



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA**

SILVIA ROSA RODRIGUES

**DIREÇÃO PREFERENCIAL DE CRESCIMENTO DE RAÍZES
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Londrina
2008

SILVIA ROSA RODRIGUES

**DIREÇÃO PREFERENCIAL DE CRESCIMENTO DE RAÍZES
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientadora: Profa. Dra. Cristiane de Conti Medina.
(UEL, Londrina)

Co-orientador: Dr. Jean-Louis Chopart.
(CIRAD, Saint Pierre)

Londrina
2008

**Catálogo na publicação elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da Universidade Estadual de Londrina.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

R696d Rodrigues, Silvia Rosa.
Direção preferencial de crescimento de raízes de cana-de-açúcar / Silvia Rosa
Rodrigues. – Londrina, 2008.
34 f. : il.

Orientador: Cristiane de Conti Medina.
Co-orientador: Jean-Louis Chopart.
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina,
Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2008.
Inclui bibliografia.

1. Cana-de-açúcar – Cultivo – Teses. 2. Anisotropia – Teses. I. Medina,
Cristiane de Conti. II. Chopart, Jean-Louis. III. Universidade Estadual de
Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em
Agronomia. IV. Título.

CDU 633.61

SILVIA ROSA RODRIGUES

**DIREÇÃO PREFERENCIAL DE CRESCIMENTO DE RAÍZES
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Cristiane de Conti Medina – UEL

Profa. Dra. Carmen Silvia Vieira Janeiro Neves
– UEL

Prof. Dr. Odair Moraes – UEL

Profa. Dra Inês Cristina de Batista Fonseca
(suplente) – UEL

Dra. Neusa Maria Colauto Stenzel (suplente) –
IAPAR

Profa. Dra. Cristiane de Conti Medina
Orientadora
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 29 de agosto 2008.

A DEUS.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora, Dra Cristiane de Conti Medina.

Agradeço a meu co-orientador, Dr. Jean-Louis Chopart, por todo o apoio, conselhos técnicos.

Agradeço especialmente ao aluno de doutorado Mateus Azevedo e aos estagiários Luiz Gustavo Mantoani, Rafael Orindo Belgamo, Paulo Vicente Contador Zaccheo e Adriano José Garcia, pela sua ajuda, sem a qual não seria possível realizar os trabalhos.

Agradeço aos funcionários da Fazenda Escola, pela realização dos tratos culturais e ajuda nos trabalhos mais pesados de avaliação do experimento.

Agradeço a paciência e ao incentivo constante da amiga Miriam Sampaio, obrigada pelas caronas.

RODRIGUES, S.R. **Direção preferencial de crescimento de raízes de cana-de-açúcar.** 2008. 34f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

RESUMO

Atualmente, a cana-de-açúcar tem um papel estratégico na matriz energética, além da força do açúcar nos mercados nacional e internacional. Do ponto de vista energético, existe crescente preocupação com relação ao uso de combustíveis fósseis, que são os grandes responsáveis pela emissão de gases poluentes na atmosfera. Vários países estão buscando reduzir ao máximo o uso desses combustíveis, pela diversificação da matriz. O objetivo deste trabalho foi identificar a direção preferencial das raízes da cana-de-açúcar. O experimento foi instalado em Londrina – PR, e as avaliações foram feitas no terceiro e no quarto ciclos da variedade RB 72454, em 2005 e 2006, respectivamente. As avaliações de enraizamento foram feitas com três repetições em quatro datas: 90, 120, 200 e 300 dias após o início da rebrota DAR (dias após rebrota). A coleta de raízes foi realizada em três distâncias da touceira: 0, 11, 0,35 e 0,58 m, e 5 profundidades: 0,10; 0,30; 0,60; 1,00; 1,40 m. As raízes foram amostradas nas paredes de perfil abertas perpendicularmente às linhas de plantio, utilizando-se de cubos com três faces metálicas com 0,1 m de lado, completando as outras três faces com o solo amostrado. As raízes expostas nas faces com solo foram contadas e, posteriormente, foram calculados a anisotropia (Na) e a direção preferencial de crescimento em relação ao plano horizontal (Ph) das raízes grossas (com mais de 1 mm de diâmetro). Aos 90 e 120 dias, as raízes grossas apresentaram um direcionamento horizontal até 0,20 m de profundidade, apresentando mudança de direção conforme aumenta a profundidade, ficando vertical ao plano h (horizontal), como foi visto aos 200 e 300 dias após a rebrota.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. Anisotropia. Direcionamento radicular.

RODRIGUES, S.R. **Direction of preferential growth of the roots of sugarcane.** 2008. 34p. Dissertation (Master`s degree in Agronomy) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

ABSTRACT

Today, the sugarcane (*Saccharum* spp) has a strategic role in the energy matrix, in addition to the strength of sugar on national and international markets. From energy, there is growing preoccupation with relation the use of fossil fuels, which are bigger responsible for the issue of polluting gases in the atmosphere. Several countries are seeking to reduce the maximum use of these fuels, by diversification energy matrix. The objective of this study was to identify the direction preferential roots of cane-of-açúcar. The experiment was installed in Londrina - PR, and appraisalment were made in the third and fourth rounds of the variety RB 72454 in 2005 and 2006, respectively. Appraisalment of rooting were made with three repetition on four dates: 90, 120, 200 and 300 days after the start of regrowth DAR (days after regrowth), which corresponded to a temperature of arrangement (SDS), of 2190, 2890, 4380 and 6320 ° C, respectively. The collection of roots was held in three distances of plaint: 0, 11, 0.35 and 0.58 m, and 5 depths: 0.10, 0.30, 0.60, 1.00, 1.40 m. The sampling procedure for roots was based on extraction of cubes with 0.1 m wide, from a profile of open ground, with sides of three sides, incomplete with steel edges. For roots, was used the method of the cube, counting up the roots that appeared on the sides exposed, and subsequently was calculated and the Ph An, is assessing the direction of preferential thick roots and anisotropy, respectively. The roots thick, 1 mm, showed preferential direction when horizontal and vertical near the touceira as the days passed.

Keywords: Sugarcane. Anisotropy. Direction of roots.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 IMPORTÂNCIA DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	11
2.2 DESENVOLVIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR	12
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O CRESCIMENTO DAS RAÍZES.....	13
2.4 O ESTUDO DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR E ANISOTROPIA	14
2.5 AVALIAÇÕES PARA QUANTIFICAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL E TRATOS CULTURAIS	22
3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	23
3.3 AVALIAÇÕES	23
4 RESULTADO E DISCUSSÃO	25
4.1 DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS RAÍZES	25
CONCLUSÃO	30
REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é hoje o principal produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) do mundo. Seus produtos são largamente utilizados na produção de açúcar, álcool combustível e, mais recentemente, biodiesel. Introduzida nos primeiros anos do Brasil colônia, a cana-de-açúcar é cultivada em grande parte do território nacional. Desde sua implantação, essa cultura tem grande importância no desenvolvimento do país. Atualmente, tem um papel estratégico na matriz energética, além da força do açúcar nos mercados nacional e internacional. Do ponto de vista energético, existe crescente preocupação com relação ao uso de combustíveis fósseis, que são os grandes responsáveis pela emissão de gases poluentes na atmosfera. Vários países estão buscando reduzir ao máximo o uso desses combustíveis, pela diversificação da matriz energéticas. E a cana-de-açúcar é uma das melhores opções para produção de biomassa, com grande importância no cenário agrícola brasileiro e um futuro promissor no cenário mundial.

Anualmente o setor sucroalcooleira movimenta R\$ 41 bilhões, o que representa 3,65% do PIB, gerando 4 milhões de empregos diretos e indiretos. A produção da safra 2006-2007 foi de 420 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, transformadas em 30 milhões de toneladas de açúcar (exportação de 19 milhões de toneladas) e 17,5 bilhões de litros de álcool carburante (exportação de 3 bilhões). O parque industrial de 367 indústrias (em operação e projetos) investe R\$ 5 bilhões por ano e recolhe R\$ 12 bilhões em impostos (JORNAL CANA, 2008). Há demanda crescente pelo etanol: no mercado nacional, pela adoção de carros bi combustíveis e na produção de ésteres de óleos vegetais (biodiesel), com tecnologia desenvolvida pela Petrobrás, que substituiu o uso de metanol na esterificação de ácidos graxos de diversas naturezas; e no mercado internacional, onde as nações desenvolvidas procuram diversificar sua matriz energética.

Com a importância da cultura no país, faz-se necessário um melhor conhecimento de toda planta. 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, agregando conhecimentos sobre a assimilação de água e nutrientes e a função de sustentação no solo.

A caracterização da arquitetura radicular tem utilidade direta e é importante na busca de uma agricultura que utilize técnicas mais precisas para a avaliação das raízes no solo e para o emprego de insumos.

Visando determinar a arquitetura radicular da cana-de-açúcar, a partir aparecimento de raízes sobre um plano transversal ao solo, metodologia já calibrada e validada para o milho e para cana-de-açúcar (CHOPART et al., 2008), foi testado um modelo geométrico baseado nas direções preferenciais das raízes (Ph), observando os impactos das raízes nas faces de um cubo metálico, descrevendo a distribuição geométrica das raízes nesse ambiente. Os resultados gerados pela base de dados coletados, foram analisados através das imagens feitas por Isolinhas, que unem pontos de iguais características, também definida como sendo linhas sobre um mapa que indicam a posição geográfica de uma seqüência de pontos na superfície com a mesma elevação.

Este trabalho foi conduzido com vistas a descrever a direção preferencial das raízes de cana-de-açúcar, e, em termos mais abrangentes, contribuir, numa cooperação internacional, para a modelização da arquitetura do sistema radicular da cana-de-açúcar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Historicamente a cana de açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil, sendo cultivada desde a época da colonização. Do seu processo de industrialização obtem-se como produtos o açúcar nas suas mais variadas formas e tipos, o álcool (anidro e hidratado), o vinhoto e o bagaço.

Devido à grandeza dos números do setor sucroalcooleira no Brasil, a cana-de-açúcar, não está apenas sendo vista como mais um produto, mas sim como o principal tipo de biomassa energética. O impacto social observado é positivo, pois a indústria sucroalcooleira além produção de álcool é uma opção energética que cria muitos empregos. O álcool etílico carburante é reconhecido mundialmente pelas suas vantagens ambientais, sociais e econômicas, e os países mais desenvolvidos, os quais têm a matriz energética baseada nos combustíveis fósseis, estão interessados nessa alternativa. Crutzen (2007) também cita a contribuição eficaz no fornecimento de energia e na alimentação humana, bem como na indústria química.

O estudo da arquitetura e distribuição radicular foi segundo Vasconcelos e Garcia (2005) dependem de fatores como: umidade, solo clima, temperatura, granulometria e também as diferenças marcantes nas características da parte aérea entre espécies vegetais e entre variedades de determinada espécie, também existem grandes diferenças no desenvolvimento e na arquitetura dos seus sistemas radiculares. O conhecimento da parte aérea de uma variedade não significa o conhecimento da planta. A arquitetura do sistema radicular também sofre alterações de acordo com a idade da planta, tanto entre ciclos (cortes) quanto dentro de um mesmo ciclo (meses de desenvolvimento).

O conhecimento adquirido na pesquisa permite, na prática, a utilização racional das técnicas agronômicas, como o espaçamento da cultura, aplicação de fertilizantes, operações de cultivo e cálculos de irrigação. (CASAGRANDE, 1991)

2.1 IMPORTÂNCIA DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR

Segundo Korndorfer (1989), as raízes das plantas é de fundamental importância para a absorção da maior parte da água e dos nutrientes para o seu desenvolvimento, além da sua fixação no solo (LIBARDI; LIER, 1999).

A cana-de-açúcar possui um sistema radicular diferenciado em relação à exploração das camadas mais profundas do solo, quando comparado com o sistema radicular das demais culturas, principalmente as anuais. Por ser uma cultura semiperene e com ciclo de cinco a sete anos, o seu sistema radicular se desenvolve em maior profundidade e pode influenciar diretamente algumas características da planta, tais como: resistência à seca, eficiência na absorção dos nutrientes do solo, tolerância ao ataque de pragas no solo, capacidade de germinação e/ou brotação, porte (ereto ou decumbente) e tolerância a compactação do solo. E estes fatores estão correlacionados com a produtividade alcançada, principalmente em solos de baixa fertilidade e menor capacidade de reter umidade.

Entretanto, não é a quantidade de raízes o fator determinante destas vantagens, mas a sua distribuição no perfil do solo ao longo das estações do ano. Uma quantidade muito grande de raízes nas camadas superficiais do solo pode significar um gasto excessivo de metabólitos sintetizados na parte aérea e translocados para as raízes, além de maior risco de estresse hídrico em períodos de veranico (VASCONCELOS, 2005).

Há uma relação intraespecífica entre a parte aérea e o sistema de raízes, ligados no que diz respeito ao transporte de água e nutrientes. Entretanto, a relação de crescimento dessas partes pode ser muito variável, de acordo com as condições da planta e do meio ambiente (GUIMARÃES et al., 1997).

De modo geral, sob o aspecto da absorção de nutrientes, é desejável que as plantas apresentem amplo sistema radicular (BARBER, 1995).

Dillewijn (1952 apud SILVA, 1992), afirma que a importância do estudo do sistema radicular da cana-de-açúcar está em: primeiro, conhecer a correlação existente entre a natureza do sistema radicular e a sua adaptabilidade às condições particulares de crescimento (solo seco, solo úmido, incidência de pragas de raízes); segundo, ter o exato conhecimento da distribuição da raiz, permitindo-se fazer sugestões coerentes sobre disposição de fertilizantes, aplicação de irrigação e

métodos de cultivo; terceiro, contribuir para o melhoramento, quando se deseja transmitir à progênie características como profundidade do sistema radicular para resistência à seca. Por outro lado, a quantificação do crescimento, da renovação e da senescência do sistema radicular passa a ser um desafio em virtude de alguns fatores salientados por Luxmoore e Stolzy (1987 apud CHOPART et al., 2008): a arquitetura geométrica complexa do sistema radicular; a ampla gama de tipos e diâmetros de raízes de plantas perenes; as diferenças na atividade fisiológica de raízes em diferentes idades; o rápido crescimento e decomposição de raízes finas; os processos microbiológicos que ocorrem na interface solo/raiz; as relações simbióticas na rizosfera e, por fim, a variabilidade do ambiente edáfico (física, química e biológica) no qual raízes se desenvolvem.

2.2 DESENVOLVIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR

Existem três tipos de raízes, na cana-de-açúcar, segundo Bacchi (1985) e Casagrande (1991): 1 - raízes superficiais, situadas nos primeiros centímetros de profundidade, responsáveis pela maior parte de absorção de água e nutrientes; 2 - raízes de fixação, que são brancas e suculentas, dirigindo-se para baixo com ângulo entre 45 e 60°, e têm absorção limitada; 3 - e raízes em cordões, mais verticais que as primeiras duas, que podem absorver água em maior profundidade.

As primeiras raízes da cana-planta são de fixação, provenientes da zona radicular do tolete. Até o desenvolvimento das raízes superficiais, que se inicia 30 dias depois da brotação, a planta sobrevive das reservas do tolete e da absorção das raízes de fixação (CASAGRANDE, 1991). Na soqueira (rebrotada da touceira após o corte) um novo sistema radicular é formado, onde as raízes velhas deixam de funcionar gradativamente (HUMBERT, 1974; CASAGRANDE, 1991).

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O CRESCIMENTO DAS RAÍZES DE CANA-DE-AÇÚCAR

Segundo Helfgott (1997) as características físicas do solo e as condições de fertilidade química podem limitar o crescimento das raízes. A estrutura regula a aeração, o suprimento de água, a penetração das raízes, a disponibilidade de nutrientes, a atividade biológica e a temperatura do solo. A porosidade de aeração para desenvolvimento vegetal deve ser, no mínimo, de 0,10 a 0,12 m³ m⁻³ (BAVER et al., 1973; VAN LIER, 2001).

Segundo Casagrande (1991), a densidade do solo pode restringir o desenvolvimento, mas seus efeitos devem ser relacionados a outros fatores, como textura, porosidade e umidade do solo e a variedade da cana em questão.

A influência em determinado desenvolvimento radicular pode ser entendida quando se conhecem as alterações que este manejo causa nas relações hídricas, térmicas e gasosas do solo. (LIBARDI; LIER, 1999).

A variedade é um fator extremamente relacionado com o desenvolvimento radicular. Vasconcelos et al., (1998), estudando o sistema radicular da cana aos 10 e 16,5 meses após o plantio, verificou o comportamento diferenciado na quantidade e distribuição de raízes no perfil do solo para 12 genótipos diferentes. A quantidade de raízes de uma variedade não quer dizer que ela seja considerada de alta produção agrícola e industrial, levando em conta que isto depende da somatória de outras características desejáveis; mas, uma variedade portadora de vigoroso sistema radicular tem maior capacidade de adaptação em condição de solo de baixo teor de água ou de baixa fertilidade, inclusive de resistência maior à incidência de certas pragas e doenças presentes no solo (CASAGRANDE, 1991).

A relação entre as raízes e a água é bem estudada, mostrando que existem variações sensíveis à condutividade hidráulica entre as variedades de cana-de-açúcar. A relação entre as condições hídricas e o desenvolvimento do sistema radicular também são citados por Faroni e Trivelin (2006), que, avaliando as raízes ativas em cana-de-açúcar cultivada em Latossolo Vermelho distrófico, afirmam que épocas de seca podem provocar mortalidade de raízes, ocorrendo parcial renovação das raízes num mesmo ciclo da soqueira, quando o solo volta a ter umidade suficiente. Os autores observaram que a quantidade de raízes vivas e ativas

aumentou com o passar do tempo, após a colheita, num ano em que não houve severa deficiência hídrica.

As características do solo, como as físico-químicas e a umidade possuem um importante fator no crescimento e no desenvolvimento das raízes. E as raízes são dinâmicas quanto às mudanças dessas características, durante o seu ciclo. Se ocorrer um ressecamento do solo, de cima para baixo, as raízes em profundidade se desenvolvem, explorando o maior volume de solo possível, aproveitando que os metabólitos são mais disponíveis e há baixa resistência à penetração; enquanto que as raízes em superfície encontram dificuldade para crescer e podem até morrer, dependendo do período de seca e das condições físico-químicas do solo. Quando suprida essa necessidade hídrica, essas últimas retomam seu crescimento e novas raízes laterais superficiais são desenvolvidas. (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

2.4 O ESTUDO DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR E ANISOTROPIA

Pela dificuldade de visualização e adaptação de metodologias para o estudo sobre sistema radicular, as quantidades de estudos sobre as raízes vêm aumentando. Ingram e Leers (2001) afirmam que, normalmente, a pesquisa que envolve avaliação de raízes é trabalhosa. Outro fator é que, experimentos de avaliação de raízes têm alto coeficiente de variação (CV%) (INGRAM; LEERS, 2001), onde, muitas vezes, não se notam diferenças estatísticas, minimizando a importância de estudos de interação solo-planta-manejo. Essa característica é observada pela alta variabilidade espacial das condições do solo e pela dificuldade de se fazer grande número de repetições. Uma das alternativas para amenizar esse problema, talvez seja ajustar modelos estatísticos adequados ao estudo de raízes. Um bom exemplo de modelagem matemática do crescimento e arquitetura do sistema radicular pode ser encontrado em Chopart et al. (2008), que ressaltam que a interpretação da arquitetura de sistemas radiculares, praticamente impossível de ser realizada pela estatística tradicional, faz com que a modelagem matemática seja uma abordagem atrativa.

Em resposta a essa tentativa de se ter uma modelagem matemática de fácil aplicabilidade no campo, levando em consideração as diferentes espessuras das raízes, comprimento de raiz, orientações principais e distribuição em diferentes profundidades, Chopart et al. (2008), publicou artigo caracterizando um modelo de passagem de número de impactos para densidade de comprimento de raízes para a cana-de-açúcar.

O procedimento de amostragem para a medição das raízes, é baseado na extração de cubos com 0,1 m de largura, a partir de um perfil do solo aberto, com faces de três lados, incompletas de aço com arestas afiadas, para facilitar a penetração do solo. O cubo foi pressionado cuidadosamente no solo, até a sua inteira colocação no nível da superfície do solo e, em seguida, foi retirado o excesso de solo, nas três frentes com uma faca, a fim de obter um cubo de solo. Uma segunda amostra foi coletada nas mesmas profundidade e distância da planta, mas com a abertura lados do cubo orientados na direção oposta, a fim de obter abertas as faces para os seis lados do cubo (Figura 1)

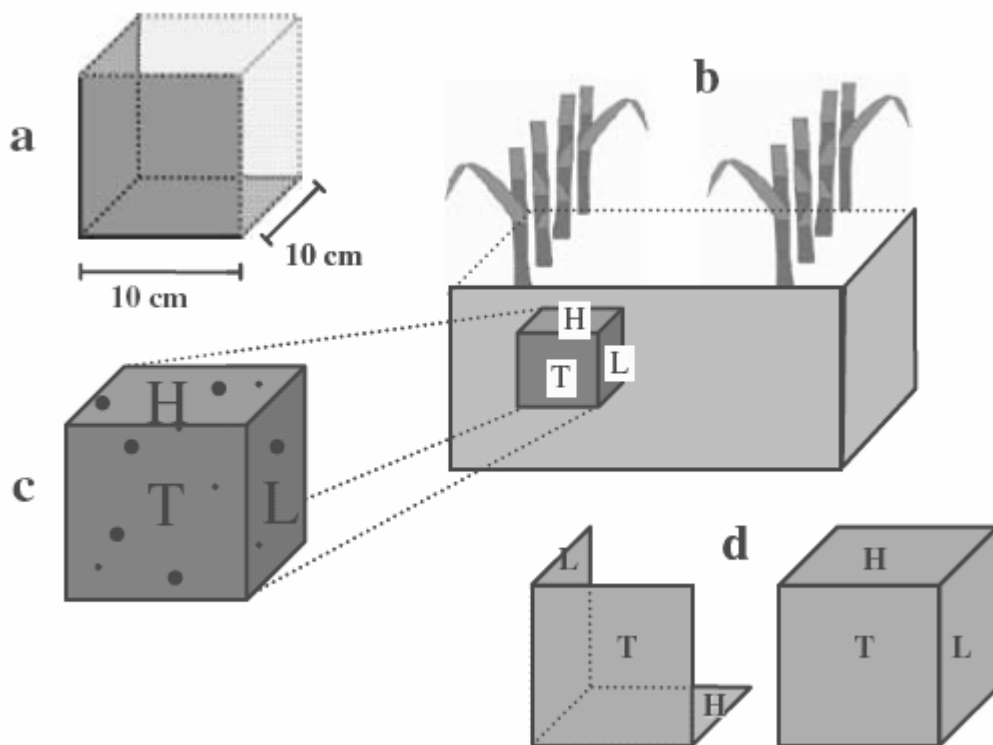


Figura 1 – a) cubo aço contendo 3 partes. b) amostragem do perfil do solo com lados orientados de acordo com a superfície do solo e linha da touceira (H horizontal, L longitudinal, T transversal). c) cubo puxado para fora do solo com 3 lados abertos d) Duas amostragens com lados abertos orientados em direções opostas.

Em cada cubo extraído com solo, foi imediatamente contado no campo o número de raízes nos três lados expostos (horizontal, transversal e longitudinal), resultando em N_{rh} , N_{rt} e N_{rl} , expresso com base no princípio do volume do cubo. As raízes foram contadas separando raízes finas (diâmetro inferior a 1 mm) e outras raízes (> 1 mm). Para conseguir uma melhor visibilidade das raízes, a face do solo do cubo foi pulverizada com água.

A quantificação das raízes, em vários estudos, é feita pela densidade de comprimento de raízes (RLD – root length density), expressa em comprimento de raízes por unidade de volume de solo, mas também é comum observar a massa seca de raízes. Para a obtenção do comprimento de raízes, pode-se utilizar a metodologia desenvolvida por Newman (1966), modificada por Tennant (1975), em amostras levadas ao laboratório. Essa metodologia se baseia no número de intersecções de raízes sobre uma tela com malha conhecida, calculando-se o comprimento total de todos os segmentos.

O desenvolvimento e a difusão de tecnologias computacionais permitiram a realização de vários trabalhos que se utilizaram de imagens e outras informações, posteriormente digitalizadas e analisadas por softwares específicos, dispensando o uso de técnicas manuais (NEWMAN, 1966; TENNANT, 1975), e diminuindo o tempo para a obtenção de dados, como Crestana et al. (1994), Jorge et al. (1996) e Chopart e Siband (1999), Ingram e Leers (2001).

Visando propor alternativas para estudo de raízes, Crestana et al. (1994) realizaram estudo através de processamento de imagens digitais. Foram feitos perfis (trincheiras), em lavouras de cana-de-açúcar e soja. Os autores fotografaram ou filmaram os perfis e as imagens foram analisadas, com o uso de baixa tecnologia, através de um papel translúcido reticulado contam-se as raízes, sobrepondo o papel sobre a foto, média tecnologia (imagens digitalizadas sem recursos de processamento) e alta tecnologia (imagens digitalizadas com recursos de processamento). O uso de imagens como ferramenta, segundo os autores, foi uma maneira eficaz na quantificação de raízes e de boa aplicabilidade.

Diferentes métodos de quantificação foram testados, Robaina Júnior (2001) estudou de raízes de cana-de-açúcar, em experimento com doses crescentes de vinhaça, em Latossolo Vermelho distroférico, em Londrina – PR. O autor comparou, através de estudo de regressão, o método do trado tradicional (com medição da massa seca raízes, em g) com o método do trado e o método da parede

do perfil, medindo-se área de raízes, obtida por imagens digitais, com correlação significativa entre os métodos.

Vasconcelos et al. (2003), em cana-de-açúcar cultivada sobre Latossolo Vermelho distrófico, de textura média, avaliaram três metodologias para quantificar as raízes de cana: 1 – monólito, aferindo-se a massa seca de raízes, e a partir do comprimento de 10% do peso de cada amostra; 2 – trado, massa seca de raízes; e 3 – parede do perfil, utilizando o programa SIARCS e contagem das raízes. Os métodos do monólito e do trado apresentaram maior porcentagem de raízes na camada de 0 – 20 m. Os autores dizem que o monólito e o trado proporcionam uma amostragem volumétrica melhor.

Medina (1993) e Robaina (2000) utilizaram o método da parede do perfil para quantificação de raízes, ambos em cana-de-açúcar, contando o número de raízes, com o auxílio de uma tela quadriculada.

Houve a comparação de métodos, como o estudo de Vepraskas e Hoyt (1988) que compararam o método da parede do perfil, contando o número de raízes no perfil do solo, e o trado cilíndrico, nas culturas de milho e fumo. Os autores destacam que a parede do perfil tem a vantagem de ser mais rápida do que o trado, usando equipamentos simples; mas, ao contrário do trado, não possibilita obter a densidade de comprimento de raízes que é a unidade internacional usual na quantificação de raízes, além de ser difícil manterem a verticalidade do perfil na camada superficial do solo, geralmente mais solta e suscetível ao desmoronamento; por outro lado, o trado demanda muito tempo.

Chopart e Siband (1999), estudando raízes de milho, desenvolveram um método que utiliza uma grade com tela de nylon, para contar o número de raízes na parede do perfil, que estima a densidade de comprimento de raízes e a taxa de exploração do solo, por meio de um modelo matemático. Para isso, os autores realizaram um estudo de orientação preferencial e isotropia das raízes, em várias profundidades, calibrando e validando o modelo. Este método se mostrou de fácil aplicação no campo e de baixo custo, fazendo-se a estimativa em laboratório de informática, através do programa RACINE[®] (desenvolvido pelo CIRAD, França), apresentando resultados satisfatórios, quando comparado com outros métodos.

Para a cana-de-açúcar, Chopart et al. (2008), desenvolveram um modelo específico, que considera o grau de isotropia de seu sistema radicular. O autor Lopez-Zamora et al. (2002) também realizou um estudo de avaliação de

isotropia de raízes de plantas arbóreas da Amazônia, conseguindo estabelecer relações significativas entre o número de impactos de raízes no perfil do solo e a densidade de comprimento de raízes.

Em razão das condições do ambiente de produção, como as características de clima, umidade e fertilidade do solo, não há um padrão na distribuição de raízes. O efeito da distribuição de nutrientes sobre as raízes é incerto. (SMITH et al., 2005).

Em relação à profundidade máxima da cana-de-açúcar, foi verificado que esta explora um grande volume de solo; e que a profundidade máxima das raízes, superior a 4 m, possibilita que as plantas tenham acesso às reservas de água, provavelmente inatingíveis para culturas anuais. Isso indica que a cana-de-açúcar pode, comparativamente às culturas anuais, suportar melhor período de restrição de água no solo (AZEVEDO, 2008).

A anisotropia somente relaciona a raiz a ter ou não tendência a algum direcionamento.

De acordo com Van Noordwijk (1987), se todas as raízes forem rigorosamente perpendiculares ao plano de observação, cada raiz, corresponde a um comprimento de raízes igual à borda do cubo. Se, no entanto, todas as raízes forem paralelas ao plano de observação, não é visualizada a raiz, por tanto não se consegue contar.

Segundo Chopart e Siband (1999), descrevem em suas análises que o comprimento da raiz pode ser calculado com base no Nr medido por uma única superfície do solo (x), tendo em conta a distribuição das raízes (anisotropia e orientação preferencial). Um Ph coeficiente é calculado para esta superfície, com t e l representando as outras duas superfícies perpendiculares.

$$Ph = 2Nr_h / (Nrt + Nrl)$$

Se $Ph > 1$ ou < 1 , as raízes são, respectivamente, uma direção preferencial paralela ou perpendicular ao plano de medição h. O número de raízes perpendicular 3 (x) nos lados de um cubo de solo foi usado para definir um índice anisotropia AN raiz. $AN = \sqrt{6}$ (Lang Melhuish e 1970; Van Noordwijk 1987), AN Varia de 0 (isotrópico) a 1 (anisotrópico).

2.5 AVALIAÇÕES PARA QUANTIFICAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR

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).

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 se compararem 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 dos trabalhos de Oskamp e Batjer (1932).

Não existe a forma perfeita de avaliar as raízes, 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. Em trabalho de Kücke et al. (1995), foram detectadas grandes diferenças de correlações e de coeficientes de variação para diferentes culturas, tipos de solo, profundidades e épocas de amostragem. Em estudos de sistema radicular da cana-de-açúcar, alguns autores encontraram diferenças quantitativas e qualitativas quanto às variedades (VASCONCELOS, 1998), aos ciclos da cultura (BALL-COELHO et al., 1992) e aos sistemas de colheita (YANG, 1977).

De acordo com Van Norordiwijk (1987), a RLD (root length density) e a Anisotropia (An), podem ser calculadas com base no número de raízes (Nr) nas superfícies de um cubo, apontado o desenvolvimento das mesmas e a viabilidade econômica da metodologia nesse ambiente. Chopart e Siband (1999) utilizaram o

método de estudo do Modelo de Passagem de número de raízes (Nr) e comprimento mensurado (LT) para avaliação de raízes, que estima a densidade de comprimento radicular (RLD), parâmetro mais pertinente para saber as alimentações hídrica e mineral, a partir da contagem de impactos de raízes no perfil do solo. Também utilizaram o método da grade para avaliação da taxa de exploração do solo e a densidade de comprimento de raízes, utilizando-se de um modelo matemático que usa o número de raízes no perfil do solo estudado. Este método se mostrou de fácil aplicação no campo e baixo custo, fazendo-se a estimativa em um laboratório de informática, apresentando resultados satisfatórios quando comparado com outros métodos avaliados.

O número de raízes num plano (perfil do solo), não dá acesso, diretamente, à densidade de comprimento radicular. Para isso, é preciso passar por um modelo de passagem, já calibrado e validado para o milho (CHOPART; SIBAND, 1999) e para cana-de-açúcar (CHOPART et al., 2008).

Vários métodos têm sido utilizados para a medição da RLD, densidade de comprimento de raiz (BOX, 1996). A sua utilização no campo é cara e muita vez resulta em dados que são pouco representativos na distribuição da variabilidade da raiz. Os mapeamentos do número de raízes sobre um perfil do solo, pela trincheira Método do Perfil (BOHM, 1976), têm a vantagem de ser viáveis no campo e evitar efeitos sobre a medição da distribuição da raiz (TARDIEU et al., 1988). Estudos empíricos sobre as diretas relações entre o número de raízes foram testados para o trigo (DREW; SAKER, 1980) e o milho (CHOPART; SIBAND, 1999). A matemática das relações entre densidade e impactos sobre a face de um cubo foi formulada (MELHUIISH; LANG, 1968; VAN NOORDWIJK, 1987) e depende do grau de direção preferencial das raízes (anisotropia), e da sua orientação. A relação entre Nr (números de raízes) e RLD foi estudada em sistemas radiculares de milho, tornando possível mostrar a complexidade e a necessidade de manter a visão da anisotropia e orientações das raízes (GRABARNICK et al., 1998). A modelagem proposta por Van Noordwijk em 1987 foi utilizada e adaptada no campo com a cultura de milho na Costa do Marfim, e testada no Burkina Faso, no continente africano por Chopart e Siband (1999). Os autores conduziram um modelo para descrever RLD da raiz do milho de acordo com os perfis do solo no campo. Este modelo também foi testado mais tarde na Colômbia (CHOPART et al., 2001), foi usado em vários estudos na área, sendo os mais recentes na França (CHOPART et

al., 2007) e no Brasil (CHOPART et al., 2008). Abordagens baseadas no trabalho de Melhuish e Van Noordwijk (1987) foram utilizadas e tiveram resultados muito próximos ao de Chopart e Siband (1999).

A modelagem matemática apresentou-se como uma promissora metodologia de análise de dados de sistemas radiculares, possibilitando uma adequada visualização de diferentes estratégias adaptativas da planta, conforme refletidas pelas diferentes arquiteturas radiculares produzidas em cada condição.

Geralmente, a quantificação do sistema radicular da cana-de-açúcar é feita em profundidade e em distâncias da touceira, medindo-se em área, comprimento ou porcentagem (em massa) de raízes por volume do solo. Böhm (1979) descreve vários métodos para a avaliação de raízes, como a parede do perfil, trado, monólitos, rhizotron e até escavação e remoção de todo o sistema radicular. A escolha da metodologia depende dos equipamentos, da mão-de-obra e da tecnologia disponíveis, bem como dos objetivos e condições do experimento.

Foi conseguido considerável conhecimento do sistema radicular da cana-de-açúcar nas últimas décadas. Robinson (1991) enfatiza que os avanços científicos no entendimento de como as raízes interceptam e absorvem os nutrientes seriam muito pequenos se tentasse reconstruir com exatidão detalhada, à custa de muito tempo, esforços e recursos financeiros despendidos, a intrincada estrutura tridimensional de um sistema radicular real.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL E TRATOS CULTURAIS

O estudo foi realizado na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina (latitude 23°23'S, longitude 51° 11'W e altitude de 560 m). O clima, segundo classificação de Wilhelm Köppen, é subtropical úmido, com precipitação média de 1620 mm⁻¹, e insolação média de 7,05 h dia⁻¹ (CORRÊA et al., 1982). O solo é classificado, de acordo com Prado (2003), como Latossolo Vermelho eutroférico, de textura argilosa.

A variedade de cana-de-açúcar utilizada foi a RB 72454, plantada em junho de 2002, com uma largura de 1,4 entrelinhas, sob cultivo convencional. No preparo de solo, foi realizada uma gradagem pesada com grade de arrasto de 32 discos, a 0,2 m de profundidade; logo após, foi feita uma escarificação com escarificador de cinco hastes (duas à frente e três atrás), espaçadas em 0,4 m, trabalhando na profundidade limitada de 0,3 m; por último, foi feita uma gradagem niveladora com grade em “V” de 34 discos, na profundidade de 0,15 m. O sulco de plantio foi feito com sulcador de uma linha, a 0,25 m de profundidade. Não houve operações de mobilização do solo na soqueira; após o corte das primeira e segunda ressecas, em dezembro de 2004 e, em novembro de 2005, retirou-se a palha, fazendo-se escarificação com escarificador de três hastes (uma à frente e duas atrás), passando entre as linhas de cana-de-açúcar a uma profundidade limitada a 0,3 m, com adubação feita imediatamente após a escarificação, incorporando o fertilizante a 0,05 m de profundidade, com o uso de uma semeadora de plantio direto adaptada para fazer a adubação próximo às linhas de cana-de-açúcar.

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Avaliações de enraizamento foram feitas três repetições em quatro datas: 90, 120, 200 e 300 dias após o início da rebrota DAR (dias após rebrota), o que correspondeu a uma combinação de temperaturas (SDS), de 2190, 2890, 4380 e 6320 °C graus dia, respectivamente. A coleta de raízes foi realizada em três distâncias da touceira: 0,11, 0,35 e 0,58 m, e 5 profundidades: 0,10; 0,30; 0,60; 1,00; 1,40 m. O procedimento de amostragem para a medição das raízes foi baseado na extração de cubos com 0,1 m de largura, a partir de um perfil do solo aberto, com faces de três lados, incompletas de aço com arestas afiadas, para facilitar a penetração do solo (Figura 1). O cubo foi pressionado cuidadosamente no solo, até a sua inteira colocação no nível da superfície do solo e, em seguida, foi retirado o excesso de solo, nas três frentes com uma faca, a fim de obter um cubo de solo. Uma segunda amostra foi coletada nas mesmas profundidade e distância da planta, mas com a abertura lados do cubo orientada na direção oposta, a fim de obter abertas as faces para os seis lados do cubo (Figura 1).

Em cada cubo extraído no solo, ainda no campo, foi contado o número de raízes separadamente nos três lados expostos (horizontal, transversal e longitudinal), resultando em número de raízes nas faces horizontal, transversal e longitudinal, respectivamente N_{rh} , N_{rt} e N_{rl} . As raízes foram contadas separando-se raízes finas (diâmetro inferior a 1 mm) e raízes grossas (> 1 mm). Antes da contagem, as faces do solo do cubo foram pulverizadas com água para melhor visualização das raízes. Contaram-se as raízes no ponto de intersecção com o solo, desprezando-se as ramificações após esse plano.

3.3 AVALIAÇÕES

O levantamento de dados foi realizado durante uma safra e os resultados foram analisados através das imagens criadas por isolinhas.

Levando-se em conta a heterogeneidade da distribuição radicular no campo, através da estimativa do Ph, face horizontal do perfil, escolhido pela

facilidade de compreender as direções das raízes grossas e finas, a partir do número de raízes (Nr) sobre um perfil de solo.

Aspectos teóricos da relação entre Nr e o sentido das raízes, em comparação com a observação das faces, foram analisadas por Van Noordwijk (1987). Esses aspectos foram utilizados em um estudo sobre o milho (CHOPART; SIBAND, 1999).

A modelagem da arquitetura radicular foi realizada sobre o número de raízes que apareciam somente sobre um plano vertical e perpendicular à touceira da cana, pois é o método mais comum para estudar as raízes em um perfil do solo.

Para cada uma das análises, tentou-se estabelecer as relações entre o número de raízes (Nr) e a orientação preferencial (Ph) das raízes a partir das amostras coletadas, separando as amostras em duas categorias: finas (f) e grossas (g). O limite entre as duas é o diâmetro de aproximadamente 1 mm, medido com paquímetro.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS RAÍZES

Segundo Chopart et al. (2008), o grau de Anisotropia é de 0 a 1. Raízes que apresentem valores de An iguais a zero, representam raízes sem direção preferencial de crescimento, isotrópicas, e as raízes que apresentarem valores próximos ou iguais 1, representam raízes com direção preferencial, anisotrópicas. Para determinar as direções preferenciais, é preciso tomar como base os P. Nesse trabalho tomou-se como referência o Ph, sendo possível saber se as raízes têm orientação mais ou menos vertical.

A análise dos dados das quatro coletas das raízes grossas e finas (Tabela 1) demonstrou que as raízes grossas são anisotrópicas e as raízes finas apresentaram um comportamento isotrópico, An igual à zero, o que indica raízes sem uma tendência de direcionamento. Em razão de não haver desse resultados, não se calculou o Ph para as raízes finas.

Tabela 1 – Coeficiente de orientação radicular (Ph) de cana-de-açúcar em relação ao plano de contagem horizontal em quatro períodos de coletas. (90, 120, 200 e 300 dias após rebrota).

Prof. (m)	Dist. Linha (m)	90 dias DAR	120 dias DAR	200 dias DAR	300 dias DAR
		Grossas	Grossas	Grossas	Grossas
0 – 0,20	0 – 0,20				
	0,30 – 0,40	0,897	0,522	0,536	0,629
	0,53 – 0,63	0,659	0,789	0,320	1,188
0,20 – 0,40	0 – 0,20	1,630	2,250	0,944	0,961
	0,30 – 0,40	0,917	0,323	0,588	1,143
	0,53 – 0,63	1,243	1,188	2,000	1,500
0,40 – 0,80	0 – 0,20	1,316	1,733	0,960	1,381
	0,30 – 0,40	0,898	1,419	0,727	0,471
	0,53 – 0,63	0,708	0,800	1,333	0,545
0,80 – 1,20	0 – 0,20	1,111	1,900	1,500	1,333
	0,30 – 0,40	1,200	0,846	0,643	1,360
	0,53 – 0,63	1,294	0,526	1,200	1,652
1,20 – 1,60	0 – 0,20	0,522	1,000	1,000	1,200
	0,30 – 0,40	1,071	1,286	0,750	1,556
	0,53 – 0,63	0,516	1,565	3,333	2,909

Valores de Ph maiores do que 1 significa que foram observadas mais raízes no plano h, ou seja, as raízes tiveram direção de crescimento preferencialmente vertical. Essa condição ocorreu nas camadas mais profundas do perfil, enquanto que mais próximo à superfície foram observadas mais raízes nas faces transversal e longitudinal do cubo, indicando mais raízes horizontais (Tabela 2). A coleta dos dados da profundidade 0 – 0,20 m não foi realizada, devido a proximidade à touceira, que dificultava a introdução do cubo no solo, por conter alta quantidade de raízes.

Tabela 2 – Soma dos Coeficientes de orientação preferencial radicular (ph) de raízes grossas de cana-de-açúcar, em quatro períodos de coleta (90, 120, 200 e 300 dias após a rebrota) e Ph médio.

Prof. (m)	Dist. Linha (m)	Horizontal	Transversal	Longitudinal	Média	Ph médio
0 - 0,20	0 – 0,20					
	0,30 – 0,40	4,083	6,208	6,750	5,681	0,630
	0,53 – 0,63	3,229	3,792	4,625	3,882	0,767
0,20 - 0,40	0 – 0,20	8,021	5,896	5,792	6,569	1,373
	0,30 – 0,40	3,792	4,271	4,229	4,097	0,892
	0,53 – 0,63	3,625	2,333	2,917	2,958	1,381
0,40 – 0,80	0 – 0,20	4,438	3,333	3,167	3,646	1,365
	0,30 – 0,40	2,250	2,271	2,583	2,368	0,927
	0,53 – 0,63	2,271	2,979	3,250	2,833	0,729
0,80 – 1,20	0 – 0,20	2,958	1,479	2,646	2,361	1,434
	0,30 – 0,40	2,854	2,667	3,063	2,861	0,996
	0,53 – 0,63	2,188	1,604	2,333	2,042	1,111
1,20 – 1,60	0 – 0,20	0,979	1,292	1,063	1,111	0,832
	0,30 – 0,40	2,063	1,792	1,771	1,875	1,158
	0,53 – 0,63	2,292	1,625	1,438	1,785	1,497

As médias de Ph deixam bem marcadas que as raízes grossas são isotrópicas mesmo quando não se encontra muitas raízes no solo.

A Figura 2 demonstra uma simulação, do comportamento de raízes grossas no perfil do solo em diferentes distâncias da touceira e profundidade (m).

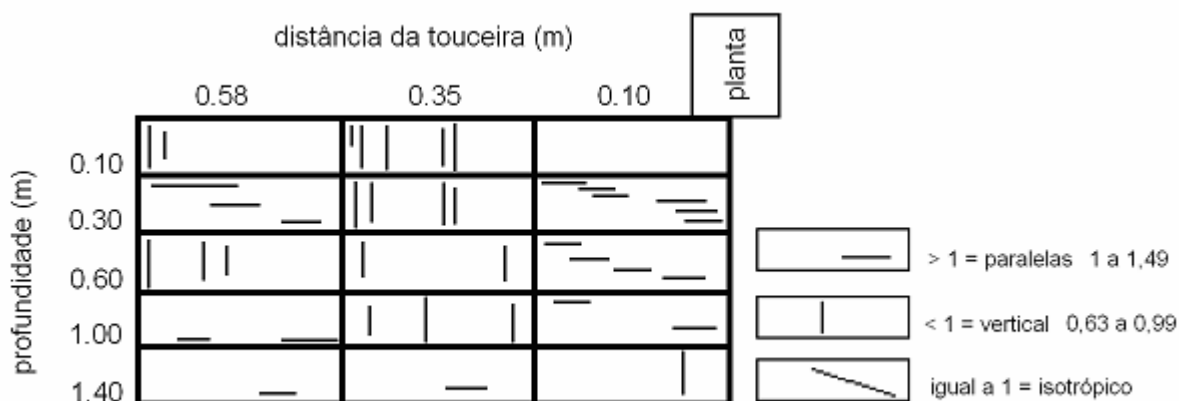


Figura 2 – Comportamento de raízes grossas no perfil do solo em diferentes distâncias da touceira e profundidade (m).

A utilização do modelo proposto por Chopart et al, (2008), para calcular o Ph e o Nrm, número médio de raízes, a partir dos dados da coleta das quatro datas, descreveu o comportamento da raiz no solo, levando-se em conta as dificuldades e as imprecisões inerentes as medições e contagens de raízes.

Para descrever melhor o comportamento das raízes grossas, foi utilizado o programa geoestatístico, que através das referências de distância da touceira, profundidade e número de raízes de cada face do cubo, possibilita terem-se as coordenadas exatas para a confecção de um mapa geoestatístico. Com a inserção dos dados, foram criados gráficos através de isolinhas, representados num mapa bidimensional em cores mostrando o comportamento e a distribuição das raízes no solo através das tonalidades atribuídas. Essa forma de visualização só foi possível, pois, para que a distribuição de uma variável possa ser representada por um conjunto de isolinhas, é necessário que ela tenha uma variação constante, de forma que dada duas isolinhas sempre poder-se ter uma terceira cujo valor possa ser interpolado a partir das duas primeiras, que possibilita uma adequada visualização de diferentes estratégias adaptativas da planta, conforme refletidas pelas diferentes arquiteturas radiculares produzidas em cada condição (Figura 3). Foram avaliadas todas as épocas separadamente. A tonalidade vermelha indica a direção das raízes em uma determinada região.

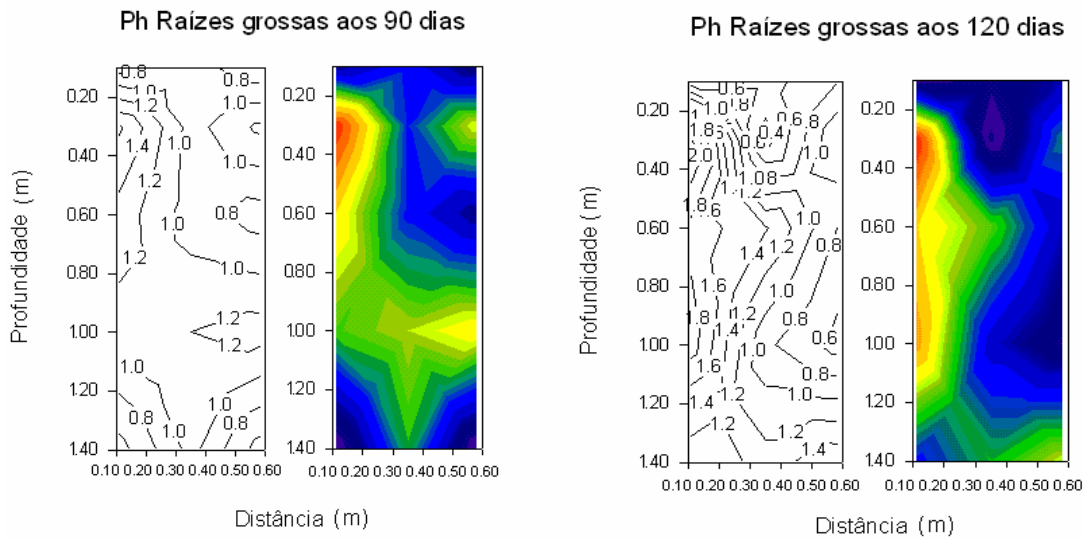


Figura 3 – Imagem da distribuição do número de raízes no perfil aos 90 e 120 dias após a rebrota.

- Para a figura 4, encontra-se uma de 0 a 0,20 m de profundidade entre 0,30 a 0,63 m de distância da touceira , os valores de Ph em sua maioria apresentam valores inferiores a 1 em todas as épocas de avaliação, indica raízes paralelas ao plano h.
- Aos 90 e 120 dias, a raiz grossa tem um direcionamento horizontal a 0,20 m de profundidade, apresentando uma mudança de sentido conforme aumenta a profundidade, ficando vertical ao plano h.
- Aos 120 dias de coleta, as raízes apresentam direcionamento paralelo ao plano h acentuado até 1,00 m de profundidade.

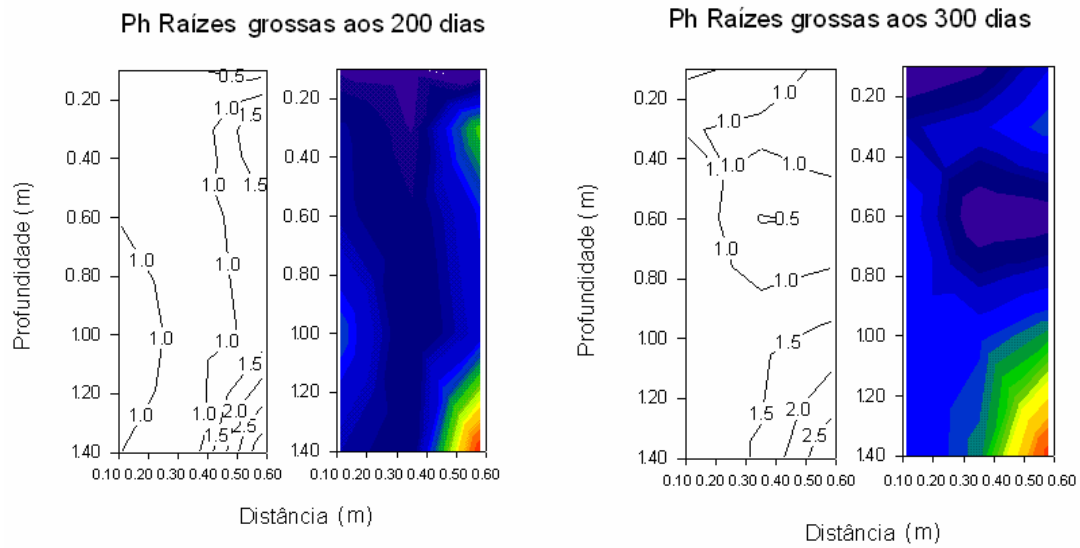


Figura 4 – Imagem da distribuição do número de raízes no perfil aos 200 e 300 dias após a rebrota.

- Aos 200 dias, as raízes não apresentam direcionamento preferencial até 1,20 m de profundidade. É visualizado um direcionamento preferencial vertical menos intenso à profundidade 1,30 m.
- Aos 300 dias, comportamento das raízes é muito similar aos 200 dias, embora menos intenso.

CONCLUSÃO

Com base nas condições do experimento, conclui-se que:

- há direção preferencial de crescimento das raízes grossas de cana-de-açúcar;
- as raízes grossas se comportam ao início da rebrota com uma tendência de crescimento paralela, em relação ao plano horizontal, previamente determinado;
- as raízes grossas com o avançar do ciclo se comportam com tendência de crescimento vertical ao plano horizontal em maior profundidade;
- o método do cubo, modelo proposto por Chopart et al, (2008), descreveu o comportamento da raiz no solo (anisotropia), levando-se em conta as dificuldades e as imprecisões inerentes às medições e contagens de raízes.
- o programa geoestatístico, que através das referências de distância da touceira, profundidade e número de raízes de cada face do cubo, possibilitou terem-se as coordenadas exatas para a confecção de um mapa geoestatístico, ficando visível o comportamento e distribuição das raízes no solo através dos mapas.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, M. C. B. **Preparo do solo para plantio de cana-de-açúcar em latossolo vermelho eutroférico**. 2004. 44p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Londrina.
- AZEVEDO, M. C. B. **Efeito de três sistemas de manejo físico do solo no enraizamento e na produção de cana-de-açúcar**. 2008. 101p. Tese de Doutorado em Agronomia – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.
- BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamic in plant-sugar cane. **Plant Soil**, vol 142, p.297 – 305, 1992.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability** - a mechanistic approach. New York: John Wiley & Sons, 1995. 414p.
- BOX, JE. () Modern methods for root investigations. **Plant Roots the Hidden Half**. New York, Dekker, , p. 193–237. 1996.
- BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlim: Springer-Verlag, 1979.188p. J. Agric. Sci., 87:365-368, 1979.
- CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, FUNEP, 1991. 157p.
- CHOPART, J. L.; VAUCLIN, M. Field test and sensitivity analysis of a model for estimating water balance of a cropped soil. **Soil Science Society American Journal**, Atlanta, v.54, p.1377-1384, 1990.
- CHOPART, J. L; SIBAND, P. Development and validation of a model to describe root length density of maize from root counts on soil profiles. **Plant and Soil**. v. 214, p. 61-74, 1999.
- CHOPART JL, SIBAND P, DINGKHUN M, ROVEDA G, BAQUERO J. From single plane profiles to root length density in Plant Soil space. Validation of a model in the field. **Root Res**. vol 10, p.586–567, 2001.
- CHOPART, J. L.; MEZINO, M.; AURE, F.; LE MEZO, L.; METE, M.; VAUCLIN, M. OSIRI: A simple decision-making tool for monitoring irrigation of small farms in

heterogeneous environments. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.87, p.128-138, 2007.

CHOPART, J. L. ; RODRIGUES, S. R. ; AZEVEDO, M. C. B. ; MEDINA, C. C. Estimating sugarcane root length density through root mapping and orientation modelling. **Artigo submetido à revista Plant and Soil**. 2008, 21p.

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 Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 3, p. 365 -371 1994.

CORRÊA, A. R.; GODOY, H.; BERNARDES, L. R. M. Características climáticas de Londrina. Londrina. **Circular Técnica IAPAR**, n.5., 1982, 16p.

CRUTZEN, PJ; MOSIER, AR; SMITH KA; WINIWARTER, W. N₂O release from agro-bio-fuel production global warming reduction by replacing fossil fuels. **Atmos Chem Phys Drew MC, Saker LR** , vol 31, p.21 2007.

DREW MC, SAKER LR. Assessment of a rapid method using soil cores for estimating the amount and distribution of crop roots in the field. **Plant Soil**, vol 55, p.297–295, 1980.

FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.6, p.1007-1013, 2006.

GRABARNIK P, PAGES L, BENGOUGH A. Geometrical properties of simulated maize root systems: consequences for length density and intersection density. **Plant Soil** 200:157–167, 1998.

HELFGOTT, S. **El cultivo de la caña de azucar en la costa peruana**. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina, 1997, 495 p.

HUMBERT, R. P. **El cultivo de la caña de azucar**. México Companhia Editorial Continental S.A., 1974. 719p.

INMAM-BAMBER NG, SMITH DM. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, vol 92, p.185–202, 2005.

INGRAM, K. T.; LEERS, G. A. Software for measuring root characters from digital images. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, p.918-922, 2001.

JORGE, L. A. C.; RALISCH, R.; ABI SAAB, O. J. G.; MEDINA, C. C.; GUIMARÃES, M. F.; NEVES, C. S. V. J.; CINTRA, F. L. D.; BASSOI, L. H.; FERNANDES, S. B. V. Recomendações práticas para análise de imagens digitais através do SIARCS®. São Carlos: EMBRAPA Instrumentação Agropecuária, 1996 (**Circular Técnica**). CD Rom.

JORNAL CANA. **Dados & estatísticas**. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br>>. Acesso em 06 fev. 2008.

LOPEZ-ZAMORA, I.; FALCÃO, N.; COMERFORD, N. B.; BARROS, N. F. Root isotropy and na evaluation of a method for measuring root distribution in soil trenches. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.166, p.303-310, 2002.

KORNDORFER, G. H.; PRIMAVESI, O.; DEUBER, R. Crescimento e distribuição do sistema radicular de cana-de-açúcar em solo LVA. **Boletim Técnico Copersucar**, São Paulo, v. 47, p. 32 -36, 1989.

LIBARDI, P. L.; LIER, Q. J. V. Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do sistema radicular. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS. Aracaju, 1999. **Anais...** Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 1999. p. 47 - 56.

MEDINA, C. C. **Estudo da aplicação de gesso, calcário e vinhaça na produção e no enraizamento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1993. 204f. Tese (Doutorado). UNESP – Botucatu.

MELHUIH, FM; LANG, ARG. Quantitative of root in soil. Length and diameters of cotton roots in a clay-loam soil by analysis of surface-ground block of resin-impregnated soil. *Soil Sci* 106:16–22, Moore PH (1987) **Anatomy and morphology**. In: Heinz DJ (ed), 1968.

NEWMAN, E. I. A method of estimating the total length of root in a sample. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v.3, p.139-145, 1966.

PRADO, H. Solos do Brasil: gênese, morfologia, classificação, levantamento, manejo. 3ª ed. Piracicaba: Piracicaba, p.275, 2003.

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

ROBAINA, C. R. P. **Efeitos de duas aplicações sucessivas de doses de vinhaça nas propriedades de um Latossolo Vermelho distroférico e no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. Tese Doutorado. UNESP – Botucatu, 2000. 82 p.

ROBAINA JÚNIOR, R. A. H. **Comparação entre métodos de avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. Dissertação de Mestrado. UEL, Londrina – PR, 2001. 15p.

RUSSEL, R.S. & ELLIS, F.B. **Estimation of the distribution of plant roots in soli**. *Nature*, 217: 583, 1968.

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORNBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p.163-189, 2005.

TARDIEU F. Analysis of the spatial variability of maize root density. I- Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. **Plant Soil**, vol 107, p.259–266, 1988.

TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, Paris, v.63, n.3, p.995-1001, 1975.

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 do Solo**, Viçosa, n.27, p.849-858, 2003.

VASCONCELOS, A. C. M.; GARCIA, J. C. Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. Cana-de-açúcar: ambientes de produção. **Encarte técnico POTAFOS – Informações técnicas**, Piracicaba, n.110, 2005, 32p.

VAN NOORDWIJK, M. Methods for quantification of root distribution pattern and root dynamics in the field. **Int. Potash Inst. Publishers**: Berne. 1987. 37p.

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