizada mecanicamente, sem a queima prévia do canavial, com a colhedora da marca Case IH, modelo A8800 (Figura 07), cujo o peso total era de 180 kN, equipada com esteira com largura das sapatas de 0,46m e bitola de 1,88m.



Figura 07. Colhedora de cana-de-açúcar utilizada no experimento.

Para pesagem da cana-de-açúcar colhida utilizou-se o caminhão transbordo instrumentado CTC da marca Volkswagen, modelo Worker 1518 (Figura 08), cujo peso total do conjunto (caminhão + carroceria) é de 92,7 kN, bitola de 2,1m, pneus dianteiros Continental 365/80 R20 MPF e pneus traseiros Alliance 600/50-22.5 MPF com pressão de trabalho de 3,7 e 4,7 MPa, respectivamente. O caminhão utilizado possui quatro células de carga nos quadrantes da carroceria transbordo que transmitem, mesmo em movimento, a resultante das forças que representam o peso da carga, para um visor posicionado dentro da cabine (Figura 09).



Figura 08. Colheita mecânica da cana-de-açúcar durante o experimento.



Figura 09. Visor de identificação de pesagem posicionado dentro da cabine do caminhão transbordo instrumentado.

As colheitas da primeira à quarta safra foram realizadas nos dias 02/09/2009, 04/08/2010, 17/08/2011 e 04/09/2012 e o ciclo foi de 524, 336, 378 e 384 dias, respectivamente.

5.6.3.2 Produtividade de açúcar

A produtividade de açúcar, expressa em toneladas de Pol por hectare (TPH), foi obtida a partir do produto de TCH e o Pol da cana-de-açúcar (%).

5.6.4 Atributos do solo

Aproximadamente 60 dias após a colheita da quarta safra, foram realizadas as amostragens para determinação da densidade, teor de água, carbono orgânico e o índice de cone do solo nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e 0,2 a 0,4m e nas posições de amostragem: na linha da cultura (LC) e 0,1m da linha, em paralelo (LP) (Figura 10).

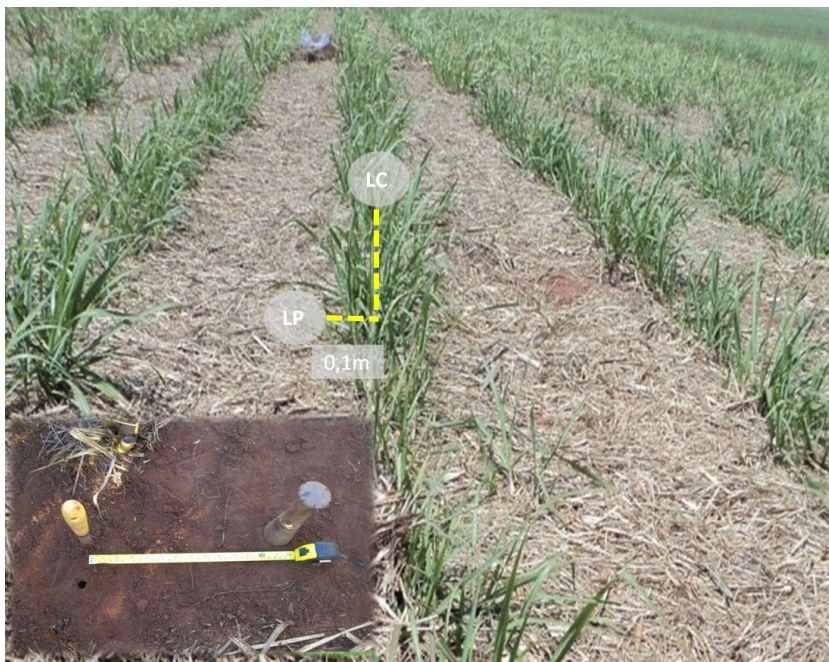


Figura 10. Posição de amostragem na linha da cultura (LC) e 0,1m da linha, em paralelo (LP).

5.6.4.1 Densidade e índice de cone do solo

A coleta de dados no campo para determinação da densidade e do índice de cone do solo foi realizada com a Unidade Móvel de Amostragem de Solo (UMAS) conforme descrito por Lanças (2006). Trata-se de uma carreta fechada (Figura 11) de um eixo que pode ser transportada por rodovias, tracionada por caminhonete ou carro. Para o funcionamento em áreas agrícolas, a carreta deve ser tracionada por um trator com engate na barra de tração e no sistema de acionamento hidráulico.



Figura 11. Unidade Móvel de Amostragem de Solo (UMAS) utilizada no experimento.

Na carreta estavam instalados dois equipamentos (Figura 12): um penetrômetro hidráulico-eletrônico equipado com um pistão hidráulico, célula de carga e uma haste de aço contendo uma ponteira cônica de ângulo sólido de 30° com diâmetro de 0,02m (LANÇAS; SANTOS, 1998) utilizado para a determinação da resistência do solo à penetração medida pelo índice de cone do solo (IC) e um sistema hidráulico mecânico de retirada de amostras indeformadas do solo, em anéis padrões, de dimensões: altura 0,03m e diâmetro de 0,07m.

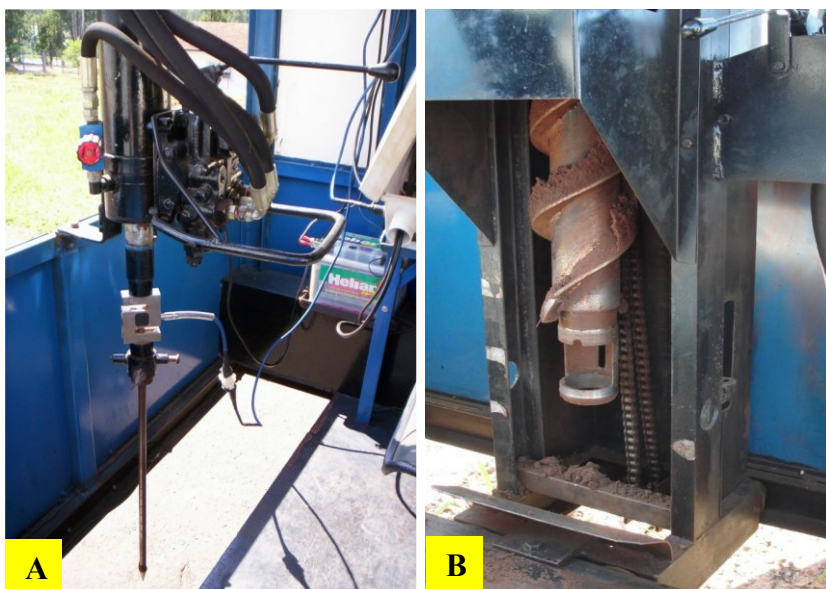


Figura 12. Penetrômetro hidráulico-eletrônico (A) e o sistema hidráulico-mecânico de retirada de amostras indeformadas (B).

Para realização do trabalho, o penetrômetro hidráulico-eletrônico, equipado com um cone normalizado, foi acionado e movimentado por um pistão e válvulas hidráulicas, enviando os resultados para um sistema eletrônico de aquisição de dados Micrologger 23X – Campbell Cientific que forneceu os valores de força obtidos através de uma célula de carga com capacidade de 2000kgf trabalhando na velocidade de penetração de $0,03\text{m s}^{-1}$, (ASAE S313.2, 1999), sendo que os dados correspondentes à profundidade de penetração no solo foram gerados por um potenciômetro.

Para o funcionamento do sistema hidráulico-mecânico de retirada de amostras indeformadas utilizou-se motores e válvulas hidráulicas que movimentavam dois tubos concêntricos para penetração no solo. O tubo externo, além do movimento de translação para penetrar no solo, possuía o movimento de rotação através de uma rosca sem-fim de duas entradas. O tubo interno (Figura 13) onde estavam instalados os anéis para amostragem indeformada do solo apresentavam somente o movimento de translação

que estava sincronizado com movimento do tubo externo. O mecanismo de transmissão dos movimentos do motor para os tubos foi realizado por rodas dentadas e um sistema de corrente, sendo a inserção e a retirada do anel amostrador no tubo interno realizadas de forma manual, através da abertura do tubo externo.

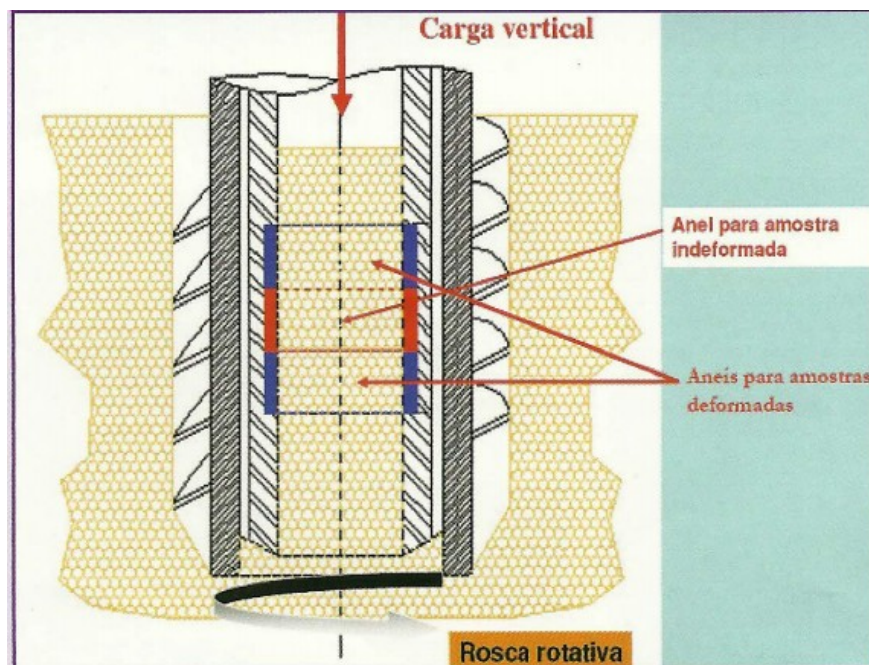


Figura 13. Disposições dos anéis de amostragem no tubo interno do sistema hidráulico-mecânico.

Fonte: Masiero et al., 2012.

Para avaliar a resistência do solo à penetração, calculada pelo IC, realizaram-se três repetições por unidade experimental com o auxílio do penetrômetro hidráulico-eletrônico. Para cada repetição foram realizadas sete leituras distanciadas em 0,1m entre si, em um transepto de 1,5m (disposto transversalmente ao sentido da linha da cultura). Avaliou-se o IC nas faixas de profundidade de 0 a 0,1, 0,1 a 0,2, 0,2 a 0,3 e 0,3 a 0,4m, sendo utilizados somente os valores médios obtidos nas faixas de profundidade e nas posições amostrais citadas anteriormente.

Para se obter a densidade do solo foram coletadas quatro amostras indeformadas por unidade experimental, sendo retiradas nas faixas de profundidade e nas posições amostrais descritas no item 5.6.3, totalizando-se 96 amostras. Utilizou-se o método do cilindro volumétrico para determinação da densidade do solo, conforme EMBRAPA (1997).

5.6.4.2 Teor de água do solo

Para verificar o teor de água foram coletadas quatro amostras por unidade experimental com o auxílio de um trado, sendo que as amostras foram retiradas nas faixas de profundidade e posições amostrais descritas no item 5.6.3, totalizando-se 96 amostras por parâmetro avaliado.

O teor de água foi determinado pelo método gravimétrico, padrão em base de massa de solo seco em estufa na temperatura de 105-110°C até a massa constante, de acordo com EMBRAPA (1997).

O teor de água na base de massa seca (Θ) foi determinado pela equação 4:

$$\Theta = (M_u - M_s) / M_s \quad (4)$$

em que:

Θ = teor de água a base de volume ($m^3 m^{-3}$);

M_u = massa de solo úmido (g);

M_s = massa de solo seco a 105-110° C durante 24 horas (g).

5.6.4.3 Carbono orgânico do solo

Para se obter o carbono orgânico do solo foram coletadas quatro amostras por unidade experimental com o auxílio de um trado, sendo que as amostras foram retiradas nas faixas de profundidade e posições amostrais descritas no item 5.6.3, totalizando-se 96 amostras por parâmetro avaliado.

A determinação do carbono orgânico no solo foi realizada pelo método de Walkley-Black descrito por Allison (1965). Esse método é caracterizado pela oxidação do carbono orgânico com a utilização de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$, 1,25 M) em meio ácido, sendo o carbono convertido em dióxido de carbono (CO_2), e, o restante desta reação, titulado, com sulfato ferroso ($FeSO_4$, 0,25M) na presença do indicador difenilamina. Por diferença, calculou-se a quantidade de carbono orgânico existente na amostra, sendo o resultado expresso em gramas de carbono orgânico em um decímetro cúbico de solo ($g dm^{-3}$).

5.7 Análise estatística

Os resultados de produtividade (TCH e TPH) e análise tecnológica (Pol e fibra) da cana-de-açúcar foram submetidos à análise de variância em esquema fatorial 2 x 3, sendo dois espaçamentos de plantio e três cultivares de cana-de-açúcar.

Os resultados dos atributos do solo (densidade, carbono orgânico, teor de água e o índice de cone do solo) foram submetidos à duas análises de variância em fatorial duplo. Na primeira análise, adotou-se como covariável os valores obtidos na posição de amostragem (na linha e a 0,1m da linha, em paralelo), sendo os fatores distribuídos no esquema 2 x 2: dois espaçamentos de plantio (1,4 e 1,5m) e duas faixas de profundidade (0 a 0,2 e 0,2 a 0,4m). Na segunda análise, a covariável foi o valor obtido em cada faixa de profundidade (0 a 0,2 e 0,2 a 0,4m), distribuindo-se os fatores no esquema 2 x 2, sendo: dois espaçamentos de plantio (1,4 e 1,5m) e duas posições de amostragem (na linha e à 0,1m da linha, em paralelo).

Após as análises de variância, os resultados foram submetidos ao teste de média de Fisher (ou LSD) à 10% de probabilidade.

Para avaliar a interação entre os atributos do solo realizou-se a análise de correlação linear simples de Pearson, com significância obtida pelo teste t.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Condições climáticas

De acordo com os resultados obtidos pelo balanço hídrico climatológico do município de Bocaina - SP (Figura 14), a primeira safra apresentou um déficit hídrico inferior aqueles das safras posteriores. O período de desenvolvimento da planta, que compreendeu desde o plantio até a colheita da primeira safra, foi superior às demais safras, que contribuiu para uma maior produtividade de colmos de cana-de-açúcar.

Na segunda safra, o excedente hídrico foi significativamente acima da média nos meses de setembro, outubro e, principalmente, em novembro de 2009; porém, o déficit hídrico acumulado de março a agosto foi superior ao da safra anterior. Além disso, o período de desenvolvimento do canavial foi inferior às demais safras, que contribuiu para uma menor produtividade da cultura.

Na terceira safra, as precipitações de maio a setembro foram abaixo da média e, também, foi observado florescimento intenso nas cultivares CTC9 e RB966928 devido a uma combinação de fatores que incluem temperatura, fotoperíodo, precipitação e radiação solar. Conforme a Conab (2011), as condições climáticas desse ano estimularam o florescimento de algumas cultivares de cana-de-açúcar nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Goiás.

Na última safra, o déficit hídrico acentuado acumulado de março a agosto foi superior às demais safras, que pode ter contribuído para uma menor produtividade da cana-de-açúcar. Outro fator que impactou na produtividade da cultura foi

o excedente hídrico acumulado de novembro a abril inferior às demais safras. De acordo com Alfonsi et al. (1987), se nessa fase de desenvolvimento ocorrer uma escassez de água, a produtividade da cana-de-açúcar pode diminuir consideravelmente.

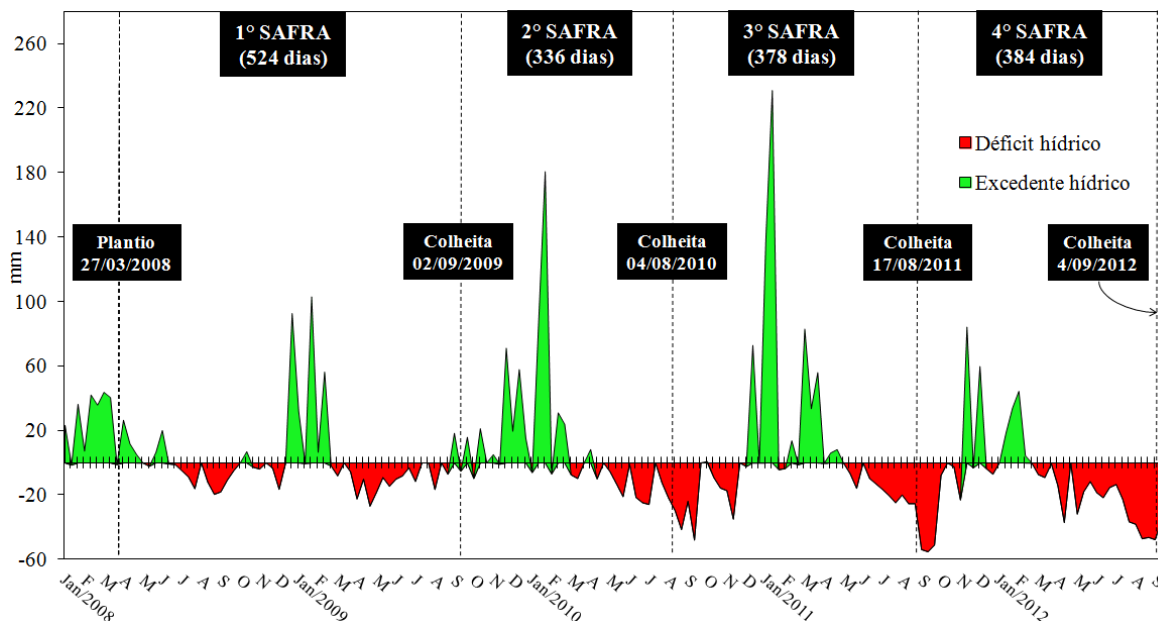


Figura 14. Componentes do balanço hídrico climatológico dividido em decêndios do município de Bocaina - SP.

6.2 Parâmetros tecnológicos e de produtividade da cana-de-açúcar

6.2.1 Produtividade de colmos

De acordo com a Tabela 3, os valores médios de toneladas de colmos de cana-de-açúcar por hectare (TCH), expresso em Mg ha^{-1} , foram semelhantes entre os espaçamentos de plantio de 1,4 e 1,5m em cada safra. Figueiredo (1995) também não encontrou diferenças significativas entre os espaçamentos de plantio de 1,15 e 1,40m.

Observou-se um comportamento diferenciado entre as cultivares, dentro dos espaçamentos de plantio, corroborando os dados obtidos por Banerjee et al. (2012), Ernandes (2005) e Richard et al. (1991). Na primeira safra, o TCH da cultivar RB925211 foi significativamente superior às demais para o espaçamento de plantio de 1,4m. Porém, na segunda e terceira safras e na média das quatro safras, o TCH da cultivar RB966928 foi significativamente superior às demais cultivares em ambos espaçamentos de plantio. Na quarta safra, a RB966928 foi significativamente superior às cultivares CTC9 e RB925211 no espaçamento de plantio de 1,5m; entretanto, o TCH das cultivares CTC9 e

RB966928 foram semelhantes para o espaçamento de plantio de 1,4m, sendo o TCH da RB925211 significativamente inferior à RB966928.

Em todas as safras, incluindo a média, não foram observadas interações significativas para os valores médios de TCH entre as cultivares e os espaçamentos de plantio, corroborando os trabalhos de Guimarães et al. (1981), Pereira Júnior (1984) e Richard et al. (1991).

Tabela 3. Análise por safra dos valores médios de toneladas de colmos por hectare (Mg ha⁻¹) entre os espaçamentos de plantio e as cultivares de cana-de-açúcar.

Tratamentos	1° safra		2° safra		3° safra		4° safra		Média de 4 safras	
¹ Espaçamento / ² Cultivar	1,4m	1,5m	1,4m	1,5m	1,4m	1,5m	1,4m	1,5m	1,4m	1,5m
CTC9	116,9 Ba	112,6 Aa	68,0 Ba	64,2 Ba	55,4 Ba	53,6 Ba	56,6 ABa	48,3 Ba	74,2 Ba	69,7 Ba
RB925211	127,7 Aa	120,7 Aa	65,8 Ba	65,1 Ba	59,0 Ba	57,8 Ba	53,3 Ba	51,7 Ba	76,4 Ba	73,8 Ba
RB966928	116,6 Ba	118,2 Aa	84,6 Aa	87,6 Aa	67,4 Aa	69,9 Aa	62,8 Aa	61,8 Aa	82,9 Aa	84,4 Aa
CV (%)	6,6		11,7		11,1		12,6		6,4	
<u>Probabilidade de F</u>										
Bloco	0,1842		0,0016		0,0146		0,0565		0,0037	
Espaçamento	0,3254		0,8993		0,9570		0,2251		0,3678	
Cultivar	0,0682		0,0001		0,0016		0,0163		0,0005	
Espaçamento x cultivar	0,5460		0,7293		0,7919		0,5269		0,4750	

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento dentro de cada safra; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator variedade dentro de cada safra.

6.2.2 Pol da cana-de-açúcar

Os valores médios de Pol (%) da cana-de-açúcar descritos na Tabela 4 foram semelhantes entre os espaçamentos de plantio de 1,4 e 1,5m em cada safra, confirmando os resultados de Ernandes (2005), Figueiredo (1995), Parasuraman e Sudhagar (2010).

Somente na primeira safra foram observadas diferenças significativas para os valores médios de Pol entre as cultivares, dentro dos espaçamentos de plantio. Os valores de Pol da cultivar RB966928 no espaçamento de plantio de 1,4m foram significativamente superiores às cultivares RB925211 e CTC9, sendo que no espaçamento de 1,5m os valores de Pol da RB925211 foram significativamente inferiores às demais cultivares. Os valores significativamente inferiores de Pol da cultivar

RB925211, em ambos os espaçamentos de plantio, foram compensados, provavelmente, pelo elevado TCH (Tabela 3), concordando com os resultados de Paranhos (1972).

Em todas as safras, incluindo a média, não foram observadas interações significativas para os valores médios de Pol entre as cultivares e os espaçamentos de plantio, contrariando os resultados obtidos por Banerjee et al. (2012).

Tabela 4. Análise por safra dos valores médios de Pol % cana-de-açúcar entre os espaçamentos de plantio e as cultivares de cana-de-açúcar.

Tratamentos ¹ Espaçamento / ² Cultivar	1° safra		2° safra		3° safra		4° safra		Média de 4 safras	
	<u>1,4m</u>	<u>1,5m</u>	<u>1,4m</u>	<u>1,5m</u>	<u>1,4m</u>	<u>1,5m</u>	<u>1,4m</u>	<u>1,5m</u>	<u>1,4m</u>	<u>1,5m</u>
CTC9	17,1 Ba	17,5 Aa	17,0 Aa	16,3 Aa	17,5 Aa	17,7 Aa	17,0 Aa	17,6 Aa	17,1 Aa	17,1 Aa
RB925211	16,9 Ba	17,1 Ba	16,1 Aa	17,4 Aa	17,4 Aa	18,0 Aa	17,2 Aa	17,1 Aa	17,0 Aa	17,0 Aa
RB966928	17,6 Aa	17,7 Aa	16,2 Aa	16,3 Aa	17,6 Aa	17,4 Aa	17,7 Aa	17,1 Aa	17,2 Aa	17,2 Aa
CV (%)	1,9		6,8		2,7		5,5		2,2	
<u>Probabilidade de F</u>										
Bloco	0,0222		0,5211		0,5170		0,8552		0,6058	
Espaçamento	0,1368		0,5679		0,2575		0,9660		0,2864	
Cultivar	0,0056		0,6280		0,7323		0,8994		0,9616	
Espaçamento x cultivar	0,6054		0,2445		0,3277		0,4460		0,3247	

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento dentro de cada safra; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator variedade dentro de cada safra.

6.2.3 Fibra da cana-de-açúcar

Os valores médios de fibra (%) descritos na Tabela 5 foram semelhantes entre os espaçamentos de plantio de 1,4 e 1,5m na primeira, segunda, terceira e na média das quatro safras, confirmando os resultados de Ernandes (2005) e Pereira Júnior (1984). Entretanto, na quarta safra observou-se que os valores médios de fibra da cultivar RB966928 no espaçamento de plantio de 1,4m foram significativamente superiores ao espaçamento de plantio de 1,5m. Para Irvine e Benda (1980), o teor de fibra nos colmos tende a crescer com a redução do espaçamento de plantio em função da maior presença de colmos de menor diâmetro, que resulta numa elevada relação circunferência do colmo por área. Conforme Copersucar (1989), a distribuição das fibras é, principalmente, periférica, o que explica o elevado teor de fibra em colmos de menor diâmetro.

Em relação às cultivares, na terceira safra e na média das quatro safras foram observadas diferenças significativas nos valores médios de fibra entre as cultivares dentro dos espaçamentos de plantio, confirmando os resultados de Ernandes (2005). Na terceira safra, os valores de fibra da CTC9 foram significativamente superiores às demais cultivares no espaçamento de plantio de 1,4m; entretanto, no espaçamento de 1,5m, os valores de fibra da CTC9 foram significativamente superiores somente em relação à RB925211. Na média das quatro safras, somente para o espaçamento de plantio de 1,4m, ocorreu diferença significativa entre as cultivares, na qual os valores de fibra da CTC9 foram superiores à RB925211 e semelhantes à RB966928.

Foi observado que o florescimento nas cultivares CTC9 e RB966928 na terceira safra foi maior do que nas outras safras, o que pode ter provocado diferenças nos valores médios de fibra das cultivares dentro dos espaçamentos de plantio, concordando com Araldi et al. (2010) que afirmou que o florescimento aumentou o teor de fibra devido a redução do volume de caldo nos colmos da cana-de-açúcar.

Em todas as safras, incluindo a média, não foram observadas interações significativas nos valores médios de fibra entre as cultivares e os espaçamentos de plantio.

Tabela 5. Análise por safra dos valores médios de Fibra (%) entre os espaçamentos de plantio e as cultivares de cana-de-açúcar.

Tratamentos	1° safra		2° safra		3° safra		4° safra		Média de 4 safras	
¹ Espaçamento / ² Cultivar	1,4m	1,5m	1,4m	1,5m	1,4m	1,5m	1,4m	1,5m	1,4m	1,5m
CTC9	11,9 Aa	12,1 Aa	11,7 Aa	11,8 Aa	13,0 Aa	12,8 Aa	13,1 Aa	12,6 Aa	12,4 Aa	12,3 Aa
RB925211	11,9 Aa	12,0 Aa	11,6 Aa	11,4 Aa	11,9 Ba	12,0 Ba	12,6 Aa	12,4 Aa	12,0 Ba	12,0 Aa
RB966928	11,9 Aa	12,1 Aa	11,7 Aa	11,7 Aa	12,3 Ba	12,3 ABa	13,1 Aa	12,1 Ab	12,2 ABa	12,1 Aa
CV (%)	5,2		4,0		3,8		5,8		2,6	
<u>Probabilidade de F</u>										
Bloco	0,9969		0,9413		0,0290		0,3700		0,2760	
Espaçamento	0,6256		0,9652		0,8647		0,0736		0,4455	
Cultivar	0,9709		0,6833		0,0034		0,5882		0,0712	
Espaçamento x cultivar	0,9967		0,8195		0,8132		0,5987		0,9155	

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento dentro de cada safra; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator variedade dentro de cada safra.

6.2.4 Produtividade de açúcar

De acordo com a Tabela 6, os valores médios de toneladas de Pol por hectare (TPH) foram semelhantes para ambos espaçamentos de plantio em cada safra, corroborando os resultados de Garside et al. (2004).

Quanto ao desempenho das cultivares dentro dos espaçamentos de plantio, não foram observadas diferenças significativas nos valores de TPH na primeira safra. Nas safras posteriores, os valores médios de TPH da cultivar RB966928 foram superiores às demais cultivares em ambos espaçamentos de plantio, sendo somente semelhante à cultivar CTC9 na quarta safra para o espaçamento de plantio de 1,4m. As variações de produtividade entre as cultivares de cana-de-açúcar a partir da segunda safra pode estar associada à resposta destas cultivares ao tráfego de máquinas agrícolas, corroborando os resultados de Braunack et. al (2006).

Em todas as safras, incluindo a média, não foram observadas interações significativas para os valores médios de TPH entre as cultivares e os espaçamentos de plantio, contrariando os resultados de Banerjee et al. (2012) que encontraram interação para este parâmetro.

Tabela 6. Análise por safra dos valores médios de toneladas de Pol por hectare (TPH) entre os espaçamentos de plantio e as cultivares de cana-de-açúcar.

Tratamentos	1° safra		2° safra		3° safra		4° safra		Média de 4 safras	
	¹ 1,4m	¹ 1,5m	¹ 1,4m	¹ 1,5m	¹ 1,4m	¹ 1,5m	¹ 1,4m	¹ 1,5m	¹ 1,4m	¹ 1,5m
CTC9	19,9 Aa	19,7 Aa	11,6 Ba	10,4 Ba	9,7 Ba	9,5 Ba	9,6 ABa	8,5 Ba	12,7 Ba	12,1 Ba
RB925211	21,6 Aa	20,6 Aa	10,7 Ba	11,4 Ba	10,3 Ba	10,4 Ba	9,2 Ba	8,8 Ba	12,9 Ba	12,8 Ba
RB966928	20,5 Aa	20,9 Aa	13,7 Aa	14,3 Aa	11,9 Aa	12,2 Aa	11,1 Aa	10,6 Aa	14,3 Aa	14,4 Aa
CV (%)	6,8		12,6		11,0		14,2		6,7	
<u>Probabilidade de F</u>										
Bloco	0,4671		0,0077		0,0193		0,1052		0,0073	
Espaçamento	0,6066		0,9364		0,7973		0,2518		0,5873	
Cultivar	0,2030		0,0010		0,0020		0,0260		0,0008	
Espaçamento x cultivar	0,6027		0,4068		0,9270		0,8349		0,6593	

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento dentro de cada safra; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator variedade dentro de cada safra.

6.3 Atributos do solo

6.3.1 Teor de água e índice de cone do solo (IC)

Conforme Tabela 7, observou-se que na posição amostral de LP o teor de água do solo, na faixa de profundidade de 0,2 a 0,4m, foi significativamente superior à faixa de profundidade de 0 a 0,2m no espaçamento de plantio de 1,5m.

De acordo com as Tabelas 7 e 8, não houve diferenças significativas nos teores de água do solo entre os espaçamentos de plantio nas faixas de profundidade e posições amostrais.

Tabela 7. Valores médios de teor de água do solo, em $m^3 m^{-3}$, entre os espaçamentos de plantio e as faixas de profundidade nas posições da linha da cultura e à 0,1m da linha, em paralelo.

Faixa de profundidade ²	Espaçamento de plantio ¹		
	1,4m	1,5m	Média
	<u>Posição de 0,1m da linha da cultura em paralelo</u>		
0-0,2m	10,2 Aa	10,2 Ba	10,2 B
0,2-0,4m	10,5 Aa	10,9 Aa	10,7 A
Média	10,3 a	10,5 a	
CV % : 8,6			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,432			
Faixa de profundidade: 0,049			
Faixa de profundidade x Espaçamento de plantio: 0,299			
	<u>Posição na linha da cultura</u>		
0-0,2m	11,5 Aa	11,5 Aa	11,5 A
0,2-0,4m	11,6 Aa	11,7 Aa	11,6 A
Média	11,5 a	11,6 a	
CV % : 7,2			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,810			
Faixa de profundidade: 0,471			
Faixa de profundidade x Espaçamento de plantio: 0,755			

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento de plantio; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator faixa de profundidade dentro de cada posição amostral.

Os valores médios de teor de água do solo na posição da LC foram significativamente superiores à de LP em ambas profundidades amostrais (Tabela 8), confirmando os resultados de Braunack et. al (2006).

A comparação dos valores médios de IC entre os espaçamentos de plantio tornou-se possível devido os resultados semelhantes de teor de água do solo, concordando com Souza et al. (2006).

Tabela 8. Valores médios de teor de água do solo, em $m^3 m^{-3}$, entre os espaçamentos de plantio e as posições amostrais nas faixas de profundidade de 0 a 0,2m e de 0,2 a 0,4m.

Posição ²	Espaçamento de plantio ¹		
	1,4m	1,5m	Média
<u>Faixa de profundidade de 0-0,2m</u>			
Linha da cultura	11,5 Aa	11,5 Aa	11,5 A
0,1m paralelo a linha da cultura	10,2 Ba	10,2 Ba	10,2 B
Média	10,9 a	10,8 a	
CV % : 9,9			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,876			
Posição: < 0,001			
Espaçamento de plantio x Posição: 0,929			
<u>Faixa de profundidade de 0,2-0,4m</u>			
Linha da cultura	11,6 Aa	11,7 Aa	11,6 A
0,1m paralelo a linha da cultura	10,5 Ba	10,9 Ba	10,7 B
Média	11,0 a	11,3 a	
CV % : 8,5			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,213			
Posição: < 0,001			
Espaçamento de plantio x Posição: 0,498			

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento de plantio; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator posição dentro de cada faixa de profundidade.

Os valores de IC na faixa de profundidade de 0,2 a 0,4m (Tabela 9) foram significativamente superiores à faixa de profundidade de 0 a 0,2m nos dois espaçamentos de plantio e em ambas as posições amostrais, atingindo valores acima de 2MPa, sendo este valor considerado restritivo ao crescimento das raízes de cana-de-açúcar em algumas condições específicas (OTTO et al., 2011). O tráfego dos tranbordos e da

colhedora de cana-de-açúcar podem ter influenciado os valores de IC na subsuperfície do solo, concordando com Hakansson e Voorhees (1997) e Laia et al. (2006) que afirmaram que a presença de compactação em subsuperfície é determinada pela propagação de tensões aplicadas na superfície do solo e, também, pela frequência do tráfego.

Tabela 9. Valores médios do índice de cone do solo, em MPa, entre os espaçamentos de plantio e as profundidades amostrais nas posições da linha da cultura e à 0,1m da linha, em paralelo.

Faixa de profundidade ²	Espaçamento de plantio ¹		
	1,4m	1,5m	Média
	<u>Posição de 0,1m da linha da cultura em paralelo</u>		
0-0,2m	1,67 Ba	1,88 Ba	1,78 B
0,2-0,4m	3,58 Ab	4,01 Aa	3,80 A
Média	2,62 b	2,95 a	
CV % : 40,4%			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,017			
Faixa de profundidade: <0,001			
Faixa de profundidade x Espaçamento de plantio: 0,404			
	<u>Posição na linha da cultura</u>		
0-0,2m	1,11 Ba	1,32 Ba	1,21 B
0,2-0,4m	2,65 Ab	3,15 Aa	2,90 A
Média	1,88 b	2,23 a	
CV % : 47,1			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,007			
Faixa de profundidade: <0,001			
Faixa de profundidade x Espaçamento de plantio: 0,242			

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento de plantio; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator faixa de profundidade dentro de cada posição amostral.

Na faixa de profundidade de 0,2 a 0,4m, os valores de IC, no espaçamento de plantio de 1,5m, foram significativamente superiores ao espaçamento de plantio de 1,4m, em ambas posições amostrais (Tabela 9). Esse resultado pode estar associado à proximidade de raízes da cana-de-açúcar em subsuperfície no espaçamento de plantio menor. Conforme Vasconcelos (2002), o crescimento radicular da cana-de-açúcar é acumulativo durante o ciclo da cultura, sendo que a dinâmica de renovação e morte das raízes a cada safra no espaçamento de plantio de 1,4m pode ter contribuído para o aumento de macroporos no solo, e, conseqüentemente, uma diminuição nos valores médios de IC.

Os valores de coeficiente de variação do IC foram considerados altos, concordando com Carvalho et al. (2003). Esta alta variabilidade pode estar associada à posição amostral em que foi avaliado tal atributo, sendo que houve uma grande quantidade de raízes e rizomas da cana-de-açúcar nesses locais, que podem ter interferido nos valores de IC. Segundo Torres e Saraiva (1999) é temerário definir se um solo está ou não compactado apenas com as avaliações feitas com o penetrômetro.

Na Tabela 10, os valores de IC na posição de LP foram significativamente superiores à da LC nos dois espaçamentos de plantio e nas duas faixas de profundidade em função dos valores inferiores de teor de água no solo (Tabela 8) e, possivelmente, pela maior intensidade do tráfego agrícola nesta posição, corroborando os trabalhos de Braunack et al. (2006) e Souza et al. (2012a).

Tabela 10. Valores médios de índice de cone do solo, em MPa, entre os espaçamentos de plantio e as posições amostrais nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4m.

Posição ²	Espaçamento de plantio ¹		
	1,4m	1,5m	Média
	<u>Faixa de profundidade de 0-0,2m</u>		
Linha da cultura	1,11 Ba	1,32 Ba	1,21 B
0,1m paralelo a linha da cultura	1,67 Aa	1,88 Aa	1,78 A
Média	1,39 b	1,60 a	
CV % : 29,0			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,028			
Posição: <0,001			
Espaçamento de plantio x Posição: 0,957			
	<u>Faixa de profundidade de 0,2-0,4m</u>		
Linha da cultura	2,65 Bb	3,15 Ba	2,90 B
0,1m paralelo a linha da cultura	3,58 Ab	4,01 Aa	3,80 A
Média	3,11 b	3,58 a	
CV % : 21,9			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,004			
Posição: <0,001			
Espaçamento de plantio x Posição: 0,835			

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento de plantio; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator posição dentro de cada faixa de profundidade.

6.3.2 Densidade do solo (Ds)

Foram observados valores de densidade do solo (Ds) superiores à $1,69 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 11 e 12) nas faixas de profundidade e posições amostrais de ambos os espaçamentos de plantio. Para Torres et. al (1996) e Trowse Júnior (1967), os valores de Ds acima de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ podem restringir o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. No entanto, a influência da textura e estrutura do solo nesse atributo, limita a escolha de um valor absoluto de referência (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Conforme mostrado nas Tabelas 11 e 12, não houve diferenças significativas nos valores de Ds entre os espaçamentos de plantio nas faixas de profundidade e posições amostrais. Na posição da LC do espaçamento de plantio de 1,5m, o valor médio de Ds na faixa de profundidade de 0,2 a 0,4m foi significativamente superior à faixa de profundidade de 0 a 0,2m, contrariando os resultados de Otto et al. (2011).

Tabela 11. Valores médios de densidade do solo, em g cm^{-3} , entre os espaçamentos de plantio e as profundidades amostrais nas posições da linha da cultura e à 0,1m da linha, em paralelo.

Faixa de profundidade ²	Espaçamento de plantio ¹		
	1,4m	1,5m	Média
	<u>Posição 0,1m da linha da cultura em paralelo</u>		
0-0,2m	1,84 Aa	1,83 Aa	1,84 A
0,2-0,4m	1,85 Aa	1,89 Aa	1,87 A
Média	1,84 a	1,86 a	
CV % : 4,6			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,596			
Faixa de profundidade: 0,243			
Faixa de profundidade x Espaçamento de plantio: 0,303			
	<u>Posição na linha da cultura</u>		
0-0,2m	1,70 Aa	1,69 Ba	1,70 B
0,2-0,4m	1,76 Aa	1,82 Aa	1,79 A
Média	1,73 a	1,76 a	
CV % : 7,4			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,436			
Faixa de profundidade: 0,010			
Faixa de profundidade x Espaçamento de plantio: 0,294			

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento de plantio; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator faixa de profundidade dentro de cada posição amostral.

Os valores médios de Ds (Tabela 12) na posição de LP não foram significativamente superiores aos da LC, somente na faixa de profundidade de 0,2 a 0,4m do espaçamento de plantio de 1,5m. Os elevados valores de Ds observados na posição de LP podem estar associados ao tráfego de máquinas pesadas durante a colheita das quatro safras do experimento, concordando com Souza et al. (2012a).

Os valores de Ds no espaçamento de plantio de 1,5m foram significativamente superiores ao de 1,4m, considerando a média dos valores obtidos nas posições amostrais da faixa de profundidade de 0,2-0,4m.

Tabela 12. Valores médios de densidade do solo, em g cm^{-3} , entre os espaçamentos de plantio e as posições amostrais nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4m.

Posição ²	Espaçamento de plantio ¹		
	1,4m	1,5m	Média
	<u>Faixa de profundidade de 0-0,2m</u>		
Linha da cultura	1,70 Ba	1,69 Ba	1,70 B
0,1m paralelo a linha da cultura	1,84 Aa	1,83 Aa	1,84 A
Média	1,77 a	1,76 a	
CV % : 7,9			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,757			
Posição: < 0,001			
Espaçamento de plantio x Posição: 0,966			
	<u>Faixa de profundidade de 0,2-0,4m</u>		
Linha da cultura	1,76 Ba	1,82 Aa	1,79 B
0,1m paralelo a linha da cultura	1,85 Aa	1,89 Aa	1,87 A
Média	1,80 b	1,85 a	
CV % : 5,0			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,034			
Posição: 0,002			
Espaçamento de plantio x Posição: 0,596			

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento de plantio; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator posição dentro de cada faixa de profundidade.

6.3.3 Carbono orgânico do solo (CO)

De acordo com a classificação quantitativa para o CO descrita por Tomé Júnior (1997), os valores médios de CO nas duas posições amostrais de ambos os

espaçamentos de plantio foram considerados médios e baixos nas faixas de profundidade de 0 a 0,2m e de 0,2 a 0,4m, respectivamente.

Como esperado, os valores de CO na faixa de profundidade de 0 a 0,2m foram superiores à faixa de profundidade de 0,2 a 0,4m nas duas posições amostrais de ambos os espaçamentos de plantio (Tabela 13). Esses resultados podem estar associados ao fato da colheita do experimento ter sido realizada de forma mecânica sem a queima prévia do canavial, o que aumentou a quantidade de palhiço na superfície do solo, corroborando os resultados de Souza et.al (2005).

De acordo com a Tabela 13 e 14, os espaçamentos de plantio não influenciaram os valores de CO nas faixas de profundidade e posições amostrais.

Tabela 13. Valores médios de carbono orgânico do solo, em g dm^{-3} , entre os espaçamentos de plantio e as profundidades amostrais nas posições da linha da cultura e à 0,1m da linha, em paralelo.

Faixa de profundidade ²	Espaçamento de plantio ¹		
	1,4m	1,5m	Média
	<u>Posição de 0,1m da linha da cultura em paralelo</u>		
0-0,2m	10,0 Aa	10,1 Aa	10,1 A
0,2-0,4m	8,3 Ba	8,5 Ba	8,4 B
Média	9,2 a	9,3 a	
CV % : 13,0			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,700			
Faixa de profundidade: < 0,001			
Faixa de profundidade x Espaçamento de plantio: 0,796			
	<u>Posição na linha da cultura</u>		
0-0,2m	11,3 Aa	12,0 Aa	11,6 A
0,2-0,4m	9,0 Ba	8,5 Ba	8,8 B
Média	10,2 a	10,3 a	
CV % : 19,9			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,772			
Faixa de profundidade: < 0,001			
Faixa de profundidade x Espaçamento de plantio: 0,121			

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento de plantio; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator faixa de profundidade dentro de cada posição amostral.

Os valores médios de CO na posição da LC foram significativamente superiores aos de LP na faixa de profundidade de 0 a 0,2m, em ambos os espaçamentos de plantio (Tabela 14). Isto demonstra que houve, possivelmente, uma maior contribuição do material orgânico oriundo da biomassa radicular da cana-de-açúcar na posição da LC, confirmando os resultados de Hartel (2005). Na faixa de profundidade de 0,2 a 0,4m, em ambos espaçamentos de plantio, não houve diferenças significativas para os valores médios de CO, entre as posições amostrais.

Tabela 14. Valores médios de carbono orgânico do solo, em g dm^{-3} , entre os espaçamentos de plantio e as posições amostrais nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4m.

Posição ²	Espaçamento de plantio ¹		
	1,4m	1,5m	Média
<u>Faixa de profundidade de 0-0,2m</u>			
Linha da cultura	11,3 Aa	12,0 Aa	11,6 A
0,1m paralelo a linha da cultura	10,0 Ba	10,1 Ba	10,1 B
Média	10,7 a	11,1 a	
CV % : 14,9			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,327			
Posição: < 0,001			
Espaçamento de plantio x Posição: 0,367			
<u>Faixa de profundidade de 0,2-0,4m</u>			
Linha da cultura	9,0 Aa	8,5 Aa	8,8 A
0,1m paralelo a linha da cultura	8,3 Aa	8,5 Aa	8,4 A
Média	8,7 a	8,5 a	
CV % : 10,9			
<u>Probabilidade de F</u>			
Espaçamento de plantio: 0,487			
Posição: 0,139			
Espaçamento de plantio x Posição: 0,193			

¹Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator espaçamento de plantio; ² Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste LSD ($P \leq 0,10$) para o fator posição dentro de cada faixa de profundidade.

6.3.4 Correlações entre os atributos do solo

Conforme descrito na Tabela 15, os valores do CO tiveram correlação negativa e significativa com a Ds na faixa de profundidade de 0 a 0,2m. Esse

resultado pode estar associado ao fato dos resíduos orgânicos provenientes da decomposição do palhço e das raízes da cana-de-açúcar possuírem menor densidade que as partículas minerais do solo e, também, pelo efeito cimentante do CO que une as partículas individualizadas do solo em macroagregados, reduzindo a obstrução do espaço poroso (KLEIN, 2008; TIDALL; OADES, 1982). Os valores do CO não apresentaram correlação com o teor de água do solo e o IC, nas duas faixas de profundidade, concordando com Beutler et. al (2002) e Silva et. al (2008).

Os valores de Ds tiveram correlação negativa e significativa com o teor de água do solo na faixa de profundidade de 0 a 0,2m, contrariando os resultados obtidos por Beutler et. al (2002). Os valores de Ds e do IC apresentaram correlação significativa e positiva entre si, para as duas faixas de profundidade, confirmando os resultados de Beutler et. al (2004) e Otto et al. (2011).

Os valores do IC tiveram correlação negativa e significativa com o teor de água do solo nas duas faixas de profundidade, corroborando os resultados de Laboski et al. (1998), Miranda (2006) e Torres e Saraiva (1999).

Tabela 15. Correlação linear simples de Pearson entre o carbono orgânico, o teor de água, a densidade e o índice de cone do solo nas faixas de profundidade de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4m.

	Ds ²	Teor de água ³	IC ⁴
<u>Faixa de profundidade de 0-0,2m</u>			
CO ¹	-0,31*	0,24 ^{NS}	-0,17 ^{NS}
Ds ²		-0,38**	0,43**
Teor de água ³			-0,58**
<u>Faixa de profundidade de 0,2-0,4m</u>			
CO ¹	-0,02 ^{NS}	0,19 ^{NS}	-0,05 ^{NS}
Ds ²		-0,11 ^{NS}	0,40**
Teor de água ³			-0,32*

^{NS}, **, *, Não significativo, significativo pelo teste t à 1% e 5 %, respectivamente. ¹Carbono orgânico do solo (g dm⁻³); ²Densidade do solo (g cm⁻³); ³Teor de água do solo (m³ m⁻³); ⁴Índice de cone do solo (MPa).

7 CONCLUSÕES

Os valores médios de Pol da cana-de-açúcar (%), produtividade em toneladas de colmos e Pol por hectare (TCH e TPH) foram semelhantes entre os espaçamentos de plantio de 1,4 e 1,5m nas quatro safras, incluindo a média.

Os espaçamentos de plantio de 1,4 e 1,5m influenciaram os valores de fibra da cana-de-açúcar (%), dependendo da safra e da cultivar.

De acordo com a safra, os parâmetros tecnológicos e de produtividade das cultivares estudadas diferenciaram-se dentro de cada espaçamento de plantio.

Nas quatro safras, incluindo a média, não houve interações significativas entre os espaçamentos de plantio e os parâmetros tecnológicos e de produtividade das cultivares.

Os espaçamentos de plantio de 1,4 e 1,5m não influenciaram os valores médios de densidade, o carbono orgânico e o teor de água do solo nas faixas de profundidade e posições amostrais.

Os valores médios de índice de cone do solo no espaçamento de plantio de 1,5m foram superiores ao espaçamento de plantio de 1,4m, na faixa de profundidade de 0,2 a 0,4m de ambas posições amostrais.

Independente do espaçamento de plantio, as condições físico-hídricas da posição de linha da cultura foram superiores à posição de 0,1m da linha, na faixa de profundidade de 0 a 0,2m.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, J. J. B. **Índice de cone, capacidade de suporte de carga e teor de água de quatro solos da fazenda Lageado, Botucatu/SP: Correlações e mapas de isocompactação**, 2008. 145f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2008.

ALFONSI, R. R.; PEDRO, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climática para a cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B (Ed.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. São Paulo: Fundação Cargill. cap.1 v.1, p.42-87. 1987. 856p.

ALLISON, L. E. Organic carbon. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; ENSMINGER, L. E.; WHITE, J. L.; CLARK, F. E. (Ed.). Method of soil analysis. Madison: **American Society of Agronomy**, v. 2, p. 1372-1376, 1965.

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

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Procedured for using and

reporting data obtained with the soil cone penetrometer. In: **ASAE Standards 1999: standards engineering practices data**. 46.ed. St. Joseph. p. 991-3 (ASAE EP542).

ARALDI, R.; SILVA, F. M. L.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.3, p.694-702, mar, 2010.

ARRUDA, H. C. **Contribuição para o estudo da técnica cultural da cana-de-açúcar no estado de São Paulo**. 1961. 57 f. Tese de Doutorado, ESALQ/USP, Piracicaba, 1961.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: **Soil Science Society of America**, p.123-141, 1996 (SSSA Special publication, 49).

ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvests in Southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 60, p. 67-78, 2001.

AUDE, M. I. S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 241-248, 1993.

BANERJEE, K., PRAMANIK, B. R., PUSTE, A. M. Effect of different row spacing on ratoonability of high sugar genotypes of sugarcane hybrids. **Journal of Crop and Weed**, v. 8 (2), p. 77-79, 2012.

BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (Saccharum spp.)**. 1981. 142 f. Dissertação (Mestrado), ESALQ/USP, Piracicaba, 1981.

BARBIERI, J. L., POLI, D. M., DONZELLI, J. L. Compactação e descompactação do solo em áreas de reforma de canaviais. **Boletim Técnico Copersucar**, Piracicaba, v.22, 1984. 14-20 p.

BARZEGAR, A. R., OADES, J. M., RENGASAMY, P., Soil structure degradation and mellowing of compacted soils by saline sodic solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, p. 583-588, 1996.

BARZEGAR, A. R.; ASOODAR, M. A.; ANSARI, M. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.57, n.1, p.167-172, 2000.

BASILE F. A.; CÂMARA, G. M. S.; CESAR, M. A. A.; PIEDADE, S. M.S.; MIRANDA, R. E. Produção e qualidade tecnológica de três variedades de cana-de-açúcar, conduzidas sob espaçamento reduzido e tradicional de plantio em condições de cana-de-ano. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 5., Águas de São Pedro, 1993. **Anais...** Piracicaba: STAB, 1993.

BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. V. H.; CORRÊA, M. M.; COSTA, L. M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 29, p. 21-31, 2005.

BAUMGART, TH., HORN, R., Effect of aggregate stability on soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 19, p. 203-213, 1991.

BELL, M. J.; HALPIN, N. V.; ORANGE, D. N.; HAINES, M. Effect of compaction and trash blanketing on rainfall infiltration in sugarcane soils. **Proc. Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v. 23, p. 161-167, 2001.

BELLINASO, I. F.; MORAES, E. E.; DONZELLI, J.L.; SILVA, P. C.; STRINI JUNIOR, A. E. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRÔNOMICA, 6. **Boletim Copersucar**, p. 57-66, 1994.

BENGHOUGH, A. G. & MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v.41, p. 341-358, 1990.

BENGOUGH, A. G.; BRANSBY, M. F.; HANS, J.; MCKENNA, S. J.; ROBERTS, T. J.; VALENTINE, T. A. Root responses to soil physical conditions; Growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, p. 437-447, 2006.

BERTO, P. N. A.; THURLER, A. M.; PEIXOTO, A. A. Plantio em sulco duplo. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 2., 1981, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: STAB, p. 434-442, 1981.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p.829-834, 2002.

BEUTLER. A. N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G .Relação entre alguns atributos físicos e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em latossolos. **Ciência Rural**, v.34, n.2, mar-abr, p. 365-371, 2004.

BRASIL. MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Ministério da Agricultura, **Pecuária e Abastecimento: Brasil Projeções do Agronegócio 2011/2012 a 2021/2022**, Brasília DF, 2012. <http://www.agricultura.gov.br/ministerio/gestao-estrategica/projecoes-do-agronegocio>. Acesso em 13 jan. 2013.

BRAUNACK, M. V., WOOD, A. W., DICK, R. G., GILMOURE, J. M. The extent of soil compaction in sugarcane soils and a technique to minimise it. **Sugar Cane**, v.5, p. 12–18, 1993.

BRAUNACK, M. J.; PEATEY, T. C. Changes in soil physical properties after one pass of a sugarcane haul-out unit. **Australian Journal Experimental Agriculture**, v.39, p.733–742, 1999.

BRAUNACK, M. V.; MCGARRY, D.; CREES, L. R.; HALPIN, N. V. Strategic tillage for planting sugarcane. **Proc. Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v. 21, p. 101–107, 1999.

BRAUNACK, M. V.; ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions, and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, v.89, p.103-121, 2006.

BRAUNACK, M.V. A tyre option for sugarcane haulout trucks to minimise soil compaction. **Journal of Terramechanics**, v. 41, n. 4, p.243-253, Oct, 2004.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: EESC-USP, 1998. 131 p.

CÂMARA, G. M. S. Ecofisiologia da cultura de cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, Cap. 3, p. 31-64, 1993.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1997. p. 132.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, M. O.; SILVA, A. R.; JÚNIOR, L. C. T.; NOBILE, F. O. Atributos físicos de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, Set./Dez, v. 26, n.3, 2006.

CAMPBELL, D. J. Determination and use of soil bulk density in relation to soil compaction. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C., eds. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, Elsevier, p. 113-139, 1994.

CAMPOS, C. M.; MILAN, M.; SIQUEIRA, L. F. F. Identificação e avaliação de variáveis críticas no processo de produção da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 554-564, jul./set., 2008.

CANA DE AÇÚCAR. **Agrianual 2008**. Anuário da agricultura brasileira. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, p. 502, 2008.

- CANTARELLA, H.; RAIJ, B.; VAN QUAGGIO, J. A. Soil and plant analyses for lime and fertilizer recommendations in Brazil. *Commun. Soil Science and Plant Analysis*, v. 29, p.1691-1706, 1998.
- CARAVACA, F.; GARCIA, C.; HERNANDEZ, M. T.; ROLDAN, A. Aggregate stability changes after organic amendment and mycorrhizal inoculation in the afforestation of a semiarid site with *Pinus halepensis*. *Applied Soil Ecology*, v.19, p. 199-208, 2002.
- CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.37, p.1151-1159, 2002.
- CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Ed. FUNEP, Jaboticabal, 1991. 157 p.
- CASTRO, P. R. C.; KLUNGE, R. A. **Ecofisiologia de culturas extrativistas: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira**. Stoller do Brasil, Cosmópolis – SP, 2001. 138 p.
- CASTRO FILHO, C., LOURENÇO, A., GUIMARÃES, M. F., FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. *Soil and Tillage Research*, 65, p. 45–51, 2002.
- CASSEL, D. K.; BOWEN, H. D.; NELSON, L. A. An Evaluation of Mechanical Impedance for Three Tillage Treatments on Norfolk Sandy Loam. *Soil Science Society of America Journal*, n. 42, p. 116-120, 1978.
- CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura – Campinas: 2012. http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_289.html. Acesso em: 25 jun. 2012.
- CESAR, M. A. A.; SILVA, F. C. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria sucroalcooleira**. Ed. CALQ, Piracicaba – SP, 1993. 108 p.

CHEN, J. C. P.; CHOU, C. **Cane Sugar Handbook**: A manual for cane sugar manufacturers and their chemists. 12. ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

CHEN, W. T. **A study on the planting methods of sugarcane at the Tidal Land of Yung Lin**. Taiwan Sugar Exp. Station, Taiwan, (42): p. 87-96, Oct, 1966.

CHEONG, L. R. N.; KWONG, K. F. N. K.; PREEZ, C. C. Soil compaction under sugarcane (*Saccharum hybrid sp.*) cropping and mechanization in Mauritius. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 26, p. 199–205, 2009.

COLETI, J.T.; WALDER, L. A. M.; RODRIGUES, J. C. S. Estudo de espaçamentos em duas variedades de cana-de-açúcar: SP70-1143 e NA56-79. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.6, n.2, p. 32-34, nov./dez. 1987.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar, safra 2011/2012, segundo levantamento, agosto/ 2011**. Brasília - DF, 2011. <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/cana.pdf>. Acesso em: 1 set. 2013.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar, safra 2012/2013, terceiro levantamento, dezembro/ 2012**. Brasília - DF, 2012. <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/cana.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2013.

CONSECANA. Conselho dos Produtores de Cana-De-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. **Circular n° 07/01**, 21 ago, 2001.

COPERSUCAR. Redução do espaçamento na cultura de cana-de-açúcar (uma revisão bibliográfica). Centro de Tecnologia Copersucar. **Caderno COPERSUCAR**, série agrônômica n° 13, 8 p., 1989.

COSTA, E. F. S.; SIMÕES NETO, D.E; GUEDES, W.B. Observações preliminares sobre plantio de cana-de-açúcar em diferentes tipos de sulcos e densidade de mudas nos Estados

de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DE TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL, 2, Rio de Janeiro - RJ, **Anais...**, p.415-433. 1981.

COX, D. Davco journey into precision farming, controlled traffic and row spacing standards. In: VIII SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, **Idea**, Ribeirão Preto - SP, mar., 2006.

CTC. Centro de Tecnologia Canavieira, CTC – Piracicaba - SP. Documentos de divulgação restrita, 2012.

CTC. Boletim Técnico. Ed. Especial. 2ª geração de variedades CTC. **Centro de Tecnologia Canavieira**. Piracicaba, v.01, (DVD), 2006.

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**, v.12, p.356-362, 2008.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**, v.57, p.203-212, 2001.

DIAS JÚNIOR, M. S. **Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic**. 1994, 114 f. Tese de Doutorado, Michigan State University, East Lansing, 1994.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n.2, p.175-182, 1996.

DIAS JÚNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, v.23, p.371-380, 1999.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H.V. & CHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa - MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, 2000.

DOMINY, C.; HAYNES, R.; ANTWERPEN, R. V. Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 36, n. 5, p. 350-356, nov., 2002.

DOOREMBOS, J; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, p.212, 1979 (FAO. Riego y Drenaje, 33).

DURUOHA, C. **Desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) em função da compactação, teor de água e tipo de solo**. 2000. 115 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2000.

EAVIS, B. W.; RATLIFF, L. F.; TAYLOR, H.M. Use of a dead load technique to determine axial root growth pressure. **Agronomy Journal**, v. 61, p. 640–643, 1969.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Brasília, 1997. 212p.

EKWUE, E.I. Organic-matter effects on soil strength properties. **Soil and Tillage Research**, v. 16, p. 289–297, 1990.

ERNANDES, M. L. **Comportamento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) cultivadas em espaçamentos simples e duplos**. 2005. 42 f. Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

ESPIRONELO, A.; COSTA, A. A.; LANDELL, M. G. A.; PEREIRA, J. C. V.A.; IGUE, T.; CAMARGO, A. P.; RAMOS, M. T. B. Adubação NK em três variedades de cana- de-

açúcar em função de dois espaçamentos. **Bragantia**, Campinas - SP, v.46, n.2, p.247-268, 1987.

FAO. **Food And Agricultural Organization of United Nations: Economic And Social Department: The Statistical Division**, 2008. <http://www.fao.org/economic/esa/esa-home/en/>. Acesso em: 23 jan. 2012.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azúcar**. Ed. Blume, Barcelona, 1975. 433p.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB, 2003. 240p.

FERNANDEZ, J. Wide base furrow for sugarcane planting. In: CONGRESS INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGIST, 17. **Proceedings...** Manila, The Executive Committee of ISSCT. v.1, p. 1058-1068, 1980.

FIDALSKI, J. **Propriedades físico-hídricas de um Argissolo Vermelho distrófico latossólico em diferentes sistemas de manejo das entrelinhas de citros**. 2004. 62 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Maringá, Maringá - PR, 2004.

FIGUEIREDO, P. A. M. de. **Efeitos de espaçamentos, variedades e intensidades de capinas na incidência de plantas daninhas e rendimentos da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1995. 64 f. Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras, 1995.

FIGUEIREDO, L. H. A; DIAS JÚNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.3, p.487-493, 2000.

GALVANI, E.; BARBIERI, V.; PEIREIRA, A. B.; VILA NOVA, N. A. Efeitos de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Scientia Agrícola**, Piracicaba – SP, v. 54, p. 62-68, jan - ago, 1997.

GAMAL, ABD EL-FATTAH, et al., "Cane Productivity as Effected by Inter-Row Spacing and Cane Cultivars", **International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 1, p. 1-8, 1986.

GARSDIE, A.L.; WATTERS, T.S.; BERTHELSEN, J. E.; SING, N. J.; ROBOTAN, B.G.; BELL, M.J. Comparisons between conventional and alternative sugarcane farming systems which incorporate permanent beds, minimum tillage, controlled traffic and legume fallows. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology**, Vol. 26, 2004.

GARSDIE, A. L.; BELL, M. J.; ROBOTAN, B. G. Row spacing and planting density effects on the growth and yield of sugarcane. 2. Strategies for the adoption of controlled traffic. **Crop and Pasture Science**, v. 60, n. 6, p. 544-554, 2009.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, p. 445-479, 1983.

GRAHAM, M. H.; HAYNES, R. J. Organic matter status and the size, activity and metabolic diversity of soil microbial community in the row and inter-row of sugarcane under burning and trash retention. **Soil Biology and Biochemistry**, v.38, p. 21-31, 2006.

GUE'RIF, J. Mechanical properties of straw: the effect on soil. In: GROSSBARD, E. (Ed.), **Straw Decay and its Effect on Disposal and Utilization**. Wiley, Chichester, UK, p.73-81, 1979.

GUIMARÃES, E.; ESTURION, A. C.; SILVA, G. M. A.; GURGEL, M. N. A. Influência do espaçamento na produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. In: **SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE MODALIDADE DE FINANCIAMENTO**

DE ENERGIA RENOVÁVEL, 1, Rio de Janeiro, 1981. **Anais...**, Rio de Janeiro, p. 505-511, 1981.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Chapter 10 — predicting soil mechanical behavior during tillage. *Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties and Processes*. Special Publication, **American Society of Agronomy**, vol. 44, p. 151–178, 1982.

GUPTA, S. C., SCHNEIDER, E. C., LARSON, W. E., HADAS, A., Influence of corn residue on compression and compaction behaviour of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 207-212, 1987.

HADAS, A. Soil tilth-the desired soil structural state obtained through proper soil fragmentation and reorientation processes. **Soil and Tillage Research**, v. 43, p. 7–40, 1997.

HALKETT, P. On guideway agriculture, being a system enabling all the operations of the farm to be performed by steam–power. **Journal Society of Arts**, v. 6 (316), p. 41–53, 1858.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Chapter on soil compaction. In: LAL, R., BLUM, W.H. VALENTIN, C.; STEWART, B.A., eds. **Methods for assessment of soil degradation**. Lewis Publishers, Boca Raton, USA, 576p., 1997.

HARTEL, P. G. The soil habitat. In: SYLVIA, D. M.; HARTEL, P. G.; FUHRMANN, J. J.; ZUBERER, D. A. **Principles and applications of soil microbiology**. 2., ed. New Jersey, Pearson Education, p. 26-54, 2005.

HARPER, R. J.; GILKES, J. The effects of clay and sand additions on the strength of sandy topsoils. **Australian Journal of Soil Research**, v.42, p. 39-44, 2004.

HEERDEN, P. D. R. Van; DONALDSON, R. A.; WATT, D. A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 11, p. 2877-2877, 2010.

HERBERT, L. P.; R.J. MATHERINE e L. G. DAVIDSON. Row-spacing experiments with sugarcane in Louisiana. In: CONGRESS INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGIST, 12., Puerto Rico, 1965, **Proceedings...** Amsterdam, Elsevier, p. 96-102, 1967.

HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**, 3., ed. Academic Press, New York, p. 349, 1980.

HOFFMANN, H. P.; BASSINELLO, A. I.; URASHIMA, A. S.; VIEIRA, M. A. S.; GAGLIARDI, P. R.; LOUREIRO, C. J.; MENDES, C. J.; CIOFI, J.; SILVA, J. I.; ZAVAGLIA, L. P.; MENEZES, L. L.; DIOGO, O.; OLIVEIRA, V. **Quatro novas variedades RB de cana-de-açúcar**. Araras - SP: CCA/UFSCar, p.18, 2006.

HOFFMANN, H. P. **Características agrônômicas dos clones RB**. Araras – SP: CCA/UFSCar, p. 25, 2006.

HUANG, P. M.; WANG, M.K.; CHIUC, C. Y. Soil mineral-organic matter-microbe interactions: Impacts on biogeochemical processes and biodiversity in soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IMPACTS OF SOIL BIODIVERSITY ON BIOGEOCHEMICAL PROCESSES IN ECOSYSTEMS, **Pedobiologia**, v. 49, p. 609-635, 2005.

IJIMA, M.; KONO, Y. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. **Japanese Journal of Crop Science**, v. 60, p. 130-138, 1991

IMHOFF, S.; PIRES DA SILVA, A.; DIAS JÚNIOR, M. DE S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa - MG, Brasil, v. 25, n. 1, p. 11-18, 2001.

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

IRVINE, J. E. & BENDA, T. A. Sugarcane spacing I. historical and theoretical aspects. In: CONGRESS ISSCT, 17º, Manila, **Proceedings...**, p. 350-355, 1980.

JAMES, G. **Sugarcane**. Oxford: Blackwell Science, p. 216, 2004. (World Agriculture Series).

JOAQUIM, A. C.; DONZELLI, J. L.; QUADROS, A. D.; SARTO, L. F. Potencial de Produção de cana-de-açúcar In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., Piracicaba/SP: Centro de Tecnologia Copersucar, **Anais...**, p. 68-76, 1997.

KANWAR, R.A. e K.K SHARMA. Effect of interrow spacing on tiller mortality, stalk population and yield of sugarcane. In: CONGRESS INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGIST, 15, Durban, 1974. **Proceedings...**, Durban, Hayne & Gibson, v. 3, p. 751-755, 1974.

KELLER, T.; HAKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, v. 154, n. 3 - 4, p. 398-406, Jan., 2010.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; ENSMINGER, L. E.; WHITE, J. L.; CLARK, F. E. (Ed.). Methods of soil analysis. Madison: **American Society of Agronomy**, v. 1, p. 499-510, 1965.

KINGWELL, R.; FUCHSBICHLER, A. The whole-farm benefits of controlled traffic farming: an Australian appraisal. **Agricultural Systems**, v. 104, p. 513-521, 2011.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2008. 6 - 212 p.

KRZIC, M. et al. Relative measure of bulk density to characterize compaction of forest soils caused by harvest. Final Report (R2003-0219) UBC – Vancouver, p. 45, 2003.

KULLI, B., GYSI, M., FLÜHLER, H. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 70, p. 29–40, 2003.

LABOSKI, C.A.M., DOWDY, R.H., ALLMARAS, R.R., LAMB, J.A. Soil strength and water content influences on corn root distribution in a sandy soil. **Plant Soil**, v. 203, p. 239-247, 1998.

LAIA, A. M.; MAIA, J. C. S.; KIM, M. E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.523–530, 2006.

LANÇAS, K. P., BENEZ, S. H., FURLANI Jr, J. A., GAMERO, C. A., ANTUNIASSI, U. R. Subsolador: desgaste em função da sua dureza superficial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., Piracicaba - SP. 1990. **Anais...** Piracicaba, SP, p. 801-809, 1990.

LANÇAS, K. P. **Subsolador: constituição, regulagens, operação e desempenho**. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, p. 47, 1991.

LANÇAS, K. P. **Desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da lastragem e do deslizamento das rodas de tratores agrícolas**. 1996. 170 f. Tese (Livre Docência em Mecânica Aplicada) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, 1996.

LANÇAS, K. P., SANTOS, C. A. Penetrômetro Hidráulico-eletrônico equipado com DGPS para avaliação da compactação do solo (Hydraulic-electronic Penetrometer with DGPS for evaluation of the soil compaction). In: INGENIERÍA RURAL Y MECANIZACIÓN AGRARIA EN EL ÁMBITO LATINOAMERICANO: ANAIS DEL

CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA RURAL, edited by Sociedade Latinoamericana de Ingeniería Rural La Plata, Ag, p. 570–576, 1998.

LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A.; ANJOS, I. A.; VASCONCELOS, A. C. M.; PINTO, L. R.; CRESTE, S. Potencialidade de novas variedades de cana-de-açúcar. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; AZANIA, A. A. P. M.; TASSO JUNIOR, L. C.; NOGUEIRA, G. A.; VALE, D. W. (Ed.). **Tópicos em Tecnologia Sucroalcooleira**. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda., p. 17-30, 2006.

LIBARDI, P. L.; JONG van LIER, Q. Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do Sistema radicular. In: FERNANDES, M. F. TAVARES, E. D.; LEAL, M. L. S. WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: **Metodologias e estudos de casos**. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1999. 300 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005.

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

MACHADO, A. L. T., TREIN, C. R., BICA, A. V. D., BOENI, M. Desenvolvimento e aplicação de um penetrógrafo eletrônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, A Engenharia Agrícola – TENDÊNCIAS E INOVAÇÕES. 1999, Pelotas,RS, **Anais...**, Pelotas/RS, (CD ROM). 1999.

MAGRO, J. A. Necessidades para colher cana mecanicamente. In: MAGRO, J. A. **Seminário de Mecanização Agrícola: Perda de Produtividade**, SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, STAB, Ribeirão Preto, 2002. 1 CD-ROOM

MANDLOI, R. V.; SINGH, R. V.; LOKHANDE. Response of sugarcane varieties to row spacing and seed rate. **Indian Journal of Agronomy**, New Delhi, v.34, n.2, p. 247-249, Jun., 1989.

MARQUES, M. O.; MARQUES, T. A.; TASSO JÚNIOR, L. C. **Tecnologia do açúcar: Produção e industrialização da cana-de-açúcar**. ed. Jaboticabal: Funep, 2001.

MASIERO, F. C.; LANÇAS, K. P.; RAMOS, C. R. G.; LYRA, G. A.; MARASCA, I.; MONTANHA, G. K. Tráfego pesado. **Revista Cultivar Máquinas**, n. 123, p. 28-31, 2012.
MATERECHERA, S. A.; DEXTER, A. R.; ALSON, A. M. Penetration of very strong soils by seedling of different plant species. **Plant Soil**, v. 135, p. 31-41, 1991.

MATHERNE, R. J., 1972. Effects of interrow spacing and planting rate on stalk population and cane yield in Louisiana. In: CONGRESS ISSCT, 14., 1971, Louisiana, **Proceedings...**, Baton Rouge, Franklin Press, 1971, p. 640-645.

MATHUR, B. K., BHADURIA, V. S.; SINGH, A. Study on the effects of different doses of N and systems of plant on plan cane and its subsequent effect on ratoon crop. **India Sugar**, 1968.

MCBRIDE, R. A. Estimation of density–moisture–stress functions from uniaxial compression of unsaturated, structured soils. **Soil and Tillage Research**, v.13, p. 383–397, 1989.

MCGARRY, D.; BIGWOOD, R. C.; PILLAI-MCGARRY, U. P.; BRAY, S. G.; MOODY, P. Is cane damaging the soil? A comparison of a 10-year-old block with the adjoining treeline. **Proc. Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v. 18, p. 189-194, 1996.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.197-202, 1999.

MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.;

CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, cap. 2, p. 65-60, 2007.

MIRANDA, E. E. V. **Modelagem e mapas de capacidade de suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2006. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

MISRA, G. N. A new system of spacing sugarcane rows. **Indian Sugarcane Journal**, v.5, p. 9-193, 1965.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. História e Morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V. et al. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. 415 p.

NEGRISOLI, E.; VELINI, E. D.; ROSSI, C. V. S.; CORREA, M. R.; COSTA, A. G. F. Associação do herbicida tebuthiuron com a cobertura de palha no controle de plantas daninhas no sistema cana-crua. **Planta Daninha**, v. 25, p. 621–628, 2007.

NESMITH, D. S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultissol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p.193-186, 1987.

OHU, J. O.; RAGHAVAN, G. S.V.; MCKEYS, E. Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils, **Transaction of the ASAE**, v. 28, p. 420–424, 1985.

OHU, J. O.; EKWUE, E. I.; FOLORUNSO, O. A. The effect of addition of organic matter on the compaction of a Vertisol from Northern Nigeria Original Research Article. **Soil Technology**, v. 7, n. 2, p. 155-162, Jun. 1994.

ORTEGA, D.; MANZON, E D. Distancia y densidades de siembra mas convenientes em 5 variedades de caña de azúcar. **Boletin Estación Experimental de Occidente**, Yaritagua, v. 79, 1966, 1 p.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**. v. 117, p. 201-210, 2011.

PANKHURST, C. E.; MAGAREY, R. C.; STIRLING, G. R.; BLAIR, B.L.; BELL M. J.; GARSIDE A. L. Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, v. 72, n. 2, p.125-137, Aug. 2003.

PARANHOS, S. B. **Evaluation of the factors affecting or being affected by plant population and distance between rows of sugarcane plant**. 1971. 72 f. Dissertação (Mestrado) – Ohio State University, Ohio, 1971.

PARANHOS, S. B. **Espaçamentos e densidades de plantio em cana-de-açúcar**. 1972. 109 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1972.

PARASURAMAN, P., SUDHAGAR, R. Growth and yield analysis of sugarcane as influenced by different row spacings. **Mysore Journal Agricultural Sciences**, v. 44 (4), p. 919-921, 2010.

PETTER, R. L. **Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo**. 1990. 144 f. Dissertação (Mestrado em Biodinâmica do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

PINTO, A. C. P.; BELLINASSO, I. F. Chopped sugarcane harvesting: equipment traffic studies and effects on yields. Agricultural Engineering Workshop. **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT)**. Malelane, South Africa, p.75-86, 2000.

PEREIRA JÚNIOR, A. C. G. **Efeitos da irrigação e do espaçamento no desenvolvimento e na produção de três variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum***

spp.). 1984. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

PERTICARRARI, J.G.; IDE, B.Y. Cultivo mínimo. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4., Piracicaba, 1988. **Anais...** São Paulo, Copersucar, 1988. p.43-63.

PLANALSUCAR. **Cultura da cana-de-açúcar: manual de orientação**. Piracicaba: IAA, Coordenadoria Regional Sul, 1986. 56p.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B.; VAN MALAVOLTA, E. Alternative use of SMP buffer solution to determine lime requirement of soils. *Commun. Soil Science Plant Analysis*, v. 16, p. 245-260, 1985.

RACHID, M., SABER, N., EL-BRAHLI, A., LAHLOU, S., BESSAM, F. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. **Soil and Tillage Research**, v. 57, p. 225–235, 2001.

RAIJ, B.; VAN ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **Instituto Agrônômico**, Campinas, p. 285, 2001.

RAO, B. K. R.; BANGITA, B. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. **Geoderma**, v. 189, p. 351-356, nov., 2012.

RICHARD JUNIOR, E. P.; DUNCKELMAN, J. W.; CARTER, C. E. Productivity of sugarcane on narrow rows, as affected by mechanical harvesting. **Field Crops Research**, v. 26, p. 375-386, 1991.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. Noções fitotécnicas. In: RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Ed. dos Autores,. 2006. p. 80-88.

ROBERTSON, F. A., THORNBURN, P. J. Trash management - consequences for soil carbon and nitrogen. **Proc. Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v. 22, p. 225–229, 2000.

ROBOTHAM, B. G. The yellow brick road to the sugar mill. **Proc. Australian Sugar Convention**. Cane Growers Publications, p. 95–101, 2000.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, Instituto de Biociências, p. 99, 1995.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, p.133-137, 1998.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G.S. de. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.744-750, 2010.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.34, n.5, p.821-828, maio, 1999.

ROUILLARD, G. “Results on spacing experiment”. **Annual Rep. Mauritius Sugar Ind. Rep. Institute**, p. 102. 1969.

SANTOS FILHO, A. G.; LANÇAS, K. P. Efeito da geometria do prato de recalque para levantamento de parâmetros físicos do solo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, SP, v.13, n.1, p. 18-31, 1998.

SALATA, J. ; SANTI, E. ; BENEDITO, E. ; DEMATTÊ, J. L. I. Efeitos do espaçamento na produção da cana-de-açúcar em função de épocas de corte e de variedades na região de Quatá Sudoeste do estado de São Paulo. CONGRESSO NACIONAL DA STAB – STAB, 1993, Águas de São Pedro. **Anais... Águas de São Pedro: STAB**, 1993. p. 25-29.

SALIRE, E.V.; HAMMEN, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil and Tillage Research**, Oxford, v.31, n.2-3, p.235-248, 1994.

SALUNKHE, A. N.; JAMDADE, S.R.; JADHAV, S.B. Maximisation of farm profit by paired row systems in cane cultivation. **Proceedings: International Society of Sugar Cane Technologists**, vol 2, p. 217-218, 2001.

SALVADOR, N.; GRANATO, L. R. N. Avaliação de diferentes sistemas de manejo de restos de culturais sobre à compactação do solo cultivado com milho (*Zea mays* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, A Engenharia Agrícola – Tendências e Inovações. 1999, Pelotas, RS, **Anais...** Pelotas/RS, (CD ROM). 1999.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. 2008. 274 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MAZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V. et al. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, p. 415, 2006.

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

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; JÚNIOR, M. S. D.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. F. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II - quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 30, n. 3, Jun., 2010.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, I. F., MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 313–319, 1997.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 877-883, 1997.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. de. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, Set. 2006b.

SILVA, R.B. da; LANÇAS, K.P.; CARDOSO, V.M.F.; MIRANDA, E.E.V. de. Atributos físicos, mecânicos e dinâmicos do solo como indicadores do impacto do cultivo e do tráfego em perímetros irrigados. **Irriga**, v.11, p.384-401, 2006a.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa. MG: SBCS, cap. 4, p. 275-374, 2007.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1-10, 2008.

SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; MIRANDA, E. E. V.; SILVA, F. A. M. & BAIO, F. H. R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of São Paulo State - Brazil. **Soil and Tillage Research**, 103, p. 265-270, 2009.

SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE JR., J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v. 88, p. 171-178, 2004.

SINGELS, A.; SMIT, M. A. The effect of row spacing on an irrigated plant crop of sugarcane variety NCO376. **Proc. South African Sugar Association**, Experiment Station, P/Bag X02, Mount Edgecombe, 4300, v.76, 2002.

SINGELS, A.; SMIT, M. A.; REDSHAW, K. A.; DONALDSON, R. A. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, v. 92, p. 249-260, 2005.

SIX, J., FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J.C.M.; ALBRECHT, A. Soil organic carbon, biota and aggregation in temperate and tropical soils effects of no-tillage. **Agronomie**, v. 22, p. 755-775, 2002.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, v.78, p. 93-111, 1997.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v. 16, p. 179-201, 1990.

SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, mar. 2005.

SOUZA, Z. M, CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, I. H. L.; JÚNIOR, J. M.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.128-134, jan-fev, 2006.

SOUZA, T. R. **Componentes morfológicos e de rendimento de duas variedades de cana-de-açúcar em espaçamentos de plantio simples e duplos**. 2012. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M. de.; SILVA, R. B. da.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 4, Apr., 2012a.

SOUZA, R. A.; TELLES, T. S.; MACHADO, W.; HUNGRIA, M.; FILHO, J. T.; GUIMARÃES, M. F. Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil Agriculture, **Ecosystems and Environment**, v. 155, n. 15 p. 1-6, Jul., 2012b.

STOLF, R. Espaçamento de plantio: Mecanização a espaçamentos estreitos. **Seminário Agroindustrial da Cana-de-açúcar**, Piracicaba-SP, 1986.

STONE, R. J.; EKWUE, E. I. Maximum bulk density achieved during soil compaction as affected by the incorporation of three organic materials. **Transactions** of the **ASAE**, v. 36, n. 6, p. 1713-1719, Nov./ Dec. 1993.

SWINFORD, J. M., BOEVEY, T. M. C. The effects of soil compaction due to in-field transport on ratoon cane yields and soil physical characteristics. **Proc. South African Sugar Technologist Assn**, p. 198–203, 1984.

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, p. 18-22, 1966.
TAYLOR, H. M., RATLIFF, L. F. Root growth pressures of cotton, peas and peanuts. **Agronomy Journal**, 61, p. 398–402, 1969.

TANG, K. H.. “A comparison study of different planting systems in connection with the mechanized cultivation of sugarcane”. Resp. **Taiwan Sugar Exp. Stat.**, v. 14, p. 36-46, 1956.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico do solo em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.393-399, 1999.

TERAMOTO, E. R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) baseados em parâmetros do solo e do clima**. 2003. 85 f. (Tese Doutorado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

THOMAS, G. W.; HASZLER, G. R.; BLEVINS, R. L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the proctor test. **Soil Science**, Baltimore, v.61, n.3, p. 502-508, 1996.

THORNTHWAITE, C.W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, 38: 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Publications in Climatology. New Jersey: **Drexel Institute of Technology**, 1955. 104p.

TIDALL, J. M., OADES, J. M. Organic matter and water stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.33, p.141–163, 1982.

TO, J.; KAY, B. D. Variation in penetrometer resistance with soil properties: The contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. **Geoderma**, v. 126, p. 261-276, 2005.

TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247p.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 333-339, 1996.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, v. 52, p. 223-232, 1999.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA, 1999. 58p. (Circular Técnico, 23).

TORRES, J. S.; YANG, S. J.; VILLEGAS, F. Soil compaction and cane stool damage by semi-mechanized harvesting systems in the wet season , **Sugarcane**, v. 5, p. 12–16, 1990.

TORRES, J. S., VILLEGAS, F. Differentiation of soil compaction and cane stool damage. **Sugarcane**, n. 1, p. 7–11. 1993.

TROUSE JÚNIOR., A. C. Effects of soil compression on the development of sugar cane roots. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 12., San Juan, 1965. **Proceedings**. Amsterdam, International Society of Sugarcane Technologists, p.137-152, 1967.

URGEL, G. U.; C.A. LUMANCAN E C.R. MORA, Influence of planting density and furrow distance on yield of cane and sugar. **Philsurgin Quarterly**, v. 12, p. 19-24, 1966.

USDA. United States Department of Agriculture. **USDA Agricultural Projections to 2021**. Office of the Chief Economist, World Agricultural Outlook Board, U.S. Department of Agriculture. Prepared by the Interagency Agricultural Projections Committee. Long-term Projections Report OCE-2012-21, p. 102, 2012.

VASCONCELOS, A. C. M. **Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 2002. 140 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2002.

VEENHOF, D. W.; MCBRIDE, R. A. Over consolidation in agricultural soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 2, p. 362-373, 1996.

VEIGA, F.M.; AMARAL, E. Ensaio de espaçamento de cana-de-açúcar. **Boletim do Serviço de Pesquisas Agronômicas**, v. 8, p. 1-28, 1952.

VERMEULEN, G. D.; MOSQUERA, J. Soil, crop and emission responses to seasonal-controlled traffic in organic vegetable farming on loam soil. **Soil and Tillage Research**, v. 102, p. 126-134, 2009.

WEAICH, K.; CASS, A. & BRISTOW, K.L. Use of a penetration resistance characteristic to predict soil strength development during drying. **Soil and Tillage Research**, n. 25, p.149-166, 1992.

WEBSTER, J .N. P., Widths of cane row in various sugar cane countries. **Hawaiian Planters Records**. v.35, p.217-31, 1931.

WOOD, A. W., Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland. **Soil and Tillage Research**, v. 20, p. 69-85, 1991.

XAVIER, C. E.O. **Custos de Produção do setor sucroenergético**. In: VI SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia Administração e Sociologia, 2013.

ZOTARELLI, L.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; TORRES, E.; SANTOS, H. P.; PAUSTIAN, K.; BODDEY, R. M.; SIX, J. Impact of tillage and crop rotation on aggregate-associated carbob in two Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 482-491, 2005.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 947-958, 2000.

ZHANG, H., HARTGE, K. H., RINGE, H., Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 239-245, 1997.