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

**Sistema de preparo profundo do solo e sua influência no
desenvolvimento da cana-de-açúcar**

Halan Vieira de Queiroz Tomaz

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

**Piracicaba
2013**

Halan Vieira de Queiroz Tomaz
Engenheiro Agrônomo

**Sistema de preparo profundo do solo e sua influência no desenvolvimento da
cana-de-açúcar**

Orientador:
Prof. Dr. **KLAUS REICHARDT**

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

**Piracicaba
2013**

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

Tomaz, Halan Vieira de Queiroz

Sistema de preparo profundo do solo e sua influência no desenvolvimento da cana-de-açúcar / Halan Vieira de Queiroz Tomaz.- - Piracicaba, 2013.
132 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Preparo do solo 2. Desenvolvimento radicular 3. Tráfego controlado
4. Compactação do solo 5. Fileira dupla 6. Redução de custos I. Título

CDD 633.61
T655s

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

Quero agradecer muito aos meus pais, **Antonio Tomaz da Silva Neto** e **Irene Vieira de Queiroz Tomaz**, pela confiança e apoio durante esses anos dedicados a vida acadêmica. Sem essa confiança que depositaram em mim tenho certeza de que esse caminho seria muito mais árduo. Obrigado!

Aos meus irmãos, **Helen Vieira** e **Helen Vieira**, por sempre me ajudarem nos momentos em que precisei.

A minha querida namorada **Thelma Xavier**, pela paciência e compreensão durante esse período. Além do apoio para a realização deste momento.

DEDICO & OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por mais um objetivo alcançado e por todas as realizações que tenho conseguido;

Ao meu orientador, professor Dr. Klaus Reichardt, pela sua serenidade e compreensão ao longo desses anos e pelos conhecimentos repassados;

Ao meu amigo e professor Dr. Edgar Beauclair, que desde o Mestrado me acompanha nas mais diversas tarefas que tive durante esses anos de pós-graduação. Desde a grande colaboração na instalação dos experimentos de campo até os bons churrascos que fazíamos;

A toda turma boa de serviço do GECA (Grupo de Estudos em Cana-de-açúcar), que sem a colaboração de todos era praticamente impossível este experimento, desde a instalação, passando pela coleta de dados, até a colheita.

Aos professores participantes da Banca de Qualificação pelas valiosas sugestões, Dr. José Láercio Favarin, Dr. Pedro Jacob Christoffoleti e Dr. Osny Oliveira Santos Bacchi e aos professores da Banca por terem aceitado o convite e pela estimada colaboração;

Ao Dr. Robson Clayton, pela ajuda na coleta de dados, nas análises de laboratório e na análise de dados;

A ESALQ/USP, pela oportunidade de realização deste curso, e ao CNPq pela concessão da bolsa;

Ao professor Me. Steferson Bezerra da UFERSA, pela ajuda nas análises estatísticas;

À Luciane Aparecida Lopes Toledo, secretária do programa de pós-graduação em Fitotecnia, pela sua atenção e ser sempre prestativa;

Aos amigos Fábio Coutinho e Luiz Francisco, pelos momentos de convivência nas aulas e também pelas diversões que passamos juntos;

Aos amigos que fiz na Sala 7 (salinha), Ana Paula, Tiago Tezotto e Txarli, por esses anos de amizade e companheirismo que compartilhamos;

Aos funcionários do Setor de Agricultura do Departamento de Produção Vegetal, ESALQ/USP – Seu Tino, Silvia e Gustavo – por serem sempre prestativos com as solicitações;

À MAFES, em nome do sr. Roberto Sako e Henry, que colaboraram na instalação e condução o experimento;

À Usina Raizen na colaboração com tratores e implementos para a instalação do experimento e também nas análises tecnológicas;

Aos grandes Mestres que tive durante a minha vida acadêmica na UFERSA e ESALQ, por terem contribuído para minha formação profissional;

À Eliana Maria Garcia, da Seção de Referência da Biblioteca, pela atenção dada nas revisões das normas;

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desse trabalho que não foram citados, sintam-se agradecidos;

***A todos vocês, meus sinceros
AGRADECIMENTOS!!!***

RESUMO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	21
2.1 Importância do setor sucroenergético no Brasil.....	21
2.2 Desenvolvimento da cana-de-açúcar.....	23
2.3 Propriedades físicas do solo.....	28
2.4 Operações mecanizadas.....	40
2.5 Sistema radicular.....	46
2.6 Viabilidade econômica.....	53
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	55
3.1 Caracterização do solo.....	56
3.2 Tratamentos.....	60
3.3 Avaliações.....	63
3.4 Análise estatística.....	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
4.1 Características do plantio.....	75
4.2 Biometria.....	78
4.3 Características tecnológicas.....	85
4.4 Desenvolvimento radicular.....	87
4.5 Características físicas do solo.....	96
4.6 Vantagens do espaçamento duplo.....	106
4.7 Análise econômica.....	107
5 CONCLUSÕES.....	113
REFERÊNCIAS.....	115

RESUMO

Sistema de preparo profundo do solo e sua influência no desenvolvimento da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma das mais importantes cadeias do agronegócio brasileiro, além do seu elevado destaque no contexto internacional como fonte de energia renovável e sustentável. Com a competitividade que as Usinas vem passando e pelas perspectivas de crescimento, este trabalho teve como hipóteses: i) o preparo profundo em cana-de-açúcar proporciona um maior volume de solo explorado pelas raízes; ii) o tráfego controlado de máquinas aliado ao espaçamento em fileiras duplas irá trazer uma maior população de plantas, traduzindo isso em incrementos de produtividade e redução de custos para o produtor. O objetivo geral, portanto, foi avaliar métodos de preparo do solo e desenvolver o tráfego controlado na área, propondo assim que o produtor tenha redução nos custos com o manejo da cultura e também aumente a produtividade e longevidade do canavial. Portanto, pode-se concluir que na análise do comprimento de raízes, em todas as profundidades estudadas, o Preparo Profundo obteve comprimento, área e volume de raízes maiores estatisticamente. A Resistência do solo a penetração no tratamento Preparo Profundo, para as profundidades de 20-40 e 40-60 cm foi de 0,29 MPa e 0,45 MPa, respectivamente. Nas avaliações biométricas da parte área, o Preparo Profundo se destacou com um IAF de 7,1. Os custos das operações no momento do plantio foram bem inferiores no Preparo Profundo, sendo 33% e 58% inferiores aos Mínimo duplo e Convencional duplo, respectivamente. A movimentação do solo causada pelo sistema Preparo Profundo no preparo do solo, foi de até 80% inferior ao tratamento Convencional duplo. O tráfego controlado que o Preparo Profundo proporciona, diminui em até 70% o tráfego de máquinas na lavoura; menor consumo de combustível; redução no tempo das operações agrícolas; redução do parque de máquinas; e menor custo operacional.

Palavras-chave: Preparo do solo; Desenvolvimento radicular; Tráfego controlado; Compactação do solo; Fileira dupla; Redução de custos

ABSTRACT

Deep soil preparation system and its influence on sugarcane development

Sugarcane is one of the most important crops in the Brazilian agribusiness chain, besides its great branch in the international context as a renewable and sustainable energy source. Through the competitiveness that sugar mills experience and through the growth perspectives of the sector, this study focuses the deep soil preparation for sugarcane crop renewal, since it provides a larger soil volume to be explored by the root system. Furthermore, the machinery traffic controlled by a smaller number of soil preparation operations, reduces farmer's production costs. The general objective was, therefore, evaluate soil preparation methods and develop a controlled traffic system in the area, in order to propose to the farmer a cost reduction in the farm soil management along with yield increase and extension of the longevity of the crop. As a result of the imposed treatments it was possible to conclude that by the root length analysis in all depths of the Deep Soil Preparation, root length, area and volume were greater. Soil resistance to penetration in the Deep Soil Preparation system was much less in relation to the other treatments, assuming values of 0.29 MPa and 0.45 Mpa in the 20-40 and 40-60 cm layers, respectively. The above ground evaluations showed leaf area index of 7.1 for the Deep Soil Preparation, much higher in relation to the other treatments. Operation costs at planting time were much less for the Deep Soil Preparation, 33% and 58% smaller than for the Double Minimum Tillage and Double conventional, respectively. Soil movement caused by Deep Preparation was up to 80% less in relation to the Double conventional. The controlled machinery traffic that the Deep Soil Preparation provides, reduced up to 70% the farming operations, therefore presenting a lower fuel consumption, a reduction of the time used in farming operations, reduction of the machinery park, and a lower operational cost.

Keywords: Root development; Controlled traffic; Soil compaction; Double line; Cost reduction

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Evolução da produção de cana-de-açúcar nos principais países produtores, em milhões de toneladas.....	22
Figura 2 -	Esquema de espaçamento: uniforme (simples) e duplo alternado.....	42
Figura 3 -	Localização do experimento na Fazenda Areão, ESALQ/USP, em Piracicaba/SP.....	55
Figura 4 -	Valores de precipitação pluviométrica e temperatura durante o ciclo da cultura.....	56
Figura 5 -	A) Aplicação de corretivos na superfície do solo; B) Aplicação em profundidade no tratamento PPF. Em detalhe a aplicação na profundidade de 40 e 60 cm.....	58
Figura 6 -	Distribuição manual das mudas nos sulcos de plantio.....	58
Figura 7 -	Representação do croqui de um bloco do experimento, em detalhe a área útil utilizada nas avaliações.....	59
Figura 8 -	Operações de preparo do solo. A) Aração nos tratamentos CON-S e CON-D; B) Subsolagem nos tratamentos CON e MIN; C) Sulcação do espaçamento duplo; D) Aplicação de inseticida e cobrição das mudas.....	61
Figura 9 -	A) DRENO subsolador, implemento utilizado para realizar o preparo profundo de 0,80 m de profundidade no tratamento PPF; B) Enxada rotativa, utilizada para destorroamento no PPF – este implemento foi acoplado ao DRENO, fazendo a tarefa em uma única operação; C) Esquema do trânsito dirigido de máquinas e implementos no tratamento PPF, utilizando o espaçamento duplo de 1,5 x 0,9 m. Em detalhe a profundidade que a haste alcançou sem o solo oferecer resistência após o PPF.....	62
Figura 10 -	Avaliação inicial no dia da instalação do experimento, contagem de gemas no sulco de plantio.....	63
Figura 11 -	Medição do diâmetro do colmo com o auxílio de um paquímetro digital.....	65
Figura 12 -	Pesagem das parcelas com o auxílio de uma carregadeira e célula de carga.....	67
Figura 13 -	Representação gráfica das trincheiras e das medidas utilizadas para	68

avaliação das raízes por imagens no programa Safira.....	
Figura 14 - A) Operação de abertura com a retroescavadeira; B) Parede da trincheira com raízes expostas; C) Raízes pintadas com tinta <i>spray</i> ; D) Lavagem da parede para retirar excesso de tinta.....	69
Figura 15 - Análise de imagens no Programa Safira da EMBRAPA. Etapas do processamento feito pelo programa e saída dos resultados.....	70
Figura 16 - Coleta de amostras do solo para análise da umidade.....	71
Figura 17 - Modo de operação do penetrômetro portátil.....	72
Figura 18 - Canas tombadas nos tratamentos devido a ventos forte que atingiram a Região de Piracicaba em junho/11.....	73
Figura 19 - Profundidade do sulco e cobertura das mudas no plantio.....	76
Figura 20 - Número de gemas plantadas, brotação de perfilhos e porcentagem de brotação por metro linear.....	77
Figura 21 - Número de perfilhos por metro ao longo do desenvolvimento.....	80
Figura 22 - Diâmetro do colmo ao longo do desenvolvimento.....	81
Figura 23 - Número de entre-nó no colmo ao longo do desenvolvimento.....	82
Figura 24 - Comprimento do colmo ao longo do desenvolvimento.....	83
Figura 25 - Índice de área foliar da cultura.....	84
Figura 26 - Comprimento de raízes no perfil da trincheira nas diferentes profundidades amostradas.....	89
Figura 27 - Porcentagem de raízes no perfil do solo em profundidade nos tratamentos avaliados.....	91
Figura 28 - Área de raízes no perfil da trincheira nas diferentes profundidades amostradas.....	93
Figura 29 - Volume de raízes no perfil da trincheira nas diferentes profundidades amostradas.....	94
Figura 30 - Perfil das trincheiras abertas para análise de raízes. A) CON-D; B) MIN-D; C) PPF.....	95
Figura 31 - Umidade (%) média do solo e sua distribuição no perfil e em diferentes épocas.....	97
Figura 32 - Resistência do solo a penetração (MPa) em diferentes profundidades do solo nos tratamentos, realizado na linha (A) e entre-linha (B) de plantio da cana-de-açúcar.....	99

Figura 33 - Curva de retenção de água na profundidade de 20 cm do solo.....	101
Figura 34 - Curva de retenção de água na profundidade de 40 cm do solo.....	102
Figura 35 - Curva de retenção de água na profundidade de 80 cm do solo.....	103
Figura 36 - Curva de retenção de água na profundidade de 120 cm do solo.....	103
Figura 37 - Curva de retenção de água na profundidade de 160 cm do solo.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Índices de falhas para avaliação da qualidade de plantio.....	26
Tabela 2 -	Metros de sulco por hectare e distância percorrida pela colhedora de acordo com o espaçamento adotado.....	43
Tabela 3 -	Caracterização química do solo em diferentes profundidades – Fazenda Areão, ESALQ.....	56
Tabela 4 -	Teor de micronutrientes em quatro profundidades de solo - Fazenda Areão, ESALQ.....	57
Tabela 5 -	Análise granulométrica do solo – Fazenda Areão, ESALQ.....	57
Tabela 6 -	Porcentagem de falhas, número, tamanho médio e frequência de falhas no plantio.....	78
Tabela 7 -	Análises tecnológicas realizadas após a colheita e produtividade da cultura.....	86
Tabela 8 -	Comprimento de raízes no perfil da trincheira nos tratamentos com fileira dupla.....	89
Tabela 9 -	Área de raízes no perfil da trincheira nos tratamentos com fileira dupla.....	93
Tabela 10 -	Volume de raízes no perfil da trincheira nos tratamentos com fileira dupla.....	94
Tabela 11 -	Porosidade total (PT), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro) e densidade do solo (Ds).....	105
Tabela 12 -	Operações realizadas nos sistemas de plantio no momento da implantação da cultura.....	109

1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar é uma das mais importantes do agronegócio brasileiro, não só pelo seu elevado destaque no contexto nacional e internacional, mas também pela dinâmica apresentada nos últimos anos e pelas perspectivas de crescimento.

Nesse cenário, o uso de máquinas e implementos agrícolas com alta eficiência no preparo do solo é importante para criar condições ideais para o desenvolvimento das raízes, viabilizar a produção de cana-de-açúcar e manter a competitividade da atividade. Em cana-de-açúcar, este manejo inicial pode influenciar profundamente a produção entre os cortes consecutivos, quando as operações de preparo não são conduzidas com tecnologia adequada para cada tipo de solo.

O crescente aumento no uso de máquinas agrícolas e tecnologias comumente usadas em monoculturas aumentaram significativamente a degradação do solo, alterando suas características físicas, químicas e biológicas. O impacto causado nesse recurso natural pelo uso de sistemas convencionais de produção afeta a sustentabilidade agrícola, aumentando a degradação ambiental e diminuindo a produtividade das culturas. A compactação do solo agrícola em níveis excessivos constitui o principal efeito negativo do tráfego de máquinas.

O grau de compactação do solo é importante na avaliação do manejo da cultura da cana-de-açúcar, por ser um sistema altamente mecanizado. A utilização intensiva de máquinas e implementos agrícolas no Estado de São Paulo, no cultivo da cana-de-açúcar, tem contribuído para aumentar as áreas com problemas de compactação, provavelmente pelo excesso de operações agrícolas ou de modelos capazes de estimar a capacidade de suporte do solo.

Os efeitos adversos da compactação do solo no desenvolvimento das culturas podem ser atribuídos à diminuição da aeração e da capacidade de armazenamento de água no solo, à redução dos espaços vazios, à diminuição da permeabilidade devida à diminuição da quantidade dos macroporos e impedimento ao desenvolvimento das raízes pelas camadas compactadas.

Nos últimos anos, alguns produtores vêm testando novas máquinas e formas de preparo do solo visando uma redução no impacto do cultivo convencional nas

propriedades físicas do solo. A empresa Mafes criou um sistema de cultivo alternativo de cana-de-açúcar visando impactar o mínimo às propriedades físicas do solo.

Portanto, este trabalho teve como hipóteses: a) o preparo profundo em cana-de-açúcar proporciona um maior volume de solo explorado pelas raízes, consequentemente um melhor desenvolvimento da cultura e maior longevidade do canavial; b) o tráfego controlado de máquinas aliado ao espaçamento em fileiras duplas irá trazer uma maior população de plantas, traduzindo isso em incrementos de produtividade e redução de custos para o produtor.

O objetivo geral, portanto, foi avaliar métodos de preparo do solo e desenvolver o tráfego controlado na área, propondo assim que o produtor tenha redução nos custos com o manejo da cultura e também aumente a produtividade e longevidade do seu canavial. Para alcançar este objetivo geral, foram selecionados os seguintes objetivos específicos:

- a) Análises biométricas do desenvolvimento da cultura, parte área e volume de raízes, além da produtividade final;
- b) Fazer monitoramentos, em tempos definidos, da água no solo;
- c) Comparação de métodos de preparo do solo através de medidas de características físicas do solo;
- d) Análise de custos de cada método de preparo do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância do setor sucroenergético no Brasil

A cultura da cana-de-açúcar reveste-se, atualmente, de grande importância sócio-econômica, visto que é utilizada como matéria prima para produção de duas *commodities* nacionais de grande magnitude e peso na balança comercial nacional: o açúcar e o etanol, gerando assim, uma série de benefícios para a sociedade, como empregos e avanços tecnológicos. O etanol ainda mais em voga, devido à crise de preços e à ameaça de escassez dos combustíveis fósseis que assola o mundo moderno, altamente dependente de energia para sobreviver, sem mencionar, ainda, as pressões exercidas pela sociedade no que se refere ao meio ambiente, representados pelo Protocolo de Kyoto e a crescente demanda por carros movidos a mais de um tipo de combustível, dentre eles, o etanol (ARGENTON, 2006).

No Brasil, a cana-de-açúcar é importante fator sócio-econômico constituindo-se como base de três importantes agroindústrias - açúcar, aguardente e etanol - que por sua vez são fontes de matéria-prima para outras indústrias, como bagaço para a fabricação do papel, furfural e confinamento de gado, o melaço para a produção do álcool e de muitas outras de algum significado econômico, segundo Stupiello (1987).

Há tempos o Brasil é considerado referência em produção de cana-de-açúcar, e esse status vêm se tornando ainda mais expressivo nos últimos anos. Como se observa na Figura 1, elaborada a partir de dados da Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (2012), enquanto que a produção de cana nos principais países produtores vem mantendo-se, de certa forma, constante nos últimos anos, a produção brasileira segue em tendência de crescimento. No ano de 2008, o Brasil produziu cerca de 650 milhões de toneladas de cana, o equivalente a pouco mais de 20% dos 2,9 bilhões de toneladas produzidas em todo mundo.

Figura 1 – Evolução da produção de cana-de-açúcar nos principais países produtores, em milhões de toneladas

Fonte: FAO (2012)

Hoje o país possui uma estrutura com 430 unidades industriais processadoras de cana-de-açúcar e cerca de 70 mil fornecedores da matéria-prima, gerando 1,2 milhões de empregos diretos, de acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2012a). Ainda segundo a entidade, espera-se que até 2020 os investimentos no setor somem mais de R\$ 150 bilhões, gerando 350 mil empregos adicionais e 700 mil empregos indiretos adicionais, além da requalificação de 20 a 25 mil trabalhadores por ano, em especial no que se refere à mão de obra que migra do corte manual. É nesse contexto que se estima a duplicação do PIB (Produto Interno Bruto) do setor, passando de atuais US\$ 48 bilhões para US\$ 90 bilhões em 2020 (UNICA, 2012b).

Para o Brasil, e particularmente para o Estado de São Paulo, a cana-de-açúcar é uma cultura muito importante. Ao longo dos últimos anos, ela vem se destacando, sendo a principal cultura explorada no Estado de São Paulo, cuja estimativa de produção de cana-de-açúcar para indústria, aponta acréscimo de 8,2% superior ao estimado em 2011/12, atingindo 330,69 milhões de toneladas, decorrente das novas áreas que estão entrando em produção (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2013).

2.2 Desenvolvimento da cana-de-açúcar

2.2.1 Plantio

Segundo Beauclair e Scarpari (2006), o plantio é sempre o investimento crucial na condução de qualquer cultura, é a base de seu desenvolvimento e sejam quais forem as práticas de plantio adotadas (semimecanizadas ou mecanizadas), elas devem atender tais demandas.

Na instalação de um canavial têm que se considerarem, evidentemente, todos os preceitos de boas técnicas agrônômicas, como bom preparo de solo, mudas de qualidade superior, sadias e bem manipuladas, tratamento fitossanitário do solo e das mudas, adubação, etc. As práticas de plantio são de extrema importância na determinação do sucesso do cultivo da cana, pois através de um bom plantio pode-se obter uma população de plantas adequada, ausência de pragas durante a fase inicial da cultura, bom uso do solo, dentre outras características que permitem conduzir o canavial à boa colheita (CARLIN et al., 2004).

O autor supracitado afirma que, quando se discute plantio de cana-de-açúcar, a retórica deveria ser voltada para o desenvolvimento tecnológico em busca da produtividade do canavial e no desenvolvimento de técnicas que permitam identificar pontos onde há problemas com a capacidade de produção e não, apenas, na redução de custos de implantação. Reduzir custos é fundamental, mas produtividade agrícola é um componente básico nessa redução (ou aumento). E o que se encontra na atual bibliografia e nos encontros técnicos sobre o assunto é uma busca desenfreada por eficiência na operação de plantio sem que se observem ganhos sensíveis de produtividade, quando se comparam os diferentes métodos empregados e a discussão fica com seu foco principal nos custos operacionais.

A qualidade do plantio de cana-de-açúcar deve ser observada durante a operação para que se obtenha a produtividade esperada, porém deve-se observar que quanto mais exigente quanto a qualidade, maior o custo do plantio, que pode chegar a 14,5% do custo total (VICENTE; FERNANDES, 2004).

A produtividade da cana-de-açúcar é regulada por diversos fatores de produção, dentre os quais se destacam: planta (variedade), solo (propriedades químicas, físicas e biológicas), clima (umidade, temperatura, insolação), práticas culturais (controle da erosão, plantio, erradicação de plantas invasoras,

descompactação do solo), controle de pragas e doenças, colheita (maturação, corte, carregamento e transporte), entre outros (ORLANDO FILHO et al., 1994).

Simões Neto (1986) afirma que dentre os muitos fatores que causam alterações nos rendimentos da produtividade da cana-de-açúcar podem ser citados também: emergência deficiente, nutrição inadequada, teor de água disponível insuficiente e ataques de pragas e doenças.

Uma das características de maior importância para se ter uma boa produtividade final e um bom estado de mudas, está relacionada com as práticas de plantio, levando em consideração, fatores indispensáveis para a otimização da cultura, como escolha da área e variedade, sanidade da muda, época de plantio, preparo adequado do solo, profundidade de plantio, cobertura dos rebolos e distribuição de gemas no sulco (SILVA et al., 2003).

Para Beauclair e Scarpari (2006), sejam quais forem as práticas de plantio adotadas (semi-mecanizadas ou mecanizadas), elas devem atender as necessidades ecofisiológicas e do metabolismo da cultura, pois o plantio é sempre o investimento crucial na condução de qualquer cultura e é a base de seu desenvolvimento. Dentre os fatores que podem ser influenciados pela qualidade da operação de plantio, os mais importantes são a brotação e o perfilhamento.

2.2.2 Brotação das mudas

A boa capacidade de brotação é uma característica desejável das variedades, principalmente quando o período de plantio envolve épocas com condições ambientais desfavoráveis (CASAGRANDE, 1991).

O conhecimento do processo de brotação é de grande importância para o sucesso da cultura, pelo fato de que o canavial deverá ser explorado por um período médio de cinco anos. Sendo assim, um canavial implantado sem os conhecimentos básicos de plantio, poderá ter reduzida a sua longevidade, determinando como consequência, elevação dos custos de produção (QUINTELA, 1996).

Para Plana et al. (1987), citados por Beauclair e Scarpari (2006), a brotação das gemas na cana-de-açúcar é um processo que requer maior atenção na cultura, pois dele dependerá, em grande medida, a futura população de plantas no campo.

A brotação tem início assim que começam a ocorrer mudanças nas reservas nutritivas pela atividade de enzimas e reguladores de crescimento (auxinas). A

formação de auxina faz com que as demais gemas não brotem ou o façam com atraso, o que resulta numa menor percentagem de brotação, Malavota; Haag (1964), citado por Quintela (1996).

A brotação das gemas é afetada por fatores intrínsecos e externos que afetam a emergência do broto primário e o seu perfilhamento. Esses são influenciados pelas condições do solo e pelos fatores meteorológicos, onde se destacam os efeitos das condições de umidade e da radiação solar (SIMÕES NETO, 1986).

2.2.3 Perfilhamento

Segundo Dillewijn (1952) se a boa brotação dos rebolos é considerada a base de uma boa cultura, o perfilhamento é o passo imediato, pois é ele que fornece o número de colmos apropriado para uma boa produção. O primeiro colmo que se forma é denominado primário. As gemas deste colmo em sua base dão origem a colmos secundários, estes produzem colmos terciários. Assim, a partir de uma gema forma-se uma touceira com um número variável de colmos. Essa característica recebe o nome de perfilhamento, que é influenciado por diversos fatores: variedade, luminosidade, temperatura e umidade, nutrientes, preparo do solo, espaçamento, pragas e moléstias.

Segundo Castro (2001), o processo de perfilhamento é regulado por uma auxina que é formada no topo e que desce em fluxo contínuo em direção à base. Essa auxina promove a biossíntese de enzimas específicas que atuam na degradação de polissacarídeos específicos da parede celular do colmo, produzindo oligossacarídeos capazes de inibir o desenvolvimento das gemas laterais, que se manteriam dormentes. A auxina exerceria então, nesse caso, um duplo efeito: alongamento do colmo e o impedimento do desenvolvimento das gemas laterais (dominância apical).

Segundo Alexander (1973), citado por Beauclair e Scarpari (2006), cada perfilho comporta-se como uma planta independente e autônoma, pois têm órgãos próprios como raízes, colmos e folhas, mas todos aqueles que compõem a touceira continuam tendo ligações entre si e podem eventualmente trocar alguns nutrientes e água.

Conforme Prado (1988), a fase de perfilhamento determina, em grande

parte, a produtividade da cultura, sendo que a quantidade de perfilhos que conseguem atingir a maturidade determinará a quantidade de colmos da lavoura.

O perfilhamento nos primeiros meses após o plantio é lento, sendo mais intenso à medida que as condições climáticas, temperatura e precipitação tornam-se favoráveis, chegando ao pico entre os meses de novembro e dezembro, nas condições do estado de São Paulo. Suguitani e Matsuoka (2001) avaliando quatro variedades (RB835054, RB835486, RB855113 e RB855536) em duas regiões produtoras (Araras e Valparaíso) e o número máximo de perfilhos por metro linear encontrado foi de 20 a 25. Esse valor foi diminuindo até a colheita, sendo a redução da ordem de 40 a 50 % em relação ao pico populacional, chegando a valores entre 10 e 13 perfilhos por metro dependendo da variedade.

2.2.4 Falhas no plantio

Stolf (1986) propõe a avaliação da qualidade de plantio em relação às falhas em cana planta e socas, conforme a Tabela 1. Nas fileiras de plantio os espaços maiores que 0,5 m são medidos e computados e considerados como falha.

Tabela 1 – Índices de falhas para avaliação da qualidade de plantio

% Falha > 0,5m	Avaliação do plantio
0 a 10	Excelente*
11 a 20	Bom**
21 a 35	Médio
35 a 50	Ruim
> 50	Péssimo

* Para 15 gemas por metro de sulco e condições excepcionais de brotação

** Normal, tipo mais encontrado

Fonte: Stolf et al. (1986)

Num ensaio realizado por Pinto e Moraes (1997), citado por Frasson (2007), onde foram apresentadas as principais características do sistema de plantio mecanizado com um equipamento distribuidor de rebolos, a avaliação de falhas realizada após o plantio apresentou uma qualidade normal nos primeiros meses e excelente após 10 meses de plantio, segundo os critérios proposto por Stolf (1986).

A medida das falhas apesar de ser importante na avaliação da qualidade do plantio não reflete a produtividade final, já que, muitas vezes, o perfilhamento estimulado pela maior insolação compensa o número de perfilhos final, tornando mais difícil o uso deste controle (BEAUCLAIR; SCARPARI, 2006).

2.2.5 Biometria da planta

Segundo Machado et al. (1982), as medidas biométricas das plantas durante a estação de crescimento permitem a utilização de índices fisiológicos na tentativa de explicar as diferenças varietais quanto à produção econômica; sendo os índices fisiológicos deduzidos a partir da variação temporal da fitomassa e da área foliar.

De acordo com Suguitani (2001), a área foliar está correlacionada com a produtividade das plantas, pois as folhas interceptam a luz fotossinteticamente ativa para a realização da fotossíntese, produzindo carboidratos que serão utilizados em todo ciclo fenológico da planta. Segundo Machado et al. (1982), a intensidade de crescimento foliar na fase inicial do desenvolvimento da cana-de-açúcar é o fator mais importante na taxa de crescimento e na biomassa acumulada, principalmente no desenvolvimento da matéria seca da parte aérea em relação aos colmos.

Segundo o mesmo autor, a produção da cana-de-açúcar, pela parte da planta, é resultado de vários componentes fenológicos, tais como: número de perfilhos, altura de colmos, diâmetro de colmos e densidade dos colmos. De acordo com Landell e Silva (1995) e Carlin et al. (2004), a produtividade agrícola pode ser estimada por parâmetros biométricos, entre eles: diâmetro e comprimento dos colmos, número de colmos por área e densidade do colmo. Mariotti (1971) e James (1971) também relataram que dentre os parâmetros biométricos utilizados, os que apresentam maior correlação com a produção seriam o número de colmos, altura, diâmetro de colmos e densidade, respectivamente.

Quanto ao desenvolvimento dos colmos, Lingle e Smith (1991), citam que o tempo médio de produção do entrenó de cana-de-açúcar é de uma semana, sendo que enquanto o entrenó apical se encontra em alongação, os entrenós basais já estão completamente alongados.

2.2.6 Área foliar

A área foliar está diretamente relacionada com a produtividade, pois as folhas interceptam a luz fotossinteticamente ativa para se fazer a fotossíntese, produzindo carboidratos que irão ser utilizados, direta ou indiretamente, em todos os processos vitais da planta. Além de forte ligação com a radiação solar, o desenvolvimento da área foliar está fortemente relacionado com a temperatura (MUCHOW; CARBERRY, 1989) e com características da planta como taxa de perfilhamento, surgimento e expansão de folhas, além do tamanho das mesmas.

No início do desenvolvimento, a maior parte da fitomassa produzida pela cana-de-açúcar é destinada à formação e crescimento de folhas, o que simultaneamente leva à formação de novos perfilhos que, por sua vez, depende da formação dos restolhos. Machado (1987), estudando a matéria seca acumulada nas folhas das variedades NA 56-79 e CB 41-14, verificou que, até os 100 dias após o plantio, 70% da matéria seca da planta estava nas folhas. Esta proporção foi decrescendo até chegar ao valor de 9% aos 400 dias.

Irvine (1983) encontrou valores máximos de IAF maiores que 8, mas valores entre 4 e 5 foram mais comuns. Em tratamentos irrigados ou sem restrição hídrica, o IAF tende a ser maior (LEME; MANIEIRO; GUIDOLIN, 1984). Barbieri, Bacchi e Villa Nova (1981), estudando diferentes espaçamentos, verificaram que naqueles menores o IAF aumentava com maior rapidez. Isso significa que o espaçamento usual, adequado pelas exigências mecânicas, não é o mais adequado para maximizar a produção biológica.

2.3 Propriedades físicas do solo

A mecanização agrícola é um componente básico na maioria das estratégias de desenvolvimento rural e no aumento da produtividade. No entanto, sua introdução desordenada sem adaptação prévia aos diferentes tipos de solo, pode ocasionar uma rápida e contínua degradação desse recurso natural (SIQUEIRA, 1999).

Uma característica essencial de um solo produtivo é que ele seja capaz de manter uma dotação adequada de ar e água às raízes vegetais. A ênfase dada à estrutura do solo como fator de produção agrícola deve-se, em grande parte, ao fato

de serem o ar e a água os ocupantes básicos dos espaços vazios. A sustentabilidade agrícola dos solos, prioritariamente, também está relacionada com a preservação do estado de aeração e hidratação dos sistemas radiculares (OTTONI FILHO, 2003).

O uso intensivo de máquinas e implementos na agricultura moderna pode modificar as propriedades do solo, em relação àquelas de seu estado natural. Têm sido detectadas camadas compactadas subsuperficiais causadas pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas, que provocam pressões na superfície do solo (MANTOVANI, 1987), afetando a sua densidade (MORAES; BENEZ, 1996), degradando a macroestrutura e reduzindo o grau de floculação da argila do solo (PRADO; CENTURION, 2001).

Os sistemas de preparo do solo em associação à biota do solo promovem modificações nas propriedades físicas como a agregação (CASTRO FILHO; MIZZILI; PODANOSCHI, 1998), a densidade e a porosidade do solo (De MARIA; CASTRO; DIAS, 1999). A macroporosidade é drasticamente reduzida com a compactação do solo (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996). De forma geral, essas propriedades funcionam como indicadores de possíveis restrições ao crescimento radicular das culturas (TORMENA et al., 2002).

Dentre os atributos físicos do solo com influência direta sobre o desenvolvimento das plantas, destaca-se a resistência mecânica do solo à penetração. De acordo com Pedrotti et al. (2001), a qualidade física do solo pode ser determinada, dentre outros fatores, pelo grau da resistência que o solo oferece ao crescimento das raízes, uma vez que, em condições adversas, limita a elongação radicular e, conseqüentemente, reduz a produtividade vegetal.

2.3.1 Umidade do solo

Para obter uma boa brotação e fornecimento de água para a planta, o solo deve estar o mais próximo da capacidade de campo, o que pode ser conseguido através de técnicas como o uso da vinhaça, irrigação e utilização de fontes de matéria orgânica (como a torta de filtro) para auxiliar o armazenamento de água no solo. Técnicas como estas promovem melhores condições de brotação em épocas desfavoráveis (BEAUCLAIR; SCARPARI, 2006).

Durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar, a matéria seca radicular e da parte aérea distribuem-se em função das condições ambientais (MACHADO, 1987). A variação na distribuição relativa das raízes nas primeiras camadas deve-se principalmente à variação da umidade do solo, segundo Inforzato e Alvarez (1957).

Segundo Casagrande (1991) e Irvine (1983), citados por Suguitani (2006), a umidade ótima do solo para uma boa brotação e desenvolvimento da planta varia de 15 a 25%.

2.3.2 Compactação do solo

De acordo com Camargo (1983), num sistema de agricultura intensiva o número de máquinas que trafegam uma área é grande e o cultivo muitas vezes é feito sem levar em consideração a conservação dos recursos edáficos, fazendo com que a compactação apareça sistematicamente nas lavouras de cana-de-açúcar comprometendo uma boa produção agrícola.

Os solos podem estar compactados naturalmente ou atingirem esse estado mediante práticas de manejo impostas pelo cultivo. A compactação e o adensamento da camada arável podem afetar drasticamente o desenvolvimento radicular e os processos de armazenagem e disponibilidade de água, podendo acarretar redução dos efeitos da adubação mineral e da irrigação, diminuindo o rendimento das culturas, apesar de toda tecnologia empregada (CAMARGO, 1983).

O rearranjo físico das partículas do solo que caracteriza a compactação, pode ser provocado por causas internas ou externas ao solo. No primeiro caso, pode-se citar, por exemplo, a contração do solo causada pela secagem do mesmo ou sua expansão pelo congelamento. No segundo, a aplicação de forças externas de compressão, representadas pelo peso de animais ou máquinas agrícolas, constitui o exemplo mais comum (ARAUJO, 2004).

Segundo Kooistra e Tovey (1994), a compactação é um processo de modificação da estrutura do solo em reação às forças externas aplicadas, onde a rede de poros sofre um rearranjo com consequências para o movimento de água e ar no solo. Após o tráfego, os macroporos do solo têm seu tamanho reduzido e suas geometrias alteradas, podendo inclusive fechar ou desaparecer completamente. De acordo com Lanças et al. (2000), a compactação do solo não é uma propriedade do solo e sim o efeito da variação de algumas de suas propriedades, devido à ação de

cargas externas, tais como o tráfego de máquinas e a ação de ferramentas agrícolas.

A compactação no perfil do solo se dá de forma diferenciada, onde a incidência de compactação no horizonte superficial do solo é determinada pela pressão de contato entre o solo e as rodas, enquanto que em subsuperfície a carga do eixo torna-se o fator mais importante (HÅKANSSON; VOORHEES, 1988). Além disso, a compactação depende de outros fatores destacando-se a textura do solo (IMHOFF et al 2004), o conteúdo de carbono orgânico (STONE; EKWUE, 1995), o teor de água do solo durante as operações de campo (HORN, 1995) e a frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (HORN, 1995; CHAMEN et al., 2003). Desta forma, o estudo da compactação do solo torna-se abrangente e complexo em todo cenário agrícola.

A compactação do solo tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores, sendo constatado que os seus efeitos sobre a estrutura física do solo acarretam, na maioria das vezes, na redução da produtividade das culturas. Sob condições onde a compactação anual é intensa e os processos naturais de descompactação, como ciclos de umedecimento e secamento são insignificantes, há um grande risco de que os efeitos da compactação sejam acumulados durante anos (VAN DEN AKKER et al., 2003).

Isso se traduz em efeitos detrimenais no solo, reduzindo o crescimento radicular devido à alta resistência à penetração das raízes. A infiltração de água no solo é reduzida e a absorção de nutrientes pelas plantas por meio das raízes é afetada. Ademais, é comum a prática de aumentar o suprimento de nutrientes e água (irrigação), para compensar os efeitos adversos da compactação do solo sobre a produtividade das culturas, o que resulta num aumento do custo de produção, além de levar ao rebaixamento dos níveis do lençol freático e poluir o ambiente (HÅKANSSON; VOORHEES, 1998; VAN DEN AKKER et al., 2003).

Esses efeitos da compactação do solo podem ser benéficos em ambientes áridos e solos arenosos, pois, compactações leves podem colaborar no sentido, de reduzir perdas de água por percolação profunda e aumentar o armazenamento de água para as plantas, aumentando a eficiência da irrigação e da chuva (KAYOMBO; LAL, 1994). Além disso, certo nível de compactação em torno das sementes é necessário para assegurar uma boa germinação e reduzir a erosão.

Entretanto, os efeitos negativos da compactação do solo, provocam preocupações, principalmente nas plantas cultivadas e no ambiente. No caso das plantas, camadas de solo excessivamente compactadas dificultam a penetração das raízes e, conseqüentemente, promovem uma redução no volume de solo explorado pelas mesmas, deixando as plantas suscetíveis à falta de água e nutrientes. A deterioração da estrutura do solo devido à compactação depende de vários fatores, destacando-se a textura do solo (IMHOFF et al., 2004), o conteúdo de carbono orgânico (STONE; EKWUE, 1995), o teor de água do solo durante as operações de campo (HORN, 1995) e a frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (HORN, 1995; CHAMEN et al., 2003).

A textura influencia o comportamento do solo submetido a pressões externas, pois determina o atrito entre as partículas e o tipo de ligação entre elas. Em geral, quanto maiores as partículas do solo, menor sua compressibilidade e agregação (HORN; LEBERT, 1994).

A estimativa da compactação significa prever o estado físico final do solo, após a passagem de uma máquina, a partir de informações iniciais do solo e da máquina. A condição física final do solo reflete o nível de compactação do solo e seu estado de degradação. Nessa conjuntura, pode-se afirmar que o produtor agrícola deve aprender a conviver com a possibilidade de ocorrência da compactação e procurar agir de modo a evitá-la e prevení-la, ao invés da sua remediação (LARSON et al., 1994).

De maneira geral, considera-se de 2,0 a 2,5 MPa a faixa crítica de resistência do solo com redução importante no crescimento radicular (TAYLOR et al., 1966; TAYLOR, 1971), embora algumas espécies possam, mesmo em solos compactados, desenvolver o sistema radicular, em função das suas especificidades (ROSOLEM et al., 2002).

2.3.3 Métodos de avaliação da compactação do solo

Os efeitos da compactação pelo tráfego são avaliados medindo-se a intensidade das alterações nas propriedades físicas do solo. No entanto, não existe um parâmetro de medição que reflita de forma completa e abrangente todas as conseqüências da compactação, bem como não há concordância quanto aos critérios para estabelecimento de níveis ou valores críticos de compactação do solo.

Existe uma incerteza associada à representação precisa da compactação do solo uma vez que não existe uma medida adequada da mesma, devido à grande diversidade de condições de solo, clima, máquinas, culturas exploradas e sistemas de produção existentes o que torna difícil estabelecer relações válidas generalizadas entre estes fatores e, conseqüentemente predizer as respostas do solo e das plantas às cargas aplicadas pelas máquinas (ARAUJO, 2004).

As propriedades do solo alteradas com a compactação são geralmente mensuradas antes e após um evento de compactação. A densidade e a porosidade do solo constituem os parâmetros de maior importância na avaliação da compactação, por descreverem diretamente a proporção de volume do solo disponível para as raízes das plantas, a água e o ar que elas requerem (MANTOVANI, 1987).

Os métodos para avaliação da camada compactada do solo podem ser divididos, de acordo com Lanças (1996) e Ripoli et al. (2007) em três grupos principais:

a) Métodos visuais e subjetivos

Neste grupo, os principais sinais que indicam o efeito da compactação são:

- Demora na emergência das plantas;
- Plantas mais baixas que as normais;
- Folhas com coloração não-característica;
- Sintomas de deficiência nutricional em solos bem adubados;
- Sistema radicular raso, espalhado e pouco desenvolvido;
- Formação de crosta na superfície do solo;
- Zona compactada de superfície;
- Água empoçada;
- Erosão excessiva pela água;
- Aparecimento de sulcos de erosão;
- Surgimento de fendas na superfície do solo ou nos rastros dos tratores;
- Aumento de requerimento de potência para o preparo do solo;
- Aumento da "dificuldade" de penetração de um objeto pontiagudo ao longo do perfil do solo;

- Aumento do esforço necessário para a penetração de um trado;

b) Métodos intermediaries

Nestes métodos estão os indicadores secundários da compactação do solo:

- Taxa de difusão de oxigênio;
- Condutividade hidráulica saturada;
- Resistência à penetração.

c) Métodos precisos

Os métodos utilizados envolvem análises de laboratório que, na maioria, foram descritas por Kiehl, citado por Lanças (1996):

- Densidade do solo;
- Percentagem de macroporos.

A resistência do solo à penetração tem sido frequentemente utilizada como indicador de compactação do solo em sistemas de manejo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (TORMENA; ROLOFF, 1996; MERCANTE et al., 2003).

Os aspectos do solo que influenciam a resistência à penetração são a densidade, textura, matéria orgânica e, principalmente, a umidade. O uso do penetrômetro como indicador de compactação deve ser feito com cuidado devido à sua dependência em relação à umidade do solo e às complexas relações com as demais características do solo (O'SULLIVAN et al., 1987).

A resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas do solo diretamente relacionadas com o crescimento das plantas (LETEY, 1985) sendo modificada pelos sistemas de preparo do solo. A resistência do solo à penetração aumenta com a compactação do solo, sendo restritiva ao crescimento radicular acima de certos valores de potencial. De acordo com Grant e Lafond (1993), esses valores variam de 1,5 a 3,0 MPa, já segundo Arshad et al. (1996 apud SOUZA; ALVES, 2003), a variação nesses valores é de 2,0 a 4,0 MPa. Extrema resistência do solo à penetração pode influenciar o crescimento das raízes em comprimento e

em diâmetro (MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular (IIJIMA; KONO, 1991). Além disso, estudos recentes indicam que a resistência do solo à penetração das raízes tem efeitos diretos no crescimento da parte aérea das plantas e na partição de carboidratos entre a raiz e parte aérea (MASLE; FARQUHAR, 1988). Valores críticos de resistência à penetração dependem da espécie (BENGOUGH; MULLINS, 1990).

Para Camargo e Alleoni (1997), quando a resistência à penetração é menor do que 1,1 MPa não há limitação ao crescimento radicular, sendo o solo considerado como muito baixa resistência, enquanto que para valores entre 1,0 e 2,5 MPa, a resistência deve ser considerada baixa, ocorrendo pouca limitação ao crescimento radicular.

Vários autores têm mostrado a existência de relação entre a resistência do solo à penetração e outros parâmetros do solo. A resistência é maior com o aumento da densidade e com a diminuição da umidade do solo (BELTRAME; GONDIN; TAYLOR, 1981; CALLEBOURT et al., 1985). Em condições de campo, entretanto, não há uma relação simples entre umidade, densidade e resistência, e nem sempre essa relação é observada (MEDINA, 1985).

Na avaliação da resistência mecânica à penetração de raízes no solo, têm sido utilizados, na maioria das pesquisas, estudos de penetrometria por causa da facilidade e rapidez na obtenção dos resultados (BENGOUGH; MULLINS, 1990).

2.3.4 Importância do preparo do solo

O papel fundamental das operações de preparo do solo é criar condições ideais para o desenvolvimento das raízes e, por conseguinte, maiores produções. Em cana-de-açúcar, este manejo inicial pode influenciar profundamente a produção entre os cortes consecutivos, quando as operações de preparo não são conduzidas com tecnologia adequada para cada tipo de solo (FREITAS, 1987). O preparo do solo não se limita somente às operações que afetam diretamente a sua estrutura física, mas também envolve aquelas ligadas aos fatores que determinam o pH e o ambiente. Estes fatores são adequados para absorção eficiente de nutrientes (FREITAS, 1987) e para facilitar a infiltração da água, contribuindo para o controle da erosão (ORLANDO FILHO; ZAMBELLO, 1983), que é a maior causa da degradação das terras agrícolas e provoca, ainda, a poluição dos recursos hídricos.

Dos componentes do manejo, o preparo do solo é a atividade que mais influi nos seus atributos físicos, pois atua diretamente na sua estrutura (VIEIRA; KLEIN, 2007). Camilotti et al. (2005), avaliando os efeitos de quatro sistemas de preparo de solo, feitos antes do plantio da cana-de-açúcar, não observaram efeitos significativos sobre o perfilhamento e produtividade da cultura, e nem mudanças na densidade do solo. Dias e Casagrande (2001), testando diferentes sistemas de preparo de solo, não verificou diferenças nas propriedades físicas do solo, embora tenha observado maior resistência a penetração nas áreas onde foi utilizado somente herbicida (plantio direto).

O intenso preparo do solo para o plantio da cana-de-açúcar e a utilização constante de cultivadores em condições não ideais de umidade alteram suas propriedades físicas (BYRNES et al., 1982), refletindo em alterações na estrutura do solo, principalmente na camada superficial (CERRI et al., 1991). As modificações que ocorrem na estrutura do solo são evidenciadas por alterações nos valores de densidade do solo, resistência mecânica à penetração, porosidade total, porosidade de aeração, armazenagem e disponibilidade de água às plantas, dinâmica de água na superfície e no seu perfil, assim como a consistência e a máxima compactabilidade do solo (KLEIN et al., 1998).

O ideal seria o uso e o manejo do solo que estabelecessem uma associação conveniente dessas propriedades, de modo que possibilitasse condições cada vez melhores para o crescimento e desenvolvimento vegetal, promovendo, conseqüentemente, menores perdas de solo e de água e, finalmente, maior produtividade associada à qualidade ambiental (SOUZA; ALVES, 2003).

Os diferentes implementos disponíveis para o preparo do solo provocam alterações nas suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Cada implemento trabalha o solo de maneira própria, alterando, de maneira diferenciada, estas propriedades (SÁ, 1998).

Souza et al. (2004), destacam que o cultivo inadequado pulveriza a superfície dos solos, deixando-os mais susceptíveis ao processo de erosão e propiciam a formação de impedimentos físicos logo abaixo das camadas movimentadas pelos equipamentos.

A compactação, a desestruturação do solo e a redução nos teores de matéria orgânica são considerados os principais indutores da degradação dos solos agrícolas. Tal degradação, com todas as suas implicações e conseqüências

negativas, tem resultado no desafio de viabilizar sistemas de produção que possibilitem maior eficiência energética e conservação ambiental (KLUTHCOUSKI et al., 2000).

2.3.5 Sistemas de preparo de solo

a) Cultivo mínimo

A utilização de sistemas de preparo com mínimo ou nenhum revolvimento do solo tem sido cada vez mais utilizado, por promover inúmeros benefícios, como: melhoria da estrutura, porosidade, retenção e infiltração da água no solo (BAYER, 1996); atividade biológica (CATTELAN; VIDOR, 1990); conteúdo de carbono orgânico e nitrogênio total do solo, capacidade de troca de cátions e conteúdos de nutrientes (BAYER; MIELNICZUK, 1997).

Pelo fato do cultivo da cana-de-açúcar se caracterizar como uma monocultura, a prática do sistema plantio direto se torna inviável, uma vez que uma das exigências básicas para a consolidação do sistema não é cumprida: a rotação de culturas. No entanto, na reforma do canavial, tem sido utilizado por alguns agricultores, o uso do cultivo mínimo e do plantio direto na palhada de cana, na semeadura da cultura em sucessão com a cana-de-açúcar, mas as avaliações normalmente não incluem os efeitos destes manejos sobre o desenvolvimento da cana-de-açúcar, que vem em sucessão.

No conceito de cultivo mínimo está implícita a ideia de movimentar o quanto menos possível a superfície do solo. Isso implica praticamente eliminar o preparo do solo para efetuar o plantio. Contudo, para se reformar uma área com cana-de-açúcar, é necessária a destruição da cultura anterior, operação que pode ser realizada mecânica ou quimicamente. A destruição mecânica pode ser executada por enxadas rotativas ou por arrancador de soqueira, que, com o próprio sulcador, possibilita, em uma só operação, a destruição da cultura anterior e a abertura do sulco para o novo plantio (ORLANDO FILHO; ZAMBELLO, 1983). Estudos sobre cultivo mínimo utilizando a enxada rotativa modificada para a destruição de soqueira confirmam que este sistema é o mais econômico (ORLANDO FILHO; ZAMBELLO, 1978, citado por FREITAS, 1987).

b) Preparo profundo

Com a finalidade de oferecer condições físicas, químicas e biológicas suficientemente adequadas para a cultura da cana-de-açúcar, se desenvolveu o conceito de “preparo profundo” de solo que foi avaliado no presente trabalho. Esse sistema consistiu no uso de implementos de ação profunda, tráfego dirigido (YOUNG et al., 1993), cultivo preciso (BISHOP; GRIMES, 1978; SOJKA et al., 1993), correção física do solo a 80 cm de profundidade para alívio das camadas compactadas do solo, criadas pelo longo período de utilização do preparo convencional (LABUSCHAGNE; JOUBERT, 2006).

O conceito de “cultivo preciso” (CARTER; TAVERNETTI, 1968) foi desenvolvido na Califórnia e consiste em cultivo de 50 a 60 cm de profundidade abaixo da linha de plantio, conseguindo aumentos substanciais no rendimento da cultura do algodão, superiores aos obtidos com cultivo profundo realizado aleatoriamente no campo (BISHOP; GRIMES, 1978).

Quando o solo apresenta camadas compactadas abaixo de 30 cm, o método mecânico empregado deve ser o da subsolagem (RIZZO, 2000). O preparo profundo é empregado como um meio de reduzir problemas físicos e biológicos, que criam condições inadequadas de solo.

O manejo da compactação em longo prazo requer a redução do tráfego, a restrição do tráfego para limitar as faixas de tráfego e o uso de rotação e práticas culturais (como a incorporação de resíduos) que promovem a estabilidade de agregação do solo (SOJKA et al., 1993). Para redução da compactação em um curto prazo é necessário se realizar a mobilização profunda do solo. De acordo com Sojka et al. (1993) a subsolagem em zona (também conhecida como subsolagem de precisão ou subsolagem na linha) é mais eficiente energeticamente e possui um melhor custo efetivo do que a mobilização total, e tem a vantagem adicional de manter firmes as linhas de tráfego para a reentrada no campo.

2.3.6 Retenção de água, densidade e porosidade do solo

A densidade do solo é uma característica física que sofre alterações com o manejo sendo um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a compactação

do solo. A densidade pode ser definida como sendo a massa de uma unidade de volume de solo seco e depende da natureza, das dimensões e da forma com que se acham dispostas as partículas do solo (KIEHL, 1979; BRADY, 1989).

O solo é um reservatório de água para as plantas, e todas as práticas de manejo de água, em agricultura, visam à manutenção de seu nível de água em condições ideais para o desenvolvimento das culturas. Apesar de ser um reservatório aberto para a atmosfera e para os horizontes mais profundos do perfil, retém umidade pela interação com a matriz do solo (REICHARDT, 1988). Segundo Cassel e Nielsen (1986 apud CARVALHO; FIGUEIREDO; COSTA, 1999), a capacidade de retenção de água pelo solo está diretamente relacionada à sua matriz e à distribuição espacial dos poros.

A porosidade do solo é um índice que quantifica a fração do volume do solo ocupada pelos poros e é inversamente proporcional a densidade do solo, isto é, quanto maior a densidade, menor a porosidade (LIBARDI, 2005).

Os poros do solo são classificados em termos de diâmetro de poro em macroporos, mesoporos e microporos. A principal função dos macroporos é de aeração da matriz do solo e condução da água durante o processo de infiltração. Isso afeta, portanto, a aeração e a drenagem. Os mesoporos têm como função a condução da água durante o processo de redistribuição, quando após a infiltração se esvaziam os macroporos. Os microporos, também chamado de poros capilares, atuam no armazenamento da água. Nestes poros, a água se move, mas muito vagorosamente (KOOREVAAR et al., 1983 apud LIBARDI, 2005).

Há dois tipos principais de força que operam na matriz do solo para a retenção de água: as forças capilares (a retenção ocorre nos microporos) e as forças de adsorção (a retenção ocorre na superfície dos sólidos do solo), às quais, juntas, são chamadas de forças mátricas e que dão origem ao potencial mátrico (LIBARDI, 2005).

O uso de áreas com agricultura intensiva, tem ocasionado variações nas relações água-ar do solo. Em solos com preparo intenso, devido ao tráfego contínuo de máquinas pesadas e ao uso de equipamentos de cultivo, há uma tendência para a formação de camadas compactadas de baixa permeabilidade (FLOCKER; TIMM; VOMOCIL, 1960), diminuindo o volume de poros e, conseqüentemente, aumentando a densidade, principalmente das camadas superficiais (THOMPSON, 1962).

2.4 Operações mecanizadas

A utilização de máquinas e equipamentos agrícolas tem por finalidade a otimização de desempenhos operacionais e redução de custos, entretanto seu emprego de forma imprópria pode causar impactos negativos ao ambiente e aos recursos naturais. Um destes impactos negativos é a compactação do solo definida como uma alteração no arranjo de suas partículas constituintes, reduzindo o volume ocupado por uma determinada massa do solo e o tamanho dos poros que permitem livre circulação de água e ar, chamados macroporos (CAMARGO; ALLEONI, 2006).

2.4.1 Sulcação

A sulcação consiste na abertura dos sulcos onde serão colocadas as mudas de cana-de-açúcar. O serviço de sulcação é realizado por tratores pesados equipados com sulcadores e adubadoras, que fazem os sulcos e ao mesmo tempo aplicam adubo, na dose recomendada e baseada na análise de solo realizada previamente, dentro do sulco.

A profundidade do sulco de plantio, de um modo geral, varia de 20 a 30 cm, sendo as de 20 cm uma das causas do tombamento dos colmos, pois deixa as touceiras susceptíveis à ação dos ventos, uma das causas da redução da produtividade (TOLEDO, 1962).

A profundidade da sulcação gira ao redor de 25 a 30 cm não se recomendando que esta exceda a profundidade do preparo de solo, pois pode-se plantar a cana em solo compactado que dificultará o desenvolvimento e penetração das raízes. Trabalho conduzido por Conde e Salata (1985), na Açucareira Quatá (SP), revelou diferenças superiores a 40 % na quantidade do sistema radicular quando o fundo do sulco foi escarificado, com reflexos na produtividade agrícola.

De acordo com Beauclair e Scarpari (2006), a profundidade dos sulcos varia de 20 a 25 cm com largura determinada pela abertura das asas do sulcador num ângulo de 45°, com pequenas variações dependendo da textura do solo.

2.4.2 Diferentes espaçamentos adotados

A adoção de espaçamentos mais estreitos, entretanto, traz alguns problemas para as operações mecanizadas, em especial no que diz respeito à estabilidade dos maquinários e danos à cultura durante as operações, principalmente na colheita. Além disso, tem que se considerar a questão do parque de máquinas dos produtores e usinas envolvidos na produção de cana, cuja renovação não é simples e imediata, visto os altos investimentos já realizados. Torna-se necessário, portanto, um sistema que incorpore os ganhos de produtividade dos menores espaçamentos com a questão operacional de produção.

Apesar de não ser novidade, é nesse contexto que volta a tona o espaçamento duplo alternado, que trata de uma variação na distância entre os sulcos de plantio, confeccionados, em geral, na distância de 0,90 (duplo) x 1,50 metro. Tal sistema permite a colheita simultânea de duas fileiras de cana, aumentando, teoricamente, a capacidade de colheita pela colhedora, além de um maior controle de tráfego, dado o maior espaço destinado aos rodados das máquinas.

A definição de espaçamento de plantio vem a ser a distância entre os sulcos ou fileiras de plantio (RIPOLI et al., 2007), sendo que quando a distância é equidistante, diz-se que o espaçamento é uniforme ou simples, enquanto que quando há variações na distância a partir de dois valores, diz-se que o espaçamento é alternado. De forma a facilitar a compreensão, é ilustrado na Figura 2 um esquema quanto aos tipos de espaçamento. Vale ressaltar que no caso do alternado, em geral são realizados dois sulcos a partir do menor valor, por isso a denominação do espaçamento duplo alternado.

Figura 2 – Esquema de espaçamento: uniforme (simples) e duplo alternado

Adaptado: Ripoli et al. (2007)

Segundo Stolf et al. (1987), apesar do estreitamento do espaçamento entre fileiras de cana-de-açúcar até certos limites (0,60 m) resultar em aumentos de produtividade, a mecanização das operações seria dificultada, tendo em vista que a diminuição das bitolas acarretaria numa diminuição da estabilidade das máquinas envolvidas. Para os autores, espaçamentos menores que 0,90 m são limitantes à mecanização em cana-de-açúcar.

Casagrande (2002), em revisão bibliográfica sobre espaçamentos na cultura da cana-de-açúcar, abrangendo 38 trabalhos sobre o assunto conclui que: a) de forma geral, espaçamentos mais estreitos aumentam a produtividade em primeiro corte; b) a redução de espaçamento resulta em dificuldades operacionais; c) a possibilidade de resposta de acréscimos de produtividade com espaçamentos mais estreitos em solos de baixa fertilidade é maior; d) nem todos os trabalhos apresentam resposta aos espaçamentos duplos; e e) o desenvolvimento da cana-de-açúcar em relação aos diferentes espaçamentos não é igual para todas as variedades.

Segundo Cox (2006) um dos grandes desafios para o setor canavieiro como um todo, ou seja, considerando os principais países produtores de cana-de-açúcar, é a compatibilização de um espaçamento padrão em cana-de-açúcar, tendo em vista, principalmente, a padronização de máquinas aptas à colheita. Pois quanto

maior a bitola da colhedora, menor será a compactação no solo, tendo em vista que a máquina irá passar um número menor de vezes na área. Os benefícios dessa redução de “passadas” podem também ser verificados com a adoção espaçamento duplo (ED), que reduz pela metade os impactos da compactação.

Furlani Neto (2009) ressalta o espaçamento duplo alternado como sendo uma ótima alternativa para o controle de tráfego, resultando simultaneamente em menores distâncias percorridas pelas máquinas e maiores valores quanto à metros de sulco por hectare, conforme Tabela 2, que confronta tais informações para os principais tipos de espaçamentos utilizados no Centro-Sul canavieiro.

Tabela 2 – Metros de sulco por hectare e distância percorrida pela colhedora de acordo com o espaçamento adotado

Espaçamentos (metros)	Tipo	Metros de sulco por hectare	Distância percorrida pela máquina (metros/ha)
0,90 x 1,50	Duplo Alternado	8.332	4.166
0,90 x 1,60	Duplo Alternado	8.000	4.000
1,4	Simples	7.142	7.142
1,5	Simples	6.666	6.666

Fonte: Furlani (2009)

Portanto, os objetivos com a adoção do sistema são: a) colheita simultânea de duas fileiras; b) Maior controle de tráfego no talhão; c) Diminuição da distância percorrida pelos maquinários na área; d) Aumento da longevidade e produtividade do canavial; e) Melhora da eficácia do corte basal; f) Viabilização de colhedoras e demais máquinas da frota utilizadas no processo, sem que haja necessidade de novos investimentos; g) aumento dos rendimentos operacionais e, por fim; h) diminuição dos custos operacionais.

2.4.3 Tráfego controlado

O tráfego controlado pode ser considerado como uma ferramenta promissora para minimizar a compactação do solo. Esse sistema restringe o trânsito do rodado a determinadas entre-linhas, com diminuição da compactação e, potencialmente, promove o desenvolvimento da cultura (YOUNG et al., 1993). Por

meio desse sistema, foram obtidos aumentos no rendimento de cereais, batata e gramíneas (CARTER; MEEK; RECHEL, 1988; DICKSON; CAMPBELL; RITCHIE, 1992; DOUGLAS; CAMPBELL; CRAWFORD, 1992).

Outro importante benefício do tráfego dirigido é o incremento do número de dias em que o solo está apto para ser trabalhado. De acordo com Young et al. (1993), durante o período de seu trabalho, as condições físicas do solo no sistema de tráfego controlado permitiram o início das atividades mecanizadas cinco dias antes em comparação ao sistema convencional, embora o solo sob tráfego controlado se apresentasse mais úmido. Isso é de considerável importância prática no campo, em que é comum a realização do preparo de solo sob condições inadequadas de umidade devido ao pequeno intervalo de dias secos na época chuvosa.

O tráfego de máquinas é o fator (mais importante) externo causador da compactação do solo. As características do carregamento aplicado ao solo que influenciam o processo de compactação estão diretamente relacionadas às características das máquinas agrícolas, tais como, a carga no eixo da máquina, as dimensões, geometria, rigidez, patinamento e pressão de inflação dos pneus e a velocidade de operação (ABU-HAMDEH et al., 2000).

Estudando o efeito do tráfego de um trator com peso de 8,5 Mg em quatro tratamentos de compactação: 1- sem tráfego do trator; 2- com tráfego nas entrelinhas; 3- com tráfego nas linhas; e 4- com tráfego na área toda, Aladawi e Reeder (1996), concluíram que a produção de milho com tráfego na área toda foi significativamente menor que a produção nos demais tratamentos.

Tráfego de precisão é um sistema que visa manter a área de tráfego constante e limitada, com a padronização das bitolas de máquinas e implementos durante as operações agrícolas, consequentemente criando zonas distintas de plantio e de tráfego. Esta prática geralmente aumenta a produtividade e o rendimento do trabalho de campo. Os caminhos firmemente compactados melhoram a tração e mobilidade das máquinas. O tráfego de precisão traz vantagens com relação a compactação, mas não a elimina (ALADAWI; REEDER, 1996).

Com a modernização da agricultura, a massa das máquinas e dos equipamentos assim como a intensidade de uso do solo tem aumentado drasticamente, em contrapartida o aumento da largura dos pneus não tenha alcançado reduções significativas da pressão dos mesmos sobre o solo. Esse

processo não foi acompanhado por um desenvolvimento adequado às exigências de uma agricultura que deve tender continuamente à sustentabilidade, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo, de acordo com Streck et al. (2004) que avaliaram o efeito do tráfego de máquinas na alteração das propriedades físicas de um solo sob plantio direto e concluíram que o tráfego sobre o solo aumentou a densidade e a resistência do solo à penetração. As propriedades físicas do solo de uma propriedade rural onde foi utilizado o tráfego controlado por sete anos foram medidas por Wood et al. (1993). Verificou-se que, mantendo áreas separadas para o tráfego das máquinas, a zona das culturas apresentou menor densidade e maior porosidade e permeabilidade ao ar, beneficiando as plantas em comparação com as linhas de tráfego.

Raper e Kirby (2006) afirmam que uma forma muito útil de limitar a compactação de solo é separando-se as áreas usadas para crescimento de raiz das usadas para tráfego de veículo. Laguë et al. (2003) definem de tráfego controlado como um sistema de produção no qual a área de cultivo e as pistas de tráfego são permanentemente separadas. Dessa forma, as pistas de tráfego são propositalmente compactadas e podem resistir ao tráfego adicional sem se deformar, assim a eficiência de tração dos pneus aumenta. Por sua vez, as áreas de produção entre as pistas são usadas exclusivamente para o plantio não sofrendo compactação pelo tráfego de veículos. Assim, a compactação é virtualmente eliminada, com exceção da compactação natural do solo e da provocada pelos implementos agrícolas, a qual fica, entretanto, minimizada no sistema de tráfego controlado. Outro benefício potencial do sistema de tráfego controlado é a eliminação da necessidade de tratores de grande potência necessários às operações pesadas de cultivo, tais como subsolagem e aração.

A utilização do sistema de tráfego controlado representa uma alternativa interessante ao cultivo mecanizado convencional, visto que há uma redução total ou quase total na frequência de máquinas sobre a área de plantio. Na revisão feita por Laguë et al. (2003), relata-se que com a eliminação do tráfego nas áreas de cultivo há uma enorme contribuição para aumento da produtividade.

Por outro lado, o custo de investimento inicial é mais elevado neste sistema, devido ao alto custo dos equipamentos e às modificações e manutenção das áreas. Também se deve levar em conta a perda da área de produção que for destinada exclusivamente ao tráfego.

Limitar as tensões geradas no solo pelo tráfego de máquinas, conforme a capacidade de suporte de cada solo tem sido o enfoque adotado por vários países europeus dentro de um contexto atual de reconhecimento da importância do solo como recurso natural não-renovável, o qual tem levado ao aumento da regulamentação para sua proteção e uso sustentável (VAN DEN AKKER; ARVIDSSON; HORN; FLEIGE, 2003).

2.4.4 Maquinário pesado

O uso intensivo de maquinário pesado, como ocorre na lavoura canavieira, pode causar alterações no solo, que podem levar a decréscimos na produção agrícola e ainda predispor o solo à erosão. Sendo assim, é de grandiosa importância se fazer um bom preparo de solo, antes da introdução da cultura utilizada na reforma do canavial, pois na maioria das vezes, o solo não é preparado novamente para o plantio da cana-de-açúcar em sucessão.

Proporcionar condições ótimas ao desenvolvimento das plantas deve ser um dos objetivos do preparo de solo. A descompactação do solo, que é um dos principais objetivos do preparo de solo, de acordo com Kochhann e Denardin (2000) facilita o desenvolvimento radicular das plantas, eleva a taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento de água, aumenta a permeabilidade do solo.

2.5 Sistema radicular

O atual sistema radicular observado nas plantas é o resultado de milhões de anos de evolução da planta, com as condições do solo e os microrganismos presentes. Compreender como o sistema radicular funciona permite identificar oportunidades de melhoria, conferir o seu melhor posicionamento no manejo de solo e a sua importância em relação a produtividade. Avançamos significativamente no manejo da parte aérea das plantas, mas ainda há muito a fazer com as raízes e ainda mais se considerar o manejo do perfil do solo.

A compreensão dos fenômenos ocorridos na parte aérea das plantas torna-se mais completa, quando também se compreende o que acontece abaixo da superfície do solo, principalmente com relação ao crescimento e à distribuição de raízes no perfil. Entretanto, o estudo de sistema radicular é muito trabalhoso. Além

disso, a variabilidade das condições físicas, químicas e biológicas do solo tem influência na distribuição das raízes e pode levar a resultados que não representam a realidade.

Revisões abrangentes sobre métodos de avaliação do sistema radicular foram realizadas por Böhm (1979) e Köpke (1981). Esses autores descrevem, detalhadamente, os métodos da escavação, do monólito, do trado, do perfil, do tubo ou paredes de vidro, além de métodos indiretos. Outros métodos utilizam alta tecnologia, como o emprego de fósforo- 32 ou rubídio-86, como marcadores (RUSSEL; ELLIS, 1968), ou a utilização de radiografia de nêutrons (WILLAT et al., 1978). No Brasil, Crestana et al. (1994) uniram a técnica de imagens digitais ao método do perfil com quantificação de comprimento de raízes.

Segundo Böhm (1976), no estudo de campo, o método utilizado tem tanta influência no resultado do comprimento de raízes que, em muitos casos, é impossível comparar os dados de diferentes autores. Para ele, são necessárias mais pesquisas, com diversas culturas, para comparar os resultados do método do perfil com técnicas tradicionais de amostragem e lavagem. Segundo esse pesquisador, os trabalhos realizados para entender o sistema radicular vêm de longa data. Ele cita que, em 1892, Thiel propôs a escarificação de uma fina camada do perfil do solo e a contagem das raízes visíveis, mas o método do perfil em trincheira passou a ser mais conhecido a partir de 1932, com os trabalhos de Oskamp e Batjer.

A forma perfeita de avaliar as raízes não existe, pois a adequação de um método para o estudo do sistema radicular depende da condição "*in situ*". Os resultados podem variar de acordo com a cultura, variedade estudada e seu manejo, com o tipo de solo e suas condições físico-químicas e, principalmente, com os cuidados e uniformidade de procedimentos da equipe operacional.

2.5.1 Desenvolvimento e distribuição do sistema radicular

As primeiras raízes que se desenvolvem após o plantio da cana-de-açúcar são as de fixação, originadas dos primórdios radiculares situados na zona radicular do rebolo plantado (BACCHI, 1983; CASTRO; KLUGE, 2001). Durante aproximadamente 30 dias de brotação das gemas, a planta vive das reservas de nutrientes contidas no rebolo e, parcialmente, do suprimento de água e nutrientes proporcionados por essas raízes de fixação (BACCHI, 1983; BLACKBURN, 1984).

Após esse período inicia-se o desenvolvimento das raízes dos perfilhos primários, posteriormente dos secundários e assim sucessivamente. Na medida em que novas raízes vão se desenvolvendo, as de fixação vão perdendo sua função e a cana-planta passa a depender exclusivamente das raízes do perfilhos (ROCHECOUSTE, 1967). Dependendo das condições climáticas e do solo, em torno de 90 dias após o plantio todo o sistema radicular encontra-se distribuído nos primeiros 30 cm do solo (CASAGRANDE, 1991).

Estudos citados por Dillewijn (1952) evidenciam a existência de três tipos básicos de raízes de cana-de-açúcar: raízes superficiais, ramificadas e absorventes; raízes de fixação, mais profundas; e raízes cordão, que podem atingir até seis metros de profundidade.

Após o corte da cana planta, o sistema radicular antigo mantém-se ainda em atividade por algum tempo, período em que é substituído pelas raízes dos novos perfilhos da soqueira, sendo esse processo lento e gradual. As raízes da soqueira são mais superficiais do que as da cana planta pelo fato dos perfilhos das soqueiras brotarem mais próximo da superfície do que os da cana planta. Pelo mesmo fato, quanto maior o número de cortes, mais superficial torna-se o sistema radicular das soqueiras (BACCHI, 1983).

Vários trabalhos foram desenvolvidos abordando a distribuição do sistema radicular de cana-de-açúcar no perfil do solo. Lee (1926), em trabalhos de distribuição do sistema radicular nas Ilhas Havaianas, verificou que a maioria das raízes da cultura encontrava-se nos 20 cm superficiais do solo, e que 85% encontravam-se até 60 cm de profundidade, sendo que a aeração do solo constituiu o principal fator para que as raízes da cana-de-açúcar tivessem boa superfície de absorção.

Jensen (1951), estudando o sistema radicular da cana-de-açúcar em Cuba, verificou que as variedades diferem pouco na distribuição de suas raízes e que todas emitem grande quantidade próximo à superfície do solo. Em todos os casos estudados, mais de 50% das raízes da planta madura foram encontradas nos 20 cm superficiais do solo.

Van den Berg et al. (2000), estudando o rendimento potencial da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, demonstram que quanto maior o volume de raízes por camada, maior é, também, o rendimento potencial da cultura, tanto para cana planta como para cana soca. Os autores afirmam que o rendimento tende a

aumentar com o aumento do volume de raízes.

Para Sampaio et al. (1987), deve-se dar maior importância ao sistema radicular, porque é ele que serve de reserva de nutrientes para a rebrota das socas. O mesmo autor ainda identificou que 75 % da massa radicular estava localizada nos primeiros 20 cm superficiais e 55 % estavam a menos de 30 cm do centro da touceira.

Inforzato e Alvarez (1957) obtiveram resultados demonstrativos de que a distribuição do sistema radicular apresenta-se bem homogênea, nas camadas superficiais do solo, sendo que o maior adensamento ocorre nos primeiros 30 cm (59%). Já Ball-Coelho et al. (1992) encontraram 62,69 % da matéria seca total de raízes nos primeiros 50 cm de profundidade, com 38-48 % das raízes vivas nos 30 cm iniciais. Esses autores mostraram também que, quando se trata de massa total de raízes, a referência é das raízes mais próximas aos colmos da touceira do que daquelas longe dos mesmos; esse padrão é mais marcante nas camadas superiores do solo, mas não existe abaixo de 1 m.

2.5.2 Fatores que influenciam o desenvolvimento do sistema radicular

O crescimento radicular exige energia para a divisão e alongação de suas células. Estima-se que de 25 a 78% da energia gerada pela respiração das raízes é destinado ao crescimento das raízes, de 13 a 60% para a absorção de nutrientes, e apenas de 8 a 33% é para manutenção das atividades básicas das células (WEEN, 1981). Devido à isso a disponibilidade de oxigênio no perfil do solo afeta o crescimento e a distribuição do sistema radicular. Monteith; Banath (1965) avaliaram o efeito da aeração no sistema radicular de cana-de-açúcar em condições controladas e em vasos. Foi montado vasos de 45,7 cm de altura e 9,6cm de diâmetro interno e transplantado mudas de cana com 45cm de altura. Na superfície do solo foi aplicado diferentes proporções de oxigênio por 6 dias e em seguida foi medido o crescimento radicular. O autor observou que o crescimento radicular da cana é proporcional a quantidade de oxigênio, um decréscimo das concentrações de oxigênio encontrado no ar para 14,6% foi o suficiente para reduzir 20% o crescimento radicular. Para ele, o limite crítico de oxigenação está entre 3,4 a 0%, pois nesse valor foi reduzido 80 a 95% do potencial de seu crescimento.

Ao mesmo nível que o oxigênio afeta o crescimento radicular temos a disponibilidade de água. O regime hídrico afeta a distribuição do sistema radicular, pois ela se desenvolve nos locais onde há sempre uma boa disponibilidade hídrica.

Já o fósforo afeta a distribuição do sistema radicular devido a sua baixa mobilidade nos solos tropicais. Esse efeito é marcante em culturas anuais e é expresso em menor grau nas culturas perenes devido a sua mobilidade interna na planta. De qualquer forma, tudo indica que o melhor posicionamento da aplicação do fósforo é no local do solo onde sempre temos ar e umidade o ano inteiro, assim a aplicação em alta profundidade de fósforo possui grande potencial.

Um outro fator que influencia o crescimento radicular de forma significativa é a atividade dos microrganismos rizosféricos. Se analisarmos a quantidade de raízes em solo esterilizados e não esterilizados podemos encontrar uma diferença discrepante de quantidade de raízes. O resultado obtido por Freitas e Aguilar Vildoso (2004) no crescimento radicular do limoeiro cravo, a maior frequência dos resultados mostram que há incremento na biomassa do sistema radicular e em poucos casos acontece a sua redução. Os microrganismos do solo possuem um papel importante no desenvolvimento e crescimento radicular e é devido a isso que os manejos que levam a sua redução ou eliminação certamente irão trazer alguma espécie de dano na planta.

2.5.3 A carência de pesquisas sobre o sistema radicular

Durante muitos anos (até meados do século passado), as raízes foram consideradas a “metade oculta” dos vegetais (WAISEL et al., 2002, apud ZONTA et al., 2006), com significativa escassez de resultados de pesquisa nesse tema em todo o mundo. As razões para essa carência de dados são historicamente explicáveis pelas dificuldades metodológicas, pela própria inacessibilidade ao sistema radicular como objeto de experimentação, pela sua complexidade tridimensional e por sua marcada variabilidade espacial e temporal (NOORDWIJK, 1993, apud ZONTA et al., 2006). Durante muitos anos, o tempo gasto nas atividades de quantificação do sistema radicular e as incertezas quanto aos resultados constituíram fortes desestímulos ao trabalho com raízes (ZONTA et al., 2006).

Atualmente existe consenso acerca da importância de estudos com observações *in situ* no campo para o manejo das lavouras. Quando associado aos

fatores edafoclimáticos, eles são fundamentais para otimização das práticas de adubação, tratos culturais, densidade de plantio, irrigação, cultivos intercalares, entre outros (ZONTA et al., 2006). Ainda segundo esses autores, os estudos das raízes são fundamentais para o entendimento das relações de absorção de água e nutrientes pela cultura.

Um dos fatores de maior importância na relação planta-água-solo é a arquitetura e distribuição do sistema radicular das plantas, bem como sua dinâmica de crescimento (VASCONCELOS, 2002). O conhecimento do sistema radicular da cana-de-açúcar permite a utilização adequada das técnicas agrônômicas, tais como: espaçamento, local de aplicação dos fertilizantes, operações de cultivo, drenagem dos solos e sistemas de irrigação, controle da erosão, uso de culturas intercalares entre outras (CASAGRANDE, 1991). Entretanto, o estudo de sistema radicular é muito trabalhoso e, além disso, a variabilidade das condições físicas, químicas e biológicas do solo tem influência na distribuição das raízes e pode levar a resultados que não representam a realidade. Assim, seria interessante determinar uma forma de estudo capaz de amostrar as raízes com um mínimo de gasto de tempo e de trabalho, e com o máximo de exatidão e precisão possíveis (VASCONCELOS et al., 2003).

2.5.4 Avaliação do sistema radicular

A avaliação do sistema radicular de uma cultura pode ser considerada fundamental no diagnóstico de sistemas de manejo que visam a otimização da produtividade agrícola, sendo que a distribuição das raízes no solo é resultante de uma série de processos complexos e dinâmicos, que incluem as interações entre o ambiente, o solo e as plantas em pleno crescimento (FANTE JUNIOR, 1999).

De acordo Köpke (1981), estudos sobre crescimento radicular devem ser feitos a partir da avaliação das características das raízes, como massa, comprimento e área, no tempo e no espaço, em conjunto com os fatores que influenciam a distribuição do sistema radicular, como densidade e porosidade do solo, água e ar disponíveis no solo, nutrientes e pH, dentre outros. Em estudos de raízes e suas interações com o solo (interface solo-raiz), a metodologia de quantificação é um fator limitante.

Segundo Bohm (1979), Schuurmann e Goedewaagen (1971) e Köpke

(1981), citados por Fante Júnior (1999), existem vários métodos que permitem investigar a distribuição do sistema radicular, entretanto, avaliações do volume explorado, massa seca e comprimento radicular tratam-se de tarefas de difícil realização, com grandes limitações em todas as técnicas, como o tempo gasto, pouca informação obtida e elevada variabilidade dos resultados.

Vários são os métodos para estudo do sistema radicular de culturas em campo. Queiroz-Voltan et al. (1998) estudaram aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob efeito da compactação do solo abrindo trincheiras onde foram coletadas amostras de raízes em várias profundidades.

Fante Júnior et al. (1999), estudando o sistema radicular de aveia forrageira, utilizaram, entre outros métodos, a tradagem com o emprego de um trado manual de caneca de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, sendo retiradas amostras da superfície até 50 cm de profundidade, ao longo de uma linha paralela à da cultura e distando em torno de 3 cm desta. Os autores deste trabalho concluíram que a distribuição do sistema radicular no solo apresentou considerável variabilidade espacial, mostrando maior relação com o tamanho das amostras que com o número delas.

Os principais métodos de avaliação do sistema radicular das plantas são: os métodos da escavação, do monólito, do trado, do perfil, do tubo ou paredes de vidro e métodos indiretos, conforme Bohm (1979), que descreve detalhadamente cada método. No Brasil, Crestana et al. (1994) uniram a técnica de imagens digitais ao método do perfil com quantificação de comprimento de raízes.

A escolha do método de avaliação do sistema radicular irá depender da cultura, das condições edáficas, da possibilidade ou não de amostragens destrutivas, da disponibilidade de mão de obra e, principalmente, dos objetivos do estudo.

Em relação às características radiculares que podem ser mensuradas, pode-se obter o comprimento radicular (m ou km de raízes), que determina o potencial de absorção de água e nutrientes do solo; a massa radicular (g ou kg) que determina o estoque total de matéria subterrânea e nutriente alocados; o volume radicular (cm^3 ou m^3) que determina o volume de solo explorado pelas raízes; a área radicular (cm^2 ou m^2) que determina a absorção de água e nutrientes do solo e o diâmetro radicular (mm), em estudos com associação com microrganismos, regulação do estresse hídrico e indicador da influência e resposta das condições químicas e físicas do solo

(ATKINSON, 2000, apud ZONTA et al., 2006).

2.6 Viabilidade Econômica

No processo de mecanização agrícola a seleção das máquinas pode ser analisada sob vários aspectos, que variam desde a preferência pessoal até o dimensionamento técnico e econômico feito por profissionais capacitados.

O dimensionamento técnico busca avaliar se as características das máquinas atendem as necessidades exigidas pelo sistema de produção. Já no dimensionamento econômico o que se avalia são os custos de propriedade envolvidos, fator fundamental para se determinar o retorno da atividade agrícola.

Milan (2004) relata que o desempenho econômico da maquinaria agrícola envolve o cálculo do custo direto, indireto e operacional. Os custos diretos são aqueles associados à posse e ao uso, os indiretos são aqueles devidos a um dimensionamento inadequado e o operacional está associado à capacidade de trabalho do conjunto ou máquina. Segundo o mesmo autor, a mão de obra do operador pode ser acrescentada ao custo direto de duas formas: a primeira, se o operador tem como função exclusiva a operação do conjunto/máquina, o custo incide totalmente para a máquina; a segunda, se ele exerce outras atividades, a divisão poderá ser proporcional ao tempo que ele despende na máquina e na outra atividade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área experimental da Fazenda Areão (ESALQ/USP), no município de Piracicaba/SP (Figura 3). A área experimental situa-se na latitude Sul de 22° 41' 27", longitude Oeste de 47° 38' 30" e altitude predominante de 540 m em relação ao nível do mar, apresentando, segundo a classificação de Koppen (1948), clima Cwa: tropical úmido, com chuvas de verão, inverno seco, temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C e a temperatura do mês mais frio 16,9°C. A precipitação média anual é de 1253 mm, umidade relativa do ar de 74% e insolação média mensal de 201,5 horas/mês.

Figura 3 – Localização do experimento na Fazenda Areão, ESALQ/USP, em Piracicaba/SP

A variedade utilizada foi a CTC 14, de bastante aceitação pelas suas características agrônômicas, principalmente por ser produtiva e rica em açúcar e se desenvolver bem em ambiente de produção de média a baixa fertilidade do solo. O plantio foi realizado em outubro de 2010 e a colheita em novembro de 2011, completando um ciclo agrícola de 13 meses.

Figura 4 – Valores de precipitação pluviométrica e temperatura durante o ciclo da cultura

3.1 Caracterização do solo

O solo da área experimental é um Nitossolo Vermelho Eutrófico (EMBRAPA, 2006). A caracterização química e física do solo em várias profundidades (Tabelas 3, 4 e 5) foi realizada tomando-se amostras com trado nas parcelas do experimento.

Tabela 3 – Caracterização química do solo em diferentes profundidades – Fazenda Areão, ESALQ

Prof. (cm)	pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	S mg dm ⁻³	K -----	Ca -----	Mg mmol _c dm ⁻³	H+Al -----	SB -----	T	V --- % ---	m
0-20	5,1	16	5	2	1,0	33	12	34	46	80	58	0
20-40	4,8	10	4	11	0,5	25	12	34	38	72	52	5
40-70	4,7	8	4	26	0,3	26	10	42	36	78	46	10
70-100	4,7	6	4	56	0,3	20	8	47	28	75	38	17

pH – CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (QUAGGIO; RAIJ, 2001)

M.O. – Matéria orgânica, método colorimétrico (CANTARELLA; QUAGGIO, 2001)

P, K, Ca e Mg – Extração por resina trocadora de íons (RAIJ; QUAGGIO, 2001)

H+Al – Determinação por potenciometria em solução tampão SMP (QUAGGIO; RAIJ, 2001)

Tabela 4 – Teor de micronutrientes em quatro profundidades de solo - Fazenda Areão, ESALQ

Prof.	Cu	Fe	Zn	Mn	B
(cm)	----- mg dm ⁻³ -----				
0-20	0,9	29	1,3	13,6	0,17
20-40	0,8	19	0,6	7,2	0,24
40-70	0,5	14	0,3	0,9	0,21
70-100	0,3	9	0,2	0,5	0,20

B – BaCl₂.2H₂O 0,125% microondas (ABREU et al., 2001a)

Cu, Fe, Mn, Zn – DTPA – TEA pH 7,3 (ABREU et al., 2001b)

Tabela 5 – Resultados da análise granulométrica do solo – Fazenda Areão, ESALQ

Prof.	Argila	Silte	Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina
(cm)	----- g kg ⁻¹ -----				
0-20	473	107	420	170	250
20-40	544	86	370	160	210
40-70	620	70	310	130	180
70-100	558	122	320	160	160

Antes do plantio, em agosto de 2010, foi aplicado 1,0 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, correspondente a 20 kg por parcela, seguido de uma aração leve. A aplicação de gesso se deu conforme o preparo do solo correspondente ao tratamento. Foi utilizada a quantidade de 1,5 t ha⁻¹ de gesso, correspondente a 30 kg por parcela. No preparo do solo Convencional e Mínimo foi aplicado superficialmente e depois incorporado. No preparo profundo a aplicação é realizada pelo implemento que faz o preparo do solo, onde o gesso é aplicado nas profundidades de 40 e 60 cm (Figura 5).

Figura 5 – A) Aplicação de corretivos na superfície do solo; B) Aplicação em profundidade no tratamento PPF. Em detalhe a aplicação na profundidade de 40 e 60 cm

A sulcação foi realizada em uma profundidade média de 0,30 m, concomitante à aplicação de 130 kg ha^{-1} de P_2O_5 e K_2O , com as fontes Superfosfato Triplo e Cloreto de Potássio, respectivamente. No plantio, foram utilizadas em média 15 gemas viáveis por metro e a distribuição foi manual nos sulcos de plantio (Figura 6). Após a distribuição foi realizada a aplicação de inseticida e nematicida (Evidence e Furadan, volume de calda de 200 L ha^{-1}) sobre as mudas, seguido da cobertura das mudas com uma camada de cerca de 10 cm de solo.

Figura 6 – Distribuição manual das mudas nos sulcos de plantio

O delineamento experimental foi o de blocos completos ao acaso, com cinco tratamentos e quatro repetições.

Tratamentos		
Preparo do solo Convencional	Espaçamento simples	CON-S
	Espaçamento duplo	CON-D
Preparo do solo Mínimo	Espaçamento simples	MIN-S
	Espaçamento duplo	MIN-D
Preparo do solo Profundo	Espaçamento duplo	PPF

* Espaçamento simples, 1,5 m entre linhas / Espaçamento duplo¹, 1,5 x 0,9m

Cada parcela experimental foi constituída de 8 fileiras de cana-de-açúcar, com 20 m de comprimento, totalizando 240 m² nas parcelas com fileiras simples e 192 m² nas parcelas com fileira dupla (Figura 7). A área útil de cada parcela utilizada para as avaliações foram as quatro fileiras centrais, descartando cinco metros em cada extremidade da fileira.

Figura 7 – Representação do croqui de um bloco do experimento, em detalhe a área útil utilizada nas avaliações

¹ Alguns autores chamam também de alternado ou duplo alternado.

3.2 Tratamentos

Preparo do solo convencional – espaçamento simples e duplo

Após a correção do solo com calcário e gesso foram realizadas as seguintes operações mecanizadas na seguinte ordem:

- Aração
- Gradagem pesada
- Subsolagem
- Gradagem leve
- Sulcação + Adubação de plantio
- Cobrição + Aplicação de inseticida e nematicida

Preparo do solo mínimo – espaçamento simples e duplo

Após a correção do solo com calcário e gesso, foram realizadas as seguintes operações mecanizadas na seguinte ordem:

- Subsolagem
- Gradagem leve
- Sulcação + Adubação de plantio
- Cobrição + Aplicação de inseticida e nematicida

Preparo do solo profundo – espaçamento duplo

Após a correção do solo com calcário foram realizadas as seguintes operações mecanizadas na seguinte ordem:

- Dreno subsolador + gessagem em profundidade + Enxada rotativa (Utilizado trator CASE MX270 de 270 cv)
- Sulcação + Adubação de plantio
- Cobrição + Aplicação de inseticida e nematicida

Figura 8 – Operações de preparo do solo. **A)** Aração nos tratamentos CON-S e CON-D; **B)** Subsolagem nos tratamentos CON e MIN; **C)** Sulcação do espaçamento duplo; **D)** Aplicação de inseticida e cobrição das mudas

A Figura 9 abaixo, mostra o conceito do preparo profundo aliado ao trânsito dirigido de máquinas na área. Assim, o preparo do solo é realizado somente onde as raízes da cultura vão se desenvolver, diminuindo a quantidade de solo revolvido nesses processos e também evitando que haja pisoteio no sistema radicular através do trânsito dirigido na área.

Figura 9 – **A)** DRENO subsolador, implemento utilizado para realizar o preparo profundo de 0,80 m de profundidade no tratamento PPF; **B)** Enxada rotativa, utilizada para destorroamento no PPF – este implemento foi acoplado ao DRENO, fazendo a tarefa em uma única operação; **C)** Esquema do trânsito dirigido de máquinas e implementos no tratamento PPF, utilizando o espaçamento duplo de 1,5 x 0,9 m. Em detalhe a profundidade que a haste alcançou sem o solo oferecer resistência após o PPF

Foram realizados dois controles de ervas daninhas com herbicidas, o primeiro em 18/11/13 e o segundo em 19/01/2011. O volume de calda preparado foi de 200 L ha⁻¹.

3.3 Avaliações

3.3.1 Características do plantio

a) Profundidade do sulco e altura de terra de cobertura

Foram feitas avaliações com intuito de monitorar como cada tratamento iniciou o seu desenvolvimento. No dia posterior ao plantio foram efetuadas amostragens, nos sulcos. Para a profundidade de sulcação, foram medidos 20 pontos por parcela com o auxílio de duas réguas, uma colocada nas bordas do sulco para caracterizar a linha do solo e outra para medir a profundidade.

Para a altura da terra de cobertura, escavou-se o solo onde foi plantado a muda e medida a camada de terra acima da muda.

b) Número de gemas plantadas

Em cada parcela, 20 metros lineares foram amostrados. Sendo a contagem separada a cada 1 metro e foi demarcada essa mesma área para que a contagem de perfilhos, colmos e as outras avaliações de biometria continuassem durante o ciclo da cultura, obtendo assim um mesmo referencial desde o plantio (Figura 10).

Figura 10 – Avaliação inicial no dia da instalação do experimento, contagem de gemas no sulco de plantio

c) Avaliação de falhas

Foi realizado um levantamento manual das falhas, seguindo o método proposto por Stolf (1986), que consiste em uma metodologia extremamente simples, bastando contar e computar a somatória dos metros das falhas acima de 0,5 m, em cada linha, tendo um índice, em porcentagem, da área com falhas maiores que 0,5 m. Para tal, basta uma trena e um gabarito de 0,5 m para definir se a falha é maior ou menor que este valor. Foram consideradas todas as falhas ocorridas na área útil de cada parcela, ou seja, não se fez amostragens.

Porcentagem de falhas

$$F\% = \frac{\Sigma \text{ dos comprimentos das falhas maiores que 0,5 m}}{\text{comprimento do trecho analisado}} \times 100$$

ou seja,

$$F\% = \text{metros de falhas} / 100 \text{ m de sulco}$$

Tamanho médio das falhas

$$TM = \frac{F\%}{N \text{ de falhas} / 100 \text{ m de sulco}}$$

Frequência

$$FREQ = \frac{100 - F\%}{N \text{ de falhas} / 100 \text{ m de sulco}}$$

3.3.2 Biometria

a) Perfilhos/colmos por metro

Na mesma demarcação que foi feita para a contagem de gemas, foram realizadas a contagem da brotação das gemas e perfilhos/colmos por metro. As

avaliações se deram aos 49, 90, 112, 156, 185 e 210 dias após o plantio (DAP).

b) Diâmetro e número de entre-nó

O diâmetro médio da base dos colmos foi mensurado com o auxílio de um paquímetro digital – a medição foi realizada a 10 cm do solo (Figura 11).

A partir do momento que os entre-nós ficaram visíveis, iniciou a contagem dos entre-nós.

Figura 11 – Medição do diâmetro do colmo com o auxílio de um paquímetro digital

c) Comprimento do colmo

Foi realizada a medição com o auxílio de uma trena, do nível do solo até a primeira aurícula visível, classificada como a folha +1.

d) Índice de área foliar (IAF)

As medições para o IAF foram realizadas aos 156 DAP. De cada parcela, foram contabilizados os colmos na área útil. De cada colmo foram contabilizadas as folhas, separando-se aquelas totalmente abertas que apresentavam pelo menos 20% de área verde. Com o auxílio de réguas, as folhas foram medidas em seu comprimento e em sua maior largura, cujos valores foram utilizados para calcular a área de cada folha. A somatória de todas as áreas foliares

individuais permitiu calcular a área foliar de cada colmo (HERMANN; CÂMARA, 1999) e com isso estimar o IAF para a parcela e consequentemente por hectare.

$$AFc = C \times L \times 0,75 \times (N+2)$$

onde,

AFc = área foliar do colmo;

C = comprimento da folha;

L = maior largura da folha;

0,75 = fator de forma;

N = número de folhas totalmente abertas e com pelo menos 20% de área verde;

2 = fator de correção (visa compensar as folhas verdes e relativamente abertas no interior do cartucho foliar da cana-de-açúcar, que já apresentam participação na fotossíntese ativa do colmo).

3.3.3 Características tecnológicas

Após a colheita foram selecionados ao acaso colmos para a realização das análises. Foram submetidos ao desponte na altura da gema apical (ponto de quebra), assim sendo, os colmos foram encaminhados para o Laboratório da Usina Costa Pinto (Raízen) para serem processados segundo a metodologia do Sistema de Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose (SPCTS) conforme atualizações semestrais da CONSECANA, onde foram realizadas as seguintes determinações químico-tecnológicas: °Brix, Pol, PCC, Pureza, Fibra e ATR.

3.3.4 Produção de colmos (TCH)

Realizou-se a avaliação da produção após a colheita dos colmos na área útil das parcelas, sendo esses valores convertidos para t ha⁻¹. Para auxiliar a pesagem foi utilizada uma carregadeira (Figura 12), onde foi acoplada uma célula de carga nas garras para serem feitas as pesagens dos colmos.

Figura 12 – Pesagem das parcelas com o auxílio de uma carregadeira e célula de carga

3.3.5 Desenvolvimento radicular

A distribuição do sistema radicular foi avaliada a partir do método da trincheira ou parede do perfil (Figura 13). Foram abertas com o auxílio de uma retroescavadeira. Como são necessárias repetições para fazer a análise estatística e por haverem 20 parcelas experimentais, era praticamente inviável que fossem abertas em todas as parcelas, portanto foram privilegiados os tratamentos com fileira dupla (CON-D, MIN-D e PPF) para que a comparação da distribuição das raízes tivessem condições iguais.

Figura 13 – Representação gráfica das trincheiras e das medidas utilizadas para avaliação das raízes por imagens no programa Safira®

As trincheiras foram abertas com dimensões de 2,0 x 2,0 x 2,5 m (C x L x P). A parede utilizada para estudo das raízes foi a transversal às linhas de cana. Após a abertura das trincheiras, a parede com as raízes foram lavadas com jato d'água para expo-lás e retirar uma fina camada de solo (Figura 14). Após a parede secar, as raízes foram pintadas individualmente com tinta *spray* branca, com intuito de melhorar o contraste entre raízes e o solo. Depois foi realizada uma nova lavagem para retirar a tinta que ficou no solo da trincheira e após a secagem foram obtidas imagens com câmera fotográfica digital sempre na mesma distância para todas as trincheiras.

Após as imagens serem ajustadas no computador com a mesma quantidade de *pixels* para as dimensões de 200 x 220 cm (L x P), foram digitalizadas e convertidas pelo programa SAFIRA® (JORGE; CUNHA, 2010) em comprimento, área e volume de raízes por imagem (Figura 14). Para uma melhor comparação nas

faixas de profundidade do solo, as imagens foram analisadas em quatro profundidades (0-40, 40-80, 80-150 e 150-220 cm).

Figura 14 – **A)** Operação de abertura com a retroescavadeira; **B)** Parede da trincheira com raízes expostas; **C)** Raízes pintadas com tinta *spray*; **D)** Lavagem da parede para retirar excesso de tinta

Figura 15 – Análise de imagens no Programa Safira da EMBRAPA. Etapas do processamento feito pelo programa e saída dos resultados

3.3.6 Características físicas do solo

a) Umidade gravimétrica do solo

Amostras deformadas do solo foram coletadas em três profundidades (0-25, 25-50, 50-75 cm) e com três repetições para determinação da umidade gravimétrica (CAMARGO et al., 1986). Foram coletadas na fileira de cana e em 6 épocas durante o desenvolvimento da cultura (Figura 16).

Chegando ao laboratório, as amostras foram pesadas e colocadas em estufa a 105 °C durante 24 h, para determinação da umidade gravimétrica.

b) Resistência do solo a penetração (RSP)

As avaliações foram realizadas nas linhas de cana-de-açúcar e nas entre-linhas. Foi utilizado o penetrômetro portátil da marca Hatô, que funciona através do peso do corpo do operador ao aplicar a pressão necessária sobre o cone até penetrar no solo. Para obter uma pressão de cerca de 2 MPa, apenas 1/3 do peso do corpo de uma pessoa de 70 kg é necessário, tornando-se fácil para que o operador mantenha o seu equilíbrio durante o uso (Figura 17).

O aparelho, por meio da elasticidade de sua mola, consegue indicar com precisão valores compreendidos entre 0,13 a 2,0 MPa, ponto a partir do qual ocorre diminuição significativa do crescimento radicular. Os penetrômetros convencionais não possibilitam a leitura direta da compactação no aparelho em profundidades maiores que 70 cm. O penetrômetro Hatô tem alcance de 1,5m de profundidade.

Medeiros et al. (2010) comparou os resultados com um penetrômetro eletrônico para determinar a profundidade de compactação crítica e encontrou valores semelhantes, validando assim os dados do penetrômetro portátil.

Figura 16 – Coleta de amostras do solo para análise da umidade

Figura 17 – Modo de operação do penetrômetro portátil

c) Curva de retenção de água e densidade do solo

Para avaliação da curva de retenção de água, macroporosidade e densidade do solo coletaram-se amostras indeformadas nas profundidades de 20, 40, 80, 120, 160 cm. As amostras foram coletadas em anéis metálicos (5 cm de diâmetro e 3 cm de altura) na fase intermediária de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

No laboratório, a saturação das amostras foi feita a partir da adição lenta de água. Após saturação, as amostras foram pesadas, submetidas a tensões de 0,1; 0,3; 0,8; 3; 5; e 15 atm, em câmaras de Richards (KLUTE, 1986), ao atingir o equilíbrio, foram pesadas e secas em estufa a $\pm 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas para determinação do conteúdo de água em cada tensão (GARDNER, 1986). Com esses pontos (θ , ψ_m) determinados, procedeu-se ao ajuste das curvas de retenção de água, de acordo com o modelo proposto por Van Genuchten (1980) utilizando-se o software Soil Water Retention Curve versão 3.0 (DOURADO NETO et al., 2001). Esse ajuste foi efetuado pelo método que considera: $\theta_s = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / ((1 + (\alpha * \Psi)^n)^m$ e $m = 1 - 1/n$

- Densidade do solo – conforme Blake e Hartge (1986);
- Microporosidade – equivalente ao conteúdo de água retida na tensão de 0,06 atm, determinada em câmaras de pressão de Richards com placa porosa (KLUTE, 1986);

- Porosidade total – Segundo Danielson e Sutherland (1986);
- Macroporosidade – obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

Próximo ao final do ciclo, não foi mais possível fazer a avaliação de algumas características dentro das parcelas por causa da grande quantidade de colmos acamados (Figura 18), onde no mês de junho ocorreram grandes ventanias na cidade de Piracicaba/SP. Portanto, para evitar maiores danos aos colmos e ao desenvolvimento da cultura foi tomada a decisão de paralisar o trânsito de pessoas dentro das parcelas, que por serem muitas avaliações, varias pessoas colaboravam nessas coletas de dados.

Figura 18 – Canas tombadas nos tratamentos devido a ventos forte que atingiram a Região de Piracicaba em junho/11

3.4 Análise Estatística

Os dados foram analisados considerando-se o delineamento de blocos ao acaso, sendo consideradas as parcelas cada preparo do solo e seu respectivo espaçamento. Quando o teste F foi significativo na ANOVA, realizou-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância para comparar as medias.

As características que foram analisadas em várias épocas (perfilhos, comprimento do colmo, diâmetro, número de entre-nó), foram submetidos à análise de variância e, quando o F foi significativo, procedeu-se à análise de regressão para as épocas de desenvolvimento da cultura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características do plantio

Foram encontradas diferenças significativas na profundidade dos sulcos de plantio entre os tratamentos no preparo do solo (Figura 19). Os tratamentos CON-S e MIN-S tiveram uma profundidade superior estatisticamente aos tratamentos MIN-D e PPF. Isso pode ter sido ocasionado por causa dos espaçamentos nesses tratamentos relacionados. Fica evidente que nos tratamentos com fileira dupla não foi possível ter uma maior profundidade nos sulcos, muito provavelmente por que com o espaçamento menor entre fileiras (0,90 m) o implemento não consegue aprofundar tanto e também por causa da terra que cai dentro do sulco logo após a passagem do mesmo, fato que não acontece quando a sulcação é feita no espaçamento simples (1,50 m).

Segundo Stolf et al. (1987), apesar do estreitamento do espaçamento entre fileiras de cana-de-açúcar até certos limites (0,60 m) resultar em aumentos de produtividade, a mecanização das operações é dificultada, tendo em vista que a diminuição das bitolas acarreta uma diminuição da estabilidade das máquinas envolvidas. Para os autores, espaçamentos menores que 0,90 m são limitantes à mecanização em cana-de-açúcar.

É importante ressaltar que de modo geral, diversos autores citam que a profundidade do sulco de plantio varia de 20 a 30 cm. E, que, menores de 20 cm facilitam o tombamento dos colmos, principalmente pela ação dos ventos e, maiores de 30 cm provocam redução no rendimento.

Já a quantidade de terra na cobertura da muda, não se constatou diferença significativa nos tratamentos (Figura 19) e diferentemente da operação de sulcação, a cobertura das mudas não teve intereferências do espaçamento menor (0,90 m) nesta operação. Portanto, em termos de condições de brotação das gemas, todos os tratamentos tiveram condições iguais no início do seu desenvolvimento.

Para Ripoli et al. (2007), as mudas devem ser cobertas com uma camada de terra, por volta de, 7 cm, devendo ser ligeiramente compactada. Dependendo do tipo de solo e das condições climáticas do local, pode haver uma variação na espessura dessa camada.

Figura 19 – Profundidade do sulco e cobertura das mudas no plantio

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%

Profundidade do sulco: CV = 8,2% / Terra sobre a muda: CV = 14,8%

A quantidade de gemas plantadas por metro linear em todos os tratamentos não teve diferenças significativas (Figura 20), ou seja, os dados das características do plantio demonstram que todos os tratamentos tiveram condições iguais desde o início. Apesar também de não haver diferença significativa na brotação inicial, é interessante observar a porcentagem de brotação, ou seja, quantas daquelas gemas plantadas realmente vieram a se desenvolver em um perfilho, é nessa comparação que alguns tratamentos se sobressaem, onde o PPF e CON-D foram superiores estatisticamente ao CON-S. Isto pode ser explicado pela maior quantidade de gemas viáveis nesses dois tratamentos ou também pelo melhor preparo da camada mais superficial do solo, realizado pela enxada rotativa (PPF) e pelas diversas gradagens que CON-D recebeu.

Figura 20 – Número de gemas plantadas, brotação de perfilhos e porcentagem de brotação por metro linear

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. Gemas: CV = 8,2% - Brotação: CV = 12,8% - Porcentagem de brotação: CV = 14,1%

Analisando os dados de índice de falhas em toda a área útil das parcelas (Tabela 6), constou-se que todos os tratamentos tiveram um comportamento semelhante na avaliação de porcentagem de falha (F%), abaixo dos 10%, considerado por Stolf (1986) como excelente plantio. Os tratamentos CON-D e MIN-S tiveram um desempenho ainda melhor, sendo encontradas apenas 3 falhas maiores que 0,50 m, significando uma falha apenas a cada 32 metros de linha de cana-de-açúcar plantada.

Segundo Beauclair e Sacarpari (2006), a medida das falhas apesar de ser importante na avaliação da qualidade de plantio não reflete a produtividade final, já que, muitas vezes, o perfilhamento estimulado pela maior insolação compensa o número de perfilhos final, tornando mais difícil o seu controle. Mas esses índices não deixam de ter a sua importância em termos de monitoramento da qualidade do plantio.

Tabela 6 – Porcentagem de falhas, número, tamanho médio e frequência de falhas no plantio

Tratamentos	F%	Nº de falhas	TM (m)	FREQ (m)
CON-S	5,5	8	0,69	11,8
CON-D	2,9	3	0,98	32,3
MIN-S	2,0	3	0,66	32,7
MIN-D	7,2	9	0,80	10,3
PPF	4,2	6	0,70	16,0

F%: metros de falha/100 m de sulco – TM: tamanho médio das falhas – FREQ: metros de cana plantada até ser encontrada uma falha

4.2 Biometria

Na quantidade de perfilhos por metro linear durante o ciclo da cultura, foi observado o comportamento característico da cultura da cana-de-açúcar, onde há uma grande quantidade de perfilhos nos primeiros 90 DAP (chegando a 24 perfilhos por metro) e após esse período há uma competição natural pelos recursos básicos de sobrevivência, como água, luminosidade e nutrientes e aos poucos essa população se estabiliza. Como o solo não suporta essa alta quantidade de perfilhos a cada metro linear, é normal que os perfilhos mais jovens e fracos percam a disputa pela sobrevivência. Esse efeito pode ser explicado pelo aumento do autossombreamento que ocorre no dossel com o avanço do ciclo da cultura.

A partir dos 90 DAP é observado um decréscimo natural até os 155 DAP e então há uma estabilização da quantidade desses perfilhos na área até o momento da colheita (Figura 21). Portanto, a partir desse período já é possível estimar a produtividade, onde a quantidade de perfilhos ficou estabilizada em 11-13 perfilhos pr metro.

Para Suguitani e Matsuoka (2001), o perfilhamento nos primeiros meses após o plantio é lento, sendo mais intenso à medida que as condições climáticas, temperatura e precipitação tornam-se favoráveis, chegando ao pico entre os meses de novembro e dezembro, nas condições do estado de São Paulo para cana-de-ano. De acordo com Aude (1993), o número de perfilhos decresce em função da competição por luz, água e nutrientes. O perfilhamento de cada variedade resultará no número de gemas por metro e a brotação da soqueira de cada material genético.

Tavares (2010) encontrou esse pico de perfilhos aos 163 DAP, com valores de 20 a 23 perfilhos por metro nos tratamentos de cultivo mínimo e preparo convencional, respectivamente. Após esse pico, o número de perfilhos começou a estabilizar até a colheita, chegando a valores médios de 12 perfilhos por metro e já

sem diferença significativa entre os tratamentos, o que corrobora com dados encontrados por Camilotti et al. (2005), uma vez que ao final do ciclo não mais ocorrem diferenças no perfilhamento.

Não houve interação significativa entre os tratamentos e as épocas analisadas, apenas aos 90 DAP que os tratamentos MIN-S e PPF foram superiores aos demais. Nas outras épocas analisadas não houveram diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 21).

A superioridade na quantidade de perfilhos do PPF no início do desenvolvimento da cultura pode ser atribuída ao fato de que o PPF favorece o aumento da macroporosidade em superfície, pois este desagrega as partículas do solo com a passagem da enxada rotativa. Terauchi e Matsuoka (2000) relatam que as características ideais de cultivares de cana-de-açúcar estariam relacionadas com o rápido crescimento e desenvolvimento na fase inicial, que corresponde ao perfilhamento. Portanto, para haver rápido crescimento nesta fase, necessitar-se-ia de características morfológicas que favorecessem a interceptação da radiação solar, o que foi observado na Figura 25, com o PPF possuindo um IAF superior aos outros tratamentos.

Tavares (2010) encontrou diferenças significativas entre o perfilhamento da cana em preparo convencional e cultivo mínimo, dos 163 aos 357 DAP maiores para o preparo convencional.

Figura 21 – Número de perfilhos por metro ao longo do desenvolvimento

De acordo com Aude (1993), existe diferença varietal na velocidade de brotação das gemas, sendo a brotação mais rápida em variedades precoces, onde a tendência de perfilhamento e número de colmos na touceira tem características distintas entre as variedades. Suguitani e Matsuoka (2001) também verificou em seus experimentos que o número de perfilhos depende das características genéticas de cada variedade. Portanto, comparando com os dados deste experimento onde uma única variedade foi utilizada, fica entendido o por que não foram encontradas muitas diferenças entre os tratamentos.

Terauchi e Matsuoka (2000) relatam que o elevado perfilhamento na fase inicial nem sempre significa uma maior produtividade ao final do ciclo, pois isso promoveria um gasto energético maior para a produção dos perfilhos, fato este foi observado neste experimento, onde não foram encontradas diferenças significativas na produtividade (Tabela 7).

Ripoli et al. (2007) também verificaram que algumas variedades que iniciam o perfilhamento mais rapidamente possuem perfilhos mais tardios em alongação, enquanto que algumas formam colmos mais facilmente, mesmo tendo um menor número de perfilhos. Mahadevaswamy (2000), estudando o efeito da seca nas diferentes fases do ciclo da cana-de-açúcar, constataram que cultivares com menor perfilhamento, além de apresentarem menores porcentagens de mortalidade dos

perfilhos, possuem perfilhos com maior estatura, diâmetro de colmo e maior massa seca.

Não houve interação significativa entre os tratamentos e as épocas analisadas para o diâmetro dos colmos (Figura 22). Após a evolução acelerada do diâmetro no início do desenvolvimento, os tratamentos mantiveram o crescimento constante do diâmetro até a colheita. Tavares (2010) também encontrou este mesmo comportamento analisando dados de diâmetro ao longo do ciclo da cana, mas comparando os dados de cana em cultivo mínimo e preparo convencional, o autor encontrou diferenças significativa aos 296 e 357 DAP, maiores para o tratamento cultivo mínimo.

Segundo Dillewijn (1952) o diâmetro varia de acordo com as variedades, no entanto, quanto maior o diâmetro, menor o perfilhamento das touceiras e menor a produtividade.

Figura 22 – Diâmetro do colmo ao longo do desenvolvimento

A contagem do número de entre-nós no colmo só pode ser realizada a partir dos 155 DAP, onde começou a ser possível a visualização dos mesmos (Figura 23). Antes disso, por causa da bainha das folhas que envolvem o colmo, esse tipo de avaliação não tem como acontecer sem a eliminação dos colmos para avaliação, o

que não foi o caso neste experimento.

A quantidade de entre-nós tiveram crescimento constantes em todos os tratamentos e não foram encontradas interações dos tratamentos nas épocas analisadas. Na colheita, todos os tratamentos tiveram entre 18-19 entre-nós, portanto os diferentes preparos do solo e seus espaçamentos não foram suficientes para apresentarem diferenças nesta característica avaliada.

Figura 23 – Número de entre-nós no colmo ao longo do desenvolvimento

O comprimento total dos colmos apresentou aumentos desde a primeira até a última coleta (Figura 24). Resultados similares foram encontrados por Alvarez e Castro (1999) e Tavares (2010). Não houve diferenças significativas entre os tratamentos, e o crescimento se deu de forma linear. Ocorreu uma pequena redução no ritmo de crescimento da altura dos colmos em todos os tratamentos, entre os 185 aos 210 DAP. De acordo com Machado et al. (1982), a fase de crescimento rápido está entre 100 e 250 dias após o plantio, correspondendo a 75% do máximo acumulado. A partir daí a cana-de-açúcar começa a concentrar sua produção de energia no acúmulo de sacarose no colmo.

Cebim (2007) avaliando dois sistemas de plantio também não encontrou diferenças significativas para comprimento do colmo, diâmetro do colmo e número

de entre-nó. Tavares (2010) comparando diferentes sistemas de preparo do solo encontrou diferenças apenas em algumas características e concluiu que ao longo do período, todos os dados biométricos se igualaram ao final do ciclo da cana planta.

Figura 24 – Comprimento do colmo ao longo do desenvolvimento

Tavares (2010) também não encontrou diferenças significativas entre os sistemas de cultivo e constatou redução no ritmo de crescimento do comprimento dos colmos em todos os tratamentos.

Houve diferença significativa entre os tratamentos para o IAF, sendo o PPF superior aos demais com um IAF de 7,1 aos 156 DAP (Figura 25). O fato do tratamento PPF possuir uma maior quantidade de perfilhos por metro linear contribuiu para esse aumento no IAF. Além de que, com um melhor preparo do solo, onde chegou até 80 cm de profundidade, as raízes da cana tiveram um melhor desenvolvimento e consequentemente conseguiram explorar melhor a água e nutrientes, dando um maior suporte ao perfilhamento e a produção de área foliar.

Figura 25 – Índice de área foliar da cultura

Oliveira et al. (2007), verificaram que a ocorrência dos maiores índices de área foliar ocorreu no período de dezembro a abril. Após esta fase, as cultivares diminuíram o número de folhas e a área foliar por perfilho, período que também coincidiu neste experimento. Estes resultados corroboram com os de Machado et al. (1982) e Ido (2003), que apontam o maior crescimento da parte área de cana-de-açúcar nos meses de janeiro a março, devido às adequadas condições de temperatura e precipitação pluviométrica para a região. Acresce-se a isso o fato de a área foliar fotossinteticamente ativa já ter se estabilizado, aliado à disponibilidade hídrica térmica e luminosa.

Farias et al., (2008), em experimento avaliando o crescimento da cana-de-açúcar em plantio de sequeiro e irrigado, encontrou valores máximos de IAF de 6,80 aos 146 DAP em condições de sequeiro e em cana irrigada o IAF foi de 6,82 aos 151 DAP.

Diversas variáveis influenciam o IAF, entre essas, o número de perfilhos, o número de folhas verdes, o tamanho e a largura destas folhas, a eficiência fotossintética delas, além da influência dos genótipos e dos fatores ambientais, incluindo os edáficos.

De acordo com Suguitani (2001), a área foliar está correlacionada com a produtividade das plantas, pois as folhas interceptam a luz fotossinteticamente ativa

para a realização da fotossíntese, produzindo carboidratos que serão utilizados em todo ciclo fenológico da planta. Segundo Machado et al. (1982), a intensidade de crescimento foliar na fase inicial do desenvolvimento da cana-de-açúcar é o fator mais importante na taxa de crescimento e na biomassa acumulada, principalmente no desenvolvimento da matéria seca da parte aérea em relação aos colmos.

Segundo Câmara (1993), o aumento da área foliar das touceiras é resultado do crescimento de perfilhos jovens, o que contribui para aumento da realização da fotossíntese, devido a maior área para captação da energia solar.

Leme et al. (1984) citam que o índice de área foliar (IAF) é efetivo para avaliar a produtividade final, sendo que os maiores valores durante o ciclo de desenvolvimento estariam relacionados com a maior produção final de colmos.

4.3 Características tecnológicas

Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios das análises tecnológicas nos tratamentos e a produtividade final. Não houve nenhuma diferença significativa entre os tratamentos para as análises realizadas.

Por se tratar de apenas uma variedade de cana-de-açúcar, não foi possível a partir desses tratamentos observar diferenças significativas nas características tecnológicas, onde as diferenças entre os tratamentos foram imperceptíveis. Santos (2008) testando variedades e clones de cana-de-açúcar dentro de três épocas de desenvolvimento da cultura observou diferenças significativas tanto entre as variedades, como nas diferentes épocas de desenvolvimento para sólidos solúveis, pol do caldo, ATR, pureza, açúcares redutores e fibra. Diversos autores encontram diferenças nessas características quando estão analisando épocas de colheita durante uma safra, portanto essas diferenças são perceptíveis e ficam mais evidentes nessas situações.

Tabela 7 – Análises tecnológicas realizadas após a colheita e produtividade da cultura

TRATAMENTOS	BRIX	POL	PCC	PUREZA	FIBRA	ATR	TCH
CON-S	22,7	20,5	16,6	90,2	14,5	164,2	102
CON-D	22,9	20,3	16,5	88,8	14,5	163,1	102
MIN-S	22,4	20,3	16,5	90,5	14,4	162,7	94
MIN-D	22,6	20,0	16,1	88,1	14,9	159,3	96
PPF	22,5	20,1	16,4	89,4	14,1	162,1	101
Teste F	0,426 ^{NS}	0,662 ^{NS}	0,554 ^{NS}	0,444 ^{NS}	0,433 ^{NS}	0,560 ^{NS}	0,903 ^{NS}
CV (%)	1,64	2,81	2,92	2,22	2,73	2,59	15,03
DMS	0,84	1,29	1,08	4,47	0,923	9,47	23,60

Não houve diferença significativa para produção de colmos (TCH). Por causa da dificuldade de pesar as parcelas, incluindo a colheita manual de grandes áreas e a separação da produção da área útil e bordadura, os dados de produtividade em experimentos de cana-de-açúcar sempre tem um coeficiente de variação muito alto, neste foi encontrado um CV razoável de 15%, e isso tem relação direta a não se encontrar diferença significativa para essa característica.

Vasconcelos (2002a) enfatiza que a parte aérea e o sistema radicular da cana-de-açúcar competem por fotoassimilados, o que tem consequências desfavoráveis para a produtividade e acúmulo de sacarose. Para o vegetal, a capacidade de sobrevivência é fator preponderante, sendo que a manutenção de uma arquitetura radicular com maior quantidade de raízes significa maior quantidade de reservas metabólicas, enquanto a maior distribuição em profundidade, apesar de reduzir a altura dos colmos, confere a planta maior possibilidade de contato com camadas mais úmidas e menor estresse em períodos de deficiência hídrica. Estes processos resultam em maior demanda para o sistema radicular da energia que poderia ser exportada na colheita. Portanto, o fato do tratamento PPF não ter sido superior aos demais pode estar relacionado ao IAF (Figura 25) e ao maior desenvolvimento radicular encontrado neste trabalho (Figura 26).

Mas de maneira geral, analisando os valores absolutos é perceptível esse ganho em alguns tratamentos aqui avaliados. Para o setor sucroalcooleiro, onde sempre são utilizadas grandes áreas, um aumento de 5-8 TCH traz retornos

significativos ao produtor. Até mesmo quando se desenvolve via melhoramento genético convencional novas variedades de cana-de-açúcar que trazem esse aumento de produtividade, já começam a serem observadas de maneira diferente e se trazer incorporada todas as outras características desejáveis, é praticamente certo o lançamento comercial.

Aliado a isso, vem o fato do custo menor para as operações do PPF e um menor revolvimento das camadas do solo, assuntos esses que serão discutidos mais adiante.

De maneira geral, os dados aqui apresentados já eram esperados, pois as variações nos tratamentos não seriam determinantes para influenciar nas características dessas análises, e como já foi relatado, para acontecer mudanças significativas nessas análises, apenas trabalhos com variedades, épocas de colheita, níveis de adubação com NPK, entre outros, é que seriam capazes de trazer diferenças perceptíveis.

4.4 Desenvolvimento radicular

Analizando os dados de raízes, comprimento, área e volume fica claro perceber o quanto o PPF foi superior aos demais tratamentos. Na análise de comprimento, em todas as profundidades estudadas o PPF obteve tamanho de raízes maiores, estatisticamente em relação aos outros tratamentos (Tabela 8).

A distribuição do comprimento de raízes por tratamentos na camada de 0-40 cm ficou da seguinte maneira: o CON-D com 57%, MIN-D com 48% e PPF 34% (Figuras 26 e 27). Esses dados refletem justamente no tipo de preparo do solo que cada tratamento recebeu. Enquanto o PPF foi trabalhado até uma profundidade de 80 cm do solo, suas raízes puderam se desenvolver mais e explorar camadas mais profundas, já nos tratamentos CON-D e MIN-D por causa da camada compactada do solo, que não foi rompida no momento do preparo, suas raízes foram impedidas de descer e chegar em maior quantidade a outras camadas.

De Maria et al. (1999) constataram que o sistema radicular foi reduzido entre 10-20 cm, quando a densidade e a resistência do solo foram elevadas nessa camada por causa do método de preparo do solo. Vasconcelos et al. (2003), encontrou resultados semelhantes aos dos tratamentos CON-D e MIN-D na camada de 0-40 cm, utilizando o mesmo método de avaliação de raízes, onde 60% das

raízes se concentraram nesta camada.

Na camada de 40-80 cm, a proporção de cada tratamento praticamente foi equivalente, sendo 20, 18 e 24% para o CON-D, MIN-D e PPF, respectivamente. Mas somando-se esses valores com a camada 0-40 cm, temos para a camada de 0-80 cm a proporção de 77, 65 e 58%. Um fator que pode estar relacionado a distribuição das raízes abaixo dos 80 cm, pode ser a RSP que nos tratamentos CON-D e MIN-D tiveram valores acima de 1 MPa, chegando até a 1,6, e essa característica nesses dois tratamentos pode ter influenciado diretamente o crescimento de raízes em maiores profundidades.

Na última camada de solo analisada, 150-220 cm, o PPF teve 11% de suas raízes, enquanto que o CON-D apenas 5%. Portanto, mais uma vez a importância de fazer um bom preparo do solo, principalmente em áreas onde se tem déficit de água e que as raízes em maior quantidade podem explorar melhor as necessidades da cultura. De acordo com Gregory et al. (1979), a maior quantidade de raízes em profundidade, além de favorecer a absorção de água em épocas de déficit hídrico, permite a absorção de nitrogênio que tenha sido deslocado para camadas mais profundas

Outros fatores também podem interferir no perfil de distribuição do sistema radicular, como o espaçamento, o tipo de solo e suas propriedades físico-químicas, a capacidade da variedade em deslocar energia para o desenvolvimento do sistema radicular e as condições climáticas do período antecedente à amostragem.

Vasconcelos et al. (2003) avaliando cinco métodos de avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar, concluiu que o método da trincheira subestima o comprimento de raízes na superfície, mas em geral, apresentam os menores coeficientes de variação. Quanto menor o coeficiente de variação, maior a precisão do experimento, indicando que o método da trincheira foi o mais adequado para detectar diferenças entre tratamentos, apesar de ter subestimado a quantidade de raízes na superfície. Este mesmo autor inferiu que a relação entre comprimento e massa das raízes depende da interação entre os atributos do solo, a variedade e o manejo, enquanto a constatação de alterações de comprimento e, ou, de massa depende do método escolhido para o levantamento.

Vepraskas e Hoyt (1988) também constataram menores coeficientes para este método, quando comparado ao método do tubo amostrador (“core-break”) e concluíram ser um método rápido e de boa exatidão, que em grandes experimentos

é o método mais adequado e que possui resultados confiáveis.

Por outro lado, o método do perfil (comprimento) tem a vantagem de possibilitar a visualização da distribuição do sistema radicular, além do que, se forem feitos vários cortes e preparos de perfis a cada 5-10 cm distanciando-se da planta, pode-se obter uma composição de imagens que reproduz a arquitetura do sistema radicular completo.

Cabe ressaltar um dado, apenas o comprimento de raízes do PPF na camada de 0-40 foi superior a todo o comprimento encontrado no tratamento CON-D e se aproximou bastante do MIN-D.

Figura 26 – Comprimento de raízes no perfil da trincheira nas diferentes profundidades amostradas

Tabela 8 – Comprimento de raízes no perfil da trincheira nos tratamentos com fileira dupla

TRATAMENTOS	Profundidade (cm)				TOTAL NO PERFIL
	0-40	40-80	80-150	150-220	
	cm				
CON-D	734,3 b	251,6 b	239,8 b	60,1 b	1.285,93 b
MIN-D	801,8 b	293,9 b	365,0 b	218,5 b	1.679,41 b
PPF	1.504,8 a	1.056,3 a	1.362,3 a	465,6 a	4.389,14 a

Farias et al. (2008), comparando o desenvolvimento de raízes em cana de sequeiro e irrigada, não encontrou diferenças significativas que a percentagem de raízes da cana irrigada na superfície do solo foi superior que na cana de sequeiro;

da mesma forma, na comparação entre a quantidade de raízes de cana irrigada e de sequeiro, nas seis profundidades estudadas, evidenciou que em profundidades maiores também não houve diferenças significativas entre os tratamentos.

O mesmo autor, encontrou maior percentagem de raízes no solo nas camadas mais superficiais para os dois tratamentos ao longo do período de cultivo. Diferenças significativas entre as médias dos manejos, ocorreram na profundidade de 0 a 15cm e 15 a 30 cm aos 60 DAP.

De maneira geral, os parâmetros mais utilizados na avaliação da eficiência na absorção de nutrientes das plantas são a massa fresca ou seca, a área superficial, o comprimento e o raio médio do sistema radicular. Embora cada parâmetro citado apresente limitações e vantagens quanto ao seu uso, a área superficial e o comprimento de raízes são preferidos e mais utilizados para a expressão das taxas de absorção de água e de nutrientes, além de refletir os efeitos bióticos e abióticos do meio.

Diferentemente do que foi encontrado neste trabalho, Alvarez et al. (2000), trabalhando com cana crua e queimada, afirmam que na cana crua o sistema radicular se distribui nos primeiros 40 cm de solo com 75% do total; no mesmo trabalho e para a cana queimada, 72% do sistema radicular estavam nos primeiros 40 cm de profundidade; em estudo realizado no segundo ano, esses valores são 70 e 68% para a cana crua e queimada, respectivamente.

Faroni (2004), encontrou 74% das raízes nos 20 cm superficiais do solo, não existindo muita variação entre as épocas de amostragem que foram realizadas. Considerando os primeiros 40 cm superficiais, essa porcentagem aumentou para 92%, restando 8% das raízes de 40 a 80 cm de profundidade. O autor justifica em seu trabalho que a densidade do solo não alterou-se muito em profundidade, bem como a umidade e um dos fatores que podem ter dificultado o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e limitado sua distribuição em profundidade, além da baixa aeração, foi a elevada saturação em alumínio (m%) da camada de 40 a 80 cm, chegando a 50% na profundidade de 60 a 80 cm.

A variação na distribuição relativa das raízes nas primeiras camadas do solo, na ausência de importantes impedimentos químicos e físicos, se deve à variação da umidade do solo (INFORZATO; ALVAREZ, 1957). Para os autores, o maior adensamento de raízes ocorre nos primeiros 30 cm, com um percentual de 59%. Ball-Coelho et al. (1992) observaram que 62,69% da matéria seca de raízes se

situam nos primeiros 50 cm de profundidade e que entre 38 e 48% das raízes ativas estão nos primeiros 30 cm superficiais.

Entretanto, a diferença dos dados encontrados com os trabalhos destes autores possivelmente se deu pelo preparo do solo profundo, que refletiu também em uma menor resistência a penetração das raízes (Figura 32), facilitando assim o desenvolvimento radicular nas camadas mais profundas, além de métodos de amostragem diferentes, das características químicas desses solos e da alta variabilidade dos dados que todos os métodos de avaliação de raízes possuem.

Segundo Anghinoni e Meurer (1999), o aumento da densidade de raízes, em uma fração restrita de solo pode limitar a absorção de nutrientes pelas plantas, mesmo que haja alta concentração em forma disponível, pois o decréscimo da umidade do solo, causado pela alta demanda das raízes, aumenta a salinidade e diminui a intensidade do processo de difusão.

Analisando a Figura 27, pode-se observar como a distribuição no PPF foi mais uniforme ao longo do perfil, enquanto o CON-D e MIN-D se concentraram mais na camada de 0-80 cm.

Figura 27 - Porcentagem de raízes no perfil do solo em profundidade nos tratamentos avaliados

Morris e Tai (2004) concluíram que os melhores rendimentos estão sempre relacionados à menor concentração de raízes curtas e de diâmetro maior na superfície e maior concentração de raízes longas e mais finas nos horizontes mais profundos do solo. Para Otto et al. (2009), 65% das raízes de cana encontram-se

nos primeiros 20 cm de solo. Já Farias et al. (2008) verificaram, que 76% das raízes se encontram nos primeiros 45 cm de profundidade.

Farias et al. (2010), identificou que a cana sob condições de sequeiro desenvolveu 44,48% da sua massa total de raiz nos primeiros 68,75 cm de profundidade explorando 11,06% do volume de solo estudado (110.625 cm^3) caracterizando a zona de maior densidade, interpretadas como sendo as raízes de sustentação, enquanto a de baixa densidade se localizou ao longo de todo o perfil estudado, concentrado 55,51% da massa total do sistema radicular em 67,12% do volume de solo estudado ($671.234,38 \text{ cm}^3$). A cana de sequeiro deixou de explorar, por falta de raiz, um total de 21,81% do volume de solo estudado.

Uma concentração maior de raízes na superfície favorece uma absorção maior da água após irrigação ou precipitação, minimizando a evaporação, também defendido por Lampurlanés et al. (2001). Segundo os autores, a alta densidade de raízes nas camadas superficiais é uma característica favorável à absorção de água, após irrigações ou chuvas.

A área superficial das raízes que o programa Safira® analisa, corresponde a área de cada fibra individual, que nestes dados apresentados correspondem ao somatório da área de todas as fibras que o *software* identificou, uma vez que numa mesma fibra pode-se obter mais de uma faixa de diâmetros, por isso a importância dos dados de área.

Em todas as profundidades analisadas o PPF foi superior estatisticamente aos outros tratamentos, como exceção da camada 150-220 cm em que o MIN-D foi igual ao PPF. Da mesma forma que o comprimento, nas camadas que o PPF foi superior, a área foi pelo menos o dobro maior que os tratamentos CON-D e MIN-D (Tabela 9).

A distribuição da área das raízes nas camadas analisadas também seguiu o mesmo padrão encontrado na variável comprimento, onde nos tratamentos CON-D e MIN-D a distribuição na camada de 0-80 cm foi de 76 e 63%, respectivamente (Figura 28).

Figura 28 – Área de raízes no perfil da trincheira nas diferentes profundidades amostradas

Tabela 9 – Área de raízes no perfil da trincheira nos tratamentos com fileira dupla

TRATAMENTOS	Profundidade (cm)				TOTAL NO PERFIL
	0-40	40-80	80-150	150-220	
	cm ²				
CON-D	531,2 b	171,4 b	170,7 b	48,4 b	921,89 b
MIN-D	631,5 b	219,8 b	282,8 b	212,7 a	1.346,94 b
PPF	1.212,5 a	769,1 a	1.047,5 a	340,6 a	3.369,75 a

Os dados de volume tiveram o mesmo comportamento dos dados de área, onde o PPF em todas as profundidades analisadas foi superior estatisticamente aos outros tratamentos, como exceção da camada 150-220 cm em que o MIN-D foi igual ao PPF (Tabela 10).

Van den Berg et al. (2000), estudando o rendimento potencial da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, demonstram que quanto maior o volume de raízes por camada, maior é, também, o rendimento potencial da cultura, tanto para cana planta como para cana soca. Os autores afirmam que o rendimento tende a aumentar com o aumento do volume de raízes.

Figura 29 – Volume de raízes no perfil da trincheira nas diferentes profundidades amostradas

Tabela 10 – Volume de raízes no perfil da trincheira nos tratamentos com fileira dupla

TRATAMENTOS	Profundidade (cm)				TOTAL NO PERFIL
	0-40	40-80	80-150	150-220	
	cm ³				
CON-D	37,8 b	10,9 b	11,4 b	3,6 b	63,76 b
MIN-D	50,3 b	15,5 b	21,4 b	22,0 a	109,27 ab
PPF	108,3 a	58,4 a	78,7 a	23,7 a	269,20 a

Todos os dados aqui apresentados sobre o desenvolvimento do sistema radicular, ficam evidentes pela Figura 29, onde é observado de maneira o quanto as raízes no PPF crescem e se distribuem mais uniforme ao longo do perfil, em relação aos outros tratamentos.

Figura 30 – Perfil das trincheiras abertas para análise de raízes. A) CON-D; B) MIN-D; C) PPF

Vasconcelos (2002) menciona que a quantidade e a distribuição de raízes de cana-de-açúcar mudam ao longo do tempo, devido às alterações naturais no clima e no solo e à ação antrópica. Esse autor encontrou diferença entre cultivares quanto à distribuição de raízes em profundidade no perfil do solo, afirmando que a maior quantidade de raízes em camadas mais profundas é atribuída à tolerância ao alumínio existente em determinados cultivares.

A quantificação do crescimento do sistema radicular em campo, por qualquer método de amostragem, é um desafio em função de alguns fatores, tais como: a arquitetura geométrica complexa do sistema radicular, as diferentes atividades fisiológicas em raízes de diferentes idades, a diversidade de tipos e diâmetros das raízes, o rápido crescimento e decomposição de raízes finas, os processos

microbiológicos que ocorrem na interface solo-raiz e a variabilidade do ambiente edáfico no qual as raízes se desenvolvem (LUXMOORE; STOLZY, 1987; FANTE JUNIOR, 1999).

4.5 Características físicas do solo

Em relação à umidade do solo, com amostras realizadas com o auxílio de um trado em três profundidades, apresentam-se na Figura 31 os resultados obtidos, onde os valores pouco variaram entre os tratamentos, épocas e profundidades amostradas, com médias não diferindo estatisticamente ao nível de 5% de significância. Portanto, pode-se destacar que os tratamentos não foram suficientes para que a umidade do solo fosse alterada ao longo das épocas e profundidades amostradas. Cebim (2007) avaliando dois sistemas de plantio também não encontrou diferenças na umidade do solo quando comparou os tratamentos.

Nesse tipo de comparação, com a precipitação diretamente envolvida no resultado da avaliação, devem ser observados fatores intrínsecos de cada localidade, como clima, precipitação, tipo de solo, manejo que a cultura recebeu, dentre outros.

Faroni (2004) avaliando a umidade do solo, na linha e na entrelinha da cultura, para épocas de amostragem (quarto épocas) e por profundidades (quarto, variando de 0 a 80 cm) não encontrou diferenças também. As maiores variações de umidade foram encontradas nas camadas superficiais, de 9 a 14%, sendo que nas camadas mais profundas a umidade foi mais constante variando de 12 a 14% de 40-60 cm, e de 13 a 14% de 60-80cm.

A menor umidade na camada superficial do solo, profundidade na qual a reserva de água disponível reduz-se mais rapidamente, é prejudicial à planta quando o sistema radicular se desenvolve nessa região. O menor desenvolvimento radicular em subsuperfície pode ocorrer por impedimentos físicos ou químicos.

Figura 31 – Umidade gravimétrica (%) média do solo e sua distribuição no perfil e em diferentes épocas

Os valores de umidade gravimétrica do solo encontrados ao longo do ciclo da cultura, refletem exatamente a precipitação no local do experimento, que teve altos índices no final de novembro ao final de janeiro, diminuíram em fevereiro, e em

março já voltou a ter precipitações acumuladas no mês de 200 mm, coincidindo com os gráficos de 94 a 210 DAP na Figura 31.

Nas avaliações de RSP, em quatro profundidades, nos primeiros centímetros de profundidade do solo observa-se semelhança entre a RSP entre os diferentes preparos do solo, porém fica evidente a superioridade do tratamento PPF quando analisado na linha de plantio da cana-de-açúcar em maiores profundidades. Nas camadas de 0-20 e 60-80 cm não houveram diferenças significativas a nível de 5% de significância entre os tratamentos (Figura 32). Mas na profundidade de 20-40 cm o tratamento PPF (0,29 MPa) propiciou resistência a penetração inferior em relação aos tratamentos CON-S e MIN-S (1,36 e 1,56 MPa, respectivamente). Na profundidade de 40-60 cm o tratamento PPF (0,45 MPa) demonstrou sua eficácia, onde obteve resistência a penetração inferior significativa em relação a todos os outros tratamentos, que tiveram desempenho acima de 1,40 MPa.

Os menores valores encontrados para o PPF é devido à subsolagem em profundidade na linha de cana, operação realizada com o implemento denominado *Dreno*, uma vez que o implemento rompe as camadas compactadas em profundidade. Mitsui (2006) também avaliando o mesmo sistema de preparo profundo, em batata, observou que próximo à superfície do solo (0 a 20 cm de profundidade) a resistência à penetração foi a mesma para todos os preparos do solo. Em maiores profundidades o autor observou uma menor resistência à penetração no PPF em relação ao preparo convencional. Essa diferença ocorreu, provavelmente, devido ao tráfego dirigido nesse sistema, pois o PPF minimiza o trânsito das máquinas sobre a área preparada, evitando uma compactação do solo nessa área. Dessa forma, ele encontrou valores reduzidos para a resistência à penetração nas profundidades de 20 a 45 cm. A partir dos 45 cm de profundidade, o mesmo não observou diferença entre os tratamentos de preparo do solo em relação a resistência à penetração.

A relação entre resistência à penetração e crescimento radicular foi estudada por vários autores (BOONE et al., 1986; ROSOLEM et al., 2002), e os valores considerados restritivos ao crescimento radicular variaram de 1,34 a 3 MPa para diferentes espécies. Pfeffer (1983), citado por Bennie (1996), fez as primeiras medidas diretas da máxima pressão de crescimento radicular, encontrando valores entre 0,7 e 2,5 MPa para diferentes espécies.

Vários autores consideraram a resistência à penetração limitante ao

crescimento radicular das culturas acima de certos valores, os quais apresentam pequena variação na literatura, considerando em média 1,5 MPa (GRANT; LAFOND, 1993; STALHAM et al., 2007) e 2,0 MPa (TORMENA et al., 1998).

Considerando-se o valor de 1,5 MPa como referência, verifica-se que, na linha de plantio, até 40 cm de profundidade, houve limitação para o crescimento radicular da cultura apenas no tratamento MIN-S, ao passo que, nas camadas seguintes, todos os tratamentos apresentaram resistência a penetração muito próximo ou superior a 1,5 MPa, com exceção ao PPF. Isso é claramente observado pelas imagens do perfil do solo e pela análise de raízes em cada camada e tratamento.

Figura 32 – Resistência do solo a penetração (MPa) em diferentes profundidades do solo nos tratamentos, realizado na linha (A) e entre-linha (B) de plantio da cana-de-açúcar

Na entre-linha da cana, onde passa todo o tráfego de máquinas, o desempenho do PPF foi bem diferente do apresentando na linha de cana. Apenas na profundidade de 0-20 cm foi verificada diferença significativa de 5%, onde os tratamentos CON-S, CON-D e MIN-S tiveram RSP inferior ao PPF. Nas demais profundidades não foram encontradas diferenças. Pode se atribuir esse alto índice de RSP ao PPF nas entre-linhas, o fato de que não houve o preparo do solo nesse espaçamento de 1,5 m, que pelo conceito do PFF, essa área é destinada somente para o rodado das máquinas e implementos. Ao contrario de todos os outros tratamentos, que receberam algum tipo de revolvimento do solo em área total.

Nas curvas de retenção, na profundidade de 20 cm, o PPF não conseguiu ter uma maior retenção de água nas tensões analisadas (Figura 33). Este resultado nesta camada pode ser explicado pela forma como o preparo do solo foi realizado no tratamento PPF, onde uma enxada rotativa foi passada como última operação e este implemento destrói totalmente as estruturas do solo, principalmente os microporos, que obteve o menor valor (30,63%), responsáveis pelo armazenamento da água no solo. O CON-D, com a maior quantidade de microporos (32,41%) foi o que teve a maior quantidade de água em tensões altas. Araújo et al. (2004), observaram o aumento da densidade do solo promove um aumento da água retida, devido a predominância de poros de menor tamanho nas condições de maior densidade.

Figura 33 – Curva de retenção de água na profundidade de 20 cm do solo

A porosidade é um dos fatores mais relevantes para a retenção de água no solo. Apesar de não ter sido detectada diferença estatística significativa em relação à quantidade de microporos e macroporos entre os preparos, as curvas de retenção de água no solo (Figuras 34 e 35) mostram que o preparo do solo através do sistema PPF aumentou a oxigenação do solo nas profundidades analisadas de 40 e 80 cm, justamente onde o PPF é mais eficiente. Isso pode ser evidenciado pela maior retenção de água no sistema PPF nas tensões menores e também pelos baixos valores de RSP encontrados, sendo diferente estatisticamente dos demais tratamentos.

Na camada de 40 cm, o PPF foi que armazenou menor quantidade de água em tensões mais baixas, ressaltando que este tratamento foi o que teve a menor quantidade de macroporos, apenas 9,39% e também ainda é faixa de trabalho da enxada rotativa utilizada neste tratamento. Entretanto, observando os dados da RSP pode-se observar o quanto é importante esse tipo de preparo no tratamento PPF, onde os valores de RSP foram bem inferiores aos outros tratamentos. Cabe ressaltar também, a quantidade superior de raízes que se desenvolveram nesta camada do solo, isso é devido a utilização do subsolador (Dreno), que elimina os impedimentos físicos, rompendo as camadas compactadas. Na camada de 80 cm, o PPF já foi

igual aos demais em tensões mais baixas, pois como não houve ação de máquinas a partir dessa profundidade, todos se comportaram praticamente da mesma maneira.

Nas camadas de 120 e 160 cm (Figura 36 e 37), o CON-S foi que reteve a maior quantidade de água em altas tensões, com a porcentagem de microporos superiores aos demais, 38,86 e 40,93% respectivamente. Como nessas faixas de solo não houve nenhuma interferência dos preparos na estrutura do solo, todas as curvas tiveram comportamentos semelhantes e totalmente aleatórios, diferentemente das outras profundidades. Mas, quando são observados os dados de crescimento de raízes, é que observamos a eficiência do método de preparo do solo PPF, com valores bem superiores aos demais tratamentos.

Figura 34 – Curva de retenção de água na profundidade de 40 cm do solo

Figura 35 – Curva de retenção de água na profundidade de 80 cm do solo

Figura 36 – Curva de retenção de água na profundidade de 120 cm do solo

Figura 37 – Curva de retenção de água na profundidade de 160 cm do solo

A comparação das curvas de retenção de água entre os sistemas de preparos de solo é importante, pois evidencia a mudança na porosidade de solo. Portanto, alterações nas curvas de retenção de água devido ao preparo devem ser analisadas cuidadosamente, uma vez que mostram modificações na condição ideal de porosidade, o que pode interferir no bom desenvolvimento da cultura nos anos seguintes.

Os valores de densidade do solo, porosidade total, micro e macroporos por profundidade e na linha da cultura, estão apresentados na Tabela 11.

Em todos os tratamentos, com exceção do MIN e PPF, a densidade do solo foi mais alta na camada de 20 cm e depois teve uma redução na camada seguinte, de 40 cm. No PPF, a enxada rotativa pode ter influenciado uma D_s menor e teor de macroporos alta na primeira camada, pois deixa o solo mais pulverizado, e na camada logo abaixo já houve um aumento da densidade e redução dos macroporos.

Apenas o PPF na profundidade de 40 cm teve uma densidade do solo maior que $1,45 \text{ g cm}^{-3}$. Segundo Fernandes et al. (1983), para densidade do solo acima desse valor, as raízes não encontram boas condições para suprir a parte aérea das plantas com níveis satisfatórios de nutrientes. Mas como não foram feitas repetições nas outras parcelas (por causa da dificuldade em abrir mais trincheiras), pode-se

creditar este valor a aleatoriedade da amostragem, pois em outras diversas análises mostram que o PPF foi um dos que tiveram melhores condições física do solo.

Valores de densidades de solo atingindo $1,64 \text{ g cm}^{-3}$ foram observados por Vasconcelos (2002a), em trabalho realizado na região de Ribeirão Preto nos 20 cm superficiais de um Latossolo Vermelho distrófico de textura média, e foram atribuídos ao tráfego intenso de máquinas na operação de colheita mecanizada.

Tabela 11 – Porosidade total (PT), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro) e densidade do solo (Ds)

Profundidade (cm)	CON-S			
	PT	Micro	Macro	Ds
	----- % -----			g cm ⁻³
20	50,83	32,41	18,42	1,303
40	54,78	35,01	19,77	1,198
80	59,79	36,89	22,90	1,065
120	53,55	38,86	14,68	1,231
160	54,68	40,93	13,75	1,201

Profundidade (cm)	CON-D			
	PT	Micro	Macro	Ds
	----- % -----			g cm ⁻³
20	54,60	31,01	23,59	1,203
40	62,13	29,19	32,94	1,004
80	61,25	34,93	26,31	1,027
120	60,02	37,50	22,52	1,060
160	53,57	38,70	14,87	1,230

Profundidade (cm)	MIN-S			
	PT	Micro	Macro	Ds
	----- % -----			g cm ⁻³
20	45,74	31,89	13,84	1,438
40	49,32	35,44	13,87	1,343
80	59,34	35,91	23,43	1,078
120	57,11	38,60	18,51	1,137
160	59,58	38,83	20,75	1,071

Profundidade (cm)	MIN-D			
	PT	Micro	Macro	Ds
	----- % -----			g cm ⁻³
20	51,97	30,83	21,14	1,273
40	50,72	40,86	9,86	1,306
80	65,75	32,20	33,55	0,908
120	63,05	34,34	28,71	0,979
160	55,23	37,54	17,68	1,187

Profundidade (cm)	PPF			
	PT	Micro	Macro	Ds
	----- % -----			g cm ⁻³
20	53,88	30,63	23,24	1,222
40	44,07	34,68	9,39	1,482
80	54,84	37,16	17,68	1,197
120	58,68	36,20	22,48	1,095
160	56,32	40,18	16,14	1,157

4.6 Vantagens do espaçamento duplo

O efeito do tráfego de máquinas e implementos pode ocasionar maior compactação em locais específicos na área de produção, que apresentarão condições desfavoráveis ao desenvolvimento radicular. Como o tráfego ocorre somente nas entrelinhas com espaçamento de 1,50 m, ocorre maior compactação nessa área, facilitando a tração das máquinas e obviamente menores quantidades de raízes são esperadas nesse local. Vários trabalhos mostraram efeitos do tráfego de máquinas nas linhas de cana (VASCONCELOS, 2002; FARONI, 2004).

Rosseto e Pascoto (2001) estudaram espaçamentos em cana-de-açúcar, comparando os sistemas de sulcação simples (1,50 m) e alternado duplo (0,40 x 1,40 m). Dentre as conclusões dos autores, pode-se destacar em relação ao espaçamento duplo: a) aumento de produtividade agrícola (em média 11%) e maior longevidade do canavial, dada eficácia no controle de tráfego e consequente diminuição do pisoteio das fileiras de cana; b) melhor aproveitamento das águas da chuva e menor erosão/assoreamento; c) num primeiro momento, exigência de um maior número de operações no preparo de solo; d) altas produtividades obtidas no primeiro corte podem gerar dificuldades para a atuação da máquina e; e) redução do número de manobras pelos conjuntos mecanizados envolvidos.

Dalben (2011), a respeito de desempenho operacional de colhedoras de duas fileiras, afirma que a capacidade operacional destas máquinas é em média 80% superior a colhedoras de uma única fileira, além da redução no consumo de diesel por tonelada colhida, em torno de 60%. As principais conclusões do autor acerca da colheita mecanizada, principalmente em canaviais de baixa produtividade (50 t ha^{-1}), onde o desempenho da máquina é superior, são: a) Menor consumo de diesel da colhedora e do transbordo; b) Redução no tempo de colheita; c) Redução do parque de máquinas; d) Redução de 50 a 70% no tráfego sobre a lavoura; e) Menor perdas no corte de base; f) Menor custo operacional; entre outros.

Monaco Junior (2011), estudando o desempenho operacional de duas colhedoras da fabricante John Deere, modelos 3520 e 3522, cuja diferença é que a primeira opera em espaçamento simples e a segunda colhedora em espaçamento duplo alternado, verificou que a capacidade de colheita diária da máquina, a uma mesma produtividade, aumenta em torno de 50% no espaçamento duplo alternado, além de apresentar uma redução no consumo de diesel por tonelada colhida em

torno de 45%. Apesar de tais vantagens operacionais, o autor descreve que a adoção do espaçamento duplo alternado resulta num aumento de perdas de colheita, comparativamente a outros espaçamentos, mas quando são utilizados espaçamentos maiores que 0,90 m. As principais vantagens apontadas pelo autor acerca do espaçamento alternado são: a) maior possibilidade da preservação das soqueiras, b) maior volume de exploração radicular; c) maior eficiência de absorção do fertilizante; d) maior longevidade do canavial; e) melhor trafegabilidade dos equipamentos mecanizados; f) maior capacidade da colhedora; g) menor consumo de diesel por tonelada colhida; h) menor quebra dos equipamentos; i) menor velocidade de operação/menor risco de dano às soqueiras e, j) preservação dos sulcos de 0,90m.

4.7 Análise econômica

Os custos e resultados econômicos para os sistemas de preparo do solo estão na Tabela 12. Eles foram calculados com base em valores referenciais do Agrianual (2012), ou seja, são valores formados com dados da época da instalação do experimento. Na Tabela a seguir estão expostos os dados de volume de solo revolvido, comprimento de raízes, custos das operações, produção de açúcar por hectare (TAH) e o custo final de cada tonelada de açúcar produzida.

Cabe resaltar que essa Tabela de custos foi elaborada apenas para a comparação das operações que são diferentes entre os sistemas de preparo no momento do plantio e que foi considerado que todas as outras operações que não estão aqui citadas, todos os sistemas vão receber em igualdade. Portanto, os custos finais aqui destacados não refletem o custo total da instalação de um canavial.

De acordo com o Agrianual (FNP, 2012), 75% dos custos de produção da cana-de-açúcar são gastos com máquinas, sendo 33% na operação de plantio e 42% nos 6 cortes seguintes. Dai a importância de reduzir ao máximo o número de operações no momento do plantio, que conseqüentemente é diminuído a quantidade de máquinas necessárias para essas operações, reduzindo assim os diversos custos envolvidos.

Na análise dos dados presentes na Tabela 12, é fácil evidenciar por que os custos dos sistemas MIN-D e PPF foram bem inferiores ao CON-D (redução de 37 e 58%, respectivamente). A quantidade de operações agrícolas e o volume de solo

movimentado no CON-D é muito superior aos demais (193 e 476% a mais em relação ao MIN-D e PPF, respectivamente).

Uma outra economia que o PPF introduziu, foi com a operação de quebra-lombo, pois como os sulcos de plantio para este sistema foram mais rasos, não houve a necessidade desta operação. Que dentro do custos do PPF, a economia foi de 15%.

Dias e Casagrande (2001), observaram que para os sistemas de preparo mínimo e dois tipos de preparo reduzido, os custos totais gerais foram bastante inferiores, ou seja, respectivamente custos da ordem de 71; 25 e 32% menores ao encontrado no sistema convencional. Resultados estes concordantes com Stolf (1985), Hardman et al. (1985), Hyde e Teske (1987) e Peticarrari e Ide (1988), sendo que este último autor salienta que a redução do custo de mecanização no preparo do solo é proporcional à diminuição no consumo de combustível.

Tabela 12 – Operações realizadas nos sistemas de plantio no momento da implantação da cultura

Tratamentos	Volume de solo movimentado (m ³) ²	Comprimento de raízes no perfil (m)	Custo operação (R\$/ha)	TAH	Custo açúcar (R\$/t)
CON-D	13.500	12,85	623,99	16,6	37,59
Aplicação de calcário	-		70,94		
Aplicação de gesso	-		70,94		
Aração	4.000		116,70		
Gradagem pesada	2.500		116,70		
Gradagem leve	1.000		72,89		
Subsolagem	6.000		130,30		
Quebra-lombo			45,52		
MIN-D	7.000	16,79	390,59	15,3	25,53
Aplicação de Calcário	-		70,94		
Aplicação de gesso	-		70,94		
Gradagem leve	1.000		72,89		
Subsolagem	6.000		130,30		
Quebra-lombo			45,52		
PPF	2.833	43,89	260,94	16,4	15,91
Aplicação de Calcário	-		70,94		
Aplicação de gesso	-		*		
Subsolagem (Dreno)	2.833		190,00		

* Aplicação realizada pelo Dreno

Fonte: Adaptado de Agrianual 2012

Para Oliveira (2000) quanto maior a necessidade de máquinas na realização de determinada atividade, mais complexa a sua administração e mais importante o

² Para os cálculos foram considerados os seguintes valores de referência: Grade leve, aprofunda 10 cm; grade pesada, 25 cm; Arado, 40 cm; Subsolagem, 60 cm; Dreno, “vaso” em forma de trapézio com a base larga de 1,2m, base estreita de 0,5 e altura de 0,8 m (conforme Figura 9), e que o hectare possui 41,67 “vasos”

gerenciamento dessas atividades mecanizadas sobre a rentabilidade do processo. Segundo a autora para a melhoria do desempenho das atividades mecanizadas é necessário um adequado conhecimento de engenharia e economia para que os custos sejam compatíveis com a realização da atividade.

O custo total do uso das máquinas agrícolas, segundo Balastreire (1990), é dado por duas componentes principais: custo fixo e custo operacional, sendo o primeiro componente aquele que é contabilizado independentemente do uso da máquina, representado pelos gastos com depreciação, juros, alojamentos e seguro, já o segundo é aquele componente que varia de acordo com o uso, ou seja, os gastos com combustíveis, manutenção, salários e lubrificantes. Portanto, fica evidenciado que quanto o maior o número de operações e máquinas no processo de plantio do canavial, maior será o impacto nos custos fixos e operacionais.

Cabe destacar aqui, e corroborando com Voorhees (1992), que uma pequena diferença de produção entre tratamentos pode ser estatisticamente não significativo (como foi neste experimento), porém quando considerada no contexto agrícola como um todo, pode tornar-se expressiva, o que pode ser observado principalmente no sistema PPF que vem se apresentando como promissor, onde os custos foram bem inferiores aos demais sistemas e com ganhos consideráveis em outros aspectos.

Os custos aqui apresentados são apenas uma representação da economia na hora da implantação do canavial. Em análises mais aprofundadas em relação aos custos com maquinários ao longo de um ciclo de 5-6 anos, com certeza os custos fixos e operacionais serão ainda menores no PPF, mostrando assim toda a superioridade frente aos demais sistemas.

Portanto, esses números mostram que o sistema de preparo profundo proporcionou até 80% na redução de movimentação do solo. Peticarrari; Ide (1988) encontraram valores de redução da ordem de 75 a 80% no preparo mínimo, além de poder auxiliar no controle da erosão e conservação do solo com a criação dos 'vasos' no solo (linhas de plantio), onde em regiões com altas precipitações, conseguiria armazenar maiores quantidades de água em relação aos outros sistemas de preparo, além de ser ainda mais útil em regiões com baixa pluviosidade.

Uma outra comparação importante, é a análise paralela entre os dados de volume de solo movimentado e o comprimento de raízes. Na relação³ volume de

³ Dividindo os valores de comprimento de raízes (m) por volume do solo movimentado (m³) em cada tratamento.

solo movimento (m^3) por crescimento das raízes (m) pela Tabela 12, foram observados os seguintes dados: no CON-D, a cada 1 m^3 de solo movimentado foi equivalente ao crescimento de apenas 1 mm de raízes; no MIN-D o mesmo 1 m^3 foi suficiente para o crescimento de 2,4 mm de raízes; já no PPF, a mesma quantidade foi suficiente para o crescimento de 15 mm de raízes, portanto nessa relação de eficiência operacional, o PPF foi 15 vezes superior ao CON-D. Fica evidente que o CON-D é dispendioso, agride mais o solo e é muito pouco eficiente no seu propósito, que é dar boas condições para as raízes se desenvolverem.

Por fim, com base em todos os dados aqui relatados, a adoção do espaçamento duplo no sistema de preparo profundo, se mostra bastante competitivo, com um tráfego de máquinas controlado na área, melhor tração no rodado dos tratores, traduzindo em economia de combustível, menores danos ao sistema radicular da cana, menores perdas no momento da colheita mecanizada em duas fileiras simultâneas de cana (0,90 m), melhor desenvolvimento do sistema radicular, conservação do solo pelo menor volume de solo movimentado e auxílio no controle a erosão, diminuição de custos pela quantidade reduzida de operações no plantio e menor quantidade de implementos, além de inúmeros atributos que não puderam ser medidos neste experimento, mas que merecem serem observados em futuros experimentos com esse sistema de preparo.

5 CONCLUSÕES

Com a obrigatoriedade da eliminação da queima nos canaviais do Estado de São Paulo e a consequente adoção da colheita mecanizada, o setor canavieiro se sentiu obrigado a desenvolver novas tecnologias para preencher uma lacuna que onerava muito os custos de produção, a colheita de uma única fileira ou de duas espaçadas em fileiras simples, mas com altas perdas de colmos no campo. A partir daí, o plantio de fileiras duplas (com espaçamento reduzido), apesar de ser estudado há anos, veio a solucionar esse problema, além de combinar diversos outros efeitos benéficos no manejo da cultura, como a possibilidade de preparo profundo do solo apenas onde as raízes se desenvolvem, tráfego controlado de máquinas na área, redução nos custos na implantação e ao longo das colheitas, auxílio na conservação do solo, além de outros benefícios secundários, mas tão importantes quanto os demais citados.

Portanto, com bases nos resultados obtidos e nas discussões apresentadas, pode-se concluir que:

- Nas avaliações biométricas da parte aérea, o Preparo Profundo se destacou apenas no IAF, com índice de 7,1, sendo superior estatisticamente a todos os outros tratamentos;
- Na análise do comprimento de raízes, em todas as profundidades estudadas, o Preparo Profundo obteve tamanho de raízes maiores estatisticamente e a distribuição ao longo do perfil ficou da seguinte maneira: 34% na camada de 0-40 cm, 24% de 40-80 cm, 31% de 80-150 cm e 11% de 150-220 cm de profundidade; os dados de área e de volume de raízes também foram bem semelhantes quanto a superioridade aos demais, assim como a distribuição ao longo do perfil;
- Em relação à Resistência do solo a penetração, na profundidade de 20-40 cm o tratamento Preparo Profundo (0,29 MPa) propiciou resistência inferior em relação aos tratamentos Convencional simples e Mínimo simples. Na profundidade de 40-60 cm o tratamento Preparo Profundo (0,45 MPa) obteve resistência a penetração inferior significativa em relação a todos os outros tratamentos, que tiveram desempenho acima de 1,40 MPa. Esse dados refletem a distribuição de raízes que o Preparo Profundo conseguiu;

- Os custos das operações no momento do plantio foram bem inferiores no Preparo Profundo, sendo 33% e 58% inferiores aos Mínimo duplo e Convencional duplo, respectivamente;
- A movimentação do solo causada pelo sistema Preparo Profundo no preparo do solo, foi de até 80% inferior ao tratamento Convencional duplo;
- O tráfego controlado que o Preparo Profundo proporciona, diminui em até 70% o tráfego de máquinas na lavoura; menor consumo de combustível; redução no tempo das operações agrícolas; redução do parque de máquinas; e menor custo operacional.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M.F. de; ABREU, C.A. de; ANDRADE, J.C. Determinação de boro em água quente, usando aquecimento com microonda. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001a. cap. 15, p. 231-239.
- _____. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando a solução DTPA em pH 7,3. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001b. cap. 16, p. 240-250.
- ABU-HAMDEH, N.H.; AL-WIDYAN, M.I. Effect of axle load, tire inflation pressure, and tillage system on soil physical properties and crop yield of a Jordanian soil. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 43, n. 1, p. 13-21, 2000.
- ALADAWI, S.S.; REEDER, R.C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 5, p. 1641-1649, 1996.
- ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology: a comprehensive study of the *Saccharum* source-to-sink system**. Amsterdam: Elsevier, 1973. 725 p.
- ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C. Crescimento da parte aérea de cana crua e queimada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1069-1079, 1999.
- ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C.; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 7, n. 4, p. 653-659, 2000.
- ANGHINONI, I; MEURER, E.J. Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDOS DE CASO, 1999, Aracajú. **Anais...** Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1999. p. 57-87.
- ARAUJO, A.G. **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. 2004. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo vermelho Distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.

ARGENTON, P.E. **Influência das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Piracicaba – São Paulo**. 2006. 110 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

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.

BACCHI, O.O.S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA, Planalsucar, 1983. p. 25-37. (Coleção Planalsucar, 2).

BALASTREIRE, L.A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 187 p.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamic in plant-ratoon crop of sugar cane. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 142, p. 297-305, 1992.

BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S., VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979, Mossoró. **Anais...** Mossoró: ESAM, 1979. p. 6-8.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 241 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Conteúdo de nitrogênio total num solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 235-239, 1997.

BEAUCLAIR, E.G.F.; SCARPARI, M.S. Noções fitotécnicas. In: RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Barros & Marques Editoração Eletrônica, 2006. v. 1, p. 80-91.

BELTRAME, L.F.S.; GONDIM, L.A.P.; TAYLOR, J.C. Estruturas e compactação de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 5, p. 145-149, 1981.

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

BENNIE, A.T.P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Ed.) **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, 1996. chap. 23, p. 453-470.

BEUTLER, A.N.; FREDDI, O.S.; LEONEL, C.L.; CENTURION, J.F. Densidade relativa e parâmetro "S" como indicadores da qualidade física para culturas anuais. **Revista de Biologia e Ciências da terra**, Campina Grande, v. 8, n. 2, p. 28-36, 2008.

BISHOP, J.C.; GRIMES, D.W. Precision tillage effects on potato root and tuber production. **American Potato Journal**, Orono, v. 55, p. 65-71, 1978.

BLACKBURN, F. **Sugar-cane**. New York: Longman, 1984. 414 p.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.

BÖHM, W. In situ estimation of root length at natural soil profiles. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 87, p. 365-368, 1976.

_____. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 188 p.

BOONE, F.R.; H.M.G. van der WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; HAG, T. BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soil on the growth of maize for silage. 1 Critical matric water potentials in relation to soil aeration and mechanical impedance. **Netherlands Journal of Agricultural Sciences**, Wageningen, v. 34, p. 155-171, 1986.

BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F.; BORGES, E.V.S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em Latossolo Vermelho-Escuro textura média. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 9, p. 1663-1667, 1999.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedade dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 878 p.

BYRNES, W.R.; McFEE, W.W.; STEINHARDT, G.C. **Soil compaction related to agricultural and construction operations**. West Lafayette: Purdue University, 1982. 164 p.

CALLEBOURT, F.; GABRIELS, D.; MINJAUE, W.; BOODT, M. Determination of soil surface strength with a needle-type penetrometer. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 5, p. 227-245, 1985.

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

CAMARGO, O.A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44 p.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Conceitos gerais de compactação do solo 2006**. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/ Artigos/CompSolo/Comp1.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/Comp1.htm)>. Acesso em: 26 mar. 2013.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; DIAS, F.L.F.; CASAGRANDE, A.A.; SILVA, A.R.; MUTTON, M.A.; CENTURION, J.F. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 189-198, 2005.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. cap. 9, p. 173-180.

CARLIN, S.D.; SILVA, M.A.; PERECIN, D. Fatores que afetam a brotação inicial da cana-de- açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 51, n. 296, p. 457-466, 2004.

CARTER, L.; MEEK, B.; RECHEL, E. Zone production research with wide tractive research vehicle. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ISTRO, 1., 1988, Edinburgh. **Proceedings...** Edinburgh: ISTRO, 1988. p. 221-226.

CARTER, L.M.; TAVERNETTI, J.R. Influence of precision tillage and soil compaction on cotton yields. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 11, p. 65-67, 1968.

CARVALHO, E.J.M.; FIGUEIREDO, M.S.; COSTA, L.M. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 257-265, 1999.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.

_____. Compactação e manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar. In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L.; FOLONI, J.S.S. (Ed.). **Qualidade física do solo: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p. 150-197.

CASTRO FILHO, C.; MIZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade de agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotação de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 527-538, 1998.

CASTRO, P.R.C. Aplicações da fisiologia vegetal no sistema de produção da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FISILOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 1., 2001, Piracicaba. **Material preliminar...** Piracicaba: STAB, 2001. 1 CD-ROM.

CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. **Ecofisiologia de culturas extrativas:** cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. 138 p.

CATTELAN, A.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.14, n.1, p. 133-142, 1990.

CEBIM, V.L.S.M. **Biometria de mudas de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) em dois sistemas de plantio.** 2007. 90 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

CERRI, C.C.; FELLER, C.; CHAUVEL, A. Evolução das propriedades de um latossolo vermelho escuro após desmatamento e cultivo por doze e cinquenta anos com cana-de-açúcar. **Cahiers ORSTOM, série Pédologie**, Paris, v. 26, n. 1, p. 37-50, 1991.

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMERD, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 2. Equipment and field practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 161-174, 2003.

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

CONDE, A.J.; SALATA, J.C. **Épocas de plantio x época de corte em 6 variedades.** Quatã: Departamento Agrônomo da Cia. Agrícola Quatã, 1985. 9 p.

COX, D. Sugarcane row spacing standard. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 8., 2006, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: IDEIA, 2006. p. 18.

CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M.F.; JORGE, L.A.C.; RALISCH, R.; TOZZI, C.L.; TORRE, A.; VAZ, C.M.P. Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processamento de imagens digitais. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 18, p. 365-371, 1994.

DALBEN, L.C. Alternativas de colheita mecanizada com mais de uma linha. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 5., 2011, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Idea, 2011. p. 26.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis:** physical and mineralogical methods. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 443-461.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 703-709, 1999.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Oxford, v. 120, n. 3, p. 201-214, 2004.

DIAS, F.L.F.; CASAGRANDE, A.A. Estudo agroeconômico de sistemas de preparo de solo, em área de colheita mecanizada de cana crua. **STAB. Açúcar, Álcool & Subprodutos**, Piracicaba, v. 20, n. 1, p. 6-8, set./out. 2001.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 175-182, 1996.

DICKSON, J.W.; CAMPBELL, D.J.; RITCHIE, R.M. Zero and conventional traffic systems for potatoes in Scotland, 1987-1989. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, p. 397-419, 1992.

DILLEWIJN, C. VAN. **Botany of sugarcane**. WalThan: Chronica Botânica, 1952. 371 p.

DOUGLAS, J.T.; CAMPBELL, N.J.; CRAWFORD, C.E. Soil and crop responses to conventional, reduced ground pressure and zero traffic systems for grass silage production. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, p. 421-439, 1992.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo Van Genuchten. Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3,00 beta)**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

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

FANTE JUNIOR, L.; REICHARDT, K.; JORGE, L.A.C.; BACCHI, O.O.S. Distribuição do sistema radicular de uma cultura de aveia forrageira. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1091-1100, 1999. Suplemento.

FAO. **FAOSTAT**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/?lang=en>>. Acesso em: 28 out. 2012.

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.

FARIAS, C.H.A.; SOUSA, K.S. de; SILVA, I.F.; AGRA, R.V.; GOLVEIA NETO, G.C. Crescimento do sistema radicular de cana-de-açúcar submetida a lâminas de irrigação: modelo geoespacial e influências na produtividade da cultura. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 4, p. 186-196, 2010.

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

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB, 2000. 193 p.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H.M.; BRONSON, R.D. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros em dois solos ("Typic Argia-quoll" e "Typic Haplu-dalf"). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 329-333, 1983.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, 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, p. 487-493, 2000.

FLOCKER, W.J.; TIMM, H.; VOMOCIL, J.A. Effects of soil compaction on tomato and potato yields. **Agronomy Journal**, Madison, v. 52, n. 6, p. 345-348, 1960.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **AGRIANUAL 2012**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2012. 482 p.

FRASSON, F.R. **Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar**. 2007. 76 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FREITAS, G.R. Preparo do solo. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 271-332.

FURLANI NETO, V.L. Proposta de espaçamentos para mecanização em solos de baixa fertilidade – Ambientes C, D, e E. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 11., 2009, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: IDEA, 2009. p. 32.

GARDNER, W. E. Water content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 493-544.

GRANT, C.A.; LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in Southern Saskatchewan. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 73, n. 2, p. 223-232, 1993.

GREGORY, C.J.; CRAWFOR, D.V.; MCGOWAN, M. Nutrient relations of winter wheat. II Movement of nutrients to the root and their uptake. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 93, p. 495-504, 1979.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors Influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 239-282, 1988.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 121-145, 2005.

HARDMAN, J.M.; TILLEY, L.G.W.; GLANVILLE, T. Agronomic and economic aspects of various farming systems for sugar cane in the Bundaberg district. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, Townsville, v. 7, p. 147-153, 1985.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 1, p. 32-34, 1999.

HORN, R. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1/2, p. 23-36, 1995.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 89-99, 2003.

HORN; R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69. (Developments in Agricultural Engineering, 11).

HYDE, R.F.; TESKE, I.H. Surface manage- ment systems in the Central District Canelands, Qld. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, Brisbane, v. 1,p. 41-43,1987.

IDO, O.T. **Desenvolvimento radicial e caulinar, de três variedades de cana-de-açúcar, em Rizotron, em dois substratos**. 2003. 141 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

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**, Tokyo, v. 60, p. 130-138, 1991.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 17-24, 2004.

INFORZATO, R.; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar var. Co. 290, em solo tipo terra-roxa-legítima. **Bragantia**, Campinas, v. 16, n. 1, p. 1-13, 1957.

IRVINE, J. E. Sugarcane. In: SYMPOSIUM ON POTENCIAL PRODUCTIVITY OF FIELD CROPS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENT, 1980, Los Banos. **Proceedings...** Los Banos: IRRI, 1983. p. 361-381.

JAMES, N.I. Yield components in random and selected sugarcane populations. **Crop Science**, Madison, v. 11, p. 906-908, 1971.

JORGE, L.A.C.; CUNHA, D.J.C. **SAFIRA**: manual de utilização. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2010. 28 p.

KAYOMBO, B.; LAL, R. Responses of tropical crops to soil compaction. In: SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 287-316. (Developments in Agricultural Engineering, 11).

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 264 p.

KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2007.

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**, Jaboticabal, v. 18, p. 45-54, 1998.

KLUTHCOUSKI, J.; COBUCCI, T.; AIDAR, H.; YOKOYAMA, L.P.; OLIVEIRA, I.P.; COSTA, J.L.S.; SILVA, J.G.; VILELA, L.; BACELLOS, A.O.; MAGNABOSCO, C.U. **Sistema Santa Fé – Tecnologia Embrapa**: integração lavoura-pecuária pelo consórcio de culturas anuais com forrageiras, em áreas de lavoura, nos sistemas direto e convencional. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 28 p. (Circular Técnica, 38).

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: EMBRAPA, CNPT, 2000. 36 p.

KOOISTRA, M.J.; TOVEY, N.K. Effects of compaction on soil microstructure. In: SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 91-111. (Developments in Agricultural Engineering, 11).

KÖPKE, V. Methods for studying root growth. In: SYMPOSIUM ON THE SOIL/ROOT SYSTEM, 1., Londrina, 1980. **Proceedings...** Londrina, Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p. 303-318.

LABUSCHAGNE, N.; JOUBERT, D. Profile modification as a means of soil improvement: promoting root health through deep tillage. In: UPHOFF, N.; BALL, S.A.; PALM, C. **Biological approaches to sustainable soil systems**. Boca Raton: CRC Press, 2006. chap. 38, p. 547-558.

LAGUË, C.; AGNEW, J.; KHELIFI, M. Theoretical evaluation on the feasibility of controlled traffic farming (CTF) using wide-span implements carriers (WSIC) for Canadian agriculture. In: ANUAL MEETING OF THE CSAE/SCGR, 2003, Montréal, **Proceedings...** Montreal: CSAE, SCGR, 2003. Paper nº 03-233.

LAMPURLANÉS, J.; ANGÁS, J.; CANTERO-MARTINEZ, C. Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage system on two soil in semiarid conditions. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 69, p. 27-40, 2001.

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. 172 p. Tese (Livre Docência em Mecânica Aplicada/Engenharia Rural) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Julio Mesquita Filho", Botucatu, 1996.

LANÇAS, K.P.; LOPES A.; FURLANI, C.E.A.; NAGAOKA, A.K.; KRONKA, S.N. Avaliação da resistência ao rolamento do rodado de um trator agrícola em função do tipo construtivo, da lastragem e da velocidade de deslocamento em condição de campo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 20, n. 2, p. 171-178, maio 2000.

LANDELL, M.G.A.; SILVA, M.A. Manual do experimentador: melhoramento da cana-de-açúcar. In: _____. **Metodologia de experimentação: ensaios de competição em cana-de-açúcar**. Pindorama: Instituto Agrônômico, 1995. p.3-9.

LARSON, W.E.; EYNARD, A.; HADAS, A.; LIPIEC, J. Control and avoidance of soil compaction in practice. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 597-625. (Developments in Agricultural Engineering, 11).

LEE, H.A. The distribution of the roots of sugar cane in the soil in the Hawaiian Islands. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 1, p. 363-378, 1926.

LEME, E.J.A., MANIERO, M.A.; GUIDOLIN, J.C. Estimativa da área foliar da cana-de-açúcar e sua relação com a produtividade. **Cadernos Planalsucar**, Piracicaba, n. 2, p. 3-22, 1984.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advance in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LINGLE, S.E.; SMITH, R.C. Sucrose metabolism related to growth and ripening in sugarcane internodes. **Crop Science**, Madison, v. 31, p. 172-177, 1991.

LUXMOORE, R.L.; STOLZY, L.H. Modeling belowground processes of roots, the rizosphere, and the soil communities. In: WISOL, K.; HESKETH, J.D. **Plant growth modeling for resource management**: quantifying plant processes. Boca Raton: CRC Press, 1987. v. 2, p. 129-153.

MACHADO, E.C. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar. Crescimento. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar**: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 56-87.

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

MALAVOLTA, E.; HAAG, N.P. Nutrição e adubação. In: MALAVOLTA, E. (Ed.). **Cultura e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo: Instituto Brasileiro da Potassa, 1964. p. 237-278.

MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 17, p. 52-55, 1987.

MARIOTTI, J.A. Associations among yield and quality components in sugarcane hybrid progenies. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 14., 1971, New Orleans. **Proceedings...** New Orleans: ISSCT, 1971. p. 177-184.

MASLE, J.; FARQUHAR, G.D. Effects of soil strength on the relation on water-use-efficiency and growth to carbon isotope discrimination in wheat seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 86, p. 32-38, 1988.

MEDEIROS, J.C.; FIGUEIREDO, G.C.; MAFRA, Á.L. Portable penetrometer for agricultural soil: sensitivity test to identify critical compaction depth. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1823-1829, dez. 2010.

MEDINA, B.F. Influência de dois métodos de preparo de área na compactação de um latossolo amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, p. 67-71, 1985.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1149-1159, 2003.

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

MITSUIKI, C. **Efeito de sistemas de preparo de solo e do uso de microrganismos eficazes nas propriedades físicas do solo, produtividade e qualidade da batata**. 2006. 97 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

MONACO JUNIOR, L.C. Plantio espaçamento alternado. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 13., 2011, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: IDEA, 2011. p. 41.

MONTEITH, N.H.; BANATH, C.L. The effect of soil strength on sugarcane root growth. **Tropical Agriculture**, Trinidad, v. 42, p. 293–296, 1965.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma terra roxa estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 2, p. 31-41, 1996.

MORRIS, D.R.; TAI, P.Y.P. Water table effects on sugarcane root and shoot development. **Journal of the American Society Sugar Cane Technologists**, Rouge, v. 24, p. 41-59, 2004.

MUCHOW, R.C.; CARBERRY, P.S. Environmental control of phenology and leaf growth in tropically adapted maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, p. 221-236, 1989.

OLIVEIRA, M.D.M. **Custo operacional e ponto de renovação de tratores agrícolas de pneus**: avaliação de uma frota. 2000. 147 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

OLIVEIRA, R.A. de; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; Ido, O.T.; BESPALHOK-FILHO, J.C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; SILVA, D.K.T. da. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 71-76, jun. 2007.

ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO, E. J. Distribuição e conservação dos solos com cana-de-açúcar no Brasil. In: ORLANDO FILHO, J. (Ed.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA, Planalsucar, 1983. v. 2, p. 41-73.

ORLANDO FILHO, J.; MACEDO, N.; TOKESHI, H. Seja o doutor do seu canavial. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 67, p. 1-17, set. 1994.

O’SULLIVAN, M.F.; DICKSON, J.W.; CAMPBELL, D.J. Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. **European Journal of Soil Science**, West Sussex, v. 38, n. 1, p. 137-148, 1987.

OTTO, R.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C. Root system distribution of sugarcane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 601-611, 2009.

OTTONI FILHO, T.B. Uma classificação físico-hídrica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p. 211-222, 2003.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; CRESTANAS, S.; FERREIRA, M.M.; DIAS, M.S.; GOMES, A.S.; TURATTI, A.L. Resistência mecânica a penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 521-529, 2001.

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

PINTO, A.C.P.; MORAES, E.E. Plantadora de cana. In: SEMINÁRIO COOPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997. **Anais...** São Paulo: COPERSUCAR, 1997. v. 1. p. 223-231.

PLANA, R.; DOMINI, M.E.; ESPINOSA, R.. Influencia de lãs precipitaciones y la temperatura sobre la brotadura de dos variedades de caña de azúcar (*Saccharum* sp híbrido) plantadas en diferentes meses. **Cultivos Tropicales**, Habana, v.9, n.3, p. 19-24, 1987.

PRADO, A.P.A. **Perfilhamento e produção da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) em função da densidade de plantio**. 1988. 69 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

PRADO, R.M.; CENTURION, J.F. Alterações na cor e no grau de flocculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 197-203, jan. 2001.

QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. Van. Determinação de pH em cloreto de cálcio e da acidez total. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. cap. 10, p. 181-188.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; PRADO, H.; MORETTI, F.C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob efeito da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 57, n. 1, p. 49-55, 1998.

QUINTELA, A.C.R. **Avaliação do plantio convencional e de cana inteira, com e sem despolte, e da compactação pós-cobertura, em duas variedades de cana-de-açúcar**. 1996. 37 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1996.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. cap. 11, p. 188-199.

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

RAPER, R.L.; KIRBY, J.M. Soil compaction: How to do it, undo it, or avoid doing it. In: AGRICULTURAL EQUIPMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2006, Louisville. **ASABE Distinguished Lecture Series**. St. Joseph, n. 30, p. 1-14, 2006.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 211-216, 1988.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. 2. ed. Piracicaba: Edição dos autores, 2007. 722 p.

RIZZO, L.T.B. **Indicadores da resiliência do latossolo vermelho escuro cultivado com citros e eucalipto em Itapetininga-SP: recuperação de um solo degradado pela compactação**. 2000. 200 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ROCHECOUSTE, E. **Weed control in sugar cane**. Réduit: Mauritius Sugar Industry Research Institute, 1967. 117 p.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 65 p. 109-115, 2002.

ROSSETO, A.; PASCOTO, V. Os espaçamentos devem mudar? In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 3., 2001, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, IDEA, 2001. p. 17-27.

RUSSEL, R.S.; ELLIS, F.B. Estimation of the distribution of plant roots in soil. **Nature**, London, v. 217, p. 583-583, 1968.

SA, J.C.M. Reciclagem de nutrientes dos resíduos culturais, e estratégia de fertilização para a produção de grãos no sistema plantio direto. In: SEMINÁRIO SOBRE O SISTEMA PLANTIO DIRETO NA UFV, 1., 1998, Viçosa. **Resumo das palestras...** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. p. 19-61.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, J.H.; CAVALCANTE, F.J.H. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar: III Conteúdo de nutrientes e distribuição do sistema radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, p. 425-431, 1987.

SILVA, M.A.; CARLIN, S.D.; CAMPANA, M.P.; LANDELL, M.G.A.; PERRECIN, D.; VASCONCELOS, A.C.M. Brotação da cana-de-açúcar em condições de casa de vegetação. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 22, n. 1. p. 28-33, set./out. 2003.

SIMÕES NETO E.D. **Efeito da quantidade da reserva energética do tolete e da compactação do solo no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar.**

(*Sacharum sp.*). 1986. 94 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

SIQUEIRA, R. **Sistemas de preparo em diferentes tipos de coberturas vegetais do solo.** 1999. 191p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1999.

SOJKA, R.E.; WESTERMANN, D.T.; BROWN, M.J.; MEEK, B.D. Zone-subsoiling effects on infiltration, runoff, erosion, and yields of furrow-irrigated potatoes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p. 351-368, 1993.

SOUZA, Z.M.; ALVES, M.C. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes usos e manejos. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 25, p. 27-34, 2003.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas de relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 937-944, 2004.

STALHAM, MA; ALLEN, EJ; ROSENFELD, AB; HERRY, FX. Effects of soil compaction in potato (*Solanum tuberosum* L.) crops. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 145, p. 295-312. 2007.

STOLF, R. Cultivo mínimo para cana-de- açúcar. **Boletim Técnico Planalsucar**, Piracicaba, n. 6, p. 1-42, 1985.

_____. Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. **Revista STAB. Açúcar, Alcool & Subprodutos**, Piracicaba, v. 4, n. 6, p. 22-36, jul./ago. 1986.

STOLF, R.; FURLANI NETO, V.L.; CERQUEIRA LUZ, P.H. Nova metodologia de mecanização a espaçamentos estreitos em cana-de-açúcar. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, v. 7, n. 32, p. 14-33, jan./fev. 1987.

STOLF, R.; IAIA, A.M.; LEE, T.S.G. Índice de falhas Segundo o método STOLF: Correlação com o rendimento agrícola em soqueiras de cana-de-açúcar. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, v. 11, n. 58, p. 12-16, maio/jun. 1991.

STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soil as affected by the incorporation of peat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, n. 1, p. 15-24, 1995.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, maio/jun. 2004.

STUPIELLO, J.P. A cana-de-açúcar como matéria prima. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, cap. 7, p. 761-804

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana-de-açúcar: avaliação do modelo Mosicas**. 2006. 60 p. Dissertação (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SUGUITANI, C.; MATSUOKA, S. Efeitos do fósforo nas características industriais e na produtividade agrícola em cana-de-açúcar (cana-planta) cultivada em duas regiões do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Ciência do solo: fator de produtividade competitiva com sustentabilidade; resumos....** Londrina: SBCS, 2001. p. 119.

TAVARES, O.C.H. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 61-68, 2010.

TAYLOR, H.M. Effect of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In: BARNES, K.K. (Org.). **Compaction of agricultural soils**. Madison: American Society of Agricultural Engineers, 1971. p. 292-305. (ASAE Monograph).

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations for medium-to-coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

TERAUCHI, T.; MATSUOKA, M. Ideal characteristics for the early growth of sugarcane. **Japanese Journal of Crop Science**, Tóquio, v. 69, p. 286-292, 2000.

THOMPSON, G.D. Water use by sugarcane. **South African Sugar Cane Journal**, Cidade do Cabo, v. 60, n. 11, p. 592-600; n.12, p. 627-635, 1976.

TOLEDO, F.F. Plantio da cana-de-açúcar. In: SEMANA DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA, PIRACICABA, 3., 1962, Piracicaba. **Fermentação do caldo de cana**. Piracicaba: Instituto Zimotécnico, 1962. v. 1, p. 8-17.

TOPP, G.C.; ZEBCHUK, W. The determination of soil-water desorption curves for soil cores. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 59, p. 19-26, 1979.

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

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo de solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Multimídia. Apresentações. Os desafios do setor sucroenergético e o “movimento + etanol”**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/multimedia/apresentacao/>>. Acesso em: 25 maio 2012a.

_____. **Multimídia. Apresentações. Retomada do crescimento e conscientização sobre o etanol: Prioridades do setor sucroenergético para 2012 e além**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/multimedia/apresentacao/>>. Acesso em: 27 jan. 2012b.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a ferralsol at several soil moisture conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 193-202, 2001.

VAN DER BERG, M. **Land use systems research on strongly weathered soils in south and south-east Brazil**. Utrecht: The Royal Dutch Geographical Society, 2000. 432 p. (Netherlands Geographical Studies, 271).

VAN DEN AKKER, J.J.H.; ARVIDSSON, J.; HORN, R. Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 1-8, 2003.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-897, Sept./Oct. 1980.

VASCONCELOS, A.C.M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 2002. 140p. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2002a.

_____. O sistema radicular da cana-de-açúcar e a expressão do potencial de produção. **STAB–Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 21, n. 2, p. 20, 2002b.

VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A.; PERECIN, D.; JORGE, L.A.C.; LANDELL, M.G.A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 849-858, 2003.

VEPRASKAS, M.J.; HOYT, G.D. Comparison of the trench- profile and core methods for evaluation root distributions in tillage studies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 166-172, 1988.

VICENTE, E.F.R.; FERNANDES, V. Mensuração do custo de cana-de-açúcar para médios produtores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 11., 2004, Porto Seguro. **Anais...** Disponível em: <http://www.congressodecustos.com.br/trabalhos/MENSURA%C3%83+O%20DOS%20CUSTOS%20DE%20PRODU%C3%83+O%20DE%20CANA-DE%C3%83+CAR%20PARA%20M+DIOS520PRODUTORES.pdf>. Acesso em: 20 maio 2013.

VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes temas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1271-1280, 2007.

VOORHEES, W.B. Wheel-induced soil physical limitations to root growth. **Advances in Soil Science**, Boca Raton, v. 19, p. 73-95, 1992.

WEEN, B.W. Relation between root respiration and root activity. **Plant and Soil**, New York, v. 63, p. 73-76, 1981.

WILLAT, S.T.; STRUSS, R.G.; TAYLOR, H.M. In situ studies using neutron radiography. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, p. 581-586, 1978.

WOOD, R.K.; REEDER, R.C.; MORGAN, M.T.; HOLMES, R.G. Soil physical-properties as affected by grain cart traffic. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 36, n. 1, p. 11- 15, 1993.

YOUNG, I.M.; BENGOUGH, A.G.; MACKENZIE, C.J.; DICKSON, J.W. Differences in potato development (*Solanum tuberosum* cv. Maris Piper) in zero and conventional traffic treatments are related to soil physical conditions and radiation interception. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 26, p. 341-359, 1993.

ZONTA, E.; BRASIL, F.C.; GOI, S.R.; ROSA, M.M.T. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral das plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7- 52.