

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

**Desenvolvimento radicular e produtividade da cana-de-açúcar relacionados
à mineralização do N do solo e à adubação nitrogenada**

Rafael Otto

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição
de Plantas**

**Piracicaba
2012**

Rafael Otto
Engenheiro Agrônomo

Desenvolvimento radicular e produtividade da cana-de-açúcar relacionados à mineralização do N do solo e à adubação nitrogenada

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR OCHEUZE TRIVELIN**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2012

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

Otto, Rafael

Desenvolvimento radicular e produtividade da cana-de-açúcar relacionados à mineralização do N do solo e à adubação nitrogenada / Rafael Otto. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2012. 120 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Adubação 2. Compactação dos solos 3. Fertilidade do solo 4. Fertilizantes nitrogenados 5. Matéria orgânica do solo 6. Nitrogênio 7. Raiz I. Título

CDD 633.61
O91d

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

Aos meus pais **Vera Lúcia Depiné Otto** e **Reinaldo Rubens Otto**,
Que sempre me incentivaram a seguir meu sonho,

Às minhas irmãs **Jeruza Otto Gonçalves** e **Débora Otto**,
Pelo carinho e amizade verdadeira,

A todos familiares,

Por fazeram parte da minha formação pessoal,

O que sou hoje é reflexo de cada um de vocês!

DEDICO

À **Marina Shinkai Gentil**, fiel companheira durante esses anos,
Pelo seu constante estímulo durante essa caminhada.

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e pelas pessoas que colocou em meu caminho.

Ao Professor Paulo Cesar Ocheuze Trivelin, pela orientação exemplar, presença constante e por estar sempre acessível, tanto nas alegrias quanto nas dificuldades. Agradeço por todo conhecimento compartilhado ao longo desses anos.

Ao Professor Richard L. Mulvaney, da Universidade de Illinois, um exemplo de dedicação à ciência, agradeço por todo apoio e entusiasmo na realização de parte importante desta Tese. Conhecê-lo foi sem dúvida um marco na minha carreira.

Aos Professores Godofredo Cesar Vitti e Pedro Henrique de Cerqueira Luz, pelo exemplo de entusiasmo no exercício da profissão, pelas incansáveis conversas e pela amizade.

À FAPESP pela concessão da bolsa de doutorado (Processo 2008/01217-5); à CAPES pela bolsa de doutorado sanduíche (Processo 5363-09-8) e Fundação Agrisus (Processo 634/09) pelo auxílio financeiro.

À coordenação do Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade e à ESALQ/USP pelo ensino de excelente qualidade durante a Graduação, o Mestrado e o Doutorado.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), em especial ao Laboratório de Isótopos Estáveis pela infraestrutura disponibilizada durante esses anos.

À Universidade de Illinois em Urbana-Champaign (College of Agriculture, Consumer and Environmental Sciences) pela oportunidade de realização do doutorado sanduíche entre abril de 2010 e janeiro de 2011, em especial aos Professores Richard L. Mulvaney e Saeed A. Khan.

Aos amigos da equipe de trabalho que formamos durante a realização deste trabalho: Henrique Coutinho Junqueira Franco, Carlos Eduardo Faroni, André César Vitti, Emídio Cantídio Almeida de Oliveira e aos demais orientados do professor Trivelin com os quais tive o prazer de conviver: Virgínia Damin, Caio Fortes, Raul Henrique Sartori, Michele Xavier Vieira Megda, Eduardo Mariano, José Marcos Leite, Danilo A. Ferreira, Oriel Tiago Kölln, Murilo Moraes e João José de Miranda Milagres.

A todos os estagiários que passaram pela equipe do professor Trivelin durante esse período, que desempenharam um trabalho exemplar.

À equipe do Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA/USP: Clélber, Hugo, Miguel, José A. Bonassi (Pingin), Magda, Bento, Juliana e Glauco; aos professores José Alberto Bendassolli, Jefferson Mortatti e Helder de Oliveira, pelo auxílio constante e prazeroso convívio.

Aos amigos Renato Alessandro Lopes, Carlos Roberto Sant'ana Filho, Alexandre Martins Fernandes, Diego Vendramini, Murilo e Graziela que tornaram a rotina mais agradável.

Às Usinas Santa Adélia, São Luiz e São Martinho, por cederem as áreas para as pesquisas, assim como as equipes de campo, sem as quais nada disto seria possível.

Ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), especialmente José Anderson Forti, Carlos Eduardo Faroni, Claudimir Pedro Penatti e José Luiz Donzelli, pela parceria no Projeto e apoio nas avaliações de campo.

Aos grandes amigos: José Eduardo Holler Branco (Mineiro), Renato Shinkai Gentil (Shimu), André Luis do Amaral Alfonsi (Sandulin), Tobias de Wit (Voluntário), João Luis Nunes Carvalho (Joãozinho), José Thiago das Neves Neto (Neto) e Lucas Peres Miachon (Axadô), pelos momentos de alegria, companheirismo e apoio.

Aos amigos da Universidade de Illinois: Shelbi Henning (USA), Sarah Ronin Heald (USA) e Su Kai - "Sheldon" (China); e os de Urbana-Champaign, Illinois: Igor Bernardi Souza (Brasil), Andréia Henzel (Brasil), George Kamal Atia (Egito) e Talita Amaral (Brasil), que tornaram a jornada mais agradável.

A todos aqueles que, embora não citados nesse texto, participaram dessa etapa da minha vida!

OBRIGADO!

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	10
1 INTRODUÇÃO.....	11
Referências.....	15
2 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO AFFETA O ENRAIZAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	17
Resumo	17
Abstract.....	18
2.1 Introdução	19
2.2 Material e métodos.....	21
2.3 Resultados e discussão.....	26
2.4 Conclusões	40
2.5 Referências.....	40
3 RELAÇÕES ENTRE ADUBAÇÃO NITROGENADA, PROPRIEDADE DOS SOLOS E BIOMASSA DE RAÍZES DA CANA-DE-AÇÚCAR	48
Resumo	48
Abstract.....	49
3.1 Introdução	50
3.2 Material e métodos.....	52
3.3 Resultados	58
3.4 Discussão	70
3.5 Conclusões	72
3.6 Referências.....	73
4 QUANTIFICANDO A MINERALIZAÇÃO DO NITROGÊNIO DO SOLO PARA O MANEJO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	77
Resumo	77
Abstract.....	78
4.1 Introdução	79
4.2 Material e métodos.....	83
4.3 Resultados e discussão.....	95
4.4 Conclusões	108
4.5 Referências.....	109

RESUMO

Desenvolvimento radicular e produtividade da cana-de-açúcar relacionados à mineralização do N do solo e à adubação nitrogenada

A cana-de-açúcar têm despertado o interesse mundial como fonte alternativa de energia renovável. Para que a cultura se estabeleça globalmente como alternativa à produção de bioenergia, questões de sustentabilidade devem ser consideradas. Nesse sentido, a fertilização nitrogenada desempenha papel fundamental, pois influencia a produtividade do canavial e, por outro lado, pode ocasionar impactos ao ambiente se manejada inadequadamente. O objetivo deste estudo foi elucidar questões recentemente levantadas a respeito do manejo da cana-de-açúcar em áreas colhidas sem queima, tais como (i) a colheita mecanizada sucessiva poderá ocasionar degradação física do solo que comprometerá o desenvolvimento do sistema radicular da cultura? (ii) a aplicação de elevadas doses de N sobre a palha e sem o cultivo das soqueiras irá alterar a arquitetura radicular da cana-de-açúcar? e (iii) é possível desenvolver métodos diagnósticos de N do solo para dar suporte ao manejo da adubação nitrogenada da cana-de-açúcar? Três estudos foram desenvolvidos para elucidar as questões acima descritas. Do primeiro capítulo conclui-se que a colheita mecanizada sucessiva do canavial, sem o cultivo da soqueira, altera as propriedades físicas da camada superficial do solo, com efeito negativo na densidade radicular da cultura. Valores de resistência à penetração (RP) inferiores a 0,75 MPa não comprometem o crescimento radicular da cana, porém RP entre 0,75 a 2,0 MPa diminui a densidade radicular e, a partir de 2,0 MPa, há restrição severa ao crescimento radicular. O segundo capítulo apresentou a variação no crescimento radicular da cana-de-açúcar no ciclo de primeira soqueira, em duas áreas (Usina Santa Adélia, USA e São Martinho, USM) e em função de doses de N aplicadas no plantio (0 ou 120 kg ha⁻¹ N) e na soqueira (0 e 150 kg ha⁻¹ N). O efeito da adubação nitrogenada no crescimento de raízes da cana-de-açúcar variou entre as áreas. Em ambos experimentos, a variação na biomassa de raízes durante o ciclo foi mais influenciada pelas propriedades dos solos do que pelas doses de N. Na área da USM a adubação nitrogenada de soqueira aumentou a densidade de raízes na camada superficial (0-0,2 m) e próximo às plantas (<0,3 m), enquanto que no experimento da USA nenhum efeito foi observado. Não houve efeito residual da adubação nitrogenada de plantio na biomassa e no acúmulo de N nas raízes e na parte aérea. A aplicação de altas doses de N na superfície do solo e sobre a palha não alterou significativamente a arquitetura do sistema radicular da cultura. O terceiro capítulo avaliou a resposta à adubação nitrogenada de soqueira em dez experimentos de campo no Estado de São Paulo. Os solos foram divididos em altamente responsivo, moderadamente responsivos e não responsivos. Estudos subsequentes em laboratório mostraram que os solos diferiram quanto à capacidade de fornecimento de N. A mineralização bruta separou adequadamente os solos quanto à responsividade ao N, enquanto os testes químicos *Illinois Soil Nitrogen Test* e *Destilação a Vapor Direta* apresentaram resultados promissores, podendo ser realizados em laboratórios de rotina de análise de solo em um dia de serviço. Estudos adicionais devem ser realizados para verificar a viabilidade de testes de N no solo para melhorar o manejo da adubação nitrogenada da cana-de-açúcar.

Palavras chave: Adubação; Compactação dos solos; Fertilidade do solo; Fertilizantes nitrogenados; Matéria orgânica do solo; Nitrogênio; Raíz

ABSTRACT**Sugarcane yield and root system development as related to soil nitrogen mineralization and nitrogen fertilization**

Sugarcane has been a promising crop for renewable energy production around the world. In order to establish sugarcane as a globally alternative for bioenergy production, sustainability issues should be considered. Synthetic nitrogen (N) fertilizers plays a key role in sugarcane production but, if used improperly, causes environmental threats. The goal of this study was to elucidate current questions about sugarcane management in unburned areas, as follows (i) the successive mechanical harvesting could decrease the soil physical quality and thus compromise root system development? (ii) applying high N rates over the sugarcane straw, without further cultivation would modify the sugarcane root architecture? and (iii) is it possible to use soil N mineralization indexes in order to improve the N management of sugarcane? Three studies were carried out in order to elucidate the aforementioned issues. The findings of the first study is that successive mechanical harvesting without further soil cultivation modify the physical properties of the superficial soil layer, with negative effects on root density. No limitations on root growth occurs when penetration resistance (PR) is lower than 0,75 MPa, but PR from 0,75 to 2,0 MPa decreases root density and PR higher than 2,0 MPa causes severe restriction to root growth. The second study shows the variation in sugarcane root growth over the first ratoon cycle in two trials (Santa Adelia Mill, USA and Sao Martinho Mill, USM) as related to N rates applied at planting (0 or 120 kg ha⁻¹ N) and to the ratoon (0 and 150 kg ha⁻¹N). The effect of N fertilizer addition in sugarcane rooting varied between sites. In both trials, the variation in root biomass was more influenced by soil properties than by N supply. At USM site, ratoon N fertilization increased root density in the superficial soil layer (0-0,2 m) and close to the plants (<0,3 m), while at the SA site no effect of N was observed. There was no carry over effect from N applied at planting in the evaluated parameters (root and shoot biomass and N accumulation). Applying high N rates over the sugarcane straw does not affect significantly the sugarcane root architecture. The third study assess the N fertilizer response of sugarcane in ten field trials at Sao Paulo State. The soils were categorized in highly responsive, moderately responsive and non-responsives to N fertilization. Further studies developed under laboratory conditions showed differences in the soil's N supplying power. The gross mineralization successfully identified the soil's responsiveness to N, and the chemical tests *Illinois Soil Nitrogen Test* and *Direct Steam Distillation* showed promising results and can be performed in routine soil analysis in one work day. Further studies are warranted to assess the feasibility in using soil N tests to improve N fertilizer management in sugarcane.

Keywords: Fertilization; Soil compaction; Soil fertility; Nitrogen fertilizers; Soil organic matter; Nitrogen; Root

1 INTRODUÇÃO

Energia renovável é a maneira mais eficiente de alcançar o desenvolvimento sustentável. Aumentar sua participação na matriz energética mundial irá ajudar a prolongar a existência das reservas de combustíveis fósseis, diminuir as ameaças das mudanças climáticas e garantir melhor segurança no suprimento de energia na escala global (GOLDEMBERG, 2007). A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) têm atraído atenção internacional por ser uma alternativa sustentável à substituição de combustíveis fósseis, com vantagens no que diz respeito à emissão de gases de efeito estufa (NASS et al., 2007; VRIES et al., 2010).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido por Índia, China e Paquistão (Tabela 1). A produtividade média brasileira é de 79 t ha⁻¹, superior à média dos países com área cultivada maior do que 1 milhão de hectares. Entretanto, é evidente que essa produtividade encontra-se muito abaixo do potencial produtivo da cana-de-açúcar, ou mesmo quando considerada a produtividade média obtida em Unidades Sucroalcooleiras que adotam nível mais avançado de tecnologia, que oscila entre 95 e 100 t ha⁻¹.

Tabela 1 - Área, produção e produtividade da cana-de-açúcar nos principais países produtores no ano de 2009

Posição	País	Área	Produção	Produtividade
		— milhões ha —	— milhões t —	— t ha ⁻¹ —
1	Brasil	8.5	671.4	79
2	Índia	4.4	285.0	64
3	China	1.7	116.3	68
4	Paquistão	1.0	50.0	49
5	Tailândia	0.9	66.8	72
6	México	0.7	49.5	70
7	Cuba	0.4	14.9	34
8	Indonésia	0.4	26.5	63
9	Filipinas	0.4	22.9	57
10	Austrália	0.4	31.5	80
11	Colômbia	0.4	38.5	101
12	Argentina	0.4	30.0	84
13	Estados Unidos	0.4	27.5	78
14	África do Sul	0.3	20.5	65
15	Vietnã	0.3	15.2	59
Total		23.8	1661.3	70

Fonte: FAOSTAT (2011)

No Brasil a área cultivada com cana-de-açúcar praticamente dobrou entre os anos de 1990 e 2010 (Tabela 2). A área cultivada com soja também aumentou significativamente, enquanto a área cultivada com milho manteve-se estagnada. A área cultivada com cana-de-açúcar manteve-se praticamente constante durante toda a década de 90, porém apresentou um incremento considerável a partir de 2000, quando atingiu 5 milhões de hectares, passando para 9,1 milhões de hectares em 2010. Esse crescimento demonstra o interesse econômico na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar na última década.

Assim como o aumento da área, também foi expressivo o aumento da produtividade média da cana-de-açúcar no Brasil, passando de 62 t ha⁻¹ em 1990 para 79 t ha⁻¹ em 2010. Entretanto, quando comparado às culturas de soja e milho, observa-se que o aumento da produtividade média da cana foi pequeno, de cerca de 1,3 vez nesse período, enquanto que a produtividade da soja aumentou 1,7 vez e do milho 2,3 vezes. Vários fatores são responsáveis por essas diferenças, podendo-se destacar os impactos favoráveis do melhoramento genético das cultivares de soja e milho, as práticas de fertilização, controle de pragas e de plantas daninhas. Nesse sentido, é fácil perceber a real necessidade de investimento público e privado para o desenvolvimento de tecnologias para o setor sucroalcooleiro, visando aumentar a produtividade média da cana-de-açúcar no Brasil.

Os fertilizantes desempenham papel fundamental no aumento da produtividade da lavoura e, atualmente, respondem por cerca de 15% do custo de produção da cana-de-açúcar. A cana-de-açúcar é a terceira cultura que mais consome fertilizantes no Brasil, e está muito próximo de se tornar a segunda. O consumo de fertilizantes no Brasil em 2010 foi de 24,5 milhões de toneladas, dos quais 8,5 milhões de toneladas foram destinados para a soja (35%), 3,8 milhões de toneladas para o milho (15%) e 3,7 milhões de toneladas para a cana-de-açúcar (15%) (ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS, 2010).

Tabela 2 - Histórico de área, produção e produtividade das três principais culturas cultivadas no Brasil entre os anos de 1990 e 2010

Anos	Culturas								
	Cana	Milho	Soja	Cana	Milho	Soja	Cana	Milho	Soja
	Área (milhões ha)			Produção (milhões t)			Produtividade (t ha ⁻¹)		
1990	4.3	11.4	11.5	263	21	20	61.5	1.9	1.7
1991	4.2	13.1	9.6	261	24	15	62.0	1.8	1.6
1992	4.2	13.4	9.4	271	31	19	64.6	2.3	2.0
1993	3.9	11.9	10.6	245	30	23	63.3	2.5	2.1
1994	4.3	13.7	11.5	292	32	25	67.2	2.4	2.2
1995	4.6	13.9	11.7	304	36	26	66.6	2.6	2.2
1996	4.8	12.0	10.3	317	30	23	66.8	2.5	2.2
1997	4.8	12.6	11.5	332	33	26	68.9	2.6	2.3
1998	5.0	10.6	13.3	345	30	31	69.2	2.8	2.4
1999	4.9	11.6	13.1	334	32	31	68.1	2.8	2.4
2000	4.8	11.9	13.7	326	32	33	67.9	2.7	2.4
2001	5.0	12.3	14.0	344	42	38	69.4	3.4	2.7
2002	5.1	11.8	16.4	364	36	42	71.4	3.1	2.6
2003	5.4	13.0	18.5	396	48	52	73.7	3.7	2.8
2004	5.6	12.4	21.5	415	42	50	73.7	3.4	2.3
2005	5.8	11.5	22.9	423	35	51	72.9	3.0	2.2
2006	6.4	12.6	22.0	477	43	52	75.1	3.4	2.4
2007	7.1	13.8	20.6	550	52	58	77.6	3.8	2.8
2008	8.1	14.4	21.2	645	59	60	79.3	4.1	2.8
2009	8.6	13.7	21.8	692	51	57	80.3	3.7	2.6
2010	9.1	12.7	23.3	717	56	69	79.0	4.4	2.9

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2011

O sistema de produção de cana-de-açúcar no Brasil está passando por profundas mudanças nos últimos anos visando aumentar a sustentabilidade do processo produtivo. A principal mudança diz respeito ao aumento da área colhida mecanicamente sem queima, que está avançando rapidamente no Brasil em função de questões econômicas, sociais e ambientais (GALDOS; CERRI; CERRI, 2009). Nesse novo sistema de colheita de cana, as folhas secas, os ponteiros e as folhas verdes são cortados e deixados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura morta denominada de palhada (PRADO; PANCELLI, 2008), com massa que varia de 13 a 20 t ha⁻¹ de matéria seca (OLIVEIRA et al., 1999).

Nos últimos anos, a colheita mecanizada têm proporcionado mudanças nas práticas de cultivo da cana-de-açúcar. Embora o colchão de palha que permanece sobre o solo possa diminuir a pressão exercida pelo rodado das máquinas, as sucessivas operações mecanizadas de colheita e transporte dos colmos, realizada por equipamentos pesados, pode ocasionar a compactação do solo e comprometer

a produtividade das safras seguintes. O colchão de palha também influencia as operações de cultivo das soqueiras, dificultando a incorporação de fertilizantes, o que têm proporcionado mudanças nas fontes de N utilizadas para adubação de soqueiras de cana-de-açúcar. Por essa razão, a aplicação incorporada de fertilizantes a base de uréia, prática usual de cultivo de soqueiras nas Usinas, têm dado lugar a aplicação superficial de fontes nitrogenadas mais estáveis que resultem em baixa perda de N por volatilização. Nesse novo sistema, normalmente os fertilizantes são aplicados ao lado das linhas da soqueira e sem incorporação. Atualmente questionamentos têm sido levantados a respeito da melhor fonte de fertilizante nitrogenado para áreas de colheira sem queima, assim como da melhor forma de aplicação dos fertilizantes.

Outra mudança que têm ocorrido nas áreas de cana-crua refere-se às doses de N aplicadas. Uma vez que a palha que recobre o solo possui relação C: N elevada, da ordem de 80 a 100:1, durante o processo de decomposição da palha poderá ocorrer imobilização do N pelos microorganismos heterotróficos, podendo resultar em consumo de N de outras fontes como o N do solo ou do fertilizante. Nesse sentido, numa tentativa de compensar a imobilização microbiana do N no processo de decomposição da palha, pesquisadores têm recomendado o aumento das doses de N na adubação de soqueiras de áreas de cana-crua (ROSSETTO et al., 2010). Dessa forma, é comum as Usinas aumentarem entre 20 e 30% a dose de N aplicada em áreas de colheita de cana-crua, em relação à dose normalmente utilizada em condições de colheita de cana queimada. Entretanto, estudos ainda são necessários para verificar a real necessidade de aumento das doses de N em áreas de cana-crua.

Outro fator que pode modificar o manejo da fertilização nitrogenada dos canaviais refere-se ao uso de subprodutos da agroindústria sucroalcooleira e a semeadura de leguminosas em áreas de reforma. Essas práticas têm se tornado cada vez mais comuns em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, especialmente na região Centro-Sul do Brasil. Os principais subprodutos utilizados são a torta de filtro, composto (normalmente originado pela mistura de torta de filtro e cinzas de caldeira) e vinhaça. As principais leguminosas cultivadas em rotação com a cana-de-açúcar são a soja, o amendoim, a *Crotalaria juncea* e a *Crotalaria spectabilis*. Tanto os subprodutos quanto as leguminosas fornecem N ao sistema solo-planta e, dependendo da quantidade de N adicionada ao solo, da capacidade de fixação de N pela leguminosa e da taxa de liberação de N do material, ao longo do tempo essas práticas fornecerão quantidades apreciáveis de N ao sistema que poderão ser deduzidos da necessidade de adubação nitrogenada dos canaviais.

Levando em consideração todas essas mudanças que vem ocorrendo no sistema de produção de cana-de-açúcar no Brasil, esse trabalho buscou responder algumas questões relacionadas ao manejo do canavial nesse novo cenário:

- (i) A colheita mecanizada sucessiva do canavial poderá ocasionar degradação física do solo que possa comprometer o desenvolvimento do sistema radicular da cultura?
- (ii) A aplicação de elevadas doses de N sobre a palha e sem cultivo das soqueiras irá alterar a arquitetura do sistema radicular da cultura?
- (iii) É possível desenvolver métodos de estimativa da mineralização do N do solo que possam dar suporte ao manejo da adubação nitrogenada da cana-de-açúcar?

Buscando elucidar as questões acima descritas a Tese foi elaborada na forma de três capítulos independentes. Os capítulos serão publicados conforme esquema abaixo:

1. OTTO, R.; SILVA, A.P.; FRANCO, H.C.J.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil & Tillage Research**, v. 117, p. 201–210, 2011.
2. OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, E.C.A.; ALCARDE, R.; TRIVELIN, P.C.O. Relationships between nitrogen fertilization, soil properties and sugarcane root biomass.
3. OTTO, R.; MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; TRIVELIN, P.C.O. Quantifying soil nitrogen mineralization to improve fertilizer nitrogen management of sugarcane.

Referências

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes**. São Paulo: ANDA, 2010. 178p

FAOSTAT. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>. Acesso em: 16 nov 2011.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, p. 347-352, 2009.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, Washington, v. 315, p. 808-810, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Séries estatísticas & Séries históricas. Produção agrícola municipal. Acesso em: Nov 2011. Disponível em: http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/lista_tema.aspx?op=0&no=1

NASS, L.L.; PEREIRA, P.A.A.; ELLIS, D. Biofuels in Brazil: an overview. **Crop Science**, Madison, v. 47, p. 2228-2237, 2007.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; PENATTI, C.P. Degradação da palhada de cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 803-809, 1999.

PRADO, R.M.; PANCELLI, M.A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 951-959, 2008

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F.; LANDELL, M.G.A.; CANTARELLA, H.; TAVARES, S.; VITTI, A.C.; PERECIN, D. N and K fertilization of sugarcane ratoons harvested without burning. **Proceeding International Society Sugar Cane Technology**, Veracruz, v. 27, p. 1-8, 2010.

VRIES, S.C., van de VEN, G.W.J.; van ITTERSUM, M.K.; GILLER, K.E. Resource use efficiency and environmental performance of nine major biofuel crops, processed by first-generation conversion techniques. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 34, p. 588-601, 2010.

2 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO AFETA O ENRAIZAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar pode beneficiar o sistema solo-ambiente, porém as colheitas sucessivas podem comprometer a qualidade física do solo. Ainda são poucos os resultados disponíveis na literatura sobre o crescimento e a distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar, assim como sua relação com os atributos físicos do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar e relacionar a distribuição espacial dos parâmetros físicos do solo com a densidade radicular da cana-de-açúcar em área colhida mecanicamente. O estudo foi desenvolvido em Jaboticabal, SP, em um Latossolo Vermelho distrófico com o cultivar SP81 3250. O canavial foi implantado em abril de 2005 e as avaliações foram realizadas em quatro trincheiras em julho de 2008, após três colheitas mecânicas sucessivas e sem cultivo do solo. Em cada trincheira, foram coletados 15 amostras indeformadas de solo para avaliar a densidade do solo (D_s), resistência à penetração (RP), porosidade total (P_t) e umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), além de 15 monólitos para avaliar a densidade radicular (Dr), comprimento radicular (Cr), área radicular (Ar) e umidade radicular (Ur), em posições distintas em relação às plantas e à profundidade. A RP foi determinada em amostras com umidade equilibrada à capacidade de campo. A hipótese de que o sistema radicular da cana-de-açúcar varia verticalmente e horizontalmente em relação ao eixo central da planta e está relacionado aos parâmetros físicos do solo foi comprovada. Os parâmetros físicos do solo variaram significativamente no sentido vertical do perfil do solo, enquanto o sistema radicular da cana-de-açúcar variou tanto no sentido vertical quanto horizontal. A D_s foi de 1,57, 1,55 e 1,39 g cm⁻³ respectivamente para as camadas de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m, enquanto a RP foi de 1,42, 1,20 e 0,87 MPa para aquelas camadas. No centro da entrelinha e na superfície obteve-se a maior RP (1,93 MPa). Houve diminuição da P_t e aumento da RP com o aumento da D_s . Obteve-se relação consistente entre D_s e RP em todas as camadas e, para esse solo, restrições ao crescimento radicular ($RP > 2,0$ MPa) podem ocorrer quando $D_s \geq 1,78$ g cm⁻³. A abordagem da *boundary line*, em combinação com análise de regressão múltipla não-linear, quantificou o efeito da RP na Dr , no Cr e na Ar . O crescimento de raízes de cana-de-açúcar não foi afetado quando $RP < 0,75$ MPa, mas decresceu significativamente com RP entre 0,75 e 2,0 MPa. O crescimento das raízes foi severamente restringido quando $RP > 2,0$ MPa.

Palavras-chave: Sistema radicular; Raízes; Soqueira; Compactação

Abstract

Although mechanized harvesting of sugarcane can benefit the soil-environment system, successive harvests can compromise the physical soil quality. There is a limited amount of information in the literature on the growth and distribution of the sugarcane root system and its relationship with physical soil properties. The objective of this study was to analyze the relationships between the spatial distribution of physical soil properties and sugarcane root density in mechanically harvested areas. The study was carried out in Jaboticabal, SP, Brazil with an Thypic Kandiudox and the SP81 3250 cultivar. Sugarcane plots were established in April 2005, and samples were taken from four trenches in July 2008 after three successive harvests. In each trench, 15 undisturbed soil samples were collected to evaluate bulk density (D_s), penetration resistance (Pr), total porosity (Tp) and moisture at field capacity (θ_{fc}), and 15 monoliths were collected to evaluate the root density (Rd), root length (Rl), root area (Ra) and root moisture (Rm) at different depths and plant locations. Soil moisture was balanced to the field capacity before Pr determination. The hypothesis that the sugarcane root system varied vertically and horizontally relative to the central axis of the plant and in relation to physical soil parameters was validated. Soil physical parameters varied significantly in the vertical direction, but sugarcane root system varied both vertically and horizontally. D_s values were 1.57, 1.55 and 1.39 g cm⁻³ for layers between 0 and 0.2 m, 0.2 and 0.4 m and 0.4 and 0.6 m, respectively. For the same layers, the Pr was 1.42, 1.20 and 0.87 MPa. The largest Pr value (1.97 MPa) was obtained near the surface in the space between rows. As D_s increased, Tp decreased and Pr increased. A consistent relationship was observed between D_s and Pr in all layers, and root growth ($Pr > 2.0$ MPa) may have been restricted when $D_s \geq 1.78$ g cm⁻³. The multivariate boundary line approach, in combination with nonlinear multiple regression analysis, successfully quantified the effects of Pr on Rd , Rl and Ra . Sugarcane root growth was not affected below Pr values of 0.75 MPa, but decreased significantly between 0.75 and 2.0 MPa. Root growth was severely restricted when $Pr > 2.0$ MPa.

Keywords: Root system; Roots; Ratoon; Compaction

2.1 Introdução

A queima das folhas e ponteiros da cana-de-açúcar na fase final de maturação tem sido praticada há séculos no Brasil, para facilitar a colheita manual, o transporte e o processamento dos colmos da cana-de-açúcar. Atualmente, devido a fatores econômicos, ambientais e legais a colheita mecanizada sem queima, com os resíduos deixados sobre o solo, tem sido largamente adotada (GALDOS; CERRI; CERRI, 2009). É esperado que 80% da cana-de-açúcar das principais regiões produtoras do Brasil será colhida sem queima até 2014 (MACEDO; NOGUEIRA, 2004).

A manutenção dos resíduos da cana-de-açúcar no campo afeta a temperatura e o conteúdo de água do solo (DOURADO-NETO et al., 1999), a densidade do solo (TOMINAGA et al., 2002), a taxa de infiltração e a estabilidade dos agregados (GRAHAM; HAYNES; MEYER, 2002), além de contribuir para o aumento do estoque de carbono no solo (GALDOS; CERRI; CERRI, 2009). Apesar desses benefícios, as operações mecanizadas de colheita podem ocasionar compactação do solo devido à pressão exercida pelas máquinas, sendo crescente a preocupação com a degradação física do solo com a intensificação das operações mecanizadas (LARSON; GUPTA; USECHE, 1980; PENG et al., 2004; BOTTA et al. 2005; CHAN et al., 2006; DIAS JUNIOR et al., 2007; VEIGA et al., 2007; AJAHY et al., 2009). As operações mecanizadas na colheita da cana-de-açúcar aumentaram expressivamente a densidade do solo até a camada de 0,3 m especialmente quando a colheita foi realizada em solo úmido, além de ter aumentado a resistência à penetração e diminuído a taxa de infiltração de água (ANTWERPEN et al., 2007). Ainda é desconhecido o efeito da compactação do solo no crescimento e na distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar, assim como na produtividade da cultura, uma vez que o sistema radicular constitui a interface entre o solo e a planta para absorção de nutrientes e água, interferindo diretamente na produtividade.

A compactação do solo é causada principalmente por processos naturais e pelo uso de máquinas pesadas nas operações de cultivo do solo (GRZESIAK, 2009). A compactação se refere ao efeito da consolidação da matriz do solo devido às forças aplicadas sobre este, diminuindo o volume ocupado pelos poros e aumentando a densidade do solo. Tanto a densidade quanto a resistência à penetração são índices de compactação do solo (ABU-HAMDEH, 2003).

O efeito restritivo da compactação do solo pode trazer efeitos físicos e fisiológico ao crescimento e produtividade das plantas devido ao pequeno desenvolvimento do sistema radicular (IIJIMA et al., 1991, GRZESIAK et al., 2002), uma vez que uma elevada resistência do solo influencia a elongação e proliferação das raízes (TU; TAN, 1991). A arquitetura radicular é um aspecto fundamental na produtividade das plantas, especialmente em ambientes caracterizados pela baixa disponibilidade de água e de nutrientes (LYNCH, 1995).

A associação entre parâmetros físicos do solo e a diminuição do crescimento radicular ou da produtividade foi bastante estudada para o milho (IMHOFF et al., 2010; FOLONI; CALONEGO; LIMA, 2003; LABOSKI et al., 1998, MATERECHERA; MLOZA-BANDA, 1997; VEEN; BOONE, 1990) e trigo (MARTINEZ et al., 2008; AGGARWAL et al., 2008; COLLARES et al., 2008; MARTINO; SHAYKEWICH, 1994; MASLE; PASSIOURA, 1987; REEVES; HAINES; COVENTRY, 1984), enquanto menor número de trabalhos foram realizados com algodão (TAYLOR; GARDNER, 1963), soja (FOLONI; LIMA; BÜLL, 2006; BEULTER; CENTURION, 2004), sorgo (BAUMHARDT; JONES; SCHWARTZ, 2008) e eucalipto (SILVA et al., 2008, MISRA; GIBBONS, 1996), sendo ainda raros ou inexistentes com a cultura da cana-de-açúcar. Segundo Chopart et al. (2008) é essencial determinar as características do sistema radicular da cana-de-açúcar em condições de campo.

No entanto, relações entre a densidade do solo ou resistência à penetração e o crescimento de raízes podem ser difíceis de serem obtidas em condições de campo devido à variabilidade do crescimento radicular em resposta às propriedades físicas e químicas do solo. Uma possível alternativa seria utilizar modelos empíricos que relacionam o crescimento vegetal com as condições do ambiente. Segundo Webb (1972), em experimentos biológicos a relação entre variáveis dependentes e independentes normalmente são confundidos por outros fatores de interação. Quando os dados são apresentados em gráficos, a dispersão dos valores em relação à curva são resultantes não somente dos erros de medida e da variabilidade do material biológico, mas também da interação com outros fatores. Ainda conforme Webb (1972), o limite superior dos pontos pode ser identificado como a linha representando a relação entre a variável dependente e independente, quando não ou menos afetados por outros fatores. Esse autor definiu essa metodologia como *boundary line*, que vem sendo utilizada desde então para tentar melhorar o entendimento das relações obtidas em experimentos que envolvem materiais biológicos e o ambiente. A mais recente aplicação do método foi para identificar a relação entre o crescimento de raízes de milho e as propriedades físicas do solo (IMHOFF et al., 2010).

Estimativas do volume de solo acessível ao sistema radicular das plantas requerem informações da densidade de comprimento de raízes, da distância média entre as raízes (BARBER, 1971; GARDNER, 1960, 1964; NEWMAN, 1966) e sua distribuição espacial no solo. Esses parâmetros são difíceis de serem quantificados no campo devido a limitações técnicas e pela variabilidade das propriedades das raízes dentro de uma parcela, assim como pela própria variabilidade das propriedades do solo que influenciam o crescimento das raízes (CHOPART et al., 2008). Além disso, deve-se considerar que a densidade do solo raramente é homogênea nos

horizontes e as raízes tendem a seguir zonas de menor resistência à penetração (BARRACLOUGH; WEIR, 1988).

A resistência à penetração (*RP*) e o conteúdo de água no solo são altamente inter-relacionados, sendo ambos afetados pela textura, estrutura, agregação e densidade do solo (GLINSKI; LIPIEC, 1990). À medida que o conteúdo de água do solo aumenta, a resistência à penetração diminui (LABOSKI et al., 1998), de tal forma que medidas isoladas de densidade do solo não podem explicar como as propriedades físicas do solo afetam o crescimento das raízes (VOORHEES, 1992). Em diversos trabalhos, têm sido adotado o valor de resistência à penetração de 2 MPa como o limite a partir do qual há redução no crescimento radicular das plantas (LETEY, 1966; MARTINO; SHAYKEWICH, 1994; SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999; LAPEN et al., 2004).

A hipótese deste trabalho é de que a distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar varia horizontal e verticalmente em relação ao eixo da planta e está relacionada à qualidade física do solo. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar e estabelecer relações entre parâmetros do sistema radicular da cana-de-açúcar e as condições físicas do solo em amostras coletadas em diversas posições do perfil do solo, em condição de campo e após três colheitas mecânicas do canavial.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi desenvolvido em área cultivada com cana-de-açúcar da Usina Santa Adélia, no município de Jaboticabal, São Paulo, Brasil (21° 19.98'S; 48° 19.03'W), com o cultivar SP81 3250. O solo da área é um Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006) e as análises químicas e físicas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química e física do Latossolo Vermelho Distrófico típico

Horizonte diagnóstico	pH	MO† g kg ⁻¹	P‡ mg kg ⁻¹	K‡	Ca‡	Mg‡	Al§	H+Al§	T¶	V# %	Argila‡‡ g kg ⁻¹
	H ₂ O			mmol _c kg ⁻¹							
Ap (0-0,15 m)	6,3	23	10	3,6	18	13	0	17	51,6	67	285
A ₂ (0,15-0,37 m)	6,0	16	11	2,2	9	5	2	18	34,2	47	296
BA (0,37-0,56 m)	5,1	11	3	1,2	2	1	8	31	35,2	12	347
BW ₁ (0,56-0,96 m)	5,6	8	1	0,9	3	1	3	20	24,9	20	371
BW ₂ (+0,96m)	5,9	7	1	3,5	2	1	0	9	15,5	42	367

†MO, matéria orgânica, determinada pelo método de Walkey-Black (RAIJ et al., 2001)

‡P, K, Ca e Mg, extração com resina trocadora de íons (CANTARELLA; RAIJ; QUAGGIO, 1998)

§Al extraído com 1 N KCl (RAIJ et al., 2001) e H+Al determinado em solução tampão SMP (QUAGGIO; RAIJ; MALAVOLTA, 1985)

#V, saturação por bases.

‡‡determinada pelo método do densímetro (GE; OR, 2002).

No plantio, em abril de 2005, o preparo do solo foi convencional, com aplicação de herbicida para dessecação da soqueira antiga, aplicação de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, aração, gradagem intermediária e sulcação. Os sulcos foram abertos com aproximadamente 0,35 m de profundidade, foram utilizadas 15 gemas viáveis por metro e foi aplicado 40, 120 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, conforme Spironello et al. (1997). As fontes de N, P₂O₅ e K₂O foram, respectivamente, uréia (45% de N), superfosfato triplo (45% de P₂O₅) e cloreto de potássio (60% de K₂O).

O campo experimental não foi queimado antes das colheitas. Nas adubações de soqueira, após o 1º e 2º cortes, respectivamente em julho de 2006 e julho de 2007, foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de N e 150 kg ha⁻¹ de K₂O. A fonte de nitrogênio foi o sulfato de amônio (21% de N e 24% de S) após o 1º corte e o nitrato de amônio (32% de N) após o 2º corte, enquanto a fonte de potássio foi o cloreto de potássio em todos os cortes. Os fertilizantes foram aplicados superficialmente sobre a palha e sem incorporação, não sendo realizado cultivo mecânico em nenhum dos cortes. Todas as colheitas foram realizadas mecanicamente (colhedora John Deere® 3520 com esteiras e massa total de 19.050 kg).

2.2.2 Avaliações

As amostras foram coletadas em 24 de julho de 2008, logo após a colheita do 3º corte. Para isso, foram abertas quatro trincheiras (quatro repetições) de 1,5 m de largura, 0,8 m de comprimento e 0,8 m de profundidade, entre duas linhas de cana-de-açúcar. Após a passagem da colhedora o local em que foram abertas as trincheiras foi irrigado para facilitar e melhorar a qualidade da amostragem.

Em cada uma destas trincheiras, foram coletados 15 monólitos para avaliação do sistema radicular e 15 anéis volumétricos para avaliar os parâmetros físicos do solo, sendo estes retirados no centro de cada monólito. A sequência de avaliações realizadas no estudo pode ser visualizada na Figura 1.

Os monólitos apresentaram 0,3 m de largura, 0,2 m de altura e 0,2 m de profundidade, ou seja, $0,012 \text{ m}^3$. Os monólitos foram coletados nas profundidades de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m e 0,4 a 0,6 m e, para cada profundidade, foram coletados cinco monólitos em relação às linhas da cultura, espaçados 0,3 m cada, totalizando 1,5 m de espaçamento entrelinhas. No centro de cada um destes monólitos, foram obtidas amostras indeformadas de solo, por meio de coleta de anel volumétrico com aproximadamente 100 cm^3 (5 cm de altura e 5 cm de diâmetro), na posição horizontal. A Figura 2 apresenta o esquema de retirada dos monólitos e das amostras indeformadas. Após a coleta, os anéis volumétricos tiveram as extremidades tampadas antes do envio ao laboratório.

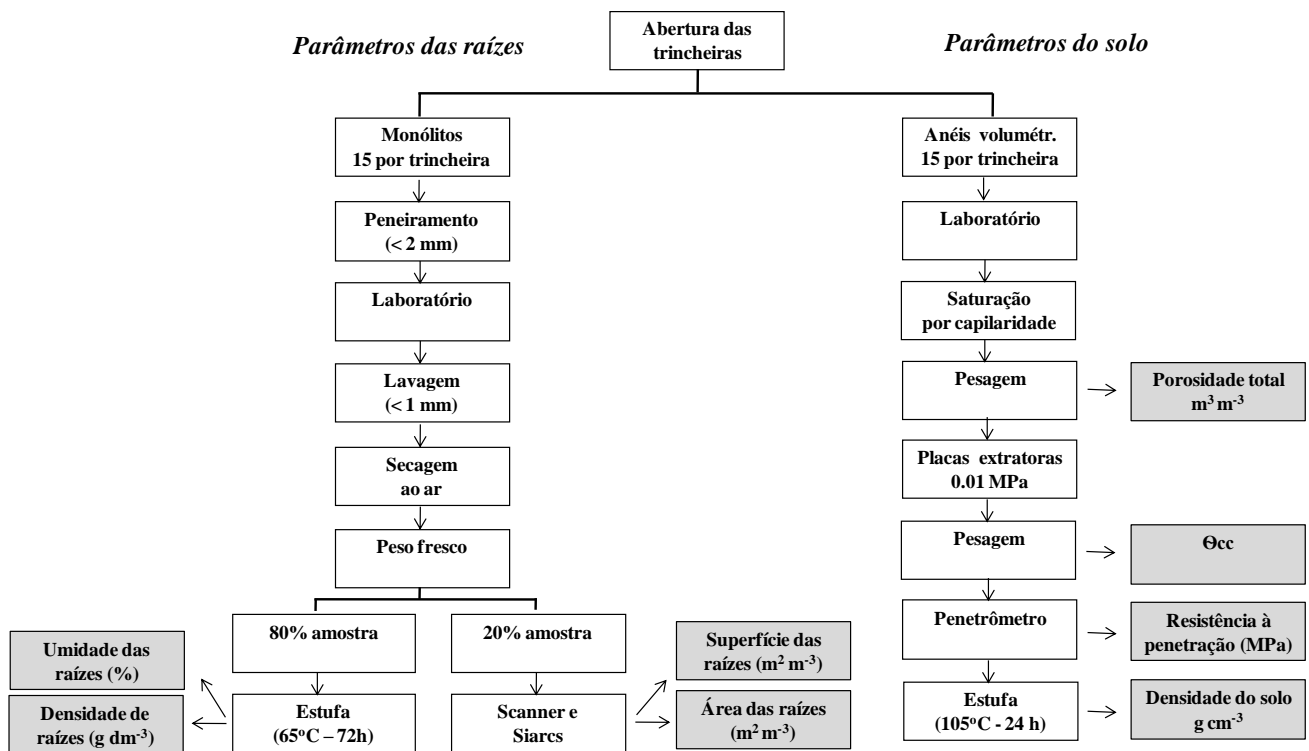


Figura 1 - Sequência de avaliações realizadas para obtenção dos parâmetros do solo e das raízes utilizados no estudo. As caixas cinzas apresentam os resultados obtidos

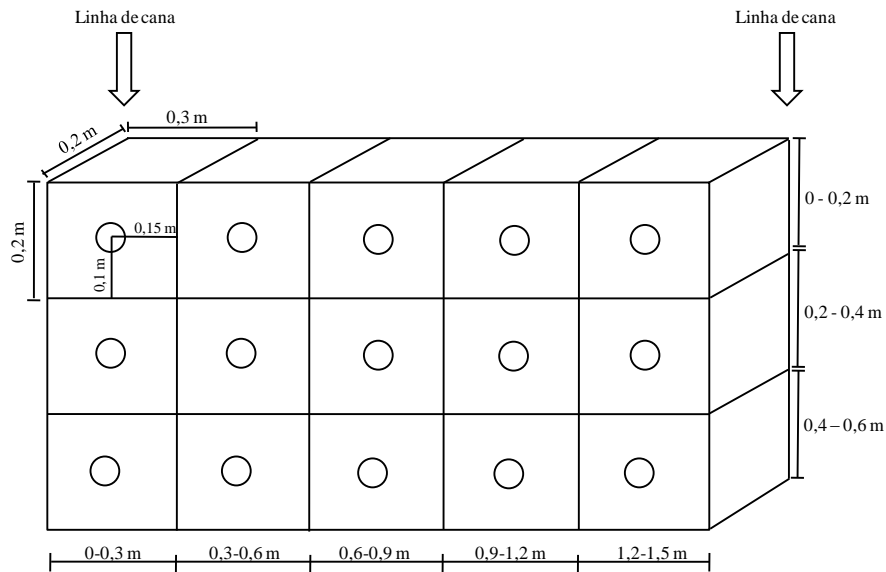


Figura 2 - Esquema de amostragem dos monólitos, para avaliação do sistema radicular, e das amostras indeformadas com anel volumétrico, para avaliação dos parâmetros físicos do solo

No campo, o solo contido em cada monólito foi passado em peneira com malha de 2 mm de diâmetro, procedimento também adotado por Vasconcelos et al. (2003), e todas as raízes coletadas foram acondicionadas em saco plástico. No laboratório as raízes foram lavadas sobre peneiras com malha de 1 mm de diâmetro e secas ao ar para retirada do excesso de água. Em cada amostra, o total de raízes foi homogeneizado e retirado uma subamostra de 20% para medição do comprimento e da área das raízes. Essa subamostra foi acondicionada uniformemente em transparências de plástico, sem sobreposição, e submetidas à digitalização em Scanner HP[®] 3400. A área e o comprimento de cada subamostra foram quantificados pelo programa SIARCS 3.0 (JORGE, 1996). As subamostras com 20% da massa da amostra, assim como o restante da amostra (80% da massa total) foram secas separadamente em estufa a 65 °C, durante 72 h, até a estabilização da massa, para permitir a extrapolação da área e comprimento de raízes para toda a amostra. Após secagem, foi obtida a massa seca de raízes de cada amostra em balança semi-analítica, com precisão de 0,01 g. Dessa maneira, obteve-se a densidade (g dm^{-3}), comprimento (cm dm^{-3}) e área de raízes ($\text{cm}^2 \text{dm}^{-3}$) de cada um dos 15 monólitos obtidos em cada trincheira.

No laboratório, as amostras indeformadas de solo foram saturadas por capilaridade, sendo posteriormente obtida a massa, permitindo calcular a porosidade total. Em seguida, as amostras foram submetidas ao potencial mátrico de 1,0 m de coluna de água (m.c.a) por meio de pressão aplicada a placas porosas (DANE; HOPMANS, 2002). Após a estabilização da pressão entre a placa porosa e as amostras indeformadas, foi obtida a massa em balança semi-analítica (precisão de 0,01 g) para determinação da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}). A resistência à penetração (RP) foi

determinada em cada uma das amostras indeformadas com um penetrômetro desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP [descrito detalhadamente em TORMENA; SILVA; LIBARDI (1999)]. O penetrômetro apresenta cone com semi-ângulo de 30°, área da base de 0,1167 cm² e velocidade de penetração de 1 cm min⁻¹ (BRADFORD, 1980). Foram descartadas as leituras da parte superior (1 cm) e inferior (1 cm), de forma padronizada para todas as amostras, considerando-se somente as leituras dos três centímetros centrais das amostras. Obtidas as leituras, as amostras foram secas em estufa a 110° C para determinação do teor de água e da densidade do solo (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

2.3 Determinação da *boundary line*

Para utilizar a abordagem do *boundary line* na relação entre as propriedades físicas do solo e o crescimento de raízes, os parâmetros de raízes foram transformados para fração (F) do valor máximo obtido, segundo Bergstrom e Beauchamp (1993) e Imhoff et al. (2010). Para a massa de raízes (g dm⁻³) obtida em cada local ($n = 60$), o valor F foi calculado pela relação entre o resultado e o maior valor no conjunto de dados da respectiva profundidade. Os valores F de cada parcela e os respectivos valores de resistência à penetração (MPa) foram plotados em um diagrama de dispersão. Somente os pontos localizados no limite superior foram utilizados para ajuste do modelo de regressão não-linear. Os pontos localizados abaixo desse ponto não foram incluídos porque podem refletir a influência de outras variáveis independentes na variável resposta. No caso específico deste trabalho, baixa densidade radicular é esperada em locais distantes do eixo central da planta e em maiores profundidades, podendo não refletir o efeito da resistência à penetração no crescimento das raízes.

Para avaliar os efeitos da RP nos parâmetros das raízes (F values) utilizando a abordagem do *boundary line*, foram avaliadas as funções linear, quadrática e assimétrica em formato de S seguindo o formato da equação proposta por Van Genuchten (1980). A última, que apresentou a maior significância dos parâmetros, foi aplicada de acordo com o modelo proposto por Imhoff et al. (2011). A função foi quantificada usando regressão não-linear no programa R (R Development Core Team, 2005). O formato inicial da função foi:

$$PR = \left(\frac{b_1 + (1 - b_1)}{1 + (b_2 \cdot R_p)^{b_3}} \right)^{1 - 1/b_3}$$

em que PR são os *F values* dos parâmetros das raízes, R_p é a resistência à penetração (MPa) e b_1 , b_2 e b_3 são constantes geradas pelo modelo que regulam o formato das curvas.

Para comparar os parâmetros do solo (P_t , Θ_{cc} , D_s e R_p) e das raízes (D_r , C_r , A_r e U_r) entre as camadas e através da distância da linha de plantio, o erro padrão da média foi calculado usando as quatro repetições de cada parâmetro.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo

A porosidade total (P_t) foi maior na camada de 0,4 a 0,6 m em relação às camadas de 0 a 0,2 m e 0,2 a 0,4 m, com valores médios de 0,45, 0,41 e 0,41 $m^3 m^{-3}$ para essas camadas, respectivamente (Tabela 2). A P_t praticamente não se alterou horizontalmente no solo, evidenciando que o tráfego de máquinas após as colheitas que foram realizados na área apresentaram pouco efeito nesta propriedade do solo, tendo em vista que normalmente o rodado das máquinas passa no centro da entrelinha. Neves et al. (2003) observaram P_t de 0,49 $m^3 m^{-3}$ em frações compactadas e 0,60 $m^3 m^{-3}$ em fração não compactada de Latossolos com conteúdo de argila variando de 65 a 79%. Tavares Filho et al. (2010), trabalhando com Latossolos de textura arenosa, obtiveram P_t variando de 0,42 a 0,62 $m^3 m^{-3}$ em solo sob mata nativa (condição natural) e de 0,30 a 0,50 $m^3 m^{-3}$ em solo cultivado com cana-de-açúcar, que apresentou a menor qualidade física dos solos avaliados.

O teor de água retido no solo na capacidade de campo (Θ_{cc}) seguiu um padrão muito semelhante ao da P_t , aumentando com a profundidade e sem sofrer alterações no sentido horizontal (Tabela 2). A Θ_{cc} está relacionada com o grau de estruturação dos agregados do solo, que interferem diretamente na microporosidade, que é a principal responsável pela retenção de água nesta tensão.

A profundidade de 0,4 a 0,6 m apresentou menor D_s (Tabela 2), certamente por sofrer pequeno efeito das operações de preparo do solo e, nesse trabalho, foi considerada como a D_s sob condições naturais deste solo. Considerando a D_s da camada de 0,4 a 0,6 m (1,39 $g cm^{-3}$, em média) como a D_s sob condições naturais do solo, o grau de compactação nas camadas de 0 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m foi, respectivamente, de 13 e 12% (1,57 e 1,55 $g cm^{-3}$, respectivamente) (Tabela 2). Era esperado maior D_s na camada superficial, que sofre o efeito direto do rodado das máquinas nas operações

agrícolas de colheita e transporte da cana, porém a D_s foi semelhante nas camadas de 0 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m. Os resíduos da cana-de-açúcar possivelmente aliviaram a compressão aplicada pelas máquinas na camada superficial do solo, uma vez que resíduos vegetais diminuem a compactação do solo causada por máquinas (FRANZEN; LAL, 2004; ESS; VAUGHAN; PERUMPRAL, 1998; BRAIDA et al., 2006; BLANCO-COQUI; LAL, 2009). Elevado teor de matéria orgânica e densidade de raízes na camada superficial do solo também favorece na redução da compactação da superfície do solo (SOANE, 1990). Resultados semelhantes obtidos por Antwerpen et al. (2008) mostraram um aumento na D_s na camada até 0,3 m quando máquinas retiraram os colmos de cana-de-açúcar da área.

Era esperado que as posições ao lado da linha de cana e nas profundidades de 0 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m apresentassem as menores D_s , pois nesses locais foi realizada a sulcação com o objetivo de aumentar a porosidade e fornecer condições adequadas ao desenvolvimento inicial do sistema radicular. Entretanto, nesses locais foi encontrada D_s relativamente elevada, até mesmo semelhante à D_s observada na entrelinha e na camada de 0 a 0,2 m. Deve-se considerar que, na ocasião da sulcação, as hastas laterais do implemento sulcador imprimem determinada pressão sobre as paredes laterais do sulco e, quando a operação é realizada com o solo parcialmente úmido, pode resultar em compactação dessa região, resultado em valores elevados de D_s .

A resistência à penetração (RP) é um bom parâmetro para avaliar a qualidade física do solo para o crescimento das raízes das plantas, pois conforme Letey (1985) é um dos fatores que afetam diretamente o crescimento das plantas, juntamente com água, oxigênio e temperatura. Segundo Letey (1985), a densidade do solo, a agregação, a estabilidade de agregados, a textura e a distribuição dos poros são fatores que interferem nos anteriores e, portanto, afetam indiretamente o crescimento das plantas. Como o conteúdo de água do solo influencia diretamente a RP (LABOSKI et al., 1998), foi necessário estabilizar o conteúdo de água em todas as amostras antes da avaliação da RP, permitindo comparar os resultados obtidos nos diferentes locais em relação à parede do perfil de solo.

A RP diminuiu com o aumento da profundidade e no sentido horizontal do perfil do solo somente houve variação na camada de 0 a 0,2 m (Tabela 2). No centro da entrelinha obteve-se a maior RP ($1,93 \pm 0,23$ MPa), certamente por ser a posição do perfil do solo que recebeu diretamente a pressão exercida pelos implementos utilizados na colheita da cana. A RP foi mais sensível do que a D_s aos efeitos do tráfego das máquinas.

Deve-se ressaltar que todas as colheitas foram realizadas com solo seco, uma vez que trata-se de área experimental. Nesse sentido, como mostrado por Antwerpen et al. (2008), o tráfego de máquinas em solo úmido promove alteração mais expressiva na D_s do que o tráfego em solo seco.

Portanto, o fato das colheitas terem sido realizadas sempre em condições de solo seco pode ter limitado a obtenção de maiores valores de D_s e RP na entrelinha da cultura. Deve-se considerar que as operações de colheita nas Usinas ocorrem durante o ano inteiro e, eventualmente, as áreas são colhidas com solo úmido, podendo resultar em compactação mais acentuada do solo do que observado neste estudo.

A RP foi de 1,42, 1,20 e 0,87 MPa respectivamente para as camadas de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m (Tabela 2). Em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, Costa et al. (2007) obtiveram RP variando de 0,22 a 1,24 MPa em um Latossolo Vermelho Amarelo e de 0,91 a 2,52 MPa em um Nitossolo Vermelho eutroférico. Considerando a RP de 2,0 MPa como o limite para o crescimento de raízes de uma cultura, conforme descrito por Taylor, Robertson e Parker Junior (1966), observa-se que para as condições deste estudo a RP média de cada local não atingiu valores superiores a este, embora algumas repetições tenham superado esse valor. Deve-se considerar, entretanto, que neste estudo o conteúdo de água das amostras foi equilibrado à tensão correspondente à capacidade de campo ($\psi = -1,0$ m.c.a.). Dessa maneira, não se pode afirmar que não existiu resistência mecânica à penetração das raízes neste solo, pois em épocas que o conteúdo de água do solo seja inferior ao da capacidade de campo, a RP pode superar o valor crítico para o crescimento das raízes, como observado por Laboski et al. (1998) para a cultura do milho.

De maneira geral, todos os parâmetros físicos do solo apresentaram variação expressiva no sentido vertical (em profundidade) e pequena variação no sentido horizontal do perfil do solo (Tabela 2). Isso indica que as operações de preparo do solo para implantação do canavial podem ter comprometido mais a qualidade física do solo do que propriamente o tráfego da colhedora e dos transbordos nas colheitas sucessivas. As operações de preparo do solo podem ter causado desagregação das partículas do solo, favorecendo o rearranjo das partículas de forma mais ordenada, permitindo assim um aumento na D_s , diminuição da PT e, por fim, aumento na RP nas camadas superficiais. Em geral, a intensificação das atividades agrícolas causa modificações na estrutura do solo, com mudanças na forma, no tamanho e na estabilidade dos agregados, assim como aumento na D_s , redução da Pt e aumento da RP (SILVA; MIELNICZUK, 1997; ALVARENGA; DAVIDE, 1999; TAVARES FILHO et al., 2001; SILVA; SILVA; FERREIRA, 2005).

Nas três camadas houve diminuição da Pt com o aumento da D_s (Figura 3). Entretanto, para a θ_{cc} somente obteve-se relação expressiva deste parâmetro com a D_s na camada de 40 a 60 cm. A ausência de relação entre estes parâmetros nas camadas superficiais pode ser devido ao efeito contínuo do preparo do solo nessa área, causando a degradação física do solo. A relação positiva

obtida entre θ_{cc} e Ds (Figura 3) na camada de 40 a 60 cm também foi observada por Tormena, Silva e Libardi (1999) e Leão et al. (2006).

Tabela 2 – Variação da porosidade total (Pt), umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}), densidade do solo (Ds) e resistência a penetração (RP) entre duas linhas de cana-de-açúcar e em função da profundidade de amostragem. Valores entre parênteses representam o erro padrão da média (n=4)

Prof. m	Distância da linha de cana-de-açúcar (m)								Média			
	0-0,3		0,3-0,6		0,6-0,9		0,3-0,6			0-0,3		
<i>Pt (m³ m⁻³)</i>												
0-0,2	0,43	(0,03)	0,39	(0,02)	0,39	(0,03)	0,40	(0,03)	0,42	(0,01)	0,41	(0,01)
0,2-0,4	0,39	(0,02)	0,42	(0,01)	0,41	(0,01)	0,41	(0,02)	0,41	(0,03)	0,41	(0,01)
0,4-0,6	0,46	(0,01)	0,47	(0,04)	0,45	(0,02)	0,44	(0,01)	0,45	(0,02)	0,45	(0,01)
Média	0,43	(0,01)	0,43	(0,02)	0,42	(0,01)	0,42	(0,01)	0,42	(0,01)		
<i>Θ_{cc} (m³ m⁻³)</i>												
0-0,2	0,24	(0,01)	0,25	(0,01)	0,24	(0,01)	0,25	(0,01)	0,28	(0,01)	0,25	(0,01)
0,2-0,4	0,28	(0,01)	0,26	(0,01)	0,27	(0,01)	0,27	(0,01)	0,26	(0,01)	0,27	(0,01)
0,4-0,6	0,28	(0,01)	0,28	(0,02)	0,27	(0,01)	0,27	(0,01)	0,27	(0,01)	0,27	(0,01)
Média	0,27	(0,01)	0,26	(0,01)	0,26	(0,01)	0,26	(0,01)	0,27	(0,01)		
<i>Ds (g cm⁻³)</i>												
0-0,2	1,50	(0,08)	1,60	(0,06)	1,61	(0,01)	1,57	(0,06)	1,56	(0,02)	1,57	(0,02)
0,2-0,4	1,60	(0,04)	1,51	(0,04)	1,54	(0,02)	1,54	(0,04)	1,55	(0,10)	1,55	(0,02)
0,4-0,6	1,40	(0,03)	1,35	(0,08)	1,36	(0,06)	1,40	(0,02)	1,42	(0,04)	1,39	(0,02)
Média	1,50	(0,04)	1,49	(0,05)	1,50	(0,04)	1,50	(0,03)	1,51	(0,04)		
<i>RP (MPa)</i>												
0-0,2	1,31	(0,43)	1,37	(0,33)	1,93	(0,23)	1,26	(0,30)	1,24	(0,08)	1,42	(0,13)
0,2-0,4	1,30	(0,23)	1,08	(0,03)	1,26	(0,03)	1,19	(0,20)	1,19	(0,31)	1,20	(0,08)
0,4-0,6	0,85	(0,19)	0,83	(0,38)	0,84	(0,31)	0,87	(0,11)	0,97	(0,21)	0,87	(0,10)
Média	1,16	(0,17)	1,09	(0,17)	1,34	(0,18)	1,11	(0,12)	1,14	(0,12)		

Em todas as profundidades obteve-se relação consistente entre a RP e Ds (Figura 3). Quando considerados os resultados das três camadas conjuntamente, a relação obtida foi $RP = 3,162 * Ds - 3,614$ ($R^2=0,69$, $P<0,05$). Utilizando a equação acima descrita e, considerando a RP igual a 2,0 MPa como sendo limite para o crescimento das plantas (TAYLOR; ROBERTSON; PARKER JUNIOR, 1966), observa-se que, para o solo em questão, esse valor é atingindo a partir da Ds igual a 1,78 g dm⁻³. Deve-se considerar, entretanto, que esse valor refere-se ao solo com teor de água equivalente à capacidade de campo (potencial da água no solo a uma tensão de - 1,0 m.c.a.) e que, quando o solo estiver mais seco, a RP de 2,0 MPa será atingida com uma densidade inferior à de 1,78 g dm⁻³. Silva et al. (2008) também não encontraram valores de RP superiores a 2,0 MPa com conteúdo de água equivalente à capacidade de campo, em uma amplitude de 180 amostras coletadas em solos cultivados com cana-de-açúcar, porém observaram valores de RP muito superiores a 2 MPa com a diminuição do teor de água do solo.

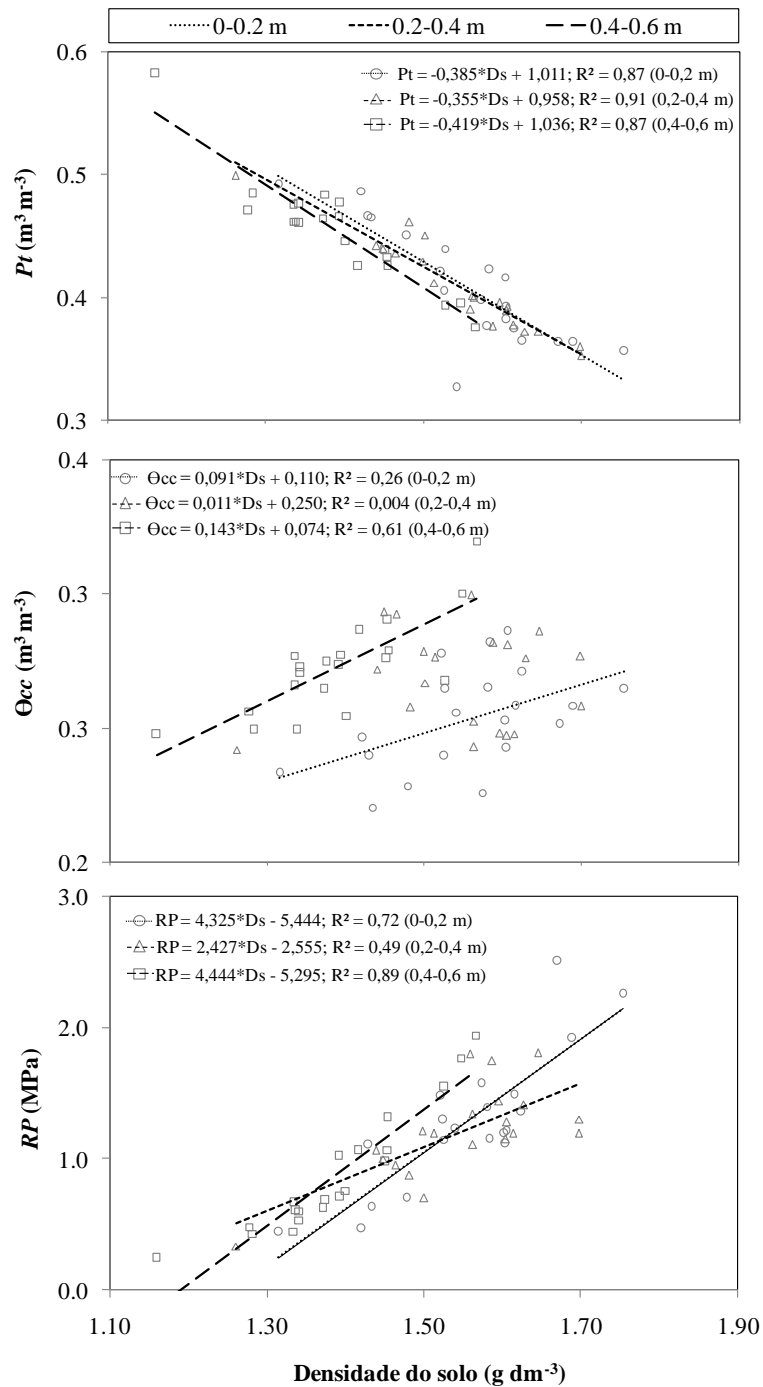


Figura 3 - Relação da Densidade do solo com a porosidade total (P_t), umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}) e resistência à penetração (RP) nas três profundidades

2.3.2 Variabilidade espacial do sistema radicular da cana-de-açúcar

A densidade, o comprimento e a área das raízes diminuíram consistentemente com o aumento da distância do eixo central da planta (no sentido da entrelinha da cultura) e com o aumento da profundidade (Tabela 3). Diminuição na densidade de raízes com a profundidade está de acordo com

outros autores (COSTA et al., 2007; BATTIE-LACLAU; LACLAU, 2009; AZEVEDO et al., 2011), uma vez que a densidade de raízes de cana-de-açúcar diminuiu exponencialmente com a profundidade (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005). Na colheita da cana-planta de um canavial não irrigado no Brasil, Battie-Laclau e Laclau (2009) encontraram densidade de comprimento de raízes de 0,46, 0,28 e 0,22 cm cm⁻³ na camada de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m de profundidade, respectivamente. No presente estudo, na média de todas as distâncias entre a linha de cana, o comprimento das raízes foi de 0,33, 0,19 e 0,10 cm cm⁻³ para as mesmas camadas de solo (calculado a partir da Tabela 3).

A diminuição da densidade de raízes da posição da linha para entrelinha no perfil de solo estão em conformidade com as observações de Costa et al. (2007) e Azevedo et al. (2011). Os últimos autores observaram densidade de comprimento de raízes variando de 1,2 cm cm⁻³ sobre a linha até 0,3 cm cm⁻³ na entrelinha, ligeiramente superiores aos resultados deste estudo (Tabela 3). Battie-Laclau e Laclau (2009), por outro lado, não encontraram diferenças na densidade de raízes na linha e na entrelinha, provavelmente devido às melhores condições para o crescimento radicular ao longo do ciclo de cana-planta. De acordo com estes autores, diversos fatores podem influenciar a densidade de comprimento de raízes, incluindo propriedades dos solos, clima, características das cultivares, método de preparo do solo, práticas de adubação e a idade do canavial.

As raízes das camadas mais profundas do perfil de solo apresentaram maior teor de umidade, com valores de 60, 63 e 68 % de umidade, respectivamente para as camadas de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m (Tabela 3). Não ocorreram variações de umidade das raízes no sentido horizontal do solo. O fato das raízes mais profundas serem mais tenras é bem relatado na literatura, porém valores quantitativos desta evidência não estão disponíveis para a cultura da cana-de-açúcar. A maior umidade das raízes das camadas mais profundas provavelmente ocorre pelo fato das raízes dessas camadas serem responsáveis principalmente pela absorção de água, enquanto as superficiais pela absorção de nutrientes. Battie-Laclau e Laclau (2009) observaram, tanto para sistema irrigado quanto para o não irrigado, que as raízes das camadas mais profundas do solo (> 1,0 m) são ferramentas importantes para suprir o requerimento de água da cultura em períodos de seca, aproveitando a água armazenada nas camadas profundas do solo. Além disso, as camadas mais profundas apresentaram maior Pt e maior Θ_{cc} (Tabela 2), indicando um maior potencial de armazenamento de água. Por isso, como nessa camada a água está retida em tensões menores, é provável que as raízes das camadas mais profundas tenham mais facilidade em absorver água dessa camada, aumentando o teor de umidade destas raízes.

Tabela 3 – Variação da densidade radicular (Dr), comprimento radicular (Cr), área radicular (Ar) e umidade radicular (Ur) entre duas linhas de cana-de-açúcar e em função da profundidade de amostragem. Valores entre parênteses representam o erro padrão da média (n=4)

Prof. m	Distância da linha de cana-de-açúcar (m)					Média
	0-0,3	0,3-0,6	0,6-0,9	0,3-0,6	0-0,3	
	<i>Dr (g dm⁻³)</i>					
0-0,2	1,88 (0,78)	0,24 (0,05)	0,13 (0,03)	0,29 (0,07)	1,12 (0,47)	0,73 (0,22)
0,2-0,4	1,31 (0,71)	0,10 (0,01)	0,08 (0,01)	0,10 (0,03)	0,50 (0,08)	0,42 (0,17)
0,4-0,6	0,31 (0,05)	0,11 (0,05)	0,07 (0,01)	0,21 (0,05)	0,36 (0,13)	0,21 (0,04)
Média	1,17 (0,37)	0,15 (0,03)	0,09 (0,01)	0,20 (0,04)	0,66 (0,18)	
	<i>Cr (cm dm⁻³)</i>					
0-0,2	741 (283)	145 (38)	91 (16)	140 (37)	531 (188)	330 (85)
0,2-0,4	554 (339)	62 (7)	59 (7)	68 (18)	189 (31)	186 (75)
0,4-0,6	127 (10)	56 (23)	71 (14)	111 (23)	123 (41)	97 (12)
Média	474 (154)	88 (18)	73 (8)	106 (17)	281 (80)	
	<i>Ar (cm² dm⁻³)</i>					
0-0,2	114 (43)	20 (5)	11 (2)	20 (6)	79 (30)	49 (13)
0,2-0,4	88 (51)	9 (1)	8 (0)	9 (3)	32 (5)	29 (12)
0,4-0,6	22 (3)	9 (4)	8 (1)	18 (4)	22 (8)	16 (2)
Média	74 (23)	13 (2)	9 (1)	16 (3)	45 (12)	
	<i>Ur (%)</i>					
0-0,2	63 (4)	60 (7)	59 (2)	54 (4)	63 (2)	60 (2)
0,2-0,4	64 (5)	60 (3)	64 (3)	58 (3)	69 (1)	63 (2)
0,4-0,6	68 (3)	61 (8)	70 (4)	68 (3)	71 (3)	68 (2)
Média	65 (2)	60 (3)	64 (2)	60 (2)	67 (1)	

Os dados da Figura 4 indicam que as raízes das camadas mais profundas (0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m) apresentam menor comprimento radicular e menor área radicular por unidade de peso de raiz. Esses resultados podem ser observados considerando o maior coeficiente de inclinação da reta obtido com os dados da camada de 0 a 0,2 m, para as duas variáveis analisadas. Essas constatações indicam que as raízes das camadas mais profundas são mais grossas do que as raízes das camadas mais superficiais (que apresentam maior comprimento e maior área radicular por unidade de peso), o que pode explicar o fato das raízes mais profundas terem apresentado maior teor de água (Tabela 3).

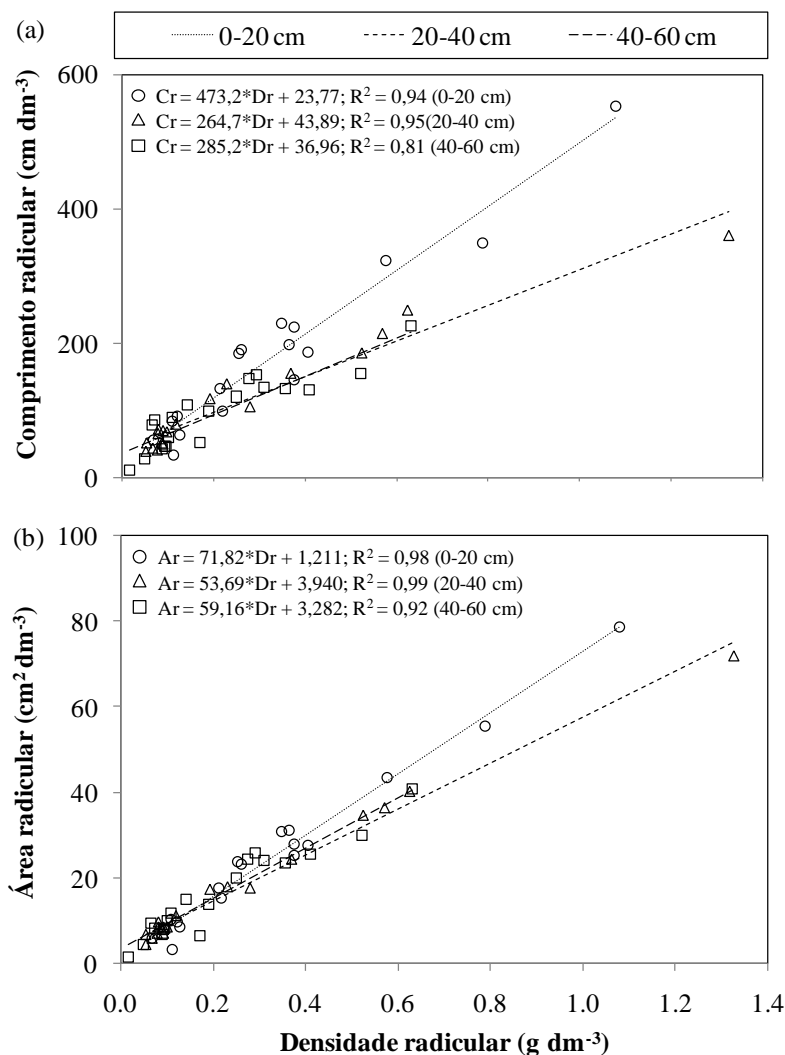


Figura 4 - Diagrama de dispersão mostrando a relação entre comprimento (a) e área radicular (b) com a densidade radicular, nas três camadas avaliadas. Raízes da camada de 0 a 0,2 m apresentaram maior comprimento e área radicular por unidade de peso de raiz

2.3.3 Relação entre as propriedades físicas e o crescimento radicular da cana-de-açúcar

Existem poucos estudos relacionando o crescimento das raízes da cana-de-açúcar e parâmetros físicos do solo na literatura. Trowse Junior e Humbert (1961) apresentaram evidências de que o aumento na densidade do solo diminui a elongação das raízes de cana e a eficiência de enraizamento para os principais solos do Hawaii. Os autores argumentaram que não é claro se o efeito é devido à resistência à penetração ou à reduzida permeabilidade de gases nas camadas compactadas dos solos. Rao e Narasimham (1988) verificaram que a compactação tanto da superfície quanto da subsuperfície diminuiu a atividade das raízes da cana-de-açúcar.

Em outras culturas, estudos têm demonstrado relação entre as propriedades físicas do solo e o crescimento de raízes. Pardo, Amato e Chiarandà (2000) observaram relação altamente significativa entre densidade de comprimento radicular e resistência à penetração para raízes de grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.). Segundo esses autores, a densidade de raízes diminuiu rapidamente quando a RP atingiu valores da ordem de 3 MPa, estabilizando os valores de densidade radicular próximos a $0,5 \text{ cm cm}^{-3}$. Beulter e Centurion (2004) obtiveram redução na densidade, superfície, diâmetro e matéria seca de raízes de soja a partir da camada de 0,05 até a camada de 0,2 m de profundidade. Esses autores obtiveram ainda relação quadrática negativa entre a RP e a produtividade da soja, com queda da produtividade a partir de RP de 0,85 MPa, quando ocorreu redução de 18% na densidade radicular.

Diagramas de dispersão mostrando os *F-values* dos parâmetros densidade radicular (Dr), comprimento radicular (Cr) e área radicular (Ar) relacionados à resistência à penetração são mostrados na Figura 5. A abordagem do *boundary line*, utilizada nesta parte do trabalho, sugere utilizar somente os pontos mais altos da relação obtida entre as variáveis dependentes e independentes, sendo que para a primeira utilizam-se valores parciais (*F-value*) referentes ao maior resultado do conjunto de dados. Somente os pontos sólidos foram utilizados na análise de regressão, assumindo-se que pontos localizados abaixo dessa área marginal são influenciados por outras variáveis independentes, conforme destacado por Webb (1972).

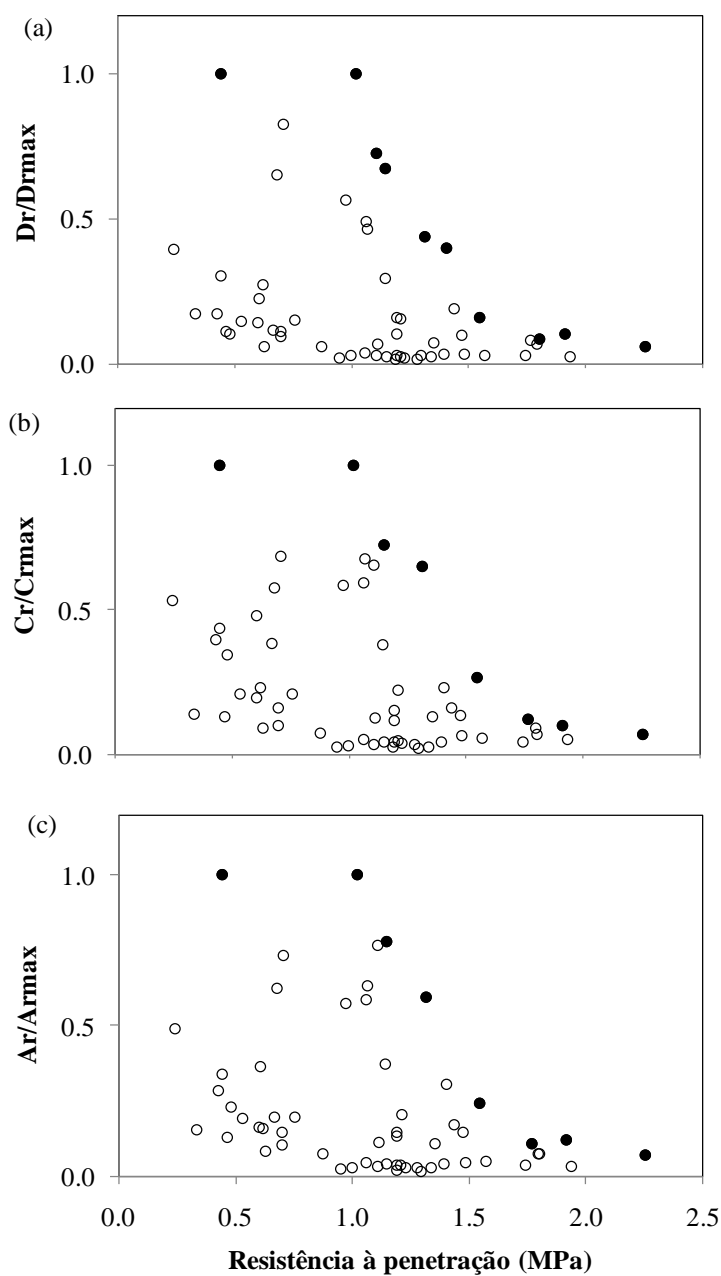


Figura 5 - Diagramas de dispersão dos F -values dos parâmetros de raízes (a) densidade radicular (Dr/Dr_{max}); (b) comprimento radicular (Cr/Cr_{max}); (c) área radicular (Ar/Ar_{max}), em função da resistência à penetração (RP). Os pontos sólidos foram selecionados conforme abordagem da *boundary line*

Utilizando a abordagem do *boundary line* e a regressão não-linear como parâmetro de análise, a relação entre os valores parciais (F -values) de Dr , Cr e Ar com a RP ajustaram-se à função assimétrica em S (Tabela 4), como também observado por Imhoff et al. (2010) para raízes de milho.

Tabela 4 - Modelo de regressão da *boundary line* relacionando os parâmetros das raízes (PR) e a resistência à penetração (Rp)

Parâmetros das raízes (PR)	b ₁	b ₂	b ₃
Modelo e parâmetros			
$PR = \{b_1 + (1 - b_1) / 1 + (b_2 \cdot Rp)^{b_3}\}^{(1-1/b_3)}$			
Densidade radicular (g dm ⁻³)	0,05367 NS	0,80134 ***	9,13981 ***
Comprimento radicular (m m ⁻³)	0,04151 NS	0,74566 ***	8,94239 **
Área radicular (m ² m ⁻³)	0,06888 *	0,75814 ***	10,25661 ***

^{NS}Valores dos coeficientes não significativos

*Valores dos coeficientes são significativos a $\alpha < 0,1$

**Valores dos coeficientes são significativos a $\alpha < 0,01$

***Valores dos coeficientes são significativos a $\alpha < 0,001$

Utilizando os parâmetros obtidos no modelo (Tabela 4) para simular o efeito da RP nos parâmetros das raízes, observa-se que estes sofreram pouco efeito até RP ~ 0,75 MPa (Figura 6). Deste valor até um valor de RP ~ 2,0 MPa, os valores dos parâmetros das raízes diminuíram significativamente e se estabilizaram a partir de RP > 2,0 MPa. Materechera e Mloza-Banda (1997) observaram diminuição no crescimento radicular com RP maior do que 1 MPa, podendo cessar com altos valores de RP. Boone e Veen (1982) mencionaram que o crescimento das raízes de milho foram afetados com RP entre 0,9 e 1,6 MPa. Imhoff et al. (2010), utilizando a mesma técnica da *boundary line*, observaram que com RP igual a 0,9 MPa iniciou-se a restrição ao crescimento radicular do milho, identificando ainda RP de 3 MPa como o limite para o crescimento das raízes. Essa última constatação também foi observada por Boone e Veen (1982) e Laboski et al. (1998), enquanto neste trabalho restrições severas ao crescimento radicular da cana-de-açúcar foram observadas com RP superior a 2,0 MPa.

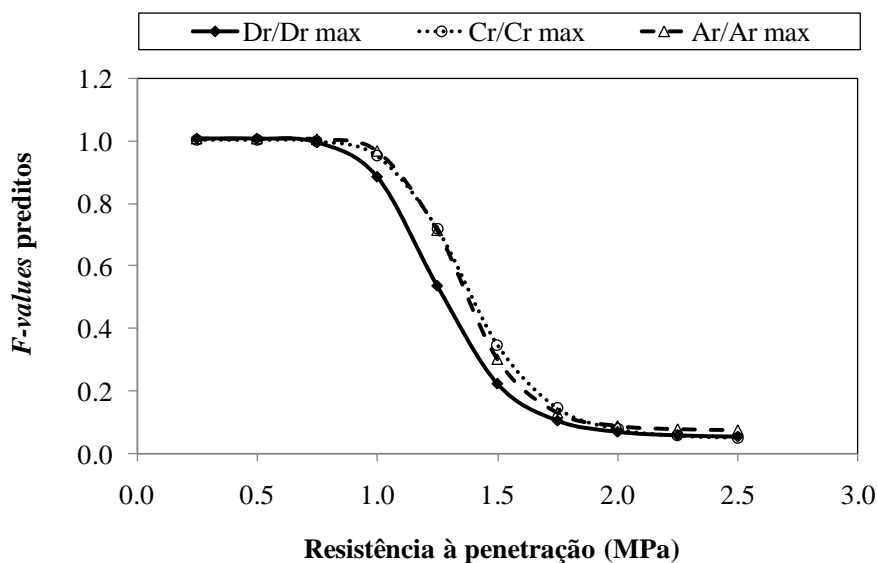


Figura 6 - Predição na variação dos *F-values* de densidade radicular (Dr), comprimento radicular (Cr) e área radicular (Ar) com a resistência à penetração utilizando a abordagem do *boundary line* e os parâmetros do modelo apresentados na Tabela 4

2.3.4 Variação da arquitetura e massa radicular com o número de cortes

A arquitetura do sistema radicular da cana-de-açúcar de 3º corte concentrou-se próximo à touceira da planta (Tabela 4), semelhante ao observado, nessa mesma área, na colheita do 1º corte (OTTO et al., 2009). De maneira geral, não se observaram modificações na arquitetura do sistema radicular entre a época do 1º e do 3º corte, salientando-se que todos os cortes foram realizados com colhedora mecânica, sendo os fertilizantes aplicados sobre a palha, ao lado da linha da soqueira e sem cultivo. O fato da arquitetura do sistema radicular não ter sido drasticamente modificada entre as colheitas sugere que a renovação do sistema radicular da cana-de-açúcar entre os cortes é menor do que se esperava. Esses resultados concordam com as observações apontadas na revisão de Smith, Inman-Bamber e Thorburn (2005) de que, apesar de existir pouca informação disponível sobre a renovação de raízes de cana-de-açúcar, evidências sugerem que o sistema radicular não é completamente substituído quando ocorre o corte da soqueira.

Comparando a massa de raízes obtida após o 3º corte com a massa que foi obtida após o 1º corte nessa área (OTTO et al., 2009), observa-se que a distribuição de raízes apresentou pequena mudança entre os cortes (Figura 7). De maneira geral, o sistema radicular da cana-planta (2006) apresentou-se mais superficial, inclusive com maior massa de raízes na camada de 0 a 20 cm no centro da entrelinha em relação ao obtido na cana-soca. Após duas colheitas,

aparentemente aumentou a distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em profundidade, na região próxima à linha de plantio.

A massa de raízes até a camada de 0,6 m foi ligeiramente inferior na cana-planta (2.380 kg ha^{-1}) em relação à cana-soca (2.720 kg ha^{-1}). Esses resultados concordam com as observações de Vasconcelos (2002) e Ball-Coelho et al. (1992), que também evidenciaram aumento na massa de raízes de cana-de-açúcar do corte da cana-planta para as soqueiras. Neste trabalho, o aumento na massa de raízes ocorreu principalmente devido ao aumento da massa nas camadas mais profundas do solo (Figura 8), tendo em vista que na camada superficial obteve-se mesma massa de raízes nas duas épocas.

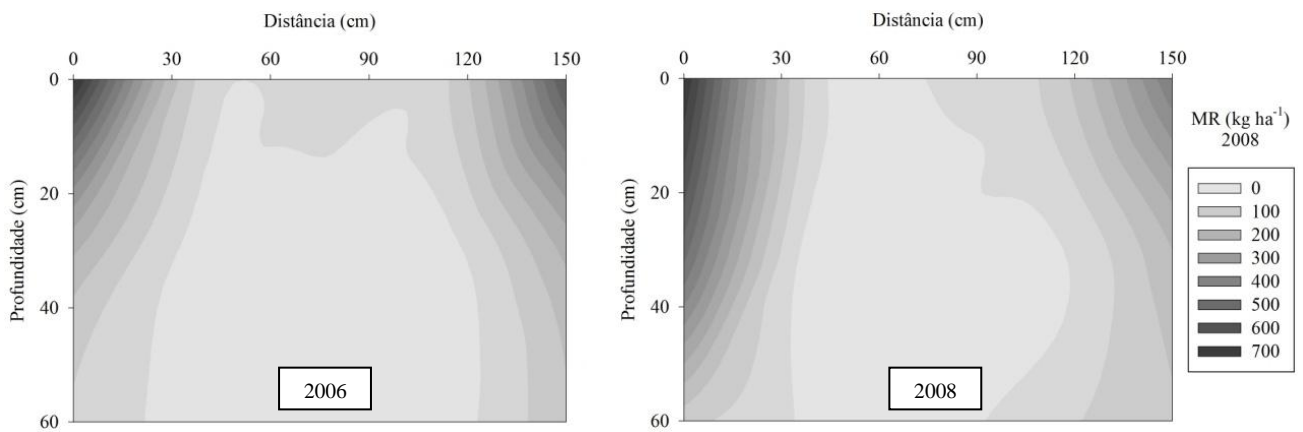


Figura 7 - Variação da distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar no perfil do solo em duas épocas: 2006 (após o corte da cana-planta) e 2008 (após o terceiro corte). Os dados de 2006 foram adaptados de Otto et al. (2009). MR, massa de raízes

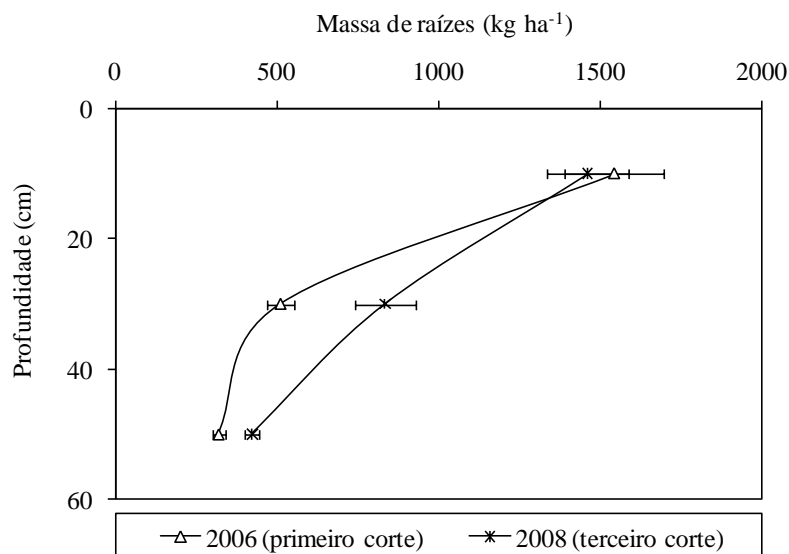


Figura 8 - Variação da massa de raízes de cana-de-açúcar com a profundidade do solo após a primeira (2006) e terceira (2008) colheita da área. Os dados de 2006 foram adaptados de Otto et al. (2009). As barras representam o erro padrão da média para n=20

Este trabalho apresentou informações importantes a respeito da distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar no perfil do solo e sua relação com as condições físicas do solo, podendo trazer implicações práticas ao manejo da cultura. A distribuição do sistema radicular próxima ao eixo central da planta em termos de massa, comprimento e área radicular dá suporte à recomendação de aplicação dos fertilizantes próximos à linha da cultura, visando aumentar a eficiência de utilização dos fertilizantes. Essa conclusão também foi adotada por Kovar et al. (1992), que indicaram que a distribuição das raízes no perfil do solo diretamente afetaram a absorção de nutrientes pelas plantas. Essas evidências sugerem ser vantajosa a aplicação dos fertilizantes em áreas com elevada densidade radicular.

Além disso, a relação entre a resistência à penetração e os parâmetros das raízes da cana-de-açúcar permitiu estimar valores de RP a partir do qual haverá redução no crescimento radicular da cultura, sendo uma ferramenta útil para direcionar a necessidade de cultivo das soqueiras visando melhorar as condições para o crescimento radicular. Finalmente, considerando que poucos estudos com o sistema radicular da cana-de-açúcar são desenvolvidos em condições de campo em virtude da dificuldade de sua avaliação, este trabalho apresentou uma metodologia simples para avaliar a distribuição do sistema radicular da cultura, podendo ser empregado em outras condições edafoclimáticas e até mesmo com outras culturas, sem maiores complicações metodológicas.

2.4 Conclusões

Após três anos consecutivos de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, a Ds foi similar nas camadas de 0 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m, e ambas foram superiores quando comparadas à Ds da camada de 0,4 a 0,6 m. A Rp foi maior na superfície do solo (atingindo o máximo de 1,93 MPa no centro da entrelinha) e diminuiu com a profundidade. Conforme Ds aumentou, a Pt diminuiu e a Rp aumentou. Uma relação consistente entre Ds e RP foi observada em todas as camadas de solo. Para esse solo, restrições ao crescimento radicular ($RP > 2,0$ MPa) podem ocorrer quando $Ds \geq 1,78 \text{ g cm}^{-3}$.

A abordagem da *boundary line* associada com a análise de regressão não-linear possibilitou quantificar o efeito da RP na densidade, no comprimento e na área radicular da cana-de-açúcar. O crescimento das raízes de cana-de-açúcar não foi afetado com $RP < 0,75$ MPa, mas decresceu significativamente com RP entre 0,75 e 2,0 MPa. O crescimento radicular foi severamente restringido quando $RP > 2,0$ MPa.

2.5 Referências

- ABU-HAMDEH, N.H. Soil compaction and root distribution for okra as affected by tillage and vehicle parameters. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 74, p. 25-35, 2003.
- AGGARWAL, P.; CHOUDHARY, K.K.; SINGH, A.K.; CHAKRABORTY, D. Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management. **Geoderma**, Amsterdam, v. 136, p. 353-363, 2006.
- AJAYI, A.E.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C.F.; SOUZA, T.T.T.; INDA JUNIOR, A.V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 122-127, 2009.
- ALVARENGA, M.I.N.; DAVIDE, A.C. Características físicas e químicas de um latossolo vermelho-escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 933-942, 1999.
- ANTWERPEN, R. van; LYNE, P.W.L.; MEYER, E.; BROWERS, M. Effect of surface applied pressure by vehicles fitted with pneumatic tires on properties of a virgin soil. **Proceedings South African Sugar Cane Technologists' Association**, Durban, v. 81, p. 408-417, 2008.
- AZEVEDO, M.C.B.; CHOPART J.L.; MEDINA, C.C. Sugarcane root length density and distribution from root intersection counting on a trench-profile. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, p. 94-101, 2011.

- BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamic in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 142, p. 297-305, 1992.
- BARBER, S.A. Effect of soil tillage practice on corn (*Zea mays* L.) root distribution and morphology. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, p. 724–726, 1971.
- BARRACLOUGH, P.B.; WEIR, A.H. Effects of a compacted subsoil layer on root and shoot growth, water-use and nutrient-uptake of winter-wheat. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 110, p. 207–216, 1988.
- BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J.P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 114, p. 351–360, 2009.
- BAUMHARDT, R.L.; JONES, O.R.; SCHWARTZ, R.C. Long-term effects of profile-modifying deep plowing on soil properties and crop yield. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 677–682, 2008.
- BERGSTROM, D.W.; BEAUCHAMP, E.G. An empirical model of denitrification. **Canadian Journal Soil Science**, Manitoba, v. 73, p. 421-431, 1993.
- BEULTER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 581-588, 2004.
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. **Critical Review in Plant Sciences**, Philadelphia, v. 28, p. 139-163, 2009.
- BOONE, F.R.; VEEN, B.W. The influence of mechanical resistance and phosphate supply on morphology and function of maize roots. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 30, p. 179-192, 1982.
- BOTTA, G.F.; JORAJURIA, D.; ROSATTO, H.; FERRERO, C. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 9–14, 2005.
- BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed). **Methods of soil analysis** – physical and mineralogical methods. 2nd ed. Madison, ASA: Soil Science Society of America , 1986. p.463-478.
- BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; REINERT, D.J. Mulch and soil organic carbon content and their relationship with the maximum soil density obtained in the proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 605–614, 2006.
- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. Van; QUAGGIO, J.A. Soil and plant analyses for lime and fertilizer recommendations in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 29, p. 1691-1706, 1998.

- CHAN, K.Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R.C.; DEAR, B.S.; PEOPLES, M.B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 13–21, 2006.
- CHOPART, J.L.; RODRIGUES, S.R.; AZEVEDO, M.C.B.; CONTI, M.C. Estimating sugarcane root length density through root mapping and orientation modelling. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 313, p. 101–112, 2008.
- COSTA, M.C.G.; MAZZA, J.A.; VITTI, G.C.; JORGE, L.A.C. Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1503-1514, 2007.
- DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. Pressure plate extractor. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.) **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v.4. p.688-690.
- DIAS JUNIOR, M.S.; FONSECA, S.; ARAUJO JUNIOR; C.F., SILVA, A.R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 257–264, 2007.
- DOURADO-NETO, D.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M. State-space approach for the analysis of soil water content and temperature in a sugarcane crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, p. 1215–1221, 1999.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.
- ESS, D.R.; VAUGHAN, D.H.; PERUMPRAL, J.V. Crop residue and root effects on soil compaction. **Transactions of ASAE**, Saint Joseph, v. 41, p. 1271-1275, 1998.
- FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C.; LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 947-953, 2003.
- FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.L.; BÜLL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 49-57, 2006.
- FRANZEN, H.; LAL, R. Tillage and mulching effects on physical properties of a tropical Alfisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 28, p. 329-346, 1994.
- GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, p. 347-352, 2009.
- GARDNER, W.R. Relation of root distribution to water uptake and availability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 56, p. 41–45, 1964.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In.: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. p. 255-289.

GLINSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1990. 250 p.

GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; MEYER, J.H. Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 53, p. 589–598, 2002.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v.4. p.201-228.

GRZESIAK, M.T. Impact of soil compaction on root architecture, leaf water status, gas exchange and growth of maize and triticale seedlings. **Plant Root**, Gofuku, v. 3, p. 10-16, 2009.

GRZESIAK, S.; GRZESIAK, M.T.; FILEK, W.; HURA, T.; STABRYŁA, J. The impact of different soil moisture and soil compaction on the growth of triticale root system. **Acta Physiologia Plantarum**, Heidelberg, v. 24, p. 331-342, 2002.

IJIMA, M.; KONO, Y.; YAMAUCHI, A.; PARDALES JUNIOR, J.R. Effects of soil compaction on the development of rice and maize root system. **Environmental Experimental Botany**, Oxford, v. 30, p. 333-342, 1991.

IMHOFF, S.; KAY, B.D.; SILVA, A.P.; HAJABBASI, M.A. Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 106, p. 303-310, 2010.

JORGE, L.A.C. (Coord.) **Recomendações práticas para aquisição de imagens digitais analisadas através do SIARCS**. São Carlos: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária, 1996. 57p. (Circular Técnica, 1/96)

KOVAR, J.L.; BARBER, S.A.; KLADIVKO, E.J.; GRIFFITH, D.R. Characterization of soil temperature, water content, and maize root distribution in two tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, p. 11-27, 1992.

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

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, p. 151-170, 2004.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 44, p. 450–457, 1980.

- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p. 279-285, 2006.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, Boca Raton, v. 1, p. 277-294, 1985.
- LYNCH, J. Root architecture and plant productivity. **Plant Physiology**, Rockville, v. 109, p. 7-13, 1995.
- MACEDO, I.C.; NOGUEIRA, L.A.H. **Avaliação da expansão da produção de etanol no Brasil**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, 2004.
- MARTÍNEZ, E.; FUENTES, J.P.; SILVA, P.; VALLE, S.; ACEVEDO, E. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, p. 232–244, 2008.
- MARTINO, D. L.; SHAYKEWICH, C.F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 74, p. 193–200, 1994.
- MASLE, J.; PASSIOURA, J.B. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 14, p. 643-656, 1987.
- MATERECHERA, S.A.; MLOZA-BANDA, H.R. Soil penetration resistance, root growth and yield of maize as influenced by tillage system on ridges in Malawi. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 41, p. 13-24, 1997.
- MISRA, R.K.; GIBBONS, A.K. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strength arising from compaction. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 182, p. 1–11, 1996.
- NEVES, C.S.V.J.; FELLER, C.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; TAVARES FILHO, J.; FORTIER, M. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the cropping profile method in clayey oxisols in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 71, p. 109-119, 2003.
- NEWMAN, J. A method of estimating the total length of root in a sample. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 3, p. 139–145, 1966.
- OTTO, R.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J; FARONI, C.E.; VITTI, A.C. Root system distribution of sugar cane related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 601-611, 2009.
- PARDO, A.; AMATO, M.; CHIARANDÀ, F.Q. Relationships between soil structure, root distribution and water uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Plant growth and water distribution. **European Journal Agronomy**, Oxford, v. 13, p. 39–45, 2000.

PENG, X.H.; HORN, R.; ZHANG, B.; ZHAOA, Q.G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompact Ultisols. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, p. 125–137, 2004.

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

R Development Core Team, 2005. **R: A language and environment for statistical computing, reference index version 2.2.1**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <http://www.R-project.org>.

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

RAO, R.S.; NARASIMHAM, R.L. Effect of soil compaction in sugarcane. II: On root development. **International Journal of Tropical Agriculture**, New Delhi, v. 6, p. 227-231, 1998.

REEVES, T.J.; HAINES, P.J.; COVENTRY, R.R. Growth of wheat and subterranean clover on soil artificially compacted at various depths. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 89, p. 135-138, 2004.

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

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

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 113-117, 1997.

SILVA, R.R.; SILVA, M.L.N.; FERREIRA, M.M. Atributos físicos indicadores da qualidade do solo sob sistemas de manejo na bacia do alto do Rio Grande (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, p. 719-730, 2005.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; LEITE, F.P. Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and load. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 921-932, 2008.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 169-183, 2005.

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

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. van; PENATTI, C.P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J.L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M.G.A.; ROSSETO, R. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Coord.).

Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas: IAC, 1997. p. 233-239 (Boletim Técnico, 100).

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F.; FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 725-730, 2001.

TAYLOR, H.M.; GARDNER, H.R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, water content and soil strength. **Soil Science**, Philadelphia, v. 96, p. 153-156, 1963.

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

TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; TIMM, L.C. Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 40, p. 605-614, 2002.

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

TROUSE JUNIOR, A.C.; HUMBERT, R.P. Some effects of soil compaction on the development of sugarcane roots. **Soil Science**, Philadelphia, v. 91, p. 208-217, 1961.

TU, J.C.; TAN, C.S. Effect on soil compaction on growth, yield and root rots of white beans in clay loam and sand loam soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 23, p. 233-238, 1991.

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, p. 892-898, 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. 140 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2002.

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

VEEN, B.W.; BOONE, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 219–226, 1990.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 104–113, 2007.

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

WEBB, R.A. Use of the boundary line in the analysis of biological data. **Journal of Horticultural Science**, Ashford, v. 47, p. 309-319, 1972.

3 RELAÇÕES ENTRE ADUBAÇÃO NITROGENADA, PROPRIEDADE DOS SOLOS E BIOMASSA DE RAÍZES DA CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

É essencial conhecer o funcionamento das raízes das culturas e pouco é conhecido a respeito das raízes de soqueiras de cana-de-açúcar. A adubação nitrogenada normalmente aumenta a biomassa da parte aérea, mas o efeito nos compartimentos subterrâneos ainda é incerto e a hipótese deste trabalho é de que a adubação nitrogenada favoreça o crescimento radicular de soqueira. O objetivo deste trabalho foi avaliar a biomassa superficial de raízes (<0,6 m) durante o ciclo de primeira soqueira de cana-de-açúcar em função de doses de N aplicadas no plantio e após o primeiro corte (soqueira). Foram desenvolvidos dois experimentos, um em Latossolo Vermelho distrófico de textura média, na Usina Santa Adélia (USA), e outro em Latossolo Vermelho eutrófico de textura muito argilosa, na Usina São Martinho (USM), no município de Jaboticabal, SP. O delineamento experimental foi em parcelas subdivididas de blocos completos ao acaso (quatro repetições). Quatro tratamentos foram avaliados (i) Aplicação de N no plantio (sem N e 120 kg ha⁻¹ N aplicado em 2005) e (ii) aplicação de N na soqueira (sem N e 150 kg ha⁻¹ N aplicado em 2006). Foi avaliada a massa de raízes em diversas posições do perfil do solo, assim como a massa da parte aérea e os teores de N nesses compartimentos, em cinco épocas, durante o ciclo agrícola de primeira soqueira. O efeito da adubação nitrogenada no crescimento de raízes da cana-de-açúcar variou entre as áreas. Em ambos experimentos, a variação na biomassa de raízes durante o ciclo foi mais influenciada pelas propriedades dos solos, como textura, densidade, resistência à penetração e dinâmica da água do que pelas doses de N. Na área da USM a adubação nitrogenada de soqueira aumentou a densidade de raízes na camada superficial (0-0,2 m) e próximo às plantas (<0,3 m), enquanto que no experimento da USA o efeito foi muito pequeno. A biomassa de raízes foi constante durante o primeiros estádios de desenvolvimento e decresceu até a colheita. A relação raiz: parte aérea variou de 0,15 a 0,40 kg kg⁻¹ no início do ciclo a 0,05 kg kg⁻¹ na colheita. A hipótese de que a adubação nitrogenada aumentaria o enraizamento da cana-de-açúcar não foi comprovada, e o efeito do N fertilizante no crescimento da parte aérea em áreas de colheita sem queima foi menor do que o esperado.

Palavras-chave: Sistema radicular; Sonda amostradora de raízes; *Saccharum* spp

Abstract

Knowledge of root function is important and little is known about roots in sugarcane ratoon crops. Nitrogen fertilization normally increases sugarcane aboveground biomass, but the effect on belowground components is unknown and we hypothesized N fertilization will increase sugarcane rooting over the cycle. The objective of this study was to evaluate the superficial (<0.6 m) sugarcane root biomass over the first ratoon cycle due to the N doses applied to the plant-cane and after the first cut (to the ratoon). Two experiments were set up in Southeastern Brazil, one on a Typic Kandiodox of medium texture (SA), and another on a Rhodic Eutradox of a very clayish texture (SM). The experimental design consisted of completely randomized blocks with split-plots (four repetitions). Four treatments were studied (i) N application in the plant-cane (without N and 120 kg ha⁻¹ N applied in 2005) and (ii) N application in the ratoon (without N and 150 kg ha⁻¹ N applied in 2006). The root density in several positions of the soil profile and the shoot biomass were evaluated over the first ratoon crop cycle, and the N content in those compartments was also examined. The effect of N fertilizer addition on sugarcane rooting varied between the sites. In both sites, sugarcane root biomass variation over the cycle was more affected by soil properties such as soil texture, density and resistance to root penetration, as well as water dynamics, than by N supplies treatments. At the SM site, the ratoon N fertilization increased the root density in the superficial layer (0-0.2 m) and close to the plants (<0.3 m), while at the SA site the effect was very small. Root biomass was constant at first developmental stages and thereafter decreased until harvest. The root: shoot ratio ranged from 0.15 to 0.40 kg kg⁻¹ in the beginning of the cycle to 0.05 kg kg⁻¹ at harvest. The hypothesis that N fertilizer addition will improve sugarcane rooting was rejected, and the effect of N fertilizer addition on sugarcane growth under unburned areas was lower than expected.

Keywords: Root system; Root sampling probe; *Saccharum* spp

3.1 Introdução

O sistema radicular funciona como a interface entre a planta e o solo. As raízes suprem a planta com água e nutrientes, que são requeridos para atender a demanda dos atributos da parte aérea associados com carbono e balanço de energia. As raízes, por sua vez, requerem foto-assimilados das folhas. De acordo com Smith, Inmam-Bamber e Thorburn (2005), a produtividade da cana-de-açúcar é influenciada pelas propriedades do sistema radicular devido ao seu efeito no suprimento de recursos subterrâneos, troca de gases e assimilação e também economia e partição de C dos assimilados para os componentes da produtividade.

Historicamente, criou-se a hipótese de que o sistema radicular da cana-de-açúcar é substituído após a colheita, com a morte do sistema radicular do ciclo antecessor e a rebrota da parte aérea dependendo do reestabelecimento de um novo sistema radicular (BAVER et al., 1962; BLACKBURN, 1984). A revisão de Smith, Inmam-Bamber e Thorburn (2005) apresentou evidências de que o sistema radicular da cana-de-açúcar não é completamente renovado de um ciclo a outro e, ainda, de que pouco é conhecido a respeito da renovação de raízes de cana-de-açúcar e seu tempo de vida.

A dinâmica de acúmulo de biomassa de raízes é requerida para estimar a alocação de carboidratos para os componentes subterrâneos da planta (BATTIE-LACLAU; LACLAU, 2009). Ainda conforme esses autores, os efeitos de práticas de manejo como adubação, irrigação, espaçamento, aplicação de defensivos e do clima na produtividade da cana tem sido amplamente estudado, porém estudos compreensivos a respeito do efeitos dos fatores ambientais no desenvolvimento do compartimento subterrâneo da planta são escassos.

A aplicação de fertilizantes nitrogenados é um importante contribuidor da produtividade dos sistemas agrícolas, garantindo um suprimento suficiente de N para a obtenção de elevadas produtividades da cana-de-açúcar (THORBURN et al., 2011). No Brasil, o N é aplicado no plantio em doses que variam de 40 a 80 kg ha⁻¹ N, enquanto as soqueiras recebem doses relativamente maiores, da ordem de 100 a 150 kg ha⁻¹ N. Além disso, a área de colheita mecanizada no Brasil está aumentando (GALDOS; CERRI; CERRI, 2009), levando a um acúmulo de palha na superfície do solo. Nesse sistema tem sido recomendado doses maiores de N quando comparado ao sistema com queima (ROSSETTO et al., 2010), o que pode modificar o padrão de crescimento dos compartimentos subterrâneos e da parte aérea da cana-de-açúcar nesse novo sistema.

As conclusões gerais são de que a adição de N modifica o padrão de enraizamento das culturas, como demonstrado em estudos em culturas como o milho (ANGHINONI; BARBER, 1988; DURIEUX et al., 1994; ANDERSON, 1987; MACKAY; BARBER, 1986; TEYKER; HOBBS, 1992) e cevada (DREW, 1975). Em cana-de-açúcar, o efeito da adição de N fertilizante no crescimento das raízes foi avaliado somente no ciclo de cana-planta (SAMPAIO et al., 1987; THORBURN et al., 2003; OTTO et al., 2009 a). Sampaio et al. (1987) observou aumento na biomassa de raízes aos 6 e 16 meses após o plantio com a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N. Otto et al. (2009 a) também observou efeito positivo do N fertilizante no crescimento das raízes e da parte aérea ao longo do ciclo de cana-planta. Thorburn et al. (2003) sugeriram que o suprimento de N afeta o padrão de enraizamento da cana-de-açúcar. Os autores observaram que a absorção de N mineral até 1,0 m de profundidade variou em função das doses de N aplicadas sob irrigação plena. Sem adição de N, houve absorção de N mineral tanto da posição da linha como da entrelinha. Com a aplicação de 120 ou 180 kg ha⁻¹ de N, as plantas absorveram N mineral somente na posição da linha, além de diminuir a absorção de N mineral em profundidades maiores. A disponibilidade de N mineral afeta, portanto, a atividade das raízes, possivelmente devido ao impacto na distribuição das raízes (SMITH; INMAM-BAMBER; THORBURN, 2005).

Apesar dos estudos realizados no ciclo de cana-planta, a área cultivada em condições de soqueira é muito mais representativa, pois compreende cerca de 80% dos 9,1 milhões de hectares cultivados com cana-de-açúcar no Brasil atualmente (IBGE, 2011). Existem diferenças marcantes nas condições de crescimento das raízes em áreas de cana-planta e soqueira. Para o estabelecimento da cana-planta no Brasil, normalmente é realizado preparo profundo do solo com arações, gradagens ou subsolagens. Em condições de soqueira, normalmente há pouco ou nenhum cultivo do solo após a colheita, especialmente em áreas de colheita de cana-crua. Além disso, o ciclo de cana-planta é mais longo (14 a 18 meses) do que o ciclo das soqueiras (normalmente de 12 meses), conferindo diferenças na distribuição da chuva e no balanço de água no solo ao longo do ano. Essas diferenças demonstram a necessidade de se estudar o efeito da adubação nitrogenada no desenvolvimento do sistema radicular das soqueiras.

A hipótese deste estudo é de que a adição de N fertilizante irá aumentar o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, bem como o crescimento da parte aérea em áreas de colheita sem queima do canavial. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da adubação nitrogenada de plantio (efeito residual) e de soqueira no (i) desenvolvimento do

sistema radicular durante o ciclo de primeira soqueira; (ii) a dinâmica da relação raiz: parte aérea ao longo do ciclo e (iii) o acúmulo de N na parte aérea e subterrânea da cultura.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Descrição dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos em dois locais no município de Jaboticabal, SP, na Usina Santa Adélia – USA (21° 19' 98" S e 48° 19' 03" W, 600 m de altitude) e Usina São Martinho - USM (21° 15' S e 48° 18' W, 580 m de altitude), com o cultivar de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) SP81 3250.

As duas áreas experimentais têm sido cultivadas com cana-de-açúcar por pelo menos 30 anos antes do estabelecimento dos experimentos. Na USA, foi realizada colheita com queima até um ano antes do estabelecimento do experimento, enquanto que na USM foi realizada colheita sem queima nos últimos sete anos antes da instalação do experimento.

O preparo do solo foi convencional na USA e reduzido na USM. Na USA a seqüência de operações foi a aplicação de herbicida para dessecação da soqueira, aplicação de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, aração com arado de aivecas (a uma profundidade de cerca de 0,4 m), gradagem intermediária (28") e sulcação. Na USM foi realizada dessecação da soqueira antiga, subsolagem (a cerca de 0,35 m de profundidade) e sulcação, não sendo aplicado calcário e gesso conforme análise química do solo.

Os sulcos foram abertos com aproximadamente 0,35 m de profundidade, foram utilizadas 15 gemas viáveis por metro, além de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 de K₂O, na forma de superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente. Antes das mudas serem cobertas com solo (cobrição das mudas) foi aplicado inseticida e nematicida. As mudas foram cobertas com uma camada de 0,1 m de terra.

3.2.2 Caracterização dos solos

No experimento USA o solo foi um Latossolo Vermelho distrófico e na USM um Latossolo Vermelho eutrófico (EMBRAPA, 2006), referentes a um Typic Kandiodox e Rhodic Eutrudox (SOIL SURVEY STAFF, 2010), respectivamente. A caracterização química, física e hídrica dos solos (Tabela 1) foi realizada a partir de amostras coletadas nos

horizontes do perfil de uma trincheira, em julho de 2006, sendo utilizadas amostras indeformadas para determinação da densidade do solo e da retenção de água (capacidade de campo e ponto de murcha permanente), e amostras deformadas para análise química e granulométrica.

3.2.3 Delineamento experimental

Dois tratamentos foram implantados no plantio das áreas experimentais: 0 e 120 kg ha⁻¹ N, no delineamento experimental de blocos completo ao acaso com quatro repetições. Após a primeira colheita, as parcelas de cana-planta foram subdivididas e aplicados os tratamentos de soqueira: 0 e 150 kg ha⁻¹ N. As avaliações foram realizadas somente durante o ciclo de primeira soqueira, para avaliar o efeito residual da adubação de cana-planta e o efeito da adubação de soqueira. Na soqueira, cada parcela experimental foi composta de 12 sulcos espaçados em 1,5 m, com 15 m de comprimento, totalizando 270 m² por parcela.

A colheita da cana-planta foi realizada em 26 de julho de 2006 na USA e em 10 de agosto de 2006 na USM. A aplicação dos fertilizantes na soqueira foi realizada em 1 e 2 de outubro de 2006, respectivamente nos solos da USA e USM. Os fertilizantes foram aplicados manualmente, com distribuição mais homogênea possível, em um lado da soqueira da cana-de-açúcar, sem incorporação. Na USA a fonte de nitrogênio foi o sulfato de amônio (21% de nitrogênio e 24% de enxofre), de tal forma que os tratamentos com 150 kg ha⁻¹ de N na soqueira receberam também 171 kg ha⁻¹ de S, enquanto na USM foi utilizada mistura de sulfato de amônio e nitrato de amônio (32%N), fornecendo 57 kg ha⁻¹ de S no tratamentos com 150 kg ha⁻¹ de N. Após o primeiro corte também foi aplicado, em todas as parcelas, 150 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio (60% de K₂O).

Tabela 1 - Caracterização química[†], física[‡] e hídrica[§] do Latossolo Vermelho distrófico (USA) e do Latossolo Vermelho eutroférico (USM)

Horizonte	pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	Areia	Silte	Argila	Θ_{cc}	Θ_{pmp}	Ds
m	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹				%	g kg ⁻¹			m ³ m ⁻³		kg m ⁻³		
<i>Latossolo Vermelho distrófico</i>																
Ap (0-0,15 m)	6,3	23	10	3,6	18	13	0	17	51,6	67	661	54	285	0,26	0,15	1.305
A ₂ (0,15-0,37 m)	6,0	16	11	2,2	9	5	2	18	34,2	47	651	53	296	0,23	0,17	1.460
BA (0,37-0,56 m)	5,1	11	3	1,2	2	1	8	31	35,2	12	603	50	347	0,26	0,19	1.391
B _{w1} (0,56-0,96 m)	5,6	8	1	0,9	3	1	3	20	24,9	20	583	46	371	0,23	0,17	1.208
B _{w2} (+0,96 m)	5,9	7	1	3,5	2	1	0	9	15,5	42	578	53	369	0,24	0,16	1.244
<i>Latossolo Vermelho eutroférico</i>																
Ap (0-0,37 m)	5,4	30	36	1,7	29	9	1	59	98,7	40	135	227	638	0,45	0,34	1.299
B _{w1} (0,37-0,60 m)	5,5	15	6	0,2	22	6	0	30	58,2	48	117	195	688	0,43	0,31	1.330
B _{w2} (0,60-0,98 m)	6,0	10	2	0,2	20	5	0	23	48,2	52	117	170	713	0,39	0,28	1.318
B _{w3} (+0,98 m)	6,8	8	1	0,2	16	4	0	19	39,1	51	112	175	713	0,39	0,27	1.375

[†]MO, matéria orgânica determinada pelo método de Walkey-Black (RAIJ et al., 2001); P, K, Ca and Mg: extração com resina trocadora de íons (CANTARELLA et al., 1998; RAIJ et al., 2001); Al extraído com 1 N KCl (RAIJ et al., 2001); H+Al determinado pela solução tampão SMP (QUAGGIO et al., 1985); CTC, capacidade de troca de cátions; V, Saturação por bases

[‡]Determinações texturais pelo método do densímetro (GEE; OR, 2002); Ds, Densidade do solo obtida pelo método do anel volumétrico (GROSSMAN; REINSCH, 2002)

[§]Amostras indeformadas de solo foram saturadas e depois submetidas ao potencial mátrico em placas extratoras (DANE; HOPMANS, 2002) equivalente à capacidade de campo (Θ_{cc}) ($\psi = - 10$ kPa) e ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) ($\psi = - 1.500$ kPa)

3.2.3 Avaliação da fitomassa de raízes, rizomas e da parte aérea

Foram realizadas avaliações da biomassa de raízes e da parte aérea durante o ciclo de primeira soqueiras; adicionalmente, a biomassa de raízes também foi avaliada na colheita da cana-planta. Considerando a colheita da cana-planta com tempo inicial (dia 0), as avaliações foram realizadas aos 145, 225, 288 e 349 dias após o corte (dac) na USA e aos 124, 211, 274 e 369 dac na USM, respectivamente nos meses de Dez./06, Mar./07, Mai./07 e Jul./07 (USA) ou Ago./07 (USM). A última coleta coincidiu com a colheita do canavial. Os componentes subterrâneos (rizomas) foram avaliados somente na colheita.

A sequência de procedimentos adotada para avaliação das raízes, parte aérea e rizomas pode ser observada na Figura 1. Para estimativa da massa da parte aérea foram colhidas as canas presentes em dois metros de sulco, em locais escolhidos ao acaso dentro da parcela, obtendo-se a massa de matéria natural por meio de pesagem em balança de campo (precisão de 0,02 kg). Também foi registrado o número de canas nesse espaço. No mesmo local foram obtidas as amostras de raízes, utilizando-se sonda amostradora de raízes (SONDATERRA[®]), com 5,5 cm de diâmetro interno, até a profundidade de 0,6 m, divididos em camadas de 0,2 m (Figura 2). Foi escolhido a profundidade de até 0,6 m pois, apesar da importância das raízes das camadas mais profundas na manutenção do crescimento da cana (BATTIE-LACLAU; LACLAU, 2009), tipicamente cerca de 50% da biomassa de raízes são encontradas nos 0,2 m superficiais e 85% na camada de até 0,6 m de profundidade (BLACKBURN, 1984). Um estudo prévio comparou a biomassa de raízes obtida pela sonda e pela avaliação em monólitos na colheita da cana-planta dessas áreas e mostrou que a sonda apresentou estimativas confiáveis da biomassa de raízes da cana-de-açúcar (OTTO et al., 2009 b). Para avaliar a bioamassa de rizoma, todos os compartimentos subterrâneos presentes em 1 m de sulco foram coletados.

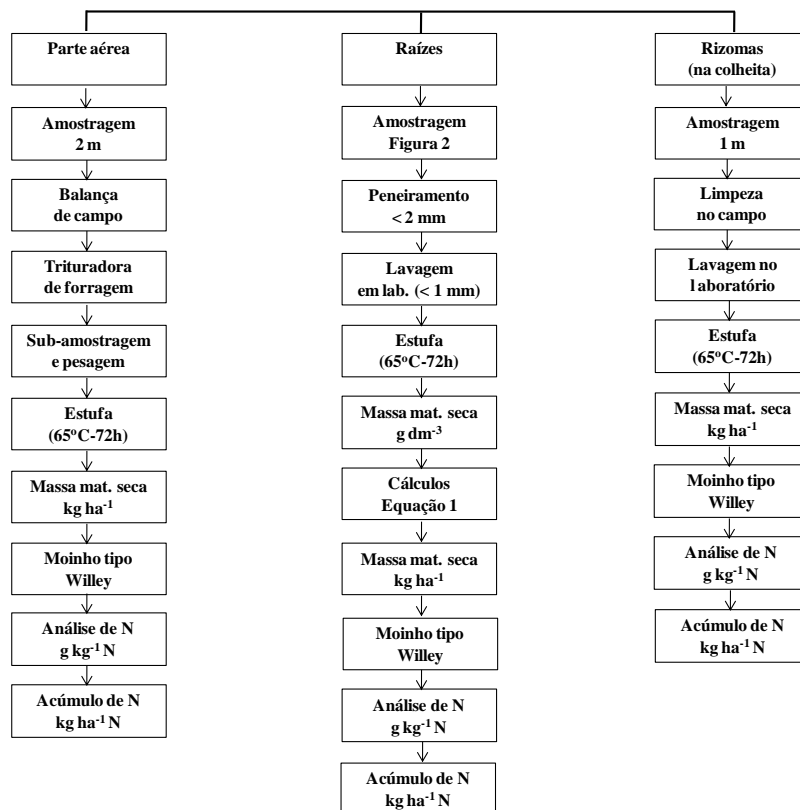


Figura 1 – Descrição sequencial das avaliações realizadas nos dois experimentos

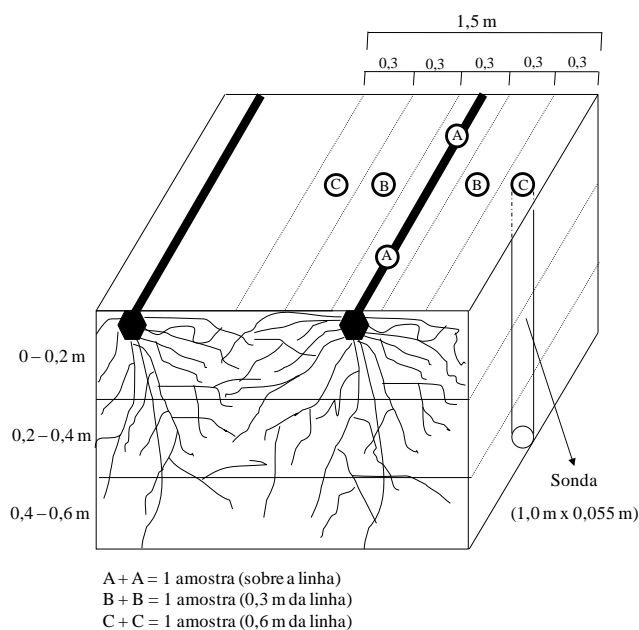


Figura 2 - Método de amostragem do sistema radicular da cana-de-açúcar (Fonte: OTTO et al, 2009a)

Ainda no campo, as amostras da parte aérea foram passadas em trituradora de forragem, coletando-se uma subamostra que foi hermeticamente fechada e levada para o

laboratório. As amostras de solos mais raízes foram peneiradas no campo, em peneiras de 2 mm, sendo as raízes acondicionadas em sacos plásticos. Os componentes subterrâneos foram separados no campo do solo e das raízes que estavam aderidos aos mesmos.

No laboratório, as raízes foram lavadas em água corrente sobre peneiras com orifícios de 1 mm de diâmetro, assim como os rizomas, que foram lavados em água para retirada do solo aderido aos mesmos. Após estes procedimentos, todas as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65°C, obtendo-se, posteriormente, a massa de matéria seca. A massa da parte aérea de cada um dos perfilhos foi obtida pelo produto da massa de matéria natural pela percentagem de matéria seca, dividida pelo número de perfilhos obtidos nos 2 m de sulco. As amostras foram então trituradas em moinho tipo Willey e determinado o teor de N, seguindo o procedimento descrito em Malavolta et al. (1997).

Adicionalmente, foram contados os números de perfilhos em 30 metros dentro de cada parcela, visando obter o número de perfilhos por hectare. O produto entre a massa seca de cada perfilho pelo número de perfilhos por hectare permitiu estimar a massa seca da parte aérea. A massa de rizomas por hectare foi obtida pelo produto entre a massa seca obtida em um metro de sulco e o comprimento de sulcos por hectare, considerando o espaçamento entre sulcos de 1,5 m. A biomassa de raízes (BR , $t\ ha^{-1}$) foi obtida pela equação:

$$BR\ (t\ ha^{-1}) = [DR_A \cdot (0,3/1,5) + DR_B \cdot (0,6/1,5) + DR_C \cdot (0,6/1,5)] \cdot 10,000 \cdot Prof. \quad [Eq.1]$$

Em que as variáveis remanescentes referem-se a: DR, densidade de raízes ($g\ dm^{-3}$) nas posições A, B e C (Figura 1); Prof., profundidade de amostragem (m), igual a 0,2 m para cada camada de solo. A biomassa total de raízes (<0,6 m) foi calculada pela soma da biomassa obtida em cada camada de solo.

Essas avaliações foram repetidas em todas as épocas descritas anteriormente, escolhendo-se ao acaso os locais dentro da parcela e tomando-se o cuidado para não realizar as avaliações em locais previamente amostrados.

3.2.4 Dados climatológicos

Para obter o balanço hídrico da cultura, a evapotranspiração potencial (ET_0) foi calculada usando a equação de Penman-Monteith com as parametrizações propostas pela

FAO (ALLEN et al., 1998). A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi obtida multiplicando-se a ET₀ pelo coeficiente da cultura (K_c) nos diversos estádios de crescimento, descritos em Allen et al. (1998). Os dados climáticos foram obtidos em estações meteorológicas localizadas próximas às áreas experimentais (< 2 km) e os dados de pluviosidade foram obtidos por meio de pluviômetros instalados nas áreas experimentais.

3.2.5 Procedimentos estatísticos

Os dados foram analisados considerando-se o delineamento de parcelas subdivididas, sendo as parcelas as doses de N no plantio e as subparcelas as doses de N na soqueira, no delineamento de blocos completos ao acaso. Quando o teste F apresentou significância na ANOVA, realizou-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância para comparar as médias.

3.3 Resultados

3.3.1 Balanço hídrico

Durante o ciclo de soqueira, a distribuição da ET_c (Figura 3) foi semelhantes nos dois experimentos, porém maiores valores foram obtidos na USA do que na USM. De maneira geral, a ET_c aumentou do início do ciclo (corte da cana-planta) até dezembro nos dois locais. A ET_c diminuiu no mês de Janeiro devido às elevadas precipitações pluviométricas, que contribuíram para a diminuição da luminosidade, aumentaram novamente até março, a partir da qual reduziram constantemente até o final do ciclo (Figura 3). A ET_c atingiu os maiores valores entre os meses de Dezembro e Janeiro, período com condições climáticas adequadas ao crescimento vegetal e acúmulo de biomassa. Esse período compreendeu a fase de máximo crescimento da cultura, como também evidenciado em trabalhos prévios nesses mesmo locais.

De maneira geral o balanço hídrico não apresentou condições extremas que pudessem comprometer o crescimento de raízes em nenhum dos locais, podendo ainda serem considerados representativos das condições de cultivo de cana-soca na região Sudeste do Brasil.

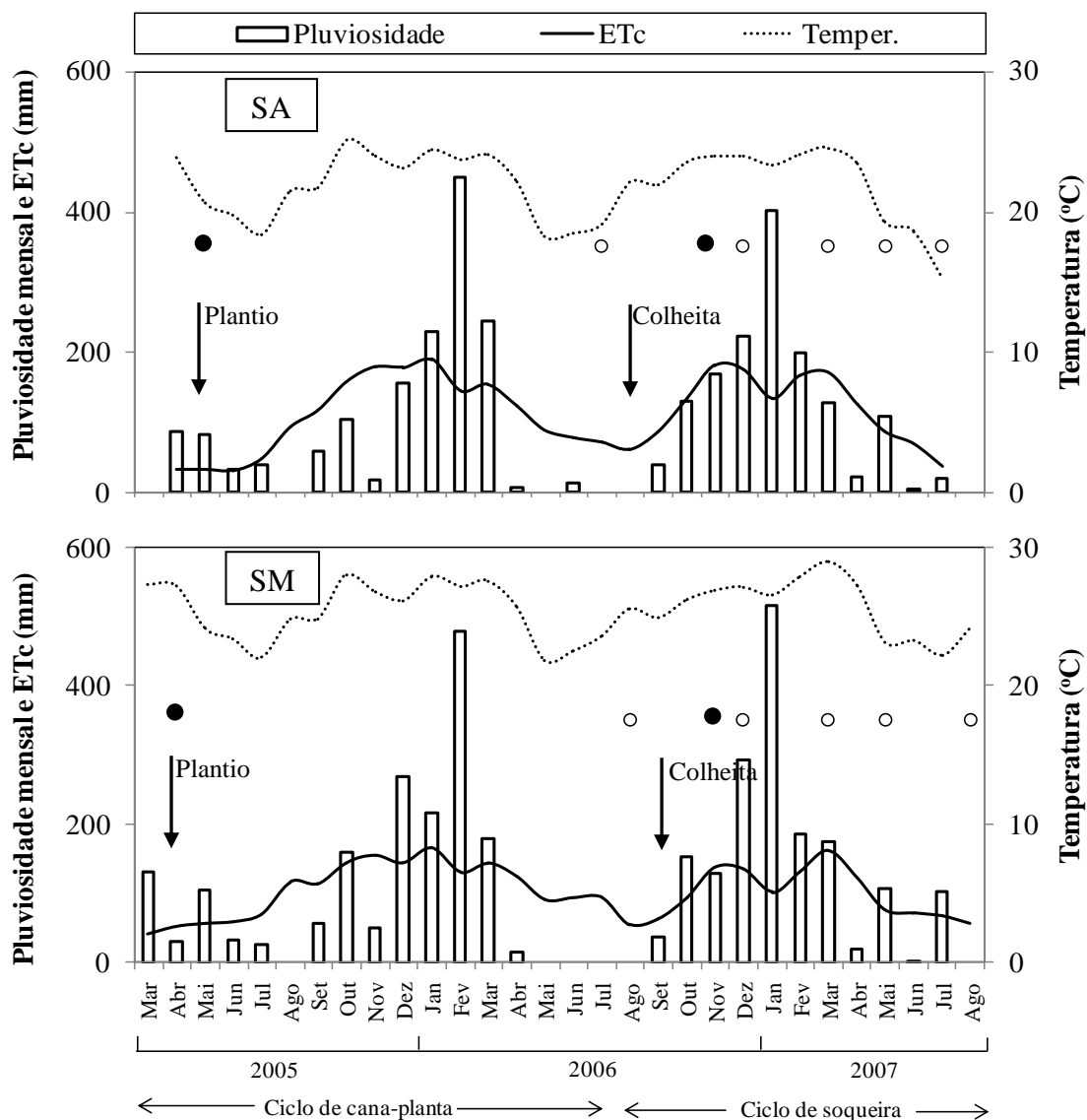


Figura 3 – Pluviosidade, evapotranspiração da cultura (ETc) e temperatura média nos experimentos das Usinas Santa Adélia (USA) e São Martinho (USM). Os pontos sólidos representam a data de aplicação dos fertilizantes e os pontos abertos representam os períodos de avaliação das raízes e da parte aérea

3.3.2 Efeito da adubação nitrogenada na densidade de raízes

Efeito da idade da soqueira

Na USA a adubação nitrogenada exerceu pouco efeito no crescimento radicular da cana-de-açúcar ao longo do ciclo de soqueira (Figura 4), não sendo observado efeito das doses de N aplicadas no plantio ou na soqueira no crescimento de raízes em profundidade. Os maiores efeitos referiram-se à dinâmica de crescimento e morte de raízes ao longo do ciclo, que ocorreu principalmente na camada de 0 a 20 cm. Battie-Laclau e Laclau (2009) também

observaram que a morte e renovação das raízes durante o ciclo de crescimento da cana-de-açúcar foram mais intensos na camada superficial do solo.

A massa de raízes aumentou do corte da cana-de-açúcar até cerca de 288 dac na USA, diminuindo a partir desta data até a colheita (349 dac). De dezembro a março observaram-se as melhores condições climáticas ao crescimento das plantas (Figura 3) e, devido à adequada umidade no solo durante esse período, a massa de raízes foi pouco alterada, favorecendo o acúmulo de biomassa da parte aérea. Por outro lado, de março a maio as condições climáticas foram mais adversas, promovendo o secamento do solo. Para sustentar a biomassa da parte aérea, houve aumento na densidade radicular em todos os tratamentos nesse período, visando diminuir os efeitos do secamento do solo no crescimento da planta. Evans (1964) observou considerável variação na capacidade de enraizamento entre variedades de cana. O autor sugeriu que raízes superficiais altamente ramificadas aumentam a tolerância à seca em cultivares com pequena biomassa de raízes, implicando que a intensidade de ramificação das raízes pode parcialmente compensar as restrições de volume de solo ocupado pelas raízes. O autor observou ainda que há diminuição na ramificação das raízes com o aumento da idade do canavial. Neste estudo, o mecanismo das plantas em aumentar a densidade radicular apresentou um limite, a partir do qual houve redução na densidade radicular de maio até a colheita da soqueira. Isso pode ter ocorrido tanto pela continuidade das condições climáticas adversas quanto pelo estágio fenológico da cultura, iniciando-se o período de senescência das folhas e maturação, contribuindo para a diminuição da massa de raízes.

O primeiro trabalho a constatar morte de raízes durante o ciclo da cultura de milho foi o de Mengel e Barber (1974). Esses autores observaram, em todas as camadas avaliadas (até 75 cm de profundidade), rápido crescimento radicular no início do ciclo, manutenção nos estádios intermediários e morte das raízes na maturação.

Enquanto a maior massa de raízes deste trabalho foi obtida em maio, na cana-planta nessa mesma área experimental a maior densidade radicular foi obtida em dezembro, com posterior diminuição até a colheita (OTTO et al., 2009 a). Além disso, no ciclo de cana planta a densidade radicular em dezembro foi maior que a obtida neste trabalho. Isso indica que há variação no crescimento radicular da cana-de-açúcar entre os ciclos de cana planta e cana soca e um dos fatores que podem contribuir para essa diferença refere-se à dinâmica de emergência e morte dos perfilhos, que é mais acentuada no ciclo da cana-planta.

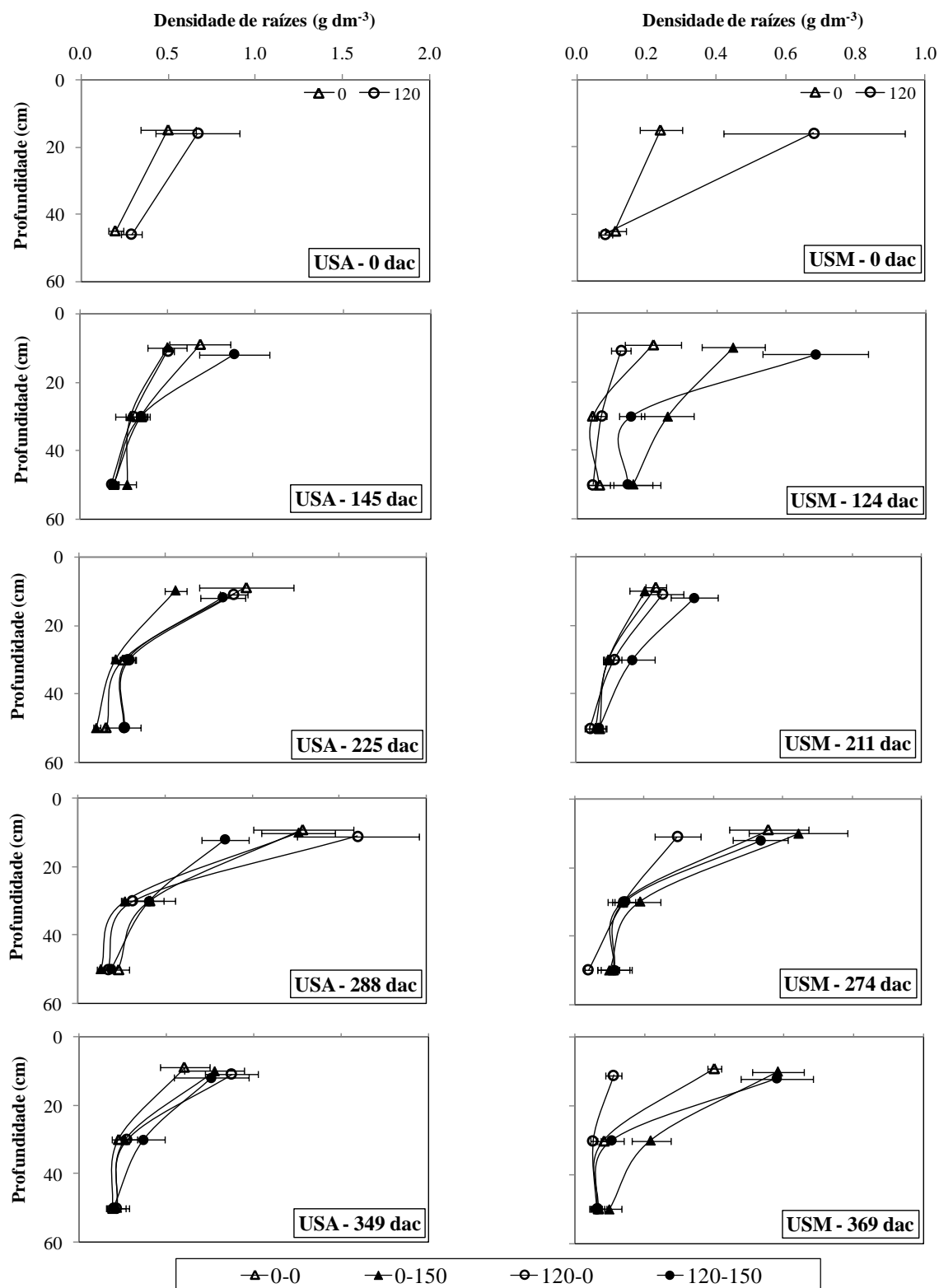


Figura 4 – Variação na densidade de raízes (g dm^{-3}) durante o ciclo de soqueira (*dac*, dias após o corte) nas Usinas Santa Adélia (USA) e São Martinho (USM) em função da adubação nitrogenada de plantio e soqueira, e em relação à profundidade de amostragem. As barras representam o erro padrão da média ($n=4$)

A variação na densidade radicular da cana-de-açúcar durante o ciclo já é bem reportada na literatura. Em adição às observações de Battie-Laclau e Laclau (2009), Ball-Coelho et al. (1992) e Vasconcelos (2002) também observaram variações na densidade radicular de soqueiras de cana-de-açúcar durante o desenvolvimento das plantas. Os resultados os três estudos sugerem que o crescimento e a morte das raízes está associado aos ciclos de umedecimento e secamento do solo. Em milho, Anderson (1987) observou que a densidade radicular aumentou durante o ciclo em um ano de seca, o que não foi observado em ano com distribuição normal de chuva.

No experimento da USM a fertilização nitrogenada alterou significativamente o crescimento radicular da cana-de-açúcar, de modo mais intenso do que o observado na USA. Na primeira avaliação, aos 124 dac, a fertilização nitrogenada de soqueira aumentou o crescimento radicular nas três camadas avaliadas, sem ocorrer efeito para a dose de N aplicada no plantio (Figura 4). De dezembro a março houve redução na densidade radicular, de modo que todas as doses apresentaram praticamente a mesma massa de raízes em março. Isso pode ter ocorrido devido à competição pelo crescimento da parte aérea das plantas, uma vez que foi o período com condições climáticas ideais para o crescimento da parte aérea (Figura 3). Assim como na USA, também houve aumento na densidade radicular de março a maio, possivelmente devido ao mecanismo das plantas em aumentarem a densidade radicular para compensar o secamento do solo. Apesar do secamento do solo de maio a agosto, a massa de raízes se manteve constante até a colheita (diferentemente da USA), possivelmente devido a uma chuva atípica (cerca de 80 mm em Jul./07, Figura 3), que pode ter favorecido o crescimento das raízes até a colheita, em Ago./07. Em maio e agosto o tratamento 120-0 apresentou a menor densidade radicular, sendo também o que apresentou a menor massa da parte aérea (Figura 6). Na colheita, as plantas que receberam fertilização nitrogenada de soqueira (0-150 e 120-150) apresentaram maior densidade radicular, inclusive na camada de 20 a 40 cm, como observado para o tratamento 0-150 (Figura 4).

O efeito da fertilização nitrogenada no aumento da densidade radicular já foi reportado para outras culturas. Em milho, foi observado aumento na densidade radicular devido à aplicação de fertilizante nitrogenado em diversos trabalhos (MACKAY; BARBER, 1986; ANDERSON, 1987; ANGHINONI; BARBER, 1988; DURIEUX et al., 1994), especialmente no início do ciclo. Na maioria desses trabalhos o fertilizante promoveu proliferação das raízes no local da aplicação do fertilizante, o que também foi observado em cevada cultivada em solução nutritiva (DREW, 1975). Por outro lado, Anderson (1987)

observou efeito negativo das doses de N na massa de raízes na época da colheita, mesmo com o aumento no comprimento radicular observado durante o ciclo. Otto et al. (2009 a), no ciclo de cana-planta, observou que o N aumentou a massa de raízes durante o ciclo em um solo eutrófico (Usina São Luis), porém também não encontrou efeito do N no crescimento das raízes na USA.

De maneira geral, obteve-se maior densidade radicular na USA do que na USM (Figura 4). Isso deveu-se possivelmente às melhores condições para o crescimento radicular na USA, como menor resistência à penetração, uma vez que a resistência do solo à penetração reduz o crescimento das raízes (MONTEITH; BANATH, 1965). Aboyamy (1989) também obteve maior densidade de raízes em um solo de textura arenosa do que argilosa. Esse autor observou que a massa de raízes no solo argiloso representou 17% da massa de raízes observada no solo arenoso aos 250-300 dias de ciclo de cana-planta, aumentando para 59% na segunda soqueira. Adicionalmente, deve-se considerar que na área da USA foi realizado preparo profundo do solo (aração e gradagens), enquanto que na USM foi realizado cultivo mínimo (subsolação e sulcação), o que pode explicar as densidades maiores observadas no solo da USM (Tabela 1) quando comparada a solos de textura semelhante. Uma vez que houve maior crescimento radicular no solo da USA, é de se esperar um menor efeito da adubação nitrogenada nesse solo, pois as raízes puderam explorar maior volume de solo e possivelmente absorver maior quantidade de N derivado do solo em comparação ao solo da USM.

Os resultados de densidade radicular da cana-de-açúcar obtidos durante o ciclo da soqueira, nas duas áreas experimentais, permitem concluir que a dinâmica de crescimento e morte de raízes é intensa na camada superficial do solo e está intimamente relacionado com o crescimento da parte aérea e com a disponibilidade hídrica, como também observado por Vasconcelos (2002) e Battie-Laclau e Laclau (2009).

Efeito da distância da planta

Na colheita da cana-planta, a adubação nitrogenada aumentou a densidade de raízes a 0,3 m da planta na área da USA e sobre a linha de cana na USM (Tabela 3). Durante o ciclo de soqueira, as doses de N aplicadas tanto no plantio quanto na soqueira não apresentaram efeito na distribuição de raízes na área da USA (Tabela 3). Por outro lado, na USM a adubação de soqueira (150 kg ha^{-1} de N) promoveu aumento na densidade radicular a 0 e 0,3

m de distância das plantas em Dez./06 (124 dac). Esse efeito desapareceu nas duas avaliações seguintes (Mar./07 e Mai./07) e foi observado novamente na colheita, em Ago./07. O efeito da proliferação de raízes no local de aplicação do fertilizante nitrogenado já foi confirmado em milho, tanto em condições de vaso (ANGHINONI; BARBER, 1974) quanto em campo (DURIEUX et al., 1994).

Table 3 – Variação da densidade de raízes (g dm^{-3}) de cana-de-açúcar durante o ciclo de soqueira (*dac*, dias após o corte) nas Usinas Santa Adélia (USA) e São Martinho (USM) em função da adubação nitrogenada de plantio e de soqueira, em relação à distância da linha†

Trat.‡	Distância (m)						Distância (m)					
	0		0,3		0,6		0		0,3		0,6	
	USA						USM					
	Jul/06 (0 dac)						Ago/06 (0 dac)					
0	0,76	(0,19)	0,19	(0,03)	0,10	(0,02)	0,31	(0,07)	0,13	(0,04)	0,07	(0,03)
120	0,98	(0,19)	0,33	(0,07)	0,14	(0,03)	1,00	(0,33)	0,13	(0,03)	0,02	(0,01)
	Dez/06 (145 dac)						Dez/06 (124 dac)					
0-0	0,78	(0,36)	0,23	(0,07)	0,21	(0,05)	0,26	(0,17)	0,04	(0,03)	0,02	(0,01)
0-150	0,63	(0,21)	0,31	(0,10)	0,11	(0,04)	0,70	(0,24)	0,13	(0,06)	0,03	(0,01)
120-0	0,53	(0,11)	0,30	(0,10)	0,14	(0,07)	0,22	(0,08)	0,02	(0,01)	0,00	(0,00)
120-150	0,87	(0,36)	0,32	(0,15)	0,23	(0,09)	0,90	(0,46)	0,07	(0,03)	0,01	(0,01)
	Mar/07(225 dac)						Mar/07 (211 dac)					
0-0	0,99	(0,65)	0,28	(0,08)	0,11	(0,04)	0,27	(0,10)	0,09	(0,03)	0,04	(0,02)
0-150	0,61	(0,27)	0,18	(0,07)	0,08	(0,03)	0,22	(0,10)	0,09	(0,03)	0,04	(0,01)
120-0	0,99	(0,34)	0,29	(0,09)	0,15	(0,07)	0,24	(0,11)	0,10	(0,07)	0,05	(0,03)
120-150	0,92	(0,39)	0,25	(0,12)	0,19	(0,04)	0,37	(0,16)	0,14	(0,06)	0,07	(0,03)
	Mai/07 (288 dac)						Mai/07 (274 dac)					
0-0	1,38	(0,70)	0,35	(0,20)	0,21	(0,08)	0,68	(0,43)	0,11	(0,04)	0,03	(0,01)
0-150	1,23	(0,72)	0,30	(0,20)	0,14	(0,04)	0,77	(0,41)	0,13	(0,06)	0,04	(0,02)
120-0	1,68	(1,06)	0,30	(0,12)	0,12	(0,05)	0,28	(0,12)	0,14	(0,07)	0,06	(0,03)
120-150	0,98	(0,42)	0,31	(0,13)	0,15	(0,06)	0,60	(0,31)	0,15	(0,04)	0,05	(0,02)
	Jul/07(349 dac)						Ago/07 (369 dac)					
0-0	0,61	(0,29)	0,22	(0,09)	0,19	(0,04)	0,48	(0,22)	0,06	(0,04)	0,01	(0,01)
0-150	0,77	(0,43)	0,35	(0,14)	0,14	(0,04)	0,74	(0,34)	0,13	(0,09)	0,02	(0,01)
120-0	0,96	(0,41)	0,28	(0,15)	0,13	(0,04)	0,13	(0,04)	0,07	(0,02)	0,03	(0,02)
120-150	0,86	(0,46)	0,33	(0,08)	0,14	(0,05)	0,63	(0,36)	0,07	(0,03)	0,04	(0,02)

†valores representam a soma da densidade de raízes obtida nas profundidades de 0 a 0,2m, 0,2 a 0,4 m e 0,4 a 0,6 m, para cada distância especificada. Valores entre parênteses representam o erro padrão da média (n-4)

‡os primeiros valores (0 ou 120) indicam as doses de N aplicadas no plantio e os segundos valores (0 ou 150) indicam a dose de N aplicadas na soqueira, em kg ha^{-1}

Na USM a densidade radicular na entrelinha (0,6 m de distância das plantas) foi muito inferior à obtida na área da USA, possivelmente em decorrência da maior restrição ao crescimento radicular neste solo.

3.3.3 Biomassa, teor e acúmulo de N nos compartimentos da planta durante o ciclo

Na área da USA, a biomassa de raízes permaneceu constante de 0 a 225 dac (Tabela 4), evidenciando que o sistema radicular não está sendo completamente substituído como reportado em estudos prévios (JENSEN, 1931; BAVER et al., 1962; EVANS, 1964; CLEMENTS, 1980). Na área da USM, que apresentou limitações ao desenvolvimento radicular, a biomassa de raízes diminuiu de 0 a 124 dac (Tabela 5), devido principalmente ao crescimento limitado das raízes nos tratamentos que não receberam N na soqueira. A adubação nitrogenada aumentou a biomassa de raízes na área da USM na colheita da cana-planta e aos 124 dac, sugerindo que a adição de N pode diminuir a morte de raízes neste tipo de solo.

Glover (1968) observou que quando há disponibilidade de água na camada superficial do solo após a colheita, os novos perfilhos podem ser sustentados pelas raízes superficiais. Entretanto, o autor salienta que a persistência do sistema radicular antigo é importante para a sobrevivência da touceira e o crescimento da soqueira durante períodos secos após a colheita. Ball-Coelho et al. (1992) estimou que a morte das raízes no período de 2 semanas após a colheita contabilizou 17% da massa de raízes inicialmente presente. Na área da USM a massa de raízes diminuiu 36% nos 2 meses seguintes à colheita, enquanto que na área da USA a massa de raízes permaneceu constante nesse mesmo período.

Na área da USA a adubação nitrogenada não apresentou efeito na fitomassa, conteúdo de N e acúmulo de N nos compartimentos da planta durante o ciclo (Tabela 4). As principais observações foram variações temporais na fitomassa das raízes e da parte aérea. Enquanto a maior fitomassa de raízes foi encontrada aos 288 dac, a fitomassa da parte aérea foi crescente ao longo do ciclo. Apesar do aumento crescente da fitomassa, o acúmulo de N na parte aérea foi semelhante entre 225 e 288 dac, provavelmente devido à morte e secamento das folhas verdes, que posteriormente não foram quantificadas na amostragem.

Embora não tenha sido observado efeito da adubação de plantio ou de soqueira nos rizomas (biomassa, conteúdo e acúmulo de N), este compartimento acumulou cerca de 20 kg ha⁻¹ de N, praticamente o dobro da quantidade de N acumulada nas raízes.

Tabela 4 - Biomassa, teor e acúmulo de N nos compartimentos da planta (raízes, rizoma e parte aérea) durante o ciclo de soqueira na Usina Santa Adélia em função da adubação nitrogenada de plantio (efeito residual) e de soqueira

Tratamento†	Dias após a colheita					Dias após a colheita				
	0	145	225	288	349	0	145	225	288	349
	Raízes§					Parte aérea§				
	<i>Biomassa (t ha⁻¹)</i>									
0-0	1,61 a	1,99 a	2,11 a	3,55 a	1,73 a (5,17 a)	-	5,51 a	20,28 a	27,83 b	39,36 a
0-150	1,61 a	1,68 a	1,35 a	2,54 b	2,11 a (4,32 a)	-	9,94 a	22,62 a	29,89 b	40,50 a
120-0	2,29 a	1,83 a	2,26 a	3,75 a	2,13 a (4,52 a)	-	8,52 a	18,90 a	35,55 a	40,84 a
120-150	2,29 a	2,35 a	2,16 a	2,56 b	2,16 a (4,35 a)	-	6,44 a	18,24 a	26,60 b	39,92 a
Média	1,95 B	1,97 B	1,97 B	3,10 A	2,03 B		7,60 D	20,01 C	29,97 B	40,15 A
	<i>Teor de N (g kg⁻¹ N)</i>									
0-0	4,75 a	3,78 a	4,90 a	3,58 a	4,58 a (4,00 a)	-	9,38 b	4,53 b	3,68 a	3,10 a
0-150	4,75 a	4,48 a	4,88 a	4,55 a	5,20 a (4,48 a)	-	10,40 ab	4,33 b	3,33 a	3,17 a
120-0	4,98 a	3,20 a	3,73 ab	3,40 a	5,03 a (4,45 a)	-	9,85 b	5,43 ab	3,68 a	3,15 a
120-150	4,98 a	3,35 a	3,40 b	4,08 a	4,68 a (3,95 a)	-	11,10 a	6,40 a	3,48 a	3,31 a
Média	4,86 A	3,70 B	4,23 AB	3,90 B	4,87 A		10,18 A	5,17 B	3,54 C	3,18 C
	<i>Acúmulo de N (kg ha⁻¹ N)</i>									
0-0	7,58 a	7,56 a	9,99 a	12,83 a	7,95 a (20,64 a)	-	50,94 c	92,26 a	102,07 b	122,51 a
0-150	7,58 a	7,45 a	6,60 a	11,53 a	10,91 a (19,66 a)	-	103,50 a	97,68 a	99,45 b	128,49 a
120-0	11,16 a	5,88 a	8,52 a	12,84 a	10,59 a (19,95 a)	-	82,67 ab	101,25 a	130,57 a	142,10 a
120-150	11,16 a	7,71 a	7,20 a	10,28 a	10,07 a (16,92 a)	-	71,30 bc	115,85 a	91,81 b	137,25 a
Média	9,37 AB	7,15 B	8,08 B	11,87 A	9,88 AB		77,10 C	101,76 B	105,98 B	132,59 A

†Os primeiros valores (0 ou 120) indicam as doses de N no plantio e os segundos valores (0 ou 150) indicam as doses de N na soqueira, em kg ha⁻¹

‡Valores entre parênteses referem-se aos compartimentos subterrâneos (rizoma)

§Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha indicam não haver diferença entre os tratamentos, enquanto letras maiúsculas diferentes na coluna indicam haver diferença entre os dias de ciclo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância

Na área da USM, a adubação nitrogenada de soqueira aumentou a fitomassa de raízes aos 124 e 369 dac (Tabela 5), além de aumentar a fitomassa da parte aérea aos 211 e 369 dac e o acúmulo de N na parte aérea em todos os períodos. Esses resultados demonstram que o aumento da fitomassa de raízes está relacionado à maior absorção de N pelas plantas, o que também foi observado em milho por Mackay e Barber (1986).

Similarmente ao observado na área da USA, na USM a maior fitomassa de raízes foi obtida aos 274 dac e a fitomassa da parte aérea continuou aumentando ao longo do ciclo (Tabela 5). Por outro lado, o acúmulo de N na parte aérea diminuiu dos 211 aos 274 dac. Isso pode estar relacionado à perdas naturais de amônia pelos estômatos, assim como à senescência das folhas verdes. A concentração de amônia na planta aumenta com o envelhecimento das folhas (MATTSON; HUSTED; SCHJOERRING, 1998) e, uma vez que elevadas concentrações de amônia são tóxicas às plantas (HOLTAN-HARTWING; BOCKMAN, 1994; MATTSON et al., 1998), perdas naturais de amônia podem ocorrer através dos estômatos, o que foi indiretamente observado em cana-de-açúcar por Ng Kee Kwong e Deville (1994) e por Trivelin (2000).

Em ambos experimentos o N acumulado nos compartimentos subterrâneos (rizomas) representou cerca de 15% do N acumulado na parte aérea e pode representar importante fonte de N para as rebrotas subsequentes. Carneiro et al. (1985), utilizando o traçador ^{15}N , observou que 6 a 12 kg ha⁻¹ de N acumulado nos rizomas foi translocado para novos tecidos de crescimento da cana-de-açúcar, representando de 5 a 10% do N acumulado na cana-planta, semelhante aos resultados obtidos neste estudo. No trabalho desenvolvido por Vitti et al. (2007), o N acumulado no sistema radicular foi positivamente correlacionado com a produtividade da soqueira subsequente, mostrando a importância do N acumulado nos compartimentos subterrâneos na manutenção da produtividade da cana-de-açúcar.

Tabela 5 - Biomassa, teor e acúmulo de N nos compartimentos da planta (raízes, rizoma e parte aérea) durante o ciclo de soqueira na Usina São Martinho em função da adubação nitrogenada de plantio (efeito residual) e de soqueira

Tratamento†	Dias após a colheita					Dias após a colheita				
	0	124	211	274	369‡	0	124	211	274	369‡
	Raízes§					Parte aérea§				
	Biomassa ($t\ ha^{-1}$)									
0-0	0,87 b	0,47 b	0,62 a	1,14 a	0,75 b (2,96 a)	-	3,54 a	14,41 ab	23,17 a	33,42 a
0-150	0,87 b	1,23 a	0,57 a	1,32 a	1,26 a (2,98 a)	-	3,91 a	16,03 ab	21,50 a	34,77 a
120-0	1,55 a	0,32 b	0,73 a	0,91 a	0,36 b (2,79 a)	-	2,33 a	12,84 b	20,53 a	29,09 b
120-150	1,55 a	1,06 a	0,93 a	1,20 a	1,03 a (3,26 a)	-	3,27 a	17,43 a	20,08 a	31,92 ab
Média	1,21 A	0,77 C	0,72 C	1,14 AB	0,85 BC		3,26 D	15,18 C	21,32 B	32,30 A
	Teor de N ($g\ kg^{-1}\ N$)									
0-0	3,70 a	3,23 a	4,08 a	3,80 a	4,20 b (4,53 a)	-	10,55 b	4,23 b	2,90 a	3,02 a
0-150	3,70 a	3,40 a	4,53 a	3,95 a	4,25 b (4,75 a)	-	12,55 a	5,47 ab	3,23 a	3,28 a
120-0	4,20 a	3,98 a	4,65 a	4,38 a	4,20 b (4,20 a)	-	12,53 a	6,03 a	2,80 a	3,43 a
120-150	4,20 a	3,35 a	4,45 a	4,30 a	5,43 a (5,35 a)	-	12,48 a	5,08 ab	3,35 a	3,51 a
Média	3,95 BC	3,49 C	4,43 AB	4,11 A	4,52 A		12,03 A	5,20 B	3,07 C	3,31 C
	Acúmulo de N ($kg\ ha^{-1}\ N$)									
0-0	3,21 b	1,53 b	2,44 a	4,26 a	3,08 b (13,07 a)	-	36,82 b	60,97 c	66,82 a	101,01 b
0-150	3,21 b	4,20 a	2,57 a	5,18 a	5,44 a (13,75 a)	-	48,32 a	87,44 a	70,10 a	113,54 a
120-0	6,51 a	1,26 b	3,37 a	3,93 a	1,50 b (11,51 a)	-	27,78 c	77,30 b	57,62 b	99,76 b
120-150	6,51 a	3,42 a	4,16 a	5,14 a	5,57 a (16,42 a)	-	40,18 ab	87,56 a	67,25 a	111,95 a
Média	4,86 A	2,60 C	3,13 BC	4,63 A	3,90 AB		38,27 D	78,32 B	65,45 C	106,56 A

†Os primeiros valores (0 ou 120) indicam as doses de N no plantio e os segundos valores (0 ou 150) indicam as doses de N na soqueira, em $kg\ ha^{-1}$

‡Valores entre parênteses referem-se aos compartimentos subterrâneos (rizoma)

§Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha indicam não haver diferença entre os tratamentos, enquanto letras maiúsculas diferentes na coluna indicam haver diferença entre os dias de ciclo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância

3.3.4 Dinâmica da relação raiz: parte aérea durante o ciclo

A relação raiz: parte aérea foi maior no início do ciclo de crescimento da soqueira e diminuiu nos períodos subsequentes (Figura 5). Isso se deve à baixa taxa de crescimento da parte aérea no início do ciclo, o que, associado à biomassa de raízes já existente da cultura do ciclo anterior, resulta em elevada relação raiz: parte aérea no início do ciclo. À medida que inicia-se o rápido crescimento da parte aérea, associado à pequena variação da biomassa de raízes ao longo do ciclo, ocorre diminuição contínua da relação raiz: parte aérea com a evolução do crescimento da cana-de-açúcar. Destes resultados pode-se concluir que a planta direciona os fotoassimilados primeiramente para manutenção do sistema radicular no início do ciclo e posteriormente para o crescimento da parte aérea. Estes resultados estão de acordo com as observações de Smith, Inmam-Bamber e Thorburn (2005), de que a cana-de-açúcar, assim como outras gramíneas, apresenta elevada relação raiz: parte aérea no início do ciclo com posterior diminuição até a colheita.

Na área da USM a adubação nitrogenada de soqueira aumentou a relação raiz: parte aérea no início do ciclo (Figura 5), devido ao aumento da fitomassa de raízes proporcionado pela adubação de soqueira nesse período. Com o avanço da idade do canavial as diferenças desapareceram e, a partir de 211 dac, a relação tornou-se semelhante entre todos os tratamentos. De maneira geral, a relação raiz: parte aérea atingiu valores da ordem de 0,15 a 0,40 kg kg⁻¹ aos 120 dac e, na colheita, de 0,05 kg kg⁻¹. Cultivando cana-de-açúcar em condições de vaso, Smith (1998) observou relação raiz: parte aérea de 0,42 kg kg⁻¹ aos 50 dias de ciclo, decrescendo para valores da ordem de 0,15 kg kg⁻¹ aos 200 dias de ciclo; este foi ligeiramente superior aos valores obtidos neste trabalho, possivelmente pela diferença no comportamento de crescimento das plantas em condições de vaso e de campo.

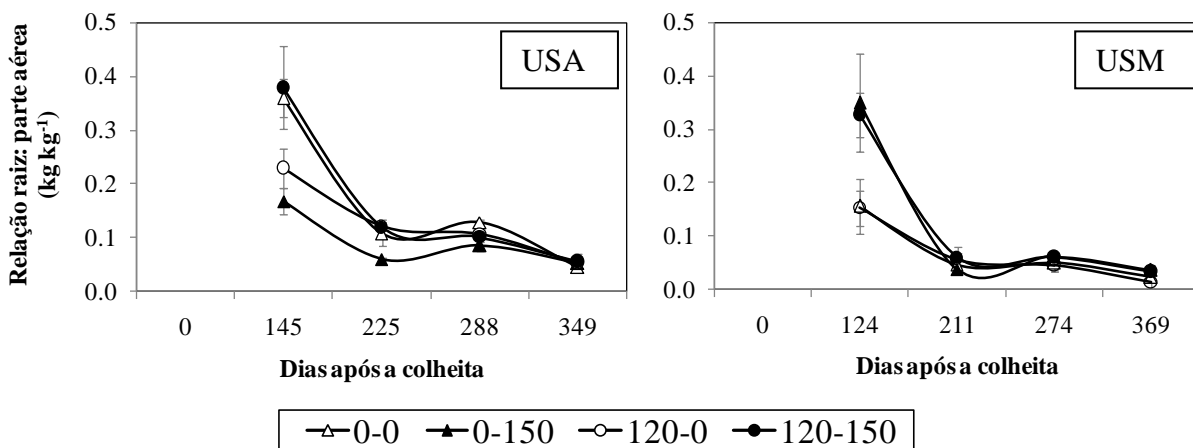


Figura 5 – Dinâmica da relação raiz: parte aérea durante o ciclo de soqueira nas Usinas Santa Adélia (USA) e São Martinho (USM), em função da adubação nitrogenada de plantio (0 ou 120 kg ha⁻¹ N) ou de soqueira (0 ou 150 kg ha⁻¹ N). No cálculo da relação raiz: parte aérea na colheita da cana-planta (0 dias após a colheita), foram utilizados os resultados dos tratamentos 0 e 120 kg ha⁻¹ N obtidos na colheita da cana-planta por Otto (2007). As barras representam o erro padrão da média (n=4)

3.4 Discussão

A adubação nitrogenada aumentou a densidade de raízes na colheita da cana-planta e ao longo do ciclo de soqueira na área da USM. Na área da USA, a adição de N fertilizante apresentou pouco efeito no desenvolvimento do sistema radicular (Figura 4). O aumento na densidade radicular observado na USM ocorreu principalmente na distância < 0,3 m das plantas (Tabela 3). Já na área da USA, o sistema radicular apresentou melhor distribuição no perfil de solo (Tabela 3), diminuindo as chances da fertilização nitrogenada favorecer o crescimento das plantas nessa área.

Os efeitos da adubação nitrogenada no crescimento e acúmulo de N na parte aérea foi variável entre os locais (Tabela 4 e 5). A principal observação foi a variação temporal na biomassa de raízes e da parte aérea. Os efeitos da adubação nitrogenada nestes parâmetros ocorreram principalmente no início do ciclo, diminuindo com o avanço do ciclo. Esse comportamento era esperado, pois a participação do N derivado do fertilizante é maior no início do ciclo (FRANCO et al., 2011), diminuindo com o aumento da idade do canavial devido à maior participação de outras fontes de N na nutrição da cana, como a mineralização do N do solo.

Dos resultados deste estudo conclui-se que a resposta da cana-de-açúcar em termos de crescimento dos compartimentos subterrâneos e da parte aérea em relação ao N é dependente das condições de solo. Enquanto a fertilização nitrogenada não apresentou efeito nesses parâmetros na área da USA, para a área da USM os resultados mostram um típico aumento de

crescimento radicular no local que recebeu o fertilizante nitrogenado, o que vêm sendo reportado também para outras culturas (especialmente milho).

Segundo Dourado-Neto et al. (2010) e outros autores, enquanto os fertilizantes inorgânicos servem como uma fonte imediata de N às plantas, a principal fonte de N para as culturas é o N estocado na matéria orgânica do solo. Uma vez que o solo é a principal fonte de N para as plantas por meio da mineralização do N do solo, é esperado que irá ocorrer uma pequena dependência das plantas ao N fertilizante em condições em que o sistema radicular das plantas explorem eficientemente o perfil do solo. Como esperado, no solo com melhores condições ao crescimento radicular – promovido pelo preparo profundo, menor conteúdo de argila, maior difusão de O₂ e menor resistência do solo à penetração (área da USA), a adubação nitrogenada de soqueira apresentou um pequeno efeito no desenvolvimento do sistema radicular, resultando em ausência de efeito do N fertilizante no crescimento da parte aérea e no acúmulo de N pela planta. Por outro lado, no solo que apresentou limitações ao crescimento radicular – promovido pelo cultivo mínimo, alto teor de argila, menor difusão de O₂ e elevada resistência à penetração (área da USM), a adubação nitrogenada de soqueira apresentou efeito significativo no desenvolvimento do sistema radicular e conseqüentemente no crescimento e acúmulo de N da parte aérea.

A variação na biomassa de raízes ao longo do ciclo (Tabelas 4 e 5) suportam as observações de Ball-Coelho et al. (1992) e Smith, Inmam-Bamber e Thorburn (2005), de que o sistema radicular da cana-de-açúcar não é completamente substituído de um ciclo para outro, em contraste com observações de outros autores (BAVER et al., 1962; CLEMENTS, 1980; EVANS, 1964; JENSEN, 1931). Os resultados das duas áreas confirmam que há variação no crescimento das raízes durante o ciclo de soqueira, especialmente na camada superficial do solo, o que já havia sido reportado para cana-planta (Otto et al., 2009 a). Battie-Laclau e Laclau (2009) também observaram que a morte e restabelecimento das raízes durante o ciclo é mais intenso na camada superficial do solo, o que provavelmente tem implicações para a ciclagem e acúmulo de C no solo. Aqueles autores também observaram que a camada superficial do solo apresentou a maior variabilidade no conteúdo de água ao longo do ciclo de cana-planta, o que explica a dinâmica de renovação de raízes nessa camada. A variação da bioamassa de raízes foi dependente das condições climáticas e do crescimento da parte aérea da cultura, devido à competição na alocação de C proveniente dos fotoassimilados da planta.

Os resultados obtidos neste estudo mostram que o sistema radicular da cana-de-açúcar é altamente dependente das condições do solo. Assim, espera-se que em estudos semelhantes que sejam realizados em outras condições ao redor do mundo, com diferentes manejos e práticas de fertilização, o sistema radicular será afetado principalmente por propriedades do solo como textura, densidade, resistência à penetração e dinâmica da água do que propriamente pelo suprimento de nutriente, como demonstrado por nossos resultados. Adicionalmente, para garantir dados de alta qualidade em estudos com densidade radicular de culturas no campo, é essencial utilizar técnicas adequadas, assim como repetir as avaliações ao longo do ciclo e em diversas posições no perfil do solo, buscando representar a variação temporal e espacial do crescimento de raízes das plantas. Uma vez que estudos avaliando o sistema radicular das culturas são escassos, mais estudos são encorajados na tentativa de melhorar a compreensão dos processos e fatores que governam o crescimento das raízes em condições de campo, e sua influencia no crescimento da parte aérea das plantas.

3.5 Conclusões

A variação na densidade de raízes de cana-de-açúcar ao longo do ciclo sofreu pouca influência das doses de nitrogênio, sendo mais influenciada pelas propriedades do solo, como textura, densidade e resistência à penetração, bem como a variação da umidade do solo.

No solo mais arenoso (USA), o sistema radicular da cana explorou o perfil do solo eficientemente e a adubação nitrogenada de soqueira apresentou pequeno efeito no desenvolvimento das raízes, resultando na ausência de efeito do N no crescimento e acúmulo de nutrientes na parte aérea. Por outro lado, solo mais argiloso (USM) o crescimento radicular foi limitado e a adubação nitrogenada de soqueira aumentou a densidade de raízes e conseqüentemente o acúmulo de N na parte aérea. Em ambas as áreas, não houve efeito residual da adubação nitrogenada de plantio no crescimento de raízes e parte aérea durante o ciclo de primeira soqueira.

A relação raiz: parte aérea foi maior no início do ciclo e diminuiu posteriormente até a colheita, com valores entre 0,15 a 0,40 kg kg⁻¹ no início do ciclo e 0,05 kg kg⁻¹ na colheita. Cerca de 15% de todo o N acumulada nas plantas de cana-de-açúcar foi encontrado nos compartimentos subterrâneos (raízes e rizomas), representando importante fonte de reservas nutricionais para a rebrota subsequente.

3.6 Referências

ABOYAMI, Y.A. Effect of soil type and crop cycle on root development and distribution pattern of a commercial sugarcane cultivar under normal irrigation and field conditions at Bacita Estate, Nigeria. **Turrialba**, San José, v. 39, p. 78–84, 1989.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). 1998.

ANDERSON, E.L. Corn root growth and distribution as influenced by tillage and nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 544-549, 1987.

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Corn root growth and nitrogen uptake as affected by ammonium placement. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 799-802, 1988.

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

BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J.P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 114, p. 351-360, 2009.

BAVER, L.D.; BRODIE, H.; TANIMOTO, T.; TROUSE, A.C. New approaches to the study of cane root systems. **Proceedings International Society of Sugar Cane Technologists**, Kwashukela, v. 11, p. 248-253, 1962.

BLACKBURN, F. **Sugar-cane**. Singapore: Longman 1984.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Soil and plant analyses for lime and fertilizer recommendations in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 29, p. 1691-1706, 1988.

CARNEIRO, A.E.V.; TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L. Utilização da reserva orgânica e de nitrogênio no tolete de plantio (colmo-semente) no desenvolvimento da cana-planta. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, p. 199-209, 1995.

CLEMENTS, H.F. **Sugar cane crop logging and crop control**. Principles and practices. Honolulu: University Press of Hawaii, 1980. p.166.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. Pressure plate extractor.. In.: DANE, J.H., TOPP, G.C. (Ed.) **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison: Soil Science Society America, 2002. v. 4 p. 688-690

DOURADO-NETO, D.; POWLSON, D.; ABU-BAKAR, R.; BACCHI, O.O.S.; BASANTA, M.V.; THI CONG, P.; KEERTHISINGHE, G.; ISMAILI, M.; RAHMAN, S.M.; REICHARDT, K.; SAFWAT, M.S.A.; SANGAKKARA, R.; TIMM, L.C.; WANG, J.Y.;

- ZAGAL, E.; KESSEL, C. van. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, p. 139-152, 2010.
- DREW, M.C. Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. **New Phytologist**, London, v. 75, p. 479-490, 1975.
- DURIEUX, R.P.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A.; MOLL, R.H. Root distribution of corn: the effect of nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 958-962, 1994.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- EVANS, D.H. The root system of sugarcane - an evaluation of its salient features. **Indian Journal of Sugarcane Research and Development**, New Delhi, v. 8, p. 161-171, 1964.
- FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, p. 29-41, 2011.
- GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, p. 347-352, 2009.
- GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In.: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. p. 255-289.
- GLOVER, J. The behavior of the root system of sugar cane at and after harvest. **Proceedings South African Sugarcane Technologists' Association**, Mount Edgecombe, v. 42, p. 133-135, 1968.
- GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In.: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 4. p. 201-228.
- HOLTAN-HARTWIG, L.; BOCKMAN, O.C. Ammonia exchange between crops and air. **Norwegian Journal Agricultural Science**, Moerveien, p. 1-41, Supplement 14, 1994.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Séries estatísticas & Séries históricas. Produção agrícola municipal. Acesso em Novembro de 2011. Disponível em: http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/lista_tema.aspx?op=0&no=1
- JENSEN, J.H. **Some studies of root habits of sugar cane in Cuba**. Yonkers: Tropical Plant Resources Foundation Science Contribution, 1931. n. 21, 37p.
- MACKAY, A.D.; BARBER, S.A. Effect of nitrogen on root growth of two corn genotypes in the field. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, p. 699-703, 1986.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**, 2. ed. Piracicaba: Potafós, 1997. 319 p.

MATTSON, M.; HUSTED, S.; SCHJOERRING, J.K. Influence of nutrition and metabolism on ammonia volatilization in plants. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 51, p. 35-40, 1998.

MENGEL, D.B.; BARBER, S.A. Development and distribution of the corn root system under field conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, p. 341-344, 1974.

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

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

OTTO, R. **Desenvolvimento de raízes e produtividade de cana-de-açúcar relacionados à adubação nitrogenada**. 2007. 119 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/>

OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 398-405, 2009b.

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

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

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

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F.; LANDELL, M.G.A.; CANTARELLA, H.; TAVARES, S.; VITTI, A.C.; PERECIN, D. N and K fertilization of sugarcane ratoons harvested without burning. **Proceeding International Society Sugar Cane Technology**, Veracruz, v. 27, p. 1-8, 2010.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; CAVALCANTI, F.J.A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. III: conteúdo de nutrientes e distribuição radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, p. 25-431, 1987.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 169-183, 2005.

SMITH, J.P. **Studies on the relation between root growth and shoot growth of sugarcane.** 1998. Thesis(M.Sc.) - James Cook University, Townsville, 1998.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy.** 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, 2010. 344p.

TEYKER, R.H.; HOBBS, D.C. Growth and root morphology of corn as influenced by nitrogen form. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, p. 694-700, 1992.

THORBURN, P.J.; BIGGS, J.S.; WEBSTER, A.J.; BIGGS, I.M. An improved way to determine nitrogen fertilizer requirements of sugarcane crops to meet global environmental challenges. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 339, p. 51-67, 2011.

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

TRIVELIN, P.C.O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: três casos estudados com o uso do traçador ¹⁵N.** 2000. 143 p. Tese (Livre Docência) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

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. 140 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2002.

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

4 QUANTIFICANDO A MINERALIZAÇÃO DO NITROGÊNIO DO SOLO PARA O MANEJO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

O uso intensivo de fertilizante nitrogenados na produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) apresenta desafios ambientais para a qualidade do ar e da água, influenciando ainda a rentabilidade dos produtores. A generalização da recomendação baseada na produtividade esperada se baseia em modelos genéricos de resposta da cultura ao N, não considerando a capacidade de fornecimento de N pelo solo que é um determinante crítico da necessidade de N para produção de cereais, fibras e energia. Este trabalho foi desenvolvido para verificar o impacto da mineralização do N do solo na resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada, sendo realizado em conjunto com dez experimentos de resposta ao N realizados entre 2006 e 2010 em condições de campo na maior área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil. Amostras de solo foram utilizados para separar os locais em altamente responsivos, moderadamente responsivos e não responsivos ao N, com base em dois índices químicos de disponibilidade do N, o Illinois Soil Nitrogen Test (ISNT) e a destilação a vapor direta (DVD), além de avaliações de (1) mineralização bruta pela técnica de diluição isotópica de $^{15}\text{NH}_4^+$, (2) mineralização líquida durante incubação aeróbia por 12 semanas, e (3) mudanças nas frações de N do solo induzidas pela incubação mediante hidrólise ácida (N hidrolisável total, N- NH_4^+ hidrolisável, N-amino-açúcar e N-amino-ácido) ou hidrólise alcalina (N-ISNT). Dos parâmetros avaliados, a mineralização bruta foi o mais preditivo da capacidade de resposta ao fertilizante nitrogenado, apresentando relação inversa com $<1,10 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para um local altamente responsivo, $1,10\text{-}2,37 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para cinco experimentos em três locais moderadamente responsivos, e $> 2,37 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para quatro experimentos em dois locais não responsivos. Não foi observada relação para mineralização líquida em condições aeróbias, embora a produção de N mineral foi acompanhada pela redução significativa na fração N- NH_4^+ hidrolisável e N-ISNT. Os resultados de ISNT e DVD foram altamente correlacionados, e ambos mostraram-se promissores para diferenciar os solos quando à responsividade ao N.

Palavras-chave: Illinois Soil Nitrogen Test-ISNT; Destilação a Vapor Direta-DVD; Mineralização bruta; Mineralização líquida; Fracionamento do N orgânico

Abstract

The intensive use of synthetic N fertilizers for sugarcane (*Saccharum* spp.) production presents environmental challenges for water and air quality, as well as impacting profitability for producers. Central to these concerns is a widespread reliance on yield-based recommendations that invoke generic models of crop N response but lack any means to account for variations in soil N-supplying power, a critical determinant of fertilizer N need for cereal, fiber, and tuber crops. The work reported herein was designed to ascertain the impact of soil N mineralization on sugarcane response to N fertilization, and was carried out in conjunction with ten N-response trials conducted between 2006 and 2010 at field sites in the largest sugarcane-cultivated area in Brazil. Soil samples were utilized in categorizing the sites as highly responsive, moderately responsive, or nonresponsive to fertilizer N, based on two chemical indices of soil N availability, the Illinois Soil N Test (ISNT) and direct steam distillation (DSD), and assessments of (1) gross mineralization by $^{15}\text{NH}_4^+$ pool dilution, (2) net mineralization during aerobic incubation for 12 wk, and (3) incubation-induced changes in soil N fractions obtained by acid (total hydrolyzable N, hydrolyzable $\text{NH}_4^+\text{-N}$, amino sugar N, and amino acid N) or alkaline (ISNT-N) hydrolysis. Of the parameters evaluated, gross mineralization was the most predictive of fertilizer N responsiveness, following an inverse relationship with $< 1.10 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ for one site that was highly responsive, 1.10 to $2.37 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ for five trials at three moderately responsive sites, and $> 2.37 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ for two nonresponsive sites. No such relationship was observed for net mineralization under aerobic conditions, although mineral N production was accompanied by significant decreases in hydrolyzable $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and ISNT-N. Test values by the ISNT and DSD were highly correlated, and both showed promise for differentiating soil responsiveness to fertilizer N.

Keywords: Illinois Soil Nitrogen Test-ISNT; Direct Steam Distillation-DSD; Gross mineralization; Net mineralization; Organic N fractionating

4.1 Introdução

Com a ênfase internacional sobre fontes renováveis de energia, cada vez mais atenção está sendo dada para o cultivo de cana-de-açúcar para a síntese de bioetanol, resultando em expansão da área em produção (NASS et al., 2007; HARTEMINK, 2008). O etanol produzido a partir da cana-de-açúcar tornou-se uma commodity energética global, que é economicamente competitiva quando comparada aos combustíveis derivados do petróleo (GOLDEMBERG, 2007). O seu uso é ambientalmente mais sustentável, devido em parte ao efeito mitigador da produção de biomassa nas emissões de gases de efeito estufa (MACEDO et al., 2008; VRIES et al., 2010).

O Brasil é o líder mundial de produção de cana-de-açúcar, cultivando cerca de 9,1 milhões de hectares em 2010 (IBGE, 2011). Potencialmente, essa área poderá expandir para cerca de 70 milhões de hectares, mesmo sem explorar áreas atualmente utilizadas para produção de alimentos ou sob mata nativa (MAPA, 2009). A produtividade média nacional é de 80 Mg ha⁻¹ (IBGE, 2011), embora Usinas que adotam um maior nível tecnológico obtenham produtividade média de cinco cortes entre 95 e 100 Mg ha⁻¹.

Fertilizantes sintéticos são utilizados extensivamente para aumentar a produtividade da cana-de-açúcar (FRANCO et al., 2011; THORBURN et al., 2011). A prática usual adotada em Usinas no Brasil é a aplicação de 40 a 60 kg N ha⁻¹ no plantio e, após cada corte, reaplicar entre 60 a 150 kg N ha⁻¹ ano⁻¹. As doses de N variam em função da produtividade obtida, visando minimizar o risco de deficiência de N (por exemplo, SPIRONELLO et al., 1997; LEGENDRE, 2001; SCHROEDER et al., 2006). Esta abordagem, entretanto, não considera a variação na capacidade de suprimento de N pelo solo e, assim, tende a promover o uso excessivo de N. Sub-fertilizações também podem ocorrer, principalmente quando o N do fertilizante está sujeito à imobilização após a adubação de soqueira em áreas de cana-crua (ROSSETTO et al., 2010).

A importância fundamental do N do solo para as plantas resulta da constatação de que a produtividade das parcelas do tratamento controle em estudos de resposta ao N muitas vezes excedem o aumento da produção provocado pela adição dos fertilizantes (por exemplo, AZEREDO et al., 1986; FREITAS et al., 1994; LORY; SCHARF, 2003; MULVANEY et al., 2006; PRADO; PANCELLI, 2008; CABRERA; ZUAZNÁBAR, 2010; FRANCO et al., 2010; ROSSETTO et al., 2010), exceto quando a disponibilidade de N do solo é reduzida pelo acúmulo de resíduos carbonáceos em experimentos com parcelas estáticas (*static*

plots). Mais uma prova deste comportamento é evidente a partir de numerosos estudos de campo utilizando fertilizantes marcados com ^{15}N , uma vez que na maioria dos casos a absorção de N pelas culturas é derivada principalmente do solo do que dos fertilizantes (por exemplo, TAKAHASHI, 1964; OLSON et al., 1979; WILSON et al., 1989; NORMAN et al., 1992; OMay et al., 1998; SCHINDLER e KNIGHTON, 1999; STEVENS; HOEFT; MULVANEY, 2005; LÓPEZ-BELLIDO; LÓPEZ-BELLIDO; LÓPEZ-BELLIDO, 2006; SILVA et al., 2006; DOURADO-NETO et al., 2010; FRANCO et al., 2011). A implicação dessas evidências é de que o fornecimento de N pelo solo deverá ser considerado quando se busca a otimização da adubação nitrogeanda (CASSMAN et al., 1998; LIU et al., 2005; MENGEL; HUTSH; KANE, 2006; MULVANEY et al., 2006; CUI et al., 2008). Testes de NO_3^- no perfil de solo são utilizados com esse propósito em regiões áridas ou semi-áridas, enquanto um desafio muito maior existe para climas mais úmidos, devido ao impacto das transformações microbianas na disponibilidade de N às plantas. A mineralização é o processo de maior importância pelo qual o N mineral é gerado a partir da reserva de N orgânico do solo. Entretanto, o produto (NH_4^+) está sujeito à assimilação pela microflora heterotrófica (imobilização), ao menos que a disponibilidade de C orgânico é limitada e ocorra a oxidação autotrófica (nitrificação), fornecendo NO_3^- para as plantas ou aumentando o risco de perda de N por lixiviação ou desnitrificação.

Uma abordagem comum para quantificar a mineralização é medir a taxa líquida de produção de N mineral durante incubações aeróbias ou anaeróbias a uma temperatura constante (tipicamente 30-40 °C). Esta abordagem é necessariamente demorada por causa da necessidade de uma 1 ou 2 semanas de incubação, e não se pode assumir que os resultados representem condições de campo, uma vez que (1) a mineralização-imobilização ocorre na ausência de absorção de N mineral por uma planta, que também afeta a umidade do solo e aeração, além de agir como uma fonte rizosférica de C, (2) as condições de incubação estática empregada não representam as flutuações naturais de temperatura e os ciclos de molhamento e secamento, que afetam a dinâmica de N microbiano no campo (ZAK et al., 1999; CARPENTER-BOGGS et al, 2000; WIENHOLD, 2007), (3) tipicamente apenas a superfície do solo é amostrada, e (4) as medições são afetadas pelos processamentos que as amostras recebem antes do uso, como o peneiramento. As interpretações podem ser ainda mais comprometidas por que a mineralização, e outros processos microbianos em geral, são inerentemente afetados por uma grande variedade de propriedades físicas e químicas do solo,

e também por muitos aspectos de manejo, incluindo os sistemas de cultivo, a aplicação de fertilizantes e insumos, assim como a entrada de resíduos (WU; MA; LIANG, 2008).

Essas complicações podem ser evitadas adotando-se a medição da mineralização bruta ao invés da mineralização líquida, que se torna possível por meio da técnica diluição do pool amônio utilizando $^{15}\text{NH}_4^+$ (MURPHY et al., 2003). Esta abordagem é baseada no princípio de que a mineralização do pool não marcado de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ do solo diminui o enriquecimento isotópico do pool $\text{NH}_4^+\text{-N}$, enquanto que a imobilização ou nitrificação reduzem a quantidade de $\text{NH}_4^+\text{-N}$, sem afetar o enriquecimento. Na prática, a taxa bruta de mineralização pode ser estimada aplicando-se várias simplificações a dados quantitativos e isotópicos de $\text{NH}_4^+\text{-N}$, antes e depois de uma incubação de curto prazo (normalmente de 1 ou 2 dias). As principais limitações, além do custo e das complexidades metodológicas inerentes a estudos com o traçador ^{15}N , surgem quando os dados estáticos de incubação de amostras superficiais peneiradas de solo devem ser extrapolados para condições de campo.

Idealmente, o N mineralizável deveria ser estimado por um teste químico do solo, mas durante anos esta abordagem foi impedida por falhas fundamentais nos métodos de destilação a vapor, comumente usado para fracionar o N do solo por hidrólise ácida, o que levou à subestimação grave de duas frações principais, o N-amino-ácido e o N-amino-açúcar. Estas falhas foram corrigidas por Mulvaney e Khan (2001) no desenvolvimento de métodos simples de difusão que foram posteriormente utilizados para comparar a distribuição de frações de N em solos que diferiram quanto à resposta do milho (*Zea mays* L.) à adubação nitrogenada. Os resultados mostraram uma concentração maior de N-aminoaçúcar em solos não responsivos ao N do que em solos responsivos, enquanto nenhuma diferença consistente foi detectada nas análises de N-total hidrolisável, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ hidrolisável, ou N-aminoácido (MULVANEY et al., 2001). Com base nesta constatação, Khan, Mulvaney e Hoefl (2001) desenvolveram um simples teste de solo (chamado Illinois Soil N Test ou ISNT) para estimar o $\text{NH}_4^+\text{-N}$ liberado por hidrólise alcalina com 2 M NaOH, que foi capaz de separar adequadamente 12 solos não responsivos e 13 solos responsivos ao N, com base no intervalo crítico de 225-235 mg kg⁻¹. Em uma avaliação mais extensa envolvendo 102 experimentos de curva de resposta ao N em condições de campo, Mulvaney, Khan e Ellsworth (2006) observaram que o ISNT foi altamente significativo para prever a produtividade das parcelas controle, o incremento de produção com a dose ótima de N (delta), a eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado (EUFN) e a dose ótima econômica de N (DOEN). A faixa crítica

estabelecida por Khan, Mulvaney e Hoefl (2001) foi altamente eficaz na identificação de 31 dos 33 locais não responsivos ao N.

O ISNT foi avaliado de forma independente em vários estudos para prever a resposta ao N, com alguns resultados positivos e outros negativos. No lado positivo, Ruffo et al. (2006) reconheceram o potencial do ISNT para o manejo do N para agricultura de precisão, uma vez que os valores do teste predizeram adequadamente a variabilidade espacial da produtividade do milho, enquanto Williams et al. (2007a, b) relataram forte regressão linear relacionando o ISNT com o delta e o DOEN. Resultados positivos também foram relatados por Klapwyk e Ketterings (2006) e Lawrence et al. (2009), mas nesses estudos o ISNT preveu adequadamente a responsividade ao N somente quando interpretado em conjunto com a matéria orgânica do solo. Este tipo de interpretação resulta da interação heterotrófica de C e N, que é tão central para a ciclagem da disponibilidade de N do solo que deve melhorar o valor preditivo do ISNT, exceto em casos em que a mineralização é limitada pela falta de umidade do solo (STECKLER; PENNOCK; WALLEY, 2008).

Os resultados desfavoráveis do ISNT obtidos por Barker et al. (2006), Marriott e Wander (2006), Laboski et al. (2008) e Osterhaus, Bundy e Andreaski (2008) certamente foram comprometidos pela complexidade das interações envolvidas naqueles estudos, uma vez que os dados foram combinados sem levar em consideração as diferenças de clima, rotação de culturas, a entrada de resíduos contendo C, preparo do solo, manejo de esterco e a densidade de semeadura. Embora dois desses estudos mostraram relação significativa do ISNT com a DOEN (LABOSKI et al., 2008; OSTERHAUS et al., 2008), a relação foi bastante fraca, enquanto uma forte correlação foi observada com o N total do solo, levando os autores a concluir que o ISNT não é seletivo para uma fração lábil do N do solo. Essa alegação, entretanto, contradiz com o fato de que o N alcalino hidrolisável varia consideravelmente em relação ao N total do solo (ROBERTS et al., 2009a), e é inconsistente com o estudo de fracionamento de N orgânico e recuperação de ^{15}N desenvolvido por Kwon et al. (2009), que demonstram que o ISNT basicamente estima o N amino açúcares de bactérias e amida.

Se a hidrólise alcalina libera uma fração facilmente mineralizável do N do solo, o ISNT deve ter ampla aplicação para muitas outras culturas além do milho. Nesse sentido, uma evidência positiva foi recentemente publicada por Roberts et al. (2011) para arroz (*Oryza sativa* L.) semeado diretamente. Os autores obtiveram uma calibração favorável da resposta ao N em função do ISNT e da destilação a vapor direta (DVD), uma técnica

semelhante que está altamente correlacionado com o ISNT (BUSHONG et al., 2008). A destilação reduz o período de análise de horas para minutos, mas é muito mais trabalhosa quando um grande número de amostras devem ser processadas em testes de rotina do solo.

Este estudo explora o potencial de manejo do N com base em testes no solo para a produção de cana-de-açúcar no Brasil, utilizando amostras de solo de dez estudos conduzidos em seis áreas experimentais. Diversas técnicas para avaliar o potencial de fornecimento de N do solo foram avaliadas, incluindo o ISNT, DVD e a mineralização bruta e líquida. O fracionamento do N do solo foi utilizado para esclarecer a natureza química do N orgânico lábil do solo e adicionalmente avaliar o ISNT.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Áreas experimentais

Dez experimentos de curva de resposta à adubação nitrogenada de soqueira foram conduzidos entre os anos de 2006 a 2010 em condições de campo no Estado de São Paulo (Figura 1), com diferenças na classe textural dos solos, cultivares, clima e histórico de manejo.

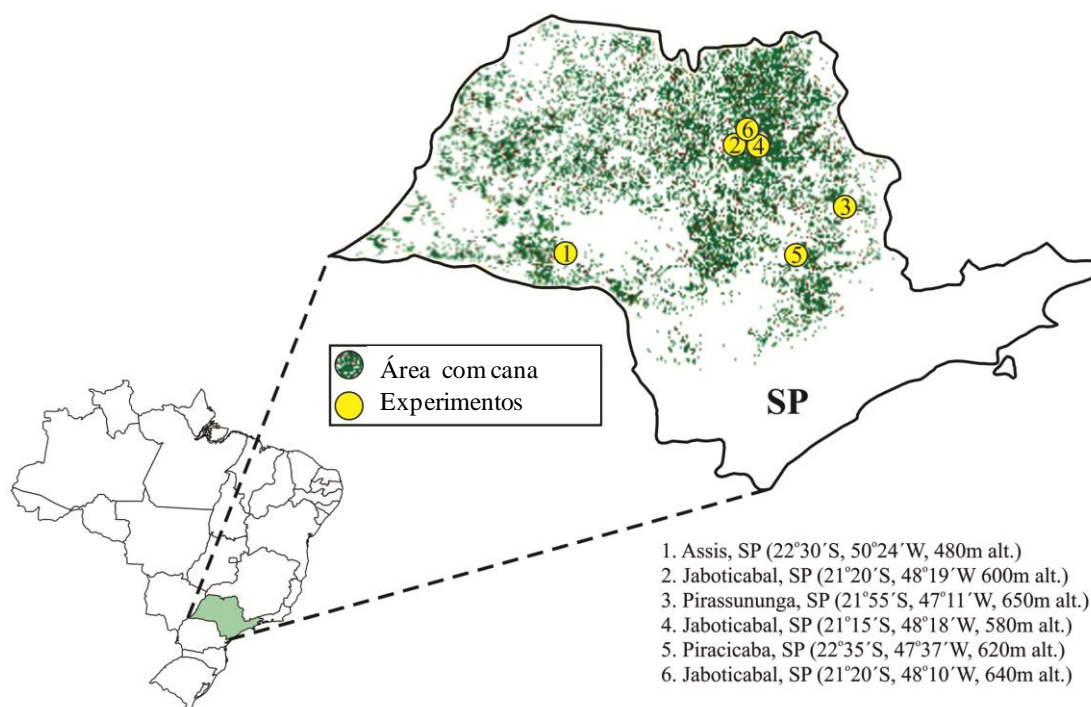


Figura 1 - Localização dos experimentos em relação à área cultivada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo (SP), Brasil

Todas as áreas foram conduzidas no sistema de colheita sem queima com manutenção dos resíduos (palha) na superfície do solo. A descrição das áreas estão descritas na Tabela 1. As doses de N variaram entre 0 a 200 kg ha⁻¹ de N, conforme recomendação para adubação nitrogenada de soqueira do Estado de São Paulo (SPIRONELLO et al., 1997), que é baseada na expectativa de produtividade do canavial com doses de N que variam de 60 a 120 kg ha⁻¹. O delineamento experimental foi em blocos completos ao acaso com quatro (locais 1-5) ou cinco (local 6) repetições. As parcelas constaram de sete (locais 1, 5-6) a 12 (locais 2-4) linhas de cana-de-açúcar espaçadas em 1,5 m e 15 m de comprimento. A colheita de todas os experimentos foi realizada com colhedora e a massa de colmos obtida em caminhão transbordo equipado com célula de carga, colhendo-se quatro linhas de 15 m por parcela. A palha residual foi distribuída homogeneamente sobre a área. Os fertilizantes foram aplicados manualmente até 2 meses após a colheita anterior, superficialmente sobre a palha, ao lado da linha de cana e sem incorporação.

Tabela 1 – Descrição e caracterização das áreas experimentais

Local	Solo†	Variedade	Experimento‡			Resíduos orgânicos§
			1	2	3	
——— Data da colheita ———						
1. Usina Nova América	Latossolo Vermelho distrófico típico textura média	SP83 2847	08/09 (2°)	—	—	—
2. Usina Santa Adélia	Latossolo Vermelho distrófico típico textura média	SP81 3250	07/07 (2°)	07/08 (3°)	—	V
3. Usina São Luis	Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico textura média	SP813250	06/07 (2°)	—	—	—
4. Usina São Martinho	Latossolo Vermelho eutroférico típico textura muito argilosa	SP81 3250	08/07 (2°)	07/08 (3°)	—	—
5. Usina Iracema	Latossolo Vermelho distrófico típico textura argilosa	SP89 1115	05/10 (2°)	—	—	V, TF
6. Usina São Martinho	Latossolo Vermelho distroférico típico textura muito argilosa	SP80 3280	09/08 (2°)	11/09 (3°)	11/10 (4°)	V

†Conforme EMBRAPA, 2006.

‡Os números entre parenteses referem-se ao número do corte (idade do canavial).

§V, vinhaça ou TF, torta de filtro, ambos aplicados pelo menos dois anos antes do início dos experimentos e não aplicados posteriormente.

4.2.2 Amostras de solo

Visando avaliar métodos diagnósticos da disponibilidade do N a fim de diferenciar solos responsivos e não responsivos à adubação nitrogenada, foram coletadas amostras de solo durante o desenvolvimento dos experimentos descritos na Tabela 1. A amostragem de solo foi realizada em junho, julho e agosto de 2006 respectivamente para os locais 2, 3 e 4; outubro de 2009 para os locais 1 e 5 e em dezembro de 2009 para o local 6. As amostras foram coletadas antes da adubação de cobertura de cada ciclo experimental.

Amostras de solo foram coletadas com trado holandês em cada parcela experimental e em duas profundidades: 0-30 e 30-60 cm (áreas 2-4) e de 0-20 e 20-40 cm (áreas 1, 5-6). Para cada profundidade foram coletadas três sub-amostras por parcela para compor uma amostra, sendo as amostras coletadas a cerca de 0,25 m de distância da linha. Os sacos plásticos contendo as amostras permaneceram abertos até a chegada ao laboratório, quando foram acondicionados em estufa com circulação forçada de ar a 40°C até secagem completa. Este procedimento foi adotado para paralisar a atividade microbiana. Conforme Haney et al. (2004), a secagem do solo a 40°C com posterior reumedecimento das amostras não alterou os resultados de mineralização do N do solo. Após secagem as amostras foram passadas em moinho de solo com peneiras < 2 mm e permaneceram em sacos plásticos até os procedimentos de análise.

Devido ao grande número de amostras, antes dos procedimentos de análise procedeu-se a mistura das amostras da seguinte maneira: para análise de pH, CTC, análise granulométrica, incubação aeróbia, fracionamento do N orgânico do solo e mineralização bruta obteve-se uma amostra representativa de cada profundidade das áreas experimentais por meio da mistura de quantidade semelhante de solo de cada amostra coletada no campo; para análise do C orgânico, N total, ISNT e DVD procedeu-se a mistura de quantidade semelhante de solo das parcelas presentes em cada bloco, permitindo isolar o efeito dos blocos na comparação das áreas.

Tabela 2 – Propriedades físico-químicas dos solos†

Local	Prof. cm	pH‡	C		CTC# mmol _c kg ⁻¹	Areia‡ g kg ⁻¹	Silte‡ g kg ⁻¹	Argila‡	θcc‡‡ mL kg ⁻¹
			orgânico§ g kg ⁻¹	total¶ g kg ⁻¹					
1	0-20	5,6	5,5	0,40	25,2	864	11	126	350
	20-40	5,0	4,8	0,34	25,6	858	16	126	360
2	0-30	5,4	7,8	0,53	43,7	661	54	285	460
	30-60	4,6	5,5	0,40	46,4	616	50	334	460
3	0-30	6,1	7,7	0,49	38,6	727	56	218	440
	30-60	5,6	5,5	0,37	31,0	693	61	247	440
4	0-30	5,6	17,8	1,47	136,4	135	227	638	600
	30-60	5,7	15,0	1,23	118,3	117	195	688	600
5	0-20	4,9	21,0	1,33	114,7	470	20	510	490
	20-40	5,0	18,8	1,02	133,2	450	20	530	520
6	0-20	5,2	16,8	1,41	132,7	239	46	716	520
	20-40	5,3	14,1	1,18	126,7	242	42	716	520

†Os resultados representam a média de determinações em triplicata, exceto para análises texturais (sem repetições).

‡Relação solo: água, 1: 1.

§Determinado pelo método de Mebius (1960).

¶Determinado pelo método regular de Kjeldahl usando bloco digestor (BREMNER, 1996), seguindo difusão com NaOH (STEVENS et al., 2000).

#CTC, capacidade de troca de cátions determinada por saturação-difusão de NH₄⁺ (MULVANEY et al., 2004).

‡Análises granulométricas realizadas pelo método do densímetro (GEE; OR, 2002).

‡‡θcc, umidade na capacidade de campo, determinada conforme descrito em Bremner e Shaw (1958).

4.2.3 Métodos diagnósticos do N do solo

a) Illinois Soil Nitrogen Test (ISNT) e Destilação a Vapor Direta (DVD)

Os métodos ISNT (KHAN; MULVANEY; HOEFT, 2001) e DVD (ROBERTS et al., 2009 b; BUSHONG et al., 2008) foram desenvolvidos para simplificar a determinação da fração de N orgânico do solo responsável pela ausência de resposta à adubação nitrogenada identificado por Mulvaney et al (2001). Esses métodos vêm sendo amplamente avaliados em condições de clima temperado para prever a resposta à adubação nitrogenada de culturas, porém ainda não foram avaliados em condições de clima tropical.

Para determinação do ISNT foi adotado o procedimento descrito em Khan, Mulvaney e Hoefl (2001). Basicamente 1 g de solo foi tratado com 10 mL de solução de NaOH (2 mol

L⁻¹) em câmara de difusão do tipo Mason Jar com as adaptações descritas em Stevens et al. (2000). Antes do fechamento da câmara foram adicionados 5 mL de solução indicadora H₃BO₃ a 4% em uma placa de Petri de acrílico de 60 mm de diâmetro, que permaneceu suspensa por meio das adaptações feitas na tampa das câmaras. As câmaras de difusão foram imediatamente colocadas sobre placas aquecedoras pré-aquecidas a 48-50°C (marca West Bend Griddle[®], 1500 W, 120 V AC), acopladas a regulador de temperatura (marca Penn[®], Johnson Controls, modelo A 419, 66 V) e dispositivo para desligamento automático (marca Intermatic[®], modelo TN 311 time all 15A “R”, 1750 W, 125 V AC 60 Hz). A temperatura foi verificada previamente por meio de termômetro inserido dentro de uma câmara contendo cerca de 100 mL de água desionizada. Todas as placas aquecedoras foram dispostas dentro de caixas plásticas (marca Rubbermaid *Revelations*[®], 29,3 L, storage box) para reduzir o efeito da temperatura ambiente do laboratório, conforme sugerido por Klapwyk e Ketterings (2005). As amostras foram rotacionadas na placa após 1.5 h e 3.0 h (conforme descrito em ¹⁵N ANALYSIS SERVICE, 2004) e retiradas após 5 h de aquecimento. Cada placa aquecedora recebeu um conjunto de 11 amostras mais uma amostra de 1 mL de solução padrão de glucosamina contendo 250 µg mL⁻¹ de N (0,3849 g glucosamina.HCl em 100 mL de água desionizada). Foram utilizadas cinco placas aquecedoras, totalizando 60 amostras por dia.

As placas de Petri foram retiradas e receberam 5 mL de água desionizada, realizando-se a titulação com solução de H₂SO₄ (0,01 mol L⁻¹) até estabelecimento do pH final em titulador automático (Modelo 719 S Tritino; Metrohm, Herisau, Switzerland) acoplado a eletrodo para superfície plana (Modelo 13-620-289; Fisher Scientific, Pittsburgh, PA) para determinação do N-NH₄. O pH final foi estabelecido verificando o pH da solução preparada pela mistura de 5 mL da solução indicadora de H₃BO₃ (4%) e 5 mL de água desionizada. O teor de N-ISNT (mg N kg⁻¹) foi determinado como $(VNM) \cdot 1000$, onde V é o volume de H₂SO₄, N é a normalidade do H₂SO₄ padronizado e M é a massa molar do N (14,0067 g mol⁻¹). Detalhes dos procedimento para determinação do ISNT podem ser observados na Figura 2.

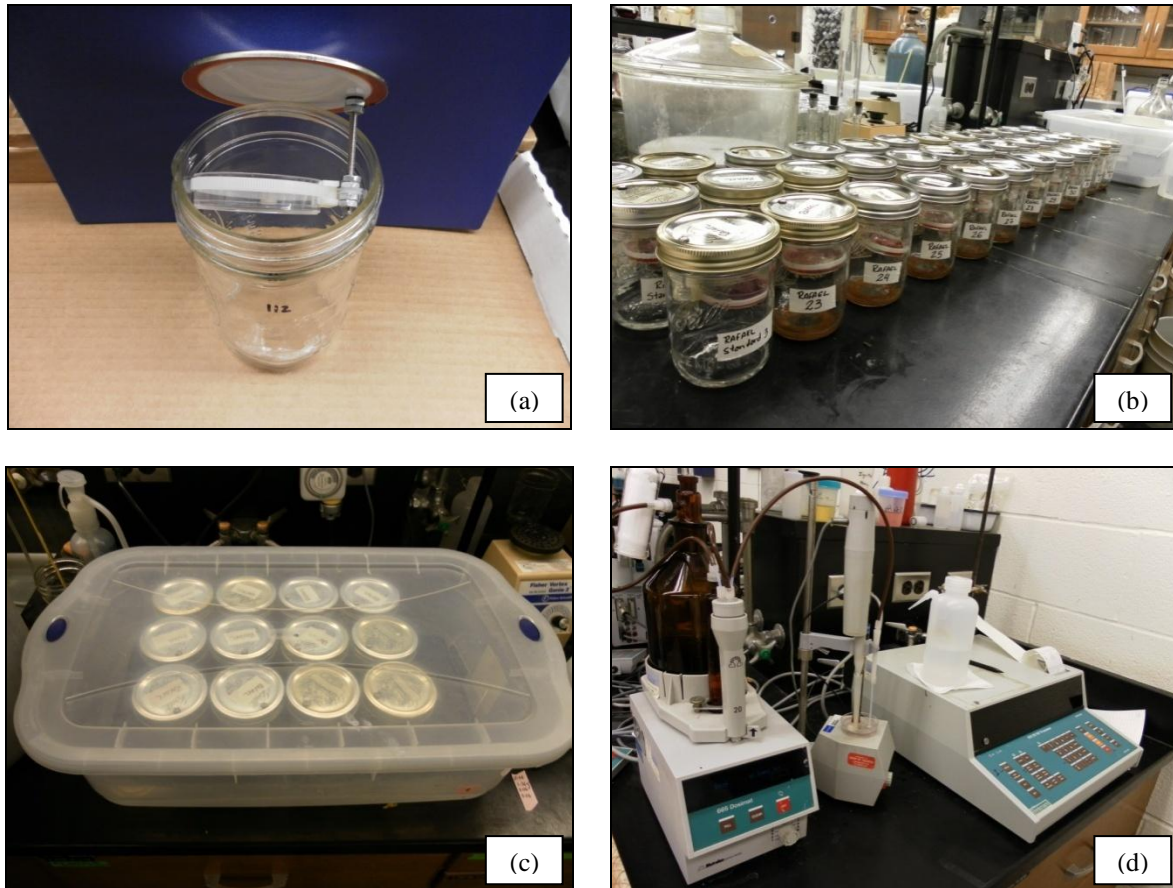


Figura 2 - Detalhes da câmara de difusão do tipo “Mason Jar” mostrando as adaptações feitas na tampa para manter uma placa de petri suspensa (a); câmaras de difusão após tratamento de 1 g solo com 10 mL 2 mol L^{-1} NaOH e deposição de 5 mL de solução indicadora 4% H_3BO_3 na placa de Petri (b); 12 câmaras de difusão sendo aquecidas a 50°C por 5 h em placa aquecedora e dentro do dispositivo para homogeneizar a temperatura (c) e titulador automático utilizado na determinação do $\text{NH}_4\text{-N}$ das amostras (d)

A técnica da DVD foi realizada conforme metodologia desenvolvida em Bushong et al. (2008) e adaptada por Roberts et al. (2009). Um grama de solo foi colocado diretamente em um frasco Kjeldahl e ligado ao destilador, recebendo 10 mL de 10 mol L^{-1} NaOH por meio do orifício localizado no topo do aparato. Destilação a vapor foi conduzida na taxa de 7 mL min^{-1} até a obtenção de 35-40 mL do destilado, que foi recebido em 5 mL de solução indicadora 4% H_3BO_3 . O $\text{NH}_4\text{-N}$ foi quantificado por titulação do destilado com $0,02 \text{ N}$ H_2SO_4 até estabelecimento do pH final usando titulador automático. Os detalhes do equipamento utilizado podem ser observados na Figura 3.

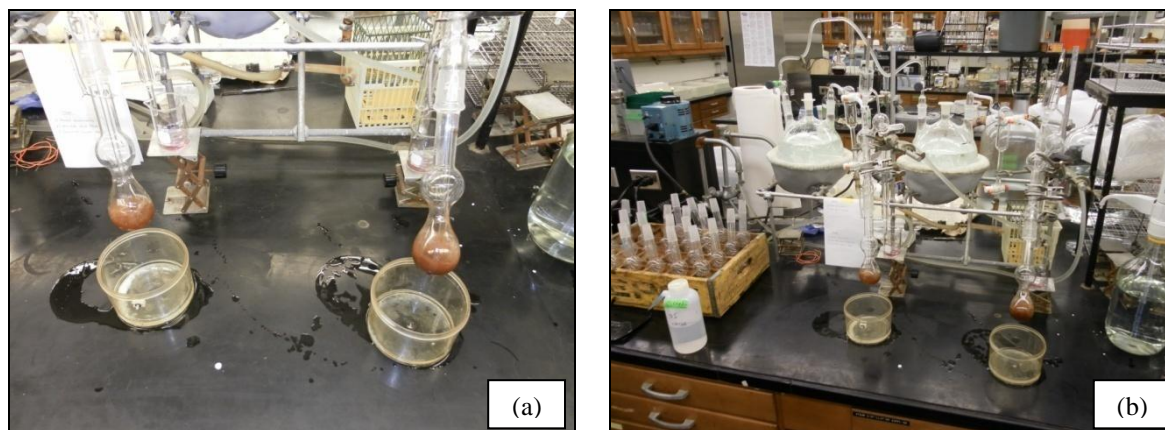


Figura 3 - Detalhes dos procedimentos adotados na Destilação a Vapor Direta mostrando as amostras de solo dentro dos tubos de destilação após recebimento de 10 mL 10 mol L^{-1} NaOH (a) e durante o processo de destilação a vapor em destilador duplo (b)

b) Mineralização líquida

Amostras de solo foram incubadas aerobicamente para avaliar o potencial de mineralização e detectar mudanças nas frações de N hidrolisável durante a incubação. Para realizar a incubação, amostras de 6 g de solo ($< 2 \text{ mm}$) foram adicionadas em filtro de quartzo (Whatman QM-A) sobre funis de Buchner de polipropileno (5.5 cm de diâmetro) e lixiviado sob vácuo com duas alíquotas de 30 mL com solução de CaCl_2 ($0,01 \text{ mol L}^{-1}$) para remoção do N inorgânico residual e 10 mL de solução nutritiva desprovida de N (STANFORD; SMITH, 1972). A umidade do solo foi ajustada a 60% da capacidade de campo [determinada conforme descrito em BREMNER; SHAW (1958)] e os funis foram dispostos em um incubador adaptado para manter a temperatura de 25°C e umidade relativa de 85-90%. Após 0, 1, 2, 4, 8 e 12 semanas, triplicatas de cada solo foram transferidas para frasco de polietileno de 125 mL e o N inorgânico foi extraído por meio de agitação das amostras com 60 mL de 2 mol L^{-1} KCl durante 1 h (BREMNER; KEENEY, 1966) e filtrando-se a suspensão resultante em papel de filtro (Whatman no. 42) em funis de Buchner de polipropileno (5.5 cm de diâmetro) sob vácuo. Para evitar a remineralização do N produzido, as amostras incubadas por 4, 8 e 12 semanas foram lixiviadas sob vácuo a cada duas semanas com duas alíquotas de 30 mL de $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ de CaCl_2 , sendo o lixiviado de cada grupo de amostras combinado para posterior análise; após esse procedimento as amostras foram lixiviadas com 10 mL de solução nutritiva desprovida de N (STANFORD; SMITH, 1972). A umidade do solo foi ajustada a 60% da capacidade de campo e as amostras retornadas ao incubador; esse procedimento foi adotado periodicamente para todas as

amostras incubadas. Os extratos e lixiviados foram analisados para N-NH₄ e N-(NO₃ + NO₂) pelo método de difusão (KHAN; MULVANEY; MULVANEY, 1997).

c) Fracionamento do N do solo

Para preparar o hidrolisado dos solos foram utilizadas as amostras iniciais (semana 0) e finais (semana 12) do experimento de incubação aeróbia. Basicamente 4 g de solo de cada amostra foi aquecido (110-120°C) sob refluxo por 12 h em frascos de 50 mL acoplados em condensador de Liebig de 40 cm, após tratamento com 16 mL de solução 6 mol L⁻¹ de HCl e duas gotas de octanol (para evitar a formação de espuma). A filtração do hidrolisado foi realizada em filtro de papel (Whatman no. 50) em um funil de Buchner de polipropileno (5.5 cm de diâmetro) sob vácuo. Adicionalmente, duas alíquotas de 10 mL de água desionizada foram aplicadas nos frascos para transferência completa do hidrolisado para o funil. O lixiviado foi coletado em frasco de vidro de 125 mL e armazenado em refrigerador (5°C). Antes do uso, o hidrolisado foi transferido para um becker de 250 mL e neutralizado por meio de adições sequenciais de solução 10 mol L⁻¹, 5 mol L⁻¹ e 1 mol L⁻¹ de NaOH até obtenção de pH entre 6,5 e 6,8 (BREMNER, 1965, STEVENSON, 1996). O hidrolisado neutralizado foi diluído para 100 mL com água desionizada, retornado ao frasco original e mantido sob refrigeração (5°C).

Utilizando os métodos de difusão descritos em Mulvaney e Khan (2001), os hidrolisados neutralizados do solo foram analisados em triplicata para N hidrolisável total, N-NH₄ hidrolisável, N-(NH₄+amino-açúcar) e N-amino-ácido. A fração de N amino-açúcar foi determinada pela diferença entre N-NH₄ e N-(NH₄+amino-açúcar). Detalhes dos procedimentos adotados podem ser observados na Figura 4.



Figura 4 - Condensador de Liebig para aquecimento das amostras de solo sob refluxo, com dispositivo para manter a temperatura dos 6 conjuntos a 110°C (a); processo de filtragem do hidrolisado após resfriamento da amostra (c); neutralização das amostras para obtenção de pH entre 6,5 e 6,8 e detalhes das amostras após adição de água desionizada até completar 100 mL (c) e transferência das amostras para as câmaras de difusão para os procedimentos de fracionamento do N orgânico conforme Mulvaney e Khan (2001)

d) Mineralização bruta (MB)

Amostras de solo (10 g) receberam água desionizada até atingir 60% da capacidade de campo em frascos de vidro de 125 mL e foram pré-incubadas durante 14 dias a 25°C e 85-90% de umidade relativa. O objetivo da pré-incubação foi reestabelecer a atividade microbiana do solo. O conteúdo de água foi monitorado periodicamente para manutenção da umidade das amostras. No fim desse período as amostras foram retiradas do incubador para secagem parcial por meio de exposição à ventilação forçada de ar; após a secagem, o conteúdo de água foi reestabelecido até um limite que permitiu-se a aplicação posterior de 1,5 mL de água. As amostras receberam então 1,5 mL de água desionizada contendo 30 µg N na forma de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (25,34 átomos % ^{15}N), atingindo novamente a umidade de 60% da

capacidade de campo, que foi mantida até o final da incubação. A solução contendo N foi distribuída uniformemente sobre a amostra com auxílio de pipeta, permitindo difusão completa da solução- ^{15}N na amostra de solo, requisito essencial nesse tipo de experimento (LUXHOI; NIELSEN; JENSEN, 2004; MURPHY et al., 2003).

Após os dias 0 (na verdade 30 min para permitir completa umidificação da amostra), 1, 2 e 7 dias, amostras em triplicata de cada solo foram agitadas durante 1 h após tratamento com 100 mL de solução de KCl (2 mol L^{-1}) para extração do N inorgânico total (BREMNER; KEENEY, 1966) e a suspensão filtrada sob vácuo em filtro de microfibras de vidro (Whatman[®] Cat No 1822 055) sobre funis de Buchner de polipropileno (5.5 cm de diâmetro); o filtro de microfibras de vidro resultou em extrato de melhor qualidade relativamente ao filtro de papel. O N- NH_4 trocável foi determinado em alíquota de 50 mL do extrato pelo método de difusão (KHAN; MULVANEY; MULVANEY, 1997) após adição de $150 \mu\text{g N}$ na forma de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ para facilitar a análise de ^{15}N . Os procedimentos adotados no experimento de mineralização bruta podem ser observados na Figura 5.

Após difusão do extrato de solo, o $\text{NH}_4\text{-N}$ coletado na solução indicadora 4% H_3BO_3 foi quantificado usando um titulador automático acoplado a eletrodo para superfície plana (descrito anteriormente). As amostras tituladas foram acidificadas ($0,01 \text{ mL}$ de 1 mol L^{-1} H_2SO_4) e aquecida para evaporação a aproximadamente 50°C . A evaporação foi repetida após adição de 5 mL de metanol para remover o H_3BO_3 , sendo o $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ residual dissolvido em $400 \mu\text{L}$ de água desionizada para transferência de uma alíquota de $250 \mu\text{L}$ contendo entre 100 e $200 \mu\text{g}$ de N para uma microplaca de plástico. A secagem final foi feita a 60°C , antes da análise isotópica usando um espectrômetro de massas equipado com um sistema automatizado com preparo de amostras pelo método de Rittenberg (MULVANEY, 1993). Depois das análises isotópicas, as unidades de difusão foram adequadamente lavadas antes de serem reutilizadas (STEVENS et al., 2000) para evitar erros por contaminação cruzada.



Figura 5 - Detalhes dos frascos de vidro (125 mL) contendo as amostras de solo (10 g) utilizadas no experimento de mineralização bruta (a); amostras sendo dispostas no incubador com sistema de injeção de vapor de água para manutenção da temperatura da umidade relativa a 85-90% (b); após a pré-incubação, as amostras receberam 1,5 mL de solução contendo ^{15}N com auxílio de pipeta volumétrica (c e d) e retornaram ao incubador; amostras recebendo 100 mL de 2 M KCl para posterior agitação por 1 h para extração do N inorgânico (e); processo de filtragem sob vácuo do extrato utilizando filtro de microfibras de vidro em funis de Buchner de polipropileno (5,5 cm de diâmetro) (f)

Levando em consideração que foi adicionada solução contendo 150 µg de N com abundância natural para facilitar a análise isotópica, o valor de abundância isotópica calculada (AI_{CA} , em átomos % ^{15}N) foi obtido pela equação de diluição isotópica:

$$AI_{CA} = [(N_{DE} \cdot AI_{DE}) - (N_{AD} \cdot AN)] / (N_{DE} - N_{AD}) \quad (1)$$

Em que as variáveis remanescentes referem-se a: N_{DE} , concentração de N determinada, em µg N amostra⁻¹; AI_{DE} , abundância isotópica determinada, em átomos % ^{15}N ; N_{AD} , nitrogênio adicionado, igual a 150 µg N amostra⁻¹; AN , abundância natural de 0,36663 átomos % ^{15}N (obtido analiticamente em seis repetições).

A taxa de mineralização bruta (MB , em mg kg⁻¹ d⁻¹ de N) foi determinada conforme Hart et al. (1994) pela equação:

$$MB = [(NH_4 t_i - NH_4 t_f) / n] \cdot [(\ln ^{15}N_{exc} t_i / ^{15}N_{exc} t_f) / (\ln NH_4 t_i / NH_4 t_f)] \quad (2)$$

Em que as variáveis remanescentes referem-se a: NH_4 , concentração de N- NH_4^+ na amostra, em mg N kg⁻¹; t_i , tempo inicial (dia 1); t_f , tempo final (dia 3); n , número de dias; $^{15}N_{exc}$, abundância isotópica em excesso, em átomos % ^{15}N , que foi obtida pela subtração da abundância natural de ^{15}N (0,370 átomos % ^{15}N) da AI_{CA} (Eq. 1).

4.2.4 Análises estatísticas

Os resultados de produtividade de colmos obtidos nos experimentos com resposta à adubação nitrogenada foram submetidos à análise de variância, assim como análises de regressão (WEBSTER, 2007) quando o teste F mostrou-se significativo ($P < 0,10$). Nos casos em que o teste F foi significativo ($P < 0,10$), a resposta ao fertilizante nitrogenado (RF) foi calculada a partir dos resultados médios de produtividade como $RF = 100 \cdot (\text{produtividade máxima} - \text{produtividade do tratamento controle}) / \text{produtividade do tratamento controle}$. Quando o teste F não foi significativo ($P > 0,10$), a RF foi considerada zero. Os experimentos foram então classificados como não-responsivos ao N ($RF = 0$), moderadamente responsivos ($RF \leq 25\%$) ou altamente responsivos ($RF > 25\%$).

Para os resultados das determinações em triplicata ou incubações foram calculadas as médias e o desvio padrão, e os valores médios comparados com base no teste t de Student ou da diferença mínima significativa (LSD) a um nível de significância $P < 0,05$.

4.3 Resultados e discussão

Desde os anos 1990, há uma tendência crescente no Brasil para a colheita mecânica da cana-de-açúcar, em áreas onde a queima do canavial antes da colheita prevaleceu. Com o novo sistema, resíduos da cultura, composta de folhas e ponteiros que variam entre 13 a 20 Mg ha⁻¹ de matéria seca (OLIVEIRA et al., 1999), permanecem na superfície do solo, formando uma cobertura vegetativa altamente carbonácea referida como palhada. Este material contém uma quantidade apreciável de N (70 a 100 kg ha⁻¹), mas a disponibilidade é muito limitada para o ciclo seguinte (GAVA et al., 2003), devido à imobilização de N mineral durante a decomposição microbiana. Com a transição para a colheita mecânica espera-se, portanto, um aumento na necessidade de adubação nitrogenada das socas (ROSSETTO et al., 2010), apesar de que um efeito compensatório pode surgir ao longo do ciclo agrícola (> 4 anos), conforme a mineralização gradualmente libera o N da palhada (FORTES et al., 2011).

Apesar de todos os seis locais estudados em nosso trabalho terem sido colhidos mecanicamente, sem queima da cana, os resultados da Tabela 3 mostram que apenas quatro (locais 1 a 4) foram responsivos à adubação nitrogenada ($P < 0,10$). Nenhuma resposta foi observada em um único experimento no local 5 ou em três experimentos no local 6. Essa variação é tipicamente observada em áreas de cana colhida sem queima, de acordo com estudos anteriores que documentam resposta à adubação nitrogenada na maioria dos casos (COSTA; VITTI; CANTARELLA, 2003; VITTI; TRIVELIN; GAVA, 2007; ROSETTO et al., 2010; VIEIRA et al., 2010), mas não em outros (URQUIAGA et al., 1998; PRADO; PANCELLI, 2008). Rossetto et al. (2010), por exemplo, relataram alta resposta ao N em 10 de 15 locais estudados, enquanto que um local não apresentou resposta e em outros quatro locais, apesar de significativa, a resposta foi muito pequena.

Uma redução na resposta da cana à adubação nitrogenada era esperada para os locais 2, 5 e 6, devido às entradas anteriores da vinhaça e / ou torta de filtro (Tabela 1), dois importantes subprodutos da agroindústria sucroalcooleira que serão cada vez mais utilizados devido às exigências ambientais (CETESB, 2006). Estes subprodutos apresentam relação C/N muito mais baixo do que a palha e, assim, representam uma fonte mais prontamente disponível de N de médio a curto prazo. Nas doses comumente utilizadas, podem levar à redução na exigência de N da ordem de 50 a 150 kg N ha⁻¹ (PRASAD, 1976; YADUVANSHI; YADAV; SINGH, 1990; GÓMEZ TORO, 1996), podendo até mesmo

eliminar a resposta à adubação nitrogenada, como ocorreu para os locais 5 e 6. Um efeito similar têm sido reportado para locais onde a renovação do canavial é precedida de cultivo de leguminosa como a *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, soja (*Glycine max* L. Merr.) ou de amendoim (*Arachis hypogaea* L.) (CÁCERES; ALCARDE, 1995; RESENDE et al., 2003; AMBROSANO et al., 2005; PARK et al., 2010).

Uma comparação das Tabelas 1 e 3 não deixa dúvida sobre a importância da aplicação de subprodutos orgânicos na variação da resposta ao fertilizante (RF) observada para os seis locais estudados. As maiores respostas, variando de 9 a 30%, ocorreram nos locais 1, 3 e 4, onde não houve aplicação de vinhaça ou torta de filtro que teria moderado a imobilização microbiana de N durante a decomposição dos resíduos culturais. Dos três locais que receberam um ou ambos destes subprodutos, o local 2 foi moderadamente responsivo ao N (RF entre 5 a 7%), enquanto os locais 5 e 6 não apresentaram resposta ao N.

A importância dos insumos orgânicos não é menos evidente a partir da mudança temporal na RF observa nos locais 2, 4 e 6. Interessante foi o aumento acentuado de 9 para 25% na RF observados para a segunda colheita no local 4. Esse aumento pode ser atribuído a um acúmulo de resíduos que, associado à ausência de adubação nitrogenada promoveu imobilização microbiana do N, limitando a produtividade do tratamento controle e inflando a RF. Este tipo de comportamento é comum com estudos de resposta que empregam um delineamento estático (*static plots*) (por exemplo, SWANSON; TAYLOR; WELCH, 1973; VANOTTI; BUNDY; PETERSON, 1997; VARVEL; WILHELM, 2003), nos quais parcelas individuais recebem o mesmo tratamento em anos consecutivos. Curiosamente, não houve nenhuma evidência de aumento na RF para os locais 2 e 6, presumivelmente porque a aplicação de vinhaça forneceu N suficiente para suportar a oxidação heterotrófica do resíduo contendo C.

Tabela 3 - Produtividade da cana-de-açúcar em dez experimentos de curvas de resposta à adubação nitrogenada entre os anos de 2006 e 2010Continua

Local	Dose de N kg ha ⁻¹	Experimento‡		
		1	2	3
		produtividade (Mg ha ⁻¹)		
		<u>Altamente responsivo ao N</u>		
1	0	69,1 (3,5)	—	—
	50	75,6 (6,5)	—	—
	100	77,3 (4,5)	—	—
	150	86,9 (4,6)	—	—
	200	90,0 (5,3)	—	—
	P	0,0004		
	Equação	y = 69,18 + 0,1060x		
	R ²	0,96		
	RF§ (%)	30,2		
		<u>Moderadamente responsivos ao N</u>		
2	0	114,1 (7,9)	104,1 (5,4)	—
	50	120,8 (7,7)	104,1 (6,8)	—
	100	120,8 (10,9)	106,0 (8,1)	—
	150	121,9 (6,2)	109,7 (6,1)	—
	P	0,0399	0,0821	
	Equação	y = 114,52 + 0,1294x - 0,00055x ²	y = 103,15 + 0,03757x	
	R ²	0,92	0,82	
	RF (%)	6,8	5,4	
3	0	78,8 (5,9)	—	—
	50	81,1 (7,4)	—	—
	100	85,9 (7,4)	—	—
	150	86,4 (9,0)	—	—
	P	0,0823		
	Equação	y = 78,90 + 0,00554x		
	R ²	0,93		
	RR (%)	9,7		
4	0	75,9 (11,6)	52,7 (9,7)	—
	50	77,5 (8,9)	63,0 (9,0)	—
	100	82,7 (6,2)	66,0 (10,8)	—
	150	81,7 (10,3)	65,0 (7,4)	—
	P	0,0692	0,0000	
	Equação	y = 75,42 + 0,08387x - 0,000257x ²	y = 52,90 + 0,2480x - 0,001124x ²	
	R ²	0,85	0,99	
	RF (%)	8,9	25,1	

Tabela 3 - Produtividade da cana-de-açúcar em dez experimentos envolvendo curvas de resposta à adubação nitrogenada entre os anos de 2007 e 2010

Local	Dose de N kg ha ⁻¹	Experimento‡			Conclusão.
		1	2	3	
		produtividade (Mg ha ⁻¹)			
<u>Não responsivos ao N</u>					
5	0	91,4 (12,3)	—	—	
	50	95,6 (12,6)	—	—	
	100	85,0 (16,5)	—	—	
	150	78,6 (5,2)	—	—	
	200	77,8 (10,9)	—	—	
	<i>P</i>	0,1136			
	RF (%)	0			
6	0	80,2 (6,7)	142,4 (19,5)	81,2 (7,1)	
	50	80,3 (6,1)	138,3 (10,9)	75,8 (9,7)	
	100	86,8 (7,2)	131,5 (12,4)	87,2 (2,1)	
	150	80,5 (3,4)	132,3 (14,7)	82,6 (9,7)	
	200	83,1 (7,0)	135,6 (14,0)	79,9 (7,0)	
	<i>P</i>	0,3456	0,7738	0,2005	
	RF (%)	0	0	0	

†Resultados representam 4 (áreas 1-5) ou 5 (área 6) blocos experimentais. Valores entre parenteses representam o desvio padrão da média.

‡Estudos conduzidos em 2006-2007 (áreas 2-4), 2007-2008 (áreas 2, 4 e 6), 2008-2009 (áreas 1 e 6) ou 2009-2010 (áreas 5 e 6).

§RF, resposta ao fertilizante calculado quando $P < 0,10$ como $100 \cdot (\text{produtividade máxima} - \text{produtividade do tratamento controle}) / \text{produtividade do tratamento controle}$.

Além de insumos orgânicos, as diferenças no potencial do solo em fornecer N provavelmente contribuiu para a variação na RF documentada na Tabela 3. Tais diferenças têm sido historicamente reconhecidos em afetar a resposta das culturas à adubação nitrogenada (BLACK; NELSON; PRITCHETT, 1946; PRITCHETT; BLACK; NELSON, 1947; FITTS; BARTHOLOMEW; HEIDEL, 1953; OLSON et al., 1960). Esse comportamento é consistente com as evidências de estudos utilizando o traçador ¹⁵N que mostram que a mineralização do N do solo muitas vezes fornece a maior parte do N absorvido pelas culturas (por exemplo, TAKAHASHI, 1964; OLSON et al., 1979; WILSON et al., 1989; NORMAN et al., 1992; OMAI et al., 1998; SCHINDLER; KNIGHTON, 1999; STEVENS; HOEFT; MULVANEY, 2005; LÓPEZ-BELLIDO; LÓPEZ-BELLIDO; LÓPEZ-BELLIDO, 2006; SILVA et al., 2006), como foi o caso dos estudos recentes conduzidos no Brasil por Dourado-Neto et al. (2010) e Franco et al. (2011).

Um aumento na capacidade de mineralização de N do solo evidentemente levaria à diminuição na resposta das culturas à adubação nitrogenada, embora as conseqüências podem não ser aparentes se as condições climáticas forem favoráveis à perda de N ou se a disponibilidade de N não limite o rendimento. Uma complicação inerente surge na estimativa de uma taxa absoluta (bruta) para a mineralização (amonificação), uma vez que o produto (NH_4^+) está sujeito à assimilação heterotrófica (imobilização) ou oxidação autotrófica (nitrificação). A técnica de diluição do pool amônio (^{15}N) proporciona o único meio para evitar esta complicação, e foi aplicado às amostras superficiais e subsuperficiais dos solos coletados nos seis locais de estudo deste projeto. Os resultados (Tabela 4) são consistentes com as respostas da cana-de-açúcar ao N apresentados na Tabela 3, em que a mineralização bruta para a camada superficial foi significativamente maior para os dois locais sem resposta (5 e 6) do que para qualquer um dos locais responsivos. Para o último grupo, este parâmetro foi significativamente maior para os locais 2 e 3 do que para 1 ou 4, refletindo os valores de RF da Tabela 3. Em contraste com estes resultados, não foram observadas diferenças significativas na mineralização bruta para as amostras de subsuperfície.

Curiosamente, a mineralização bruta foi menor para o local 4, onde o N total do solo foi maior (Tabela 2). Este comportamento é consistente, entretanto, com a conclusão de que a cana respondeu à adubação nitrogenada no local 4 (Tabela 3). Esse comportamento provavelmente é reflexo do uso de prática de cultivo mínimo nesse local, no qual a sulcação foi precedida de uma única subsolagem ao invés de práticas de preparo convencional adotadas em todos os outros locais estudados. O resultado foi um acúmulo de resíduos contendo C proveniente da colheita mecânica sem queima prévia que ocorreu anualmente por sete anos antes do primeiro experimento em 2007, favorecendo muito mais a imobilização do que a mineralização.

Embora a mineralização bruta mostrou-se eficaz na diferenciação dos solos quanto à responsividade ao N, o processo envolvido na obtenção desse parâmetro é muito complicado, caro e demorado para um teste de rotina do solo. O custo e as complexidades surgem da necessidade de fertilizantes marcados e análise de ^{15}N , enquanto o tempo de processamento da amostra é uma fonte óbvia de dificuldade uma vez que necessita de um incubação de 3 dias precedida de 2 semanas de pré-incubação. Estas limitações são muito menos graves para uma técnica de pesquisa, e não impede o uso da mineralização bruta para avaliar outras técnicas de previsão de resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada.

Tabela 4 - Mineralização bruta de N em amostras de solo da superfície e subsuperfície determinada pela técnica de diluição do pool $^{15}\text{NH}_4$.†

Local	N mineralizado			
	Superfície		Subsuperfície	
	Média‡	DP§	Média‡	DP§
$\text{mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$				
<u>Altamente responsivo ao N</u>				
1	1,10 ab	1,1	0,94 a	0,1
<u>Moderadamente responsivos ao N</u>				
2	1,47 a	0,4	1,06 a	0,4
3	1,52 a	0,7	1,21 a	0,1
4	0,60 b	0,2	0,84 a	0,4
<u>Não responsivos ao N</u>				
5	3,65 d	1,2	1,05 a	0,4
6	2,37 c	0,7	1,41 a	0,6

†amostras de 10 g de cada solo foram pré-incubadas a 25°C por duas semanas e umedecidas a 60% da capacidade de campo (θ_{cc}) com água desionizada. As amostras foram então tratadas com 1,5 mL de água desionizada contendo 30 μg N na forma de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (25.34 átomos % ^{15}N), incubadas (25°C, 60% θ_{cc}) em triplicata por 1 e 3 dias. Análise quantitativa e isotópica do $\text{NH}_4\text{-N}$ trocável foi realizada após extração com 2 mol L^{-1} KCl.

‡Calculado conforme Eq. 2 descrita na seção Material e Métodos. Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna não diferem a $P < 0,05$ pelo teste t de Student.

§DP, desvio padrão.

Uma alternativa mais simples é medir a taxa líquida de produção de N mineral quando amostras de solo são incubados sob condições estáticas. A incubação aeróbia por 12 semanas das amostras superficiais dos solos foi adotada para esta finalidade no nosso trabalho, seguindo a técnica empregada por Mulvaney et al. (2001). Os resultados (Tabela 5) mostram que, para todos os seis locais estudados, a produção de N mineral foi mais rápida na primeira semana após o reumedecimento das amostras secas e diminuiu consideravelmente na segunda semana, durante o qual ocorreu imobilização líquida para locais 1 a 3. A continuidade da incubação normalmente leva à mineralização líquida, mas as flutuações temporais são comuns nas taxas dessa medida, sem dúvida refletindo as transformações da biomassa microbiana.

Tabela 5 – Capacidade das amostras superficiais dos solos para mineralização líquida†

Local	Intervalo de incubação (semana)‡												DMS¶
	0-1		1-2		2-4		4-8§		8-12§		0-12§		
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	
(NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻)-N produzido, mg kg ⁻¹ d ⁻¹													
<u>Altamente responsivo ao N</u>													
1	0,57	0,03	-0,05	0,56	-0,02	0,24	0,20	0,34	0,17	0,09	0,17	0,16	0,30
<u>Moderadamente responsivos ao N</u>													
2	1,25	0,32	-0,27	0,04	0,56	0,18	0,31	0,08	-0,08	0,11	0,25	0,03	0,30
3	0,52	0,13	-0,27	0,36	0,12	0,30	0,20	0,14	-0,03	0,02	0,10	0,04	0,30
4	1,41	0,38	0,84	0,33	0,20	0,19	0,09	0,15	0,17	0,26	0,31	0,13	0,30
<u>Não responsivos ao N</u>													
5	2,12	0,27	0,07	0,26	0,23	0,29	0,31	0,12	0,29	0,08	0,42	0,02	0,30
6	1,22	0,10	0,08	0,24	0,49	0,17	0	0,18	0,11	0,05	0,23	0,06	0,30
DMS	0,30		0,30		0,30		0,30		0,30		0,30		

†amostras de 6-g de solo foram umidificadas a 60% da capacidade de campo e então incubadas pelo período especificado a 25°C e 85-90% de umidade relativa.

‡DP, desvio padrão.

§Valores incluem (NH₄+NO₃+NO₂)-N recuperado por lixiviação das amostras de solo com 0.01 M CaCl₂ e pela extração com 2 M KCl no final da incubação. A lixiviação com CaCl₂ foi realizada a cada duas semanas, uma vez para as amostras incubadas por quatro semanas, três vezes para amostras incubadas por oito semanas e cinco vezes para amostras incubadas a doze semanas.

¶DMS, diferença mínima significativa pelo teste *t* de Student (*P*<0,05).

A comparação das Tabelas 3 e 5 revela que a mineralização líquida foi de pouco valor para a previsão de resposta da cultura à adubação nitrogenada, até mesmo com base no período total de incubação de 12 semanas, que foi menos afetada pelas flutuações temporais na produção de N mineral. Isto é facilmente perceptível, considerando que a mineralização líquida foi menor para um local não responsivo do que para dois locais moderadamente responsivos, enquanto a menor taxa não foi obtida para o local altamente responsivo. Tais discrepâncias refletem diferenças no tipo de solo e histórico de manejo que necessariamente afetam a dinâmica de C e N do solo, que podem ocorrer uma vez que incubações estáticas no laboratório não representam as condições de campo (CARPENTER-BOGGS et al., 2000; WIENHOLD, 2007). Além da óbvia limitação imposta por um regime artificial da temperatura do solo e umidade, há mudança na macro e microporosidade que normalmente ocorre no perfil de solo, além de não ocorrer absorção de N nem entrada de C rizosférico pela ausência da planta. Os mesmos artefatos são relevantes para a técnica de diluição do pool amônio (^{15}N) usados para estimar a mineralização bruta, mas o seu impacto deve ter sido reduzido pelo período de incubação mais curto empregado.

Os artefatos mencionados anteriormente podem ser evitados adotando-se um extrator químico da quantidade de N disponível ou lábil do solo ao invés de ensaios de mineralização. A abordagem usual tem sido o teste do NO_3^- (por exemplo, CARSON, 1975; MAGDOFF; ROSS; AMADON, 1984; BLACKMER et al., 1989; BUNDY; MEISINGER, 1994), mas a última década trouxe uma nova esperança de que uma abordagem química pode também ser útil para prever a capacidade de um solo de mineralização, com base em um estudo comparativo realizado por Mulvaney et al. (2001) que avaliou a composição do N do solo em locais que diferiram quanto à responsividade do milho à adubação nitrogenada. Os resultados mostraram uma concentração muito mais elevada de N-aminoaçúcares nos solos não responsivos do que nos solos responsivos, enquanto que nenhuma diferença consistente foi detectada nas concentrações de N total hidrolisável, NH_4^+ -N hidrolisável, ou N-aminoácido. Após a incubação, a produção de N mineral foi muito maior nos solos não responsivos do que nos responsivos, que foi acompanhada por uma diminuição líquida na fração N-aminoaçúcares mas não na N-aminoácidos (MULVANEY et al., 2001).

De forma a avaliar se este método é relevante para solos brasileiros sob a produção de cana-de-açúcar, foi realizada hidrólise ácida antes e após a incubação aeróbica de 12 semanas utilizada na estimativa da mineralização líquida. A Tabela 6 apresenta os dados posteriormente obtidos pela análise da distribuição do N, que mostra a tendência esperada de

menor N hidrolisável conforme se diminuiu o N total dos solos (Tabela 2) como segue: local 4 > local 6 > local 5 > local 2 > local 3 > local 1. Mais importante ainda, a Tabela 6 mostra que a incubação teve efeitos diferentes sobre as frações de N do solo obtidas por hidrólise ácida. Poucas alterações significativas foram observadas no N-total hidrolisável ou N-aminoácido, enquanto que uma diminuição significativa na fração N-NH₄⁺-hidrolisável foi acompanhada por um aumento significativo na fração N-aminoaçúcar. Como seria de se esperar devido às direções opostas, estas mudanças foram raramente refletidas nas concentrações de N-(NH₄⁺ + amino açúcar).

Tabela 6 - Concentração de N hidrolisável nas amostras superficiais dos solos antes e depois da incubação aeróbia por 12 semanas

Local	Semana	Forma de N hidrolisável†											
		Total		AA		NH ₄ + AAç		NH ₄		AAç‡		ISNT	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
mg kg ⁻¹ de N													
<u>Altamente responsivo ao N</u>													
1	0	306 a	15	100 a	16	112 a	3	61 a	12	51 a	15	50 a	15
	12	321 a	5	82 a	20	84 b	2	49 a	3	35 b	4	38 b	11
<u>Moderadamente responsivos ao N</u>													
2	0	465 a	17	137 a	3	151 a	9	97 a	9	54 b	1	94 a	8
	12	490 a	30	136 a	3	141 a	1	62 b	3	78 a	3	80 b	5
3	0	444 a	12	130 a	13	146 a	7	85 a	2	61 b	5	94 a	2
	12	473 a	35	134 a	5	142 a	2	65 b	4	76 a	4	83 b	8
4	0	1.137 a	55	349 a	19	417 a	9	196 a	21	221 b	15	249 a	16
	12	1.106 a	31	354 a	3	406 a	3	98 b	17	308 a	16	230 b	8
<u>Não responsivos ao N</u>													
5	0	931 a	5	300 a	1	334 a	5	172 a	10	162 b	10	188 a	14
	12	893 b	7	270 b	17	302 b	6	120 b	8	182 a	12	164 b	11
6	0	1.040 a	32	351 a	12	378 a	17	210 a	15	168 b	11	225 a	6
	12	1.012 a	74	340 a	13	368 a	12	113 b	16	255 a	4	207 b	9
Média	0	721 a	7	228 a	3	256 a	2	137 a	3	120 b	2	150 a	2
	12	716 a	7	219 a	3	240 b	2	85 b	3	156 a	2	134 b	2

†Determinações em triplicata. AA, amino ácido; AAç, Amino açúcar; ISNT, Illinois Soil Nitrogen Test; DP, desvio padrão. Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna, dentro de um mesmo local, indica não haver diferença entre as semanas de incubação teste *t* de Student ($P < 0,05$).

‡Determinado como $(AAç + NH_4) - NH_4$.

Os resultados da Tabela 6 são consistentes com a teoria de que a fração N-aminoaçúcar é mais lábil do que a fração N-aminoácido. Esse comportamento baseia-se nas evidências da incubação relatada por Mulvaney et al. (2001), ou seja, uma mudança líquida muito maior na fração N-aminoaçúcar do que na fração N-aminoácido quando a imobilização foi controlada pelas lixiviações periódicas. Em contraste com as diminuições na fração N-aminoaçúcar observadas naquele trabalho, a mudança líquida foi geralmente positiva no presente estudo, refletindo a síntese de biomassa microbiana durante a assimilação de N (imobilização), em vez de mineralização líquida, conforme documentado na Tabela 5 para o período de 12 semanas de incubação. Esta anomalia pode ser explicada, pelo menos em parte, pelas diferenças consideráveis nas propriedades do solo, cultivos e manejo dos Latossolos incubadas em nosso trabalho, ao contrário dos *Molisols* e *Alfisols* estudados por Mulvaney et al. (2001). O resultado é efeito da diferença qualitativa e quantitativa na microbiota do solo, que afeta o padrão de ciclagem microbiana e a série de compostos aminados hidrolisáveis presentes. A queda consistente do NH_4^+ -hidrolisável observada na incubação implica em uma fração facilmente degradável que serve como fonte de N mineralizável, e sugere que a hidrólise moderada deve ser viável para a estimar a capacidade do solo de fornecimento de N.

A última estratégia se torna mais promissora quando abordada com o ISNT, uma técnica de difusão alcalina realizada diretamente no solo sem a necessidade de hidrólise ácida. Como apresentado na Tabela 6, a incubação levou a uma redução significativa na fração ISNT para todos os locais avaliados. A diminuição na fração ISNT durante a incubação foi altamente correlacionada com as alterações correspondentes na fração N- NH_4^+ -hidrolisável ($r = 0,92^{***}$), o que indica que ambas as frações liberam formas similares de N do solo. Mais importante, a Figura 2 mostra que a produção líquida de N mineral foi altamente relacionada com o declínio dos valores de ISNT durante a incubação.

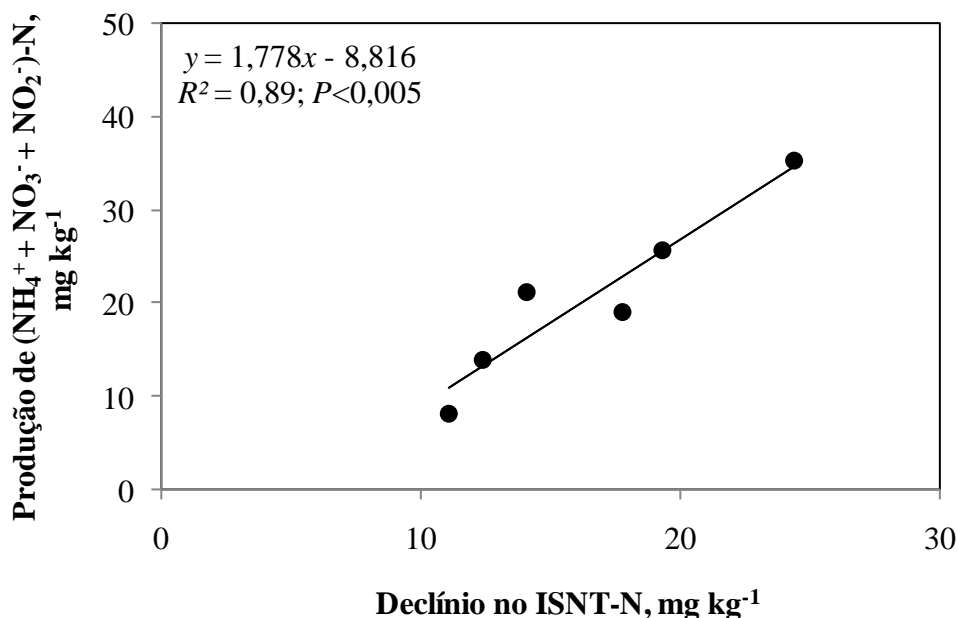


Figura 6 - Relação entre a magnitude de declínio na fração de N orgânico determinada pelo Illinois Soil Nitrogen Test (ISNT) e produção de N inorgânico durante 12 semanas de incubação aeróbica das amostras de solo

Conforme evidências apresentadas na Tabela 6 e na Figura 2 de que o ISNT está estimando uma fração mineralizável do N do solo, espera-se que testes no solo que avaliem a fração do N hidrolisável em condição alcalina sejam úteis para diferenciar locais quanto à responsividade da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada. Isso é observado na Tabela 7, que apresenta os dados obtidos pelo ISNT, assim como por DVD, de amostras de superfície e subsuperfície coletadas nos seis locais de estudo. Com qualquer uma das técnicas, os valores dos testes corretamente identificaram cinco dos seis locais, diminuindo na ordem: locais não responsivos 5 e 6 > locais moderadamente responsivos 2 e 3 > local altamente responsivo 1. A única exceção foi o local 4, caracterizada pelos maiores valores dos testes, apesar de ter apresentado resposta moderada ao N. Este comportamento é consistente com a constatação de que a mineralização bruta foi mais limitada neste local em comparação com os demais (Tabela 4), o que provavelmente pode ser atribuído ao mesmo fator observado anteriormente, ou seja, um acúmulo de resíduos das colheitas mecanizadas, que, associado ao cultivo mínimo do solo, promoveu imobilização do N mineralizado do solo e do fertilizante.

Tabela 7 - Caracterização dos solos pelo Illinois Soil Nitrogen Test (ISNT) e Destilação a Vapor Direta (DVD)

Local	Prof. cm	ISNT [†]		DVD [†]	
		Média	DP [‡]	Média	DP [‡]
mg kg ⁻¹ de N					
<u>Altamente responsivos ao N</u>					
1	0-20	56,9	6,0	51,0	4,5
	20-40	48,9	3,2	45,9	3,7
<u>Moderadamente responsivos ao N</u>					
2	0-30	85,2	6,3	78,5	3,4
	30-60	67,2	5,6	62,8	4,7
3	0-30	77,3	7,1	70,3	5,9
	30-60	62,3	4,2	54,7	6,7
4	0-30	223,6	10,5	223,5	14,2
	30-60	183,8	9,3	185,5	11,9
<u>Não responsivos ao N</u>					
5	0-20	175,4	9,2	159,6	7,7
	20-40	146,3	10,3	132,1	11,6
6	0-20	208,8	5,5	193,4	12,9
	20-40	173,9	10,1	162,7	17,6

[†]Resultados representam 12 (áreas 1-5) ou 15 (área 6) valores obtidos quando determinações em triplicata foram realizadas em amostras de solo coletadas em quatro (áreas 1-5) ou cinco (área 6) blocos experimentais.

[‡]DP, desvio padrão.

Conforme relatado anteriormente por Bushong et al. (2008), os resultados obtidos pelo ISNT e DVD também foram altamente correlacionados ($r = 0,996^{***}$). Entretanto, em contraste com os resultados daqueles autores, a precisão analítica foi ligeiramente inferior com a DVD do que com o ISNT, que apresentaram coeficiente de variação de 7,8% e 6,6%, respectivamente. A destilação reduz o período de análise para poucos minutos, porém o rendimento diário foi realmente maior com o ISNT, que é muito menos trabalhoso. A automação será necessária para garantir o potencial prático da DVD.

Se o ISNT ou a DVD devem ser utilizadas de forma eficaz para o manejo do N em cana-de-açúcar, calibrações confiáveis devem ser desenvolvidas para prever a resposta ao fertilizante nitrogenado para as condições mais relevantes de solo, manejo, variedades e condições climáticas. A importância da calibração é facilmente perceptível, considerando que a cana-de-açúcar mostrou-se não responsiva com níveis de ISNT de 175 a 209 mg N kg⁻¹ (Tabela 7), enquanto Khan et al. (2001) observaram, em condições de clima temperado,

ausência de resposta do milho ao N a partir de níveis de ISNT $> 235 \text{ mg N kg}^{-1}$. São esperados valores críticos inferiores para o clima tropical do Brasil, devido à atividade microbiana mais intensa e ao maior período de crescimento da cana em relação ao milho, o que prolonga a absorção cumulativa do N mineralizado do solo pela cana-de-açúcar.

4.4 Conclusões

Com a crescente importância do cultivo de cana-de-açúcar para produção de energia, e com a mudança do sistema de cana queimada em direção ao retorno dos resíduos culturais, assim como o uso de subprodutos como a vinhaça e torta de filtro, há uma necessidade crescente de otimizar o manejo de fertilizante nitrogenado levando-se em consideração a capacidade do solo de mineralizar N. Esta estratégia parece viável, de acordo com este estudo que utilizou amostras de solo de seis locais onde dez experimentos de resposta da cana-soca ao N foram conduzidos no Estado de São Paulo, Brasil.

A mineralização bruta estimada pela técnica de diluição do pool amônio (^{15}N) foi muito mais eficaz do que a mineralização líquida na diferenciação dos locais quanto à responsividade ao N, entretanto não é prática para ser realizada em laboratórios de análise de solo de rotina devido ao custo e a complexidade. O ISNT e a DVD fornecem uma alternativa mais prática: testes químicos para avaliar a fração de N hidrolisável em meio alcalino. Esta fração diminuiu durante a incubação, levando à produção líquida de N mineral e mostrando-se eficaz para diferenciar os solos quanto à responsividade da cana-de-açúcar ao N. Outras avaliações são necessárias, com um maior número de experimentos para garantir uma calibração confiável para a recomendação de adubação nitrogenada baseada em testes no solo.

4.5 Referências

- AMBROSANO, E.J.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMAS, E.A.; GUIRARDO, N.; ROSSI, R.; MENDER, P.C.D.; MURAOKA, T. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p.534-542, 2005.
- AZEREDO, BOLSANELLO, J.; WEBER, H.; VIEIRA, J.R. Nitrogênio em cana-planta: doses e fracionamento. **Revista Sociedade dos Técnicos Açúcareiros e Alcooleiros do Brasil**, Piracicaba, v. 4, p. 26-33, 1986.
- BARKER, D.W.; SAWYER, J.E.; AL-KAISI, M.M.; LUNDEVALL, J.P. Assessment of the amino sugar-nitrogen test on Iowa soils: II. Field correlation and calibration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 1352–1358, 2006.
- BLACK, C.A.; NELSON, L.B.; PRITCHETT, W.L. Nitrogen utilization by wheat as affected by rate of fertilization. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 11, p. 393-396, 1946.
- BLACKMER, A.M.;POTTKER, D.; CERRATO, M.E.; WEBB, J. Correlations between soil nitrate concentrations in late spring and corn fields in Iowa. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 2, p. 103-109, 1989.
- BREMNER, J.M. Nitrogen – Total. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Pt 3: **Chemical Methods**. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1996. p. 1085-1121. (SSSA Book Series 5)
- BREMNER, J.M. Organic forms of nitrogen. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison, WI: ASA, 1965. p.1238-1255. Pt 2. (Agronomy Monography, 9)
- BREMNER, J.M.; KEENEY, D.R. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 3. Exchangeable ammonium, nitrate, and nitrite by extraction-distillation methods. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 30, p. 577-582, 1966.
- BREMNER, J.M.; SHAW, K. Denitrification in soil: II. Methods of investigation. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 51, 22-39, 1958.
- BUNDY, L.G.; MEISINGER, J.J. Nitrogen availability indices. In: WEAVER, R.W.; ANGLE, J.S.; BOTTOMLEY, P.S. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Pt 2: Microbiological and biochemical properties. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1994. p. 951-984. (SSSA Book Series, 5)
- BUSHONG, J.T.; ROBERTS, T.L.; ROSS, W.J.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON JUNIOR, C.E. Evaluation of distillation and diffusion techniques for estimating hydrolyzable amino sugar-nitrogen as a means of predicting N mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 992–999, 2008.

- CABRERA, J.A.; ZUAZNÁBAR, R. Respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada en un experimento de larga duración con 24 cosechas acumuladas. **Cultivos Tropicales**, La Habana, v. 31, p. 93-100, 2010.
- CACERES, N.T.; ALCARDE, J.C. Adubação verde com leguminosas em rotação com cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Revista Sociedade dos Técnicos Açúcareiros e Alcooleiros do Brasil**, Piracicaba, v. 13, p. 16-19, 1995.
- CARPENTER-BOGGS, L.; PIKUL JUNIOR, J.L.; VIGIL, M.F.; RIEDELL, W.E. Soil nitrogen mineralization influenced by crop rotation and nitrogen fertilization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 2038-2045, 2000.
- CARSON, P.L. Recommended nitrate-nitrogen tests. In.: DAHNKE, W.C. (Ed.). **Recommended chemical test procedures for the north-central region**. North Dakota Agric. Fargo, ND: North Dakota St. Univ., 1975. p. 12-13. (Exp. Stn. Bull, 499)
- CASSMAN, K.G.; PENG, S.; OLK, D.C.; LADHA, J.K.; REICHARDT, W.; DOBERMANN, A.; SINGH, U. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 56, p. 7-39.1998.
- CETESB P4.231. Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4_231.pdf. 2006.
- COSTA, M.C.G.; VITTI, G.C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 631-637, 2003.
- CUI, Z.; ZHANG, F.; CHEN, X.; MIAO, Y.; LI, J.; SHI, L.; XU, J.; YE, Y.; LIU, C.; YANG, Z.; ZHANG, Q.; HUANG, S.; BAO, D. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N_{min} test. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 105, p. 48-55, 2008.
- DOURADO-NETO, D.; POWLSON, D.; ABU BAKAR, R.; BACCHI, O.O.S.; BASANTA, M.V.; THI CONG, P.; KEERTHISINGHE, G.; ISMAILI, M.; RAHMAN, S.M.; REICHARDT, K.; SAFWAT, M.S.A.; SANGAKKARA, R; TIMM, L.C.; WANG, J.Y.; ZAGAL, E.; KESSEL, C. van. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, p. 139-152, 2010.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p
- FITTS, J.W.; BARTHOLOMEW, W.V.; HEIDEL, H. Correlation between nitrifiable nitrogen and yield response of corn to nitrogen fertilization on Iowa soils. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 17, p. 119-122, 1953.

- FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; FERREIRA, D.A.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R. Recovery of Nitrogen (^{15}N) by sugarcane from previous crop residues and urea fertilisation under a minimum tillage system. **Sugar Technology**, New Delhi, v. 13, p. 42-46, 2011.
- FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 579-590, 2010.
- FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, p. 29-41, 2011.
- FREITAS, J.G.; CAMARGO, C.E.O.; FERREIRA FILHO, A.W.P.; TULMANN NETO, A.; PETTINELLI JUNIOR, A.; CASTRO, J.L. Produtividade e resposta de genótipos de trigo ao nitrogênio. **Bragantia**, Campinas, v. 53, p. 281-290, 1994.
- GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W. Recuperação do nitrogênio (^{15}N) da uréia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 621-630, 2003.
- GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, New York, v. 315, p. 808-810, 2007.
- GÓMEZ TORO, J.M. Efecto de la aplicacion de vinaza en la produccion y calidad de la caña de azucar. **Revista Científica Caña de Azúcar**, Maracay, v. 14, p. 15-34, 1996.
- HANEY, R.L.; FRANZLUEBBERS, A.J.; PORTER, E.B.; HONS, F.M.; ZUBERER, D.A. Soil carbon and nitrogen mineralization: influence of drying temperature. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 489-492, 2004.
- HART, S.C.; STARK, J.M.; DAVIDSON, E.A.; FIRESTON, M.K. Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification. In: WEAVER, R.W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P. (Ed.). **Methods of soil analysis: Microbiological and biochemical properties**. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1994. p.985-1016. (SSSA Book Series, 5)
- HARTEMINK, A.E. Sugarcane for bioethanol: soil and environmental issues. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 99, p. 125-182, 2008.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Séries estatísticas & Séries históricas. Produção agrícola municipal. Acesso em Novembro de 2011. Disponível em: http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/lista_tema.aspx?op=0&no=1
- KHAN, S.A.; MULVANEY, R.L.; HOEFT, R.G. A simple soil test for detecting sites that are nonresponsive to nitrogen fertilization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1751-1760, 2001.
- KHAN, S.A.; MULVANEY, R.L.; MULVANEY, C.S. Accelerated diffusion methods for inorganic-nitrogen analysis of soil extracts and water. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 936-942, 1997.

KLAPWYK, J.H.; KETTERINGS, Q.M. Reducing analysis variability of the Illinois soil nitrogen test with enclosed griddles. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 1129-1134, 2005.

KLAPWYK, J.H.; KETTERINGS, Q.M. Soil tests for predicting corn response to nitrogen fertilizer in New York. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 675–681, 2006.

KWON, H.Y.; HUDSON, R.J.M.; MULVANEY, R.L. Characterization of the organic nitrogen fraction determined by the Illinois Soil Nitrogen Test. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 3, p. 1033-1043, 2009.

LABOSKI, C.A.M.; SAWYER, J.E.; WALTERS, D.T.; BUNDY, L.G.; HOEFT, R.G.; RANDALL, G.W.; ANDRASKI, T.W. Evaluation of the Illinois soil nitrogen test in the north central region of the United States. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 1070–1076, 2008.

LAWRENCE, J.R.; KETTERINGS, Q.M.; GOLER, M.G.; CHERNEY, J.H.; COX, W.J.; CZYMMEK, K.J. Illinois soil nitrogen test with organic matter correction for predicting nitrogen responsiveness of corn in rotation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, p. 303-311, 2009.

LEGENDRE, B.L. **Sugarcane production handbook-2001**. Baton Rouge, LO: Louisiana State University. AgCenter, 2001. p.52.

LIU, L.J.; XU, W.; TANG, C.; WANG, Z.Q.; YANG, J.C. Effect of indigenous nitrogen supply of soil on the grain yield and fertilizer-N use efficiency in rice. **Rice Science**, Hangzhou, v. 12, p. 267-274, 2005.

LÓPEZ-BELLIDO, L.; LÓPEZ-BELLIDO, R.J.; LÓPEZ-BELLIDO, F.J. Fertilizer nitrogen efficiency in durum wheat under rainfed Mediterranean conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 55-62, 2006.

LORY, J.A.; SCHARF, P.C. Yield goal versus delta yield for predicting fertilizer nitrogen need in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 994-999, 2003.

LUXHOI, J.; NIELSEN, N.E.; JENSEN, L.S. Effect of soil heterogeneity on gross nitrogen mineralization measured by ¹⁵N-pool dilution techniques. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 262, p. 263-275, 2004.

MACEDO, I.C.; SEABRA, J.E.A. ; SILVA, J.E.A.R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 32, p. 582-595, 2008.

MAGDOFF, F.; ROSS, D.; AMADON, J. A soil test for nitrogen availability to corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 1301-1304, 1984.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2009. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar. In C.V. Manzatto et al. (ed.). Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. Available at http://www.cnps.embrapa.br/zoneamento_cana_de_acucar/ZonCana.pdf.

- MARRIOTT, E.E.; WANDER, M.M. Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, p. 950-959, 2006.
- MEBIUS, L.J. A rapid method for the determination of organic carbon in soil. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 22, p. 120-121, 1960.
- MENGEL, K.; HUTSCH, B.; KANE, Y. Nitrogen fertilizer application rates on cereal crops according to available mineral and organic soil nitrogen. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 24, p. 343-348, 2006.
- MULVANEY, R.L. Mass spectrometry. In: KNOWLES, R.; BLACKBURN, T.H. (Ed.). **Nitrogen isotope techniques**. San Diego, CA:Academic Press, 1993. p.11-57.
- MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A. Diffusion methods to determine different forms of nitrogen in soil hydrolysates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1284-1292, 2001.
- MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; ELLSWORTH, T.R. Need for a soil-based approach in managing nitrogen fertilizers for profitable corn production. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, p. 172-182, 2006.
- MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; HOEFT, R.G.; BROWN, H.M. A soil organic nitrogen fraction that reduces the need for nitrogen fertilization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1164-1172, 2001.
- MULVANEY, R.L.; YAREMYCH, S.A.; KHAN, S.A.; SWIADER, J.M.; HORGAN, B.P. Use of diffusion to determine soil cation-exchange capacity by ammonium saturation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, n. 1 e 2, p. 51-67, 2004.
- MURPHY, D.V.; RECOUS, S.; STOCKDALE, E.A.; FILLERY, I.R.; JENSEN, L.S.; HATCH, D.J.; GOULDING, K.W.T. Gross nitrogen fluxes in soil: theory, measurement and application of ^{15}N pool dilution techniques. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 79, p. 69-118, 2003.
- NASS, L.L.; PEREIRA, P.A.A.; ELLIS, D. Biofuels in Brazil: an overview. **Crop Science**, Madison, v. 47, p. 2228-2237, 2007.
- NORMAN, R.J.; GUINDO, D.; WELLS, B.R.; WILSON JUNIOR, C.E. Seasonal accumulation and partitioning of nitrogen-15 in rice. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 1521-1527, 1992.
- OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; PENATTI, C.P. Degradação da palhada de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 803-809, 1999.
- OLSON, R.A.; MEYER, M.W.; LAMKE, W.E.; WOLTEMATH, A.D.; WEISS, R.E. Nitrate production rate as a soil test for estimating nitrogen requirements of cereal crops. **Transaction of 7th International Congress of Soil Science**, Madison, v. 2, p. 463-470, 1960.

OLSON, R.V.; MURPHY, L.S.; MOSER, H.C.; SWALLOW, C.W. Fate of tagged fertilizer nitrogen applied to winter wheat. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 973-975, 1979.

OMAY, A.B.; RICE, C.W.; MADDUX, L.D. GORDON, W.B. Corn yield and nitrogen uptake in monoculture and in rotation with soybean. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1596-1603, 1998.

OSTERHAUS, J.T., BUNDY, L.G.; ANDRASKI, T.W. Evaluation of the Illinois soil nitrogen test for predicting corn nitrogen needs. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 143-150, 2008.

PARK, S.E.; WEBSTER, T.J.; HORAN, H.L.; JAMES, A.T.; THORBURN, P.J. A legume rotation crop lessens the need for nitrogen fertiliser throughout the sugarcane cropping cycle. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 119, p. 331-341, 2010.

PRADO, R.M.; PANCELLI, M.A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 951-959, 2008.

PRASAD, M. Response of sugarcane to filter press mud and N, P, and K fertilizers. I. Effect on sugarcane yield and sucrose content. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 539-543, 1976.

PRITCHETT, W.L.; BLACK, C.A.; NELSON, L.B. Mineralizable nitrogen in soils in relation to the response of oats to nitrogen fertilization. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 12, p. 327-331, 1947.

RESENDE, A.S.; XAVIER, R.P.; QUESADA, D.M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.. Use of green manures in increasing inputs of biologically fixed nitrogen to sugar cane. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 37, p. 215-220, 2003.

ROBERTS, T.L.; ROSS, W.J.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON JUNIOR, C.E. Predicting nitrogen fertilizer needs for rice in Arkansas using alkaline hydrolyzable-nitrogen. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, p. 1161-1171, 2011.

ROBERTS, T.L.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON JUNIOR, C.E. Changes in alkaline hydrolyzable nitrogen distribution with soil depth: fertilizer correlation and calibration implications. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 6, p. 2151-2157, 2009a.

ROBERTS, T.L.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON JUNIOR, C.E.; ROSS, W.J.; BUSHONG, J.T. Direct steam distillation as an alternative to the Illinois soil nitrogen test. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 4, p. 1268-1275, 2009b.

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F.; LANDELL, M.G.A.; CANTARELLA, H.; TAVARES, S.; VITTI, A.C.; PERECIN, D. N and K fertilization of sugarcane ratoons harvested without burning. **Proceeding International Society Sugar Cane Technology**, Veracruz, v. 27, p. 1-8, 2010.

RUFFO, M.L.; BOLLERO, G.A.; BULLOCK, D.S.; BULLOCK, D.G. Site specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. **Precision Agriculture**, New York, v. 7, p. 327–342, 2006.

SCHINDLER, F.V.; KNIGHTON, R.E. Fate of fertilizer nitrogen applied to corn as estimated by the isotopic and difference methods. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 1734–1740, 1999.

SCHROEDER, B.L.; WOOD, A.W.; MOODY, P.W.; PANITZ, J.H.; SLUGGETT, R.J.; SALTER, B. Delivering nutrient management guidelines to growers in the central region of the Australian sugar industry. **Proceedings Australian Society Sugar Cane Technologists**, Mackay, v. 28, p. 142-154, 2006.

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; TRIVELIN, P.C.O. Manejo de nitrogênio no milho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 477-486, 2006.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. VAN; PENATTI, C.P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J.L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M.G. DE A.; ROSSETTO, R. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Coord.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC, 1997. p. 233-239. (Boletim Técnico, 100).

STANFORD, G.; SMITH, S.J. Nitrogen mineralization potentials of soils. **Soil Science Society of American Proceeding**, Madison, v. 36, p. 465-472, 1972.

STECKLER, S.J.; PENNOCK; D.J.; WALLEY, F.L. Relationship of the Illinois soil nitrogen test to spring wheat yield and response to fertilizer nitrogen. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 88, p. 837-848, 2008.

STEVENS, W.B.; HOEFT, R.G.; MULVANEY, R.L. Fate of nitrogen-15 in a long term nitrogen rate study: I. Interactions with soil nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1037-1045, 2005.

STEVENS, W.B.; MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; HOEFT, R.G. Improved diffusion methods for nitrogen and nitrogen-15 analysis of Kjeldahl digests. **Journal of AOAC International**, Gaithersburg, v. 83, p. 1039-1046, 2000.

STEVENSON, F.J. Nitrogen – Organic forms. In.: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods**. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1996. p. 1185-1200. (SSSA Book Series 5)

SWANSON, E.R.; TAYLOR, C.R.; WELCH, L.F. Economically optimal levels of nitrogen fertilizer for corn: an analysis based on experimental data, 1966-1971. **Illinois Agricultural Economics**, Urbana, v. 13, n. 2, p. 16-25, 1973.

TAKAHASHI, D.T. N¹⁵-nitrogen field studies with sugarcane. **Hawaiian Plant. Rec.** Honolulu, v. 57, p. 198-222, 1964.

THORBURN, P.J.; BIGGS, J.S.; WEBSTER, A.J.; BIGGS, I.M. An improved way to determine nitrogen fertiliser requirements of sugarcane crops to meet global environmental challenges. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 339, p. 51-67, 2011.

¹⁵N ANALYSIS SERVICE. **The Illinois soil nitrogen test for amino sugar-N: Estimation of potentially mineralizable soil N and ¹⁵N**. Revision. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2004. p. 1-5. (**Technical Note 02-01**) Acessado em Nov, 2011. Disponível em: <http://illinoissoilntest.nres.uiuc.edu/research.html>.

URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; OLIVEIRA, O.C.; RESENDE, A.S.; WEBER, H. **Efeito da queima, aplicação de N, irrigação e molibdênio na produção e acumulação de nitrogênio na cana-de-açúcar a longo prazo**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, nov. 1998. 13 p. (Embrapa-CNPAB. Documentos, 72).

VANOTTI, M.B.; BUNDY, L.G.; PETERSON, A.E. Nitrogen fertilizer and legume-cereal rotation effects on soil productivity and organic matter dynamics in Wisconsin. In: PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K.; ELLIOT, E.T.; COLE, C.V. (Ed.). **Soil organic matter in temperate agroecosystems: Long-term experiments in North America**. Boca Raton, FL: CRC Press, p. 105-119, 1997.

VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W. Soybean nitrogen contribution to corn and sorghum in western Corn Belt rotations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 1220-1225, 2003.

VIEIRA, M.X.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FARONI, C.E. Ammonium chloride as nitrogen source in sugarcane harvested without burning. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1165-1174, 2010.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 249-256, 2007.

VRIES, S.C.; VEN, G.W.J. Van de; ITTERSUM, M.K. Van; GILLER, K.E. Resource use efficiency and environmental performance of nine major biofuel crops, processed by first-generation conversion techniques. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 34, p. 588-601, 2010.

WEBSTER, R. Analysis of variance, inference, multiple comparisons and sampling effects in soil research. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v. 58, p. 74-82, 2007.

WIENHOLD, B.J. Comparison of laboratory methods and an in situ method for estimating nitrogen mineralization in an irrigated silt-loam soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 38, p. 1721-1732, 2007.

WILLIAMS, J.D.; CROZIER, C.R.; WHITE, J.G.; HEINIGER, R.W.; SRIPADA, R.P.; CROUSE, D.A. Illinois soil nitrogen test predicts southeastern U.S. corn economic optimum nitrogen rates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, p. 735-744, 2007a.

WILLIAMS, J.D.; CROZIER, C.R.; WHITE, J.G.; SRIPADA, R.P.; CROUSE, D.A. Comparison of soil nitrogen tests for corn fertilizer recommendations in the humid southeastern USA. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, p. 171-180, 2007b.

WILSON JUNIOR, C.E.; NORMAN, R.J.; WELLS, B.R. Seasonal uptake patterns of fertilizer nitrogen applied in split applications to rice. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 1884–1887, 1989.

WU, T.Y.; MA, B.L.; LIANG, B.C. Quantification of seasonal soil nitrogen mineralization for corn production in eastern Canada. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, London, v. 81, p. 279-290, 2008.

YADUVANSHI, N.P.S.; YADAV, D.V.; SINGH, T. Economy in fertilizer nitrogen by its integrated application with sulphitation filter cake on sugarcane. **Biological Wastes**, Barking, v. 32, p. 75-79, 1990.

ZAK, D.R.; HOLMES, W.E.; MACDONALD, N.W.; PREGITZER, K.S. Soil temperature, matric potential, and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 575-584, 1999.