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

**Disponibilidade do nitrogênio no solo e produtividade da cana-de-açúcar
em função da rotação de culturas**

Sarah Tenelli

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

**Piracicaba
2016**

Sarah Tenelli
Engenheira Agrônoma

**Disponibilidade do nitrogênio no solo e produtividade da cana-de-açúcar em
função da rotação de culturas**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RAFAEL OTTO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2016

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

Tenelli, Sarah

Disponibilidade do nitrogênio no solo e produtividade da cana-de-açúcar em função da rotação de culturas / Sarah Tenelli. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.

90 p. : il.

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

1. Crotalaria 2. Fixação biológica do nitrogênio 3. ISNT 4. *Saccharum* spp. I. Título

CDD 633.61
T292d

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

Aos meus pais **José Tenelli Filho e Vanda Aparecida Rodrigues Tenelli**,
que tanto amo, respeito e admiro.

Pelo apoio e amor incondicional oferecido,

DEDICO.

À Sociedade Brasileira,

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

Ao meu amado Deus, por me direcionar e iluminar durante esta trajetória, pelas conquistas e desafios que foram extremamente importantes para o meu crescimento, e pela graça divina do Espírito Santo em minha vida, sou eternamente grata;

Aos meus pais, à minha irmã Susan Tenelli Sales, meu cunhado André Sales, aos pequenos Laura Tenelli Sales e Diego Tenelli Sales e à toda minha família pelo apoio, companheirismo, orações, união, confiança e bem querer;

Ao Professor Dr. Rafael Otto, pela paciência, atenção e conselhos nos momentos que mais precisei; e principalmente pela confiança e fundamental orientação na realização deste trabalho, muito obrigada!

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP e ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade de cursar a pós-graduação e infraestrutura concedida para o desenvolvimento deste trabalho;

À FAPESP, pelo recurso financeiro fornecido através da bolsa de Auxílio Regular à Pesquisa (Proc FAPESP 2014/05591-0) e à CAPES pela bolsa de mestrado;

Ao Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol – CTBE, pela parceria na realização deste trabalho;

Às Usinas Iracema e Boa Vista (Grupo São Martinho), Usina Quatá (Grupo Zilor), Usina Porto das Águas (Grupo Cerradinho), pela disponibilização das áreas experimentais e aos seus colaboradores pelo auxílio na execução dos trabalhos em campo;

Ao GAPE, que me auxiliou com infraestrutura, meio de transporte e equipe;

Aos meus queridos amigos, Elias Pedroso, Angélica Barros, Josimar Lessa, Arianne Mota e Alline Schumann que tanto admiro, obrigada pelo carinho, atenção, amizade e incansável apoio;

Aos colegas da Pós-Graduação, Marcos Altomani, Acácio Mira, Thales Sattolo, Saulo Castro, Camilo Bohórquez, Rafaela Migliavacca, Diogo Paes, Eduardo Zavaschi, Edson Mota, Cintia Lopes e Greice Pereira, pelos momentos de descontração e auxílio durante toda esta trajetória;

Ao pessoal do pensionato, Júlia Fideles, Denise Petroni, Tatiana Moraes, Francisco Santos, Lígia Erpen, Thaíse Engroff, Juliana Rodrigues, Helaine Claire e às companheiras Giuliana Micai e Lílian Moreira, que tornaram o meu dia-a-dia mais divertido; e principalmente à Dona Toshie e Sathie, que me acolheram com todo carinho durante esta caminhada;

Ao Nathan Petrucci Morita, que acreditou em meu potencial e fortaleceu a minha fé;

Aos estagiários de Graduação, Mariane Moro, Mariane Natera, Giovane Moreno, Maria Luiza Lima, Luis Felipe Rinaldi, Felipe Traldi e Arthur Gallucci, pela colaboração nas atividades laboratoriais;

Aos Professores Marcos Kamogawa e Igo Lepsch, pela disposição em ajudar e contribuições no desenvolvimento deste trabalho;

Ao Carlos Costa do Nascimento, uma pessoa iluminada e de muita paz de espírito, pela parceria e contribuições;

Aos Professores Paulo Pagliari e Renata Alcarde, por todo suporte prestado, sem o qual nada disto seria possível;

Ao Professor Dr. Godofredo Cesar Vitti, que me motivou através da sua paixão pelo seu trabalho e bom humor;

Aos integrantes da banca examinadora: Dr. Edmilson José Ambrosano e Dr. Eduardo Mariano, pela disponibilidade e dedicação na leitura deste trabalho e pelas valiosas contribuições;

À Silvia Carvalho (GAPE), secretária Marta Campos (Programa de Solos e Nutrição de Plantas), aos técnicos Luiz Silva e Ednéia Mondoni (Química e Fertilidade do Solo), José Roberto dos Santos (Recepção de Amostras), Fernando Baldesin e Denise Mescolotti (Microbiologia do Solo) e Lenita Oliveira (Química), pela incansável ajuda, suporte e atenção recebida;

Às bibliotecárias Silvia e Eliana Garcia, pelo auxílio na correção da dissertação;

E à todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho:

OBRIGADA!

EPÍGRAFE

“Se não houver frutos,
valeu a beleza das flores;
Se não houver flores,
valeu a sombra das folhas;
Se não houver folhas,
valeu a intenção da semente”.
Henfil, 1984.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
Referências	18
2 DISPONIBILIDADE DO NITROGÊNIO NO SOLO EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DE CULTURAS	21
Resumo	21
Abstract.....	21
2.1 Introdução	22
2.2 Material e Métodos	25
2.2.1 Caracterização da área experimental	25
2.2.2 Tratamentos e delineamento experimental	30
2.2.3 Avaliações	32
2.2.3.1 Teores de amônio (NH_4^+) e nitrato + nitrito ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) no solo.....	32
2.2.3.2 Nitrogênio hidrolisável da matéria orgânica do solo – <i>Illinois Soil Nitrogen Test</i> (N-ISNT).....	33
2.2.3.3 Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana.....	34
2.2.4 Análise estatística	36
2.3 Resultados e Discussão.....	36
2.3.1 Teores de amônio (N-NH_4^+) e nitrato + nitrito ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$) no solo.....	36
2.3.2 Nitrogênio hidrolisável da matéria orgânica do solo – <i>Illinois Soil Nitrogen Test</i> (N-ISNT + NH_4^+)	44
2.3.3 Teores de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (C-BM e N-BM) ...	48
2.4 Conclusões.....	51
Referências	51
3 PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DE CULTURAS	57
Resumo	57
Abstract.....	57
3.1 Introdução	58
3.2 Material e Métodos	61
3.2.1 Caracterização das áreas experimentais	61

3.2.2 Tratamentos e delineamento experimental	61
3.2.3 Avaliações	62
3.2.3.1 Densidade de colmos	62
3.2.3.2 Índice SPAD	62
3.2.3.3 Avaliação da produtividade de colmos (Mg ha^{-1}), índice EUN, produção de matéria seca e atributos tecnológicos.....	62
3.2.4 Análise Estatística	63
3.3 Resultados e Discussão	63
3.3.1 Densidade de colmos	63
3.3.2 Índice SPAD	67
3.3.3 Produtividade de colmos, índice EUN e massa de matéria seca total.....	70
3.3.4 Atributos tecnológicos	77
3.4 Conclusões	80
Referências	81
ANEXOS	87

RESUMO

Disponibilidade do nitrogênio no solo e produtividade da cana-de-açúcar em função da rotação de culturas

A adoção da rotação de culturas com leguminosas em áreas de implantação e reforma de canaviais é uma estratégia promissora para recuperação e manutenção da fertilidade do solo, e tem potencial no aproveitamento do N para as soqueiras. A análise mais detalhada do comportamento do N no solo durante o ano agrícola e dos parâmetros de produção em locais que possuem solo e clima contrastantes, permitem aprimorar o manejo da adubação nitrogenada da cana-de-açúcar. As hipóteses deste trabalho são (1) a rotação de culturas irá aumentar a disponibilidade de N no solo, a qual suprirá parte da demanda do N das soqueiras subsequentes e (2) a rotação de culturas promoverá redução da resposta das soqueiras à adubação nitrogenada. Objetivou-se avaliar o efeito da rotação de culturas nas transformações do N no solo (N mineral, N-ISNT e N e C da biomassa microbiana) e na produtividade da primeira soqueira. Os experimentos foram instalados em quatro regiões representativas de cultivo de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil: Quatá/SP (Local A); Iracemápolis/SP (Local B); Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D). Em cada local, foi instalado um experimento em esquema de parcelas subdivididas no delineamento blocos ao acaso com quatro repetições, em áreas submetidas (com rotação) ou não (sem rotação) ao plantio de leguminosa do gênero crotalária. Após a colheita da cana planta, foram implantados os seguintes tratamentos: 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N e um controle (sem N), aplicados superficialmente sobre a palhada. Foram realizadas três amostragens para determinação do conteúdo de N mineral, N-ISNT e C e N da biomassa microbiana. Entre 150 a 180 dias após a colheita da cana-planta, foram realizadas avaliações de perfilhamento e índice SPAD. Na colheita, avaliou-se matéria seca da parte aérea, produtividade e atributos tecnológicos. Os resultados demonstraram que a mineralização dos resíduos da crotalária influenciaram a dinâmica do C e N e os reservatórios de N no perfil do solo ao longo do ciclo da primeira soqueira, com destaque para o solo de textura média (Local A). Apesar da rotação de culturas ter modificado o conteúdo de N mineral, N-ISNT, e aumentado o perfilhamento e índice SPAD no local A, somente nos solos argilosos (Locais C e D), a rotação aumentou a produtividade da soqueira. A hipótese de que a rotação de culturas reduz a demanda de fertilizantes nitrogenados não foi aceita; houve resposta à adubação nitrogenada nos quatro locais, independentemente da rotação de culturas. Porém, a rotação demonstrou potencial em aumentar a produção de biomassa com manutenção da dose de N. Esta pesquisa demonstrou a viabilidade de rotação de culturas em solos argilosos com elevado conteúdo de C e N total, com potencial de aumentar a produtividade do canavial, porém sem reduzir a demanda de adubação nitrogenada.

Palavras-chave: Crotalária; Fixação biológica do nitrogênio; ISNT; *Saccharum* spp.

ABSTRACT

Availability of nitrogen in soil and productivity of sugarcane in function of crop rotation

The adoption of crop rotation with sugarcane is a promising strategy for the recovery and maintenance of soil fertility, and it shows potential in the use of N to the sugarcane ratoon. A more detailed analysis of the transformations N in soil during the agricultural year and production parameters in sites that have contrasting soil texture and climate, allows to improve management of N fertilization for sugarcane. The hypothesis of this work are (1) crop rotation will increase soil N availability, which will satisfy part of N requirements of sugarcane ratoon and (2) crop rotation will reduce the sugarcane ratoon response to N fertilization. The objective was to evaluate the effects of sunn hemp rotation in the transformations of N in soil (mineral N content, ISNT-N and microbial biomass C and N) and sugarcane ratoon yield. The field trials were installed in four representative regions of cultivation of sugarcane in Brazil: Quatá/SP (Site A); Iracemápolis/SP (Site B); Chapadão do Céu/GO (Site C) e Quirinópolis/GO (Site D). At each site, a field trial was installed in split plot in a randomized block experimental design with four replications, in areas sowed (rotation) and not sowed (no rotation) with sunn hemp. After the harvest of cane-plant, the following treatments were applied: 60, 120 and 180 kg ha⁻¹ of N and a control (without N) over the straw. Three sampling were performed to determine the soil inorganic N content, ISNT-N, C and N of microbial biomass. Between 150 to 180 days after the harvest of the cane-plant, tillering was counted and SPAD index was measured. At harvest of the sugarcane ratoon, biometric parameters, yield and quality parameters were evaluated. The results showed that mineralization of residues of sunn hemp influenced the dynamics of C and N and N content in the soil profile throughout the cycle of the sugarcane ratoon, with emphasis on medium-textured soil (Site A). Despite crop rotation has modified mineral N stocks, ISNT-N, and increased tillering and SPAD index in site A, crop rotation only increased the sugarcane ratoon yield on clay soils (Sites C and D). The hypothesis that crop rotation reduces N-fertilizer requirement was not accepted; there was response to N fertilization in four sites, regardless of crop rotation. However, the rotation showed potential in increase biomass production with maintenance of N rate. This research demonstrated the viability of crop rotation in clay soils with high total C and N content, with potential to increase sugarcane yield, but without reducing N-fertilizer requirement.

Keywords: Sunn hemp; Biological nitrogen fixation; ISNT; *Saccharum* spp.

1 INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais relacionados à agricultura são causados principalmente pela intensificação do uso da terra e expansão de novas áreas. Estima-se que o território brasileiro sofra perdas de solo por erosão da ordem de 500 milhões de Mg por ano (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - SBCS, 2015). Essas perdas já eram relatadas desde a década de 1990 no Brasil, com valores médios de 600 milhões de Mg por ano de solo, como consequência da erosão e mau uso do solo, o que corresponde a 1,5 bilhão de dólares em perdas de nutrientes (SBCS, 2015). Uma estimativa de Castro (1991) mostrou que, somente no Estado de São Paulo, cerca de 650.000 Mg de corretivos e 850.000 Mg de fertilizantes NPK eram perdidos anualmente devido à processos erosivos (MANZATTO, 2002). A agricultura, substituindo os ecossistemas naturais, contribui para a diminuição do C no solo (AMADO et al., 2001) pela degradação da sua matéria orgânica (MOS) e subsequente liberação do C para a atmosfera na forma de CO₂. Nos últimos 100 anos, a concentração de CO₂ atmosférico aumentou cerca de 85 mg kg⁻¹, sendo que 10% do CO₂ da atmosfera passa anualmente pelo solo (WILSON; AL-KAISI, 2008). Portanto, a expansão da agricultura visando produção de alimentos, fibras e energia para uma população em contínua expansão apresenta desafios no que diz respeito à conservação do solo, da água e do ar.

O Estado de São Paulo possui extensa área cultivada com a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), aonde estratégias para a conservação do solo vêm sendo adotadas buscando diminuição da erosão, eliminação da queima dos resíduos (como a chamada “cana crua”) e práticas sustentáveis de cultivo. Os resíduos vegetais deixados na superfície do solo (na maioria ponteiros e folhas secas) por meio da colheita sem queima, por exemplo, auxiliam na mitigação de gases do efeito estufa e favorece a manutenção do conteúdo de C no solo.

As áreas cultivadas com cana-de-açúcar visando a produção de açúcar, etanol e energia estão em constante expansão na região Centro Sul do Brasil. A produção de energia e etanol a partir da cana-de-açúcar representa 16% na matriz energética nacional (FRANCO et al., 2015; UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - ÚNICA, 2016). Em 2014, o Brasil apresentou área cultivada com cana-de-açúcar de ~ 10 milhões de hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2015). O processamento de cana-de-açúcar na safra 2016 deverá atingir 659 milhões de Mg, representando crescimento de 3,8% em comparação com a safra anterior. A quantidade de cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar, etanol anidro e etanol hidratado varia entre os anos em função de variáveis comerciais. Em relação à safra 2015, estimativas indicam que na safra 2016 a produção de etanol anidro reduzirá 6% (~ 11 bilhões de litros) e a produção de açúcar

reduzirá 2,7% (35 milhões de Mg), enquanto que a produção de etanol hidratado aumentará 7,4% (1,2 bilhões de litros) (CONAB, 2015). A redução na taxa de renovação dos canaviais em 2014 devido a questões financeiras poderá futuramente refletir na participação da área de cana planta e possivelmente na produtividade média da cana-de-açúcar na região Centro Sul. Entretanto, esse efeito não foi observado na safra 2015, que apresentou aumento de 3,9% na produtividade (atingindo $\sim 73 \text{ Mg ha}^{-1}$), mas espera-se diminuição da disponibilidade de cana-de-açúcar para colheita nas próximas safras (ÚNICA, 2016).

O N é um nutriente importante para o estímulo do crescimento e produção da cana-de-açúcar (THORBURN et al., 2010; FRANCO et al., 2011; ROBINSON et al., 2011). Entretanto, não há consenso na comunidade científica sobre o aumento na produção e uso de fertilizantes nitrogenados requeridos para produção de bioenergia em termos globais, devido aos possíveis efeitos deletérios do N no ambiente (ERISMAN et al., 2010; CRUTZEN et al., 2008). A produção mundial anual de fertilizantes nitrogenados atingiu 101 Tg em 2009 (FAO, 2016) e estima-se aumento até 2030, atingindo 135 Tg ano^{-1} (DOURADO-NETO et al., 2010). A disponibilidade do N no solo é um fator limitante para a produtividade da cana-de-açúcar, e fatores ambientais estão diretamente ligados às transformações dos compostos nitrogenados no solo, com destaque para as variações de temperatura, água e radiação solar que podem influenciar as perdas de N do sistema solo-planta. As perdas de N podem ocorrer por erosão, lixiviação, desnitrificação, volatilização de NH_3 e perdas de NH_3 e N_2O pela parte aérea da cana-de-açúcar, ocasionando eficiência de uso do N pela cana-de-açúcar próxima de 30% (CANTARELLA et al., 2007). Além dessas dificuldades, ainda há competição entre a planta e a população microbiana pelo N, o que torna muito importante o entendimento da sua dinâmica na escolha do manejo mais adequado para a cultura, em diferentes solos e climas, visando manter a sustentabilidade da produção dos canaviais a longo prazo (FARONI, 2008).

O cultivo consecutivo da cana-de-açúcar por longos períodos pode causar, de maneira geral, degradação das propriedades do solo via redução da disponibilidade de K, encrostamento da superfície, compactação, oscilação da umidade superficial do solo, diminuição das taxas de infiltração de água e redução da MOS (SCHUMANN et al., 2000). Neste sentido, na busca por recuperar e manter a fertilidade do solo, o cultivo de plantas de cobertura do solo vem sendo praticado a mais de 2 mil anos, principalmente com leguminosas e, no Brasil, a adoção já é conhecida há pelo menos 100 anos (DE LIMA FILHO et al., 2014). O cultivo de leguminosas no período de reforma do canavial é uma estratégia utilizada atualmente pelos produtores de cana-de-açúcar buscando melhoria da qualidade do solo, adição de N a partir da fixação biológica de N_2 atmosférico (FBN) e por fim aumento de

produtividade do canavial. O cultivo de leguminosas durante a reforma do canavial não implica em perda do ano agrícola e também não causa interferência na brotação da cana-de-açúcar. A FBN é realizada por bactérias que se desenvolvem nos nódulos das raízes de leguminosas e, em termos globais, resulta na incorporação de 20-22 milhões de toneladas de N por ano em sistemas agrícolas e naturais (PEOPLES et al., 2009). No Brasil, a utilização da soja (*Glycine max* L.) sem colheita de grãos em reforma de canavial permite economia de fertilizante mineral nitrogenado de US\$ 2,4 bilhões ano⁻¹ e contribuição da FBN de 85% em N acumulado pela planta (AMBROSANO et al., 2013).

Existem evidências de que a FBN em leguminosas pode diminuir a necessidade de adubação nitrogenada e os custos de produção da cultura agrícola cultivada em sucessão (CHERR et al., 2006; PARK et al., 2010). Essa afirmação é consistente com a observação de que em solos cultivados anteriormente com leguminosas ou que receberam aporte de resíduos orgânicos por longos períodos, como vinhaça e torta de filtro, não houve resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à adubação nitrogenada (OTTO et al., 2013). Este resultado indica que o N fixado pelas culturas de rotação pode ter aumentado a disponibilidade de N no solo e reduzido a demanda de fertilizantes nitrogenados pelas soqueiras subsequentes. Para os canaviais, a disponibilidade de N no sistema solo-planta ao longo do tempo dependerá da quantidade de N fixada pela leguminosa e da taxa de liberação do N dos seus resíduos vegetais no solo. Contudo, há necessidade de se realizar estudos neste sentido em condições brasileiras, utilizando a crotalária (*Crotalaria* spp.), que é uma leguminosa que vem sendo amplamente adotada em reforma de canaviais. Espera-se que a rotação com crotalaria irá aumentar a disponibilidade de N no solo suprimindo parte da demanda de N das soqueiras subsequentes, podendo refletir na redução da adubação nitrogenada.

A temperatura e precipitação pluviométrica são parâmetros que apresentam a diferença mais consistente entre regiões tropicais úmidas e temperadas, atuando de forma direta na taxa de mineralização da MOS e dos resíduos culturais. Além disso, a interação dos componentes minerais do solo com a matéria orgânica também são fatores relevantes para compreender a dinâmica da MOS em solos com distintas texturas (SIX et al., 2002). Portanto, considera-se que fatores como umidade e aeração do solo, temperatura, latitude e evapotranspiração influenciem na decomposição dos resíduos culturais e na dinâmica do N proveniente da FBN de culturas de rotação em diferentes solos e climas.

Deste modo, ao propor a adoção de rotação de culturas em áreas de reforma de canavial no Brasil, torna-se interessante avaliar a disponibilidade do N no solo durante o ano agrícola e os parâmetros de produção da cana-de-açúcar sob solos e climas contrastantes.

Foram instalados experimentos em quatro locais de produção de cana-de-açúcar no Brasil com o objetivo de avaliar os efeitos da rotação com crotalária nas transformações do N no solo e na produtividade da primeira soqueira, em áreas manejadas previamente com leguminosas, considerando as seguintes hipóteses:

- (i) A rotação de culturas com leguminosas em reforma do canavial irá aumentar a disponibilidade de N no solo, a qual suprirá parte da demanda do N das soqueiras subsequentes;
- (ii) A utilização de leguminosas em reforma do canavial promoverá aumento da produtividade e redução da resposta das soqueiras à adubação nitrogenada.

Referências

AMBROSANO, E.J.; FOLTRAN, D.E.; CAMARGO, M.S.; ROSSI, F.; SCHAMMASS, E.A.; SILVA, E.C.; AMBROSANO, G.M.B.; DIAS, F.L.F. Acúmulo de biomassa e nutrientes por adubos verdes e produtividade da cana planta cultivada em sucessão, em duas localidades de São Paulo. **Revista Brasileira de Agroecologia**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 199–209, 2013.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 189–197, 2001.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI A.C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana de açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 355-412.

CASTRO, O.M. de. Conservação do solo e qualidade dos sistemas produtivos. **O Agrônomo**, Campinas, v. 43, n. 2/3, p. 7-110, 1991.

CHERR, C.M.; SCHOLBERG, J.M.S.; MCSORLEY, R. Green manure approaches to crop production: a synthesis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 2, p. 302–319, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Terceiro levantamento do acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, 2015. v. 1, 65 p.

CRUTZEN, P.J.; MOSIER, A.R.; SMITH, K.A.; WINIWARTER, W. N₂O Release from agrobiofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Mainz, v. 8, p. 389-395, 2008. doi: 10.5194/acp-8-389, 2008.

DE LIMA FILHO, O.F.L.; AMBROSANO, E.J.; ROSSI, F.; CARLOS, J.A.D. (Ed.). **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília: EMBRAPA, 2014. v. 1, 507 p.

DOURADO-NETO, D.; POWLSON, D.; BAKAR, R.A.; BACCHI, O.O.S.; BASANTA,

M.V.; CONG, P.T.; KEERTHISINGHE, G.; ISMAILI, M.; RAHMAN, S.M.; REICHARDT, K.; SAFWAT, M.S.A.; SANGAKKARA, R.; TIMM, L.C.; WANG, J.Y.; ZAGAL, E.; VAN KESSEL, C. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, n. 1, p. 139, 2010.

ERISMAN, J.W.; VAN GRINSVEN, H.; LEIP, A.; MOSIER, A.; BLEEKER, A. Nitrogen and biofuels; an overview of the current state of knowledge. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, Ithaca, v. 86, p. 211-223, 2010. doi: 10.1007/s10705-009-9285-4.

FAO. **FAOSTAT**. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/R/RF/E>>. Acesso em: 02 MAR. 2016.

FARONI, C.E. **Eficiência agronômica das adubações nitrogenadas de plantio e após o primeiro corte avaliada na primeira soca da cana-de-açúcar**. 2008. 190 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade, Piracicaba, 2008.

FRANCO, A.L.C.; CHERUBIN, M.R.; PAVINATO, P.S.; CERRI, C.E.P.; SIX, J.; DAVIES, C.A.; CERRI, C.C. Soil carbon, nitrogen and phosphorus changes under sugarcane expansion in Brazil. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 515/516, p. 30–38, Apr. 2015.

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. doi: 10.1016/j.fcr.2010.11.011.

MANZATTO, C.V.; DE FREITAS JUNIOR, E.D.F.; PEREZ, J.R.R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 174 p.

OTTO, R.; MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; TRIVELIN, P.C.O. Quantifying soil nitrogen mineralization to improve fertilizer nitrogen management of sugarcane. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 49, n. 7, p. 893–904, 2013.

PARK, S.E.; WEBSTER, T.J.; HORAN, H.L.; JAMES, A.T.; THORBURN, P.J. A legume crop rotation lessens the need for nitrogen fertiliser throughout the sugarcane cropping cycle. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 119, n. 2/3, p. 331–341, 2010.

PEOPLES, M.B.; BROCKWELL, J.; HERRIDGE, D.F.; ROCHESTER, I.J.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; DAKORA, F.D.; BHATTARAI, S.; MASKEY, S.L.; SAMPET, C.; RERKASEM, B.; KHAN, D.F.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; JENSEN, E.S. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. **Symbiosis**, Cape Town, v. 48, n. 1/3, p. 1–17, 2009.

ROBINSON, N.; BRACKIN, R.; SOPER, K.V.F.; GAMAGE, J.H.H.; PAUNGFOO-LONHIENNE, C.; RENNENBERG, H.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. **PLoS One**, San Francisco, v. 6, p. e19045, 2011. doi: 10.1371/journal.pone.00190452011.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Disponível em: <http://www.sbcs.org.br/?post_type=noticia_geral&p=3810>. Acesso em: 02 mar. 2016.

SCHUMANN, R.; MEYER, J.; VAN ANTWERPEN, R. A review of green manuring practices in sugarcane production. **Proceedings South Africa Sugar Technologists**, Durban, v. 74, p. 93–100, 2000.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SA, J.C. DE M. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soil: effects of no-tillage. **Agronomie, EDP Sciences**, Fort Collins, v. 22, n. 7/8, p. 755–775, 2002.

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 and Soil**, Zurich, v. 339, p. 51–67, 2011. doi: 10.1007/s11104-010-0406-2.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Listagem Única**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/25950095920326811142/safra-2015-por-cento2F2016-no-centro-sul-deve-atingir-590-milhoes-de-toneladas-de-cana-processadas-por-cento2C-com-prioridade-para-a-producao-de-etanol/>>. Acesso em: 02 mar. 2016.

WILSON, H.M.; AL-KAISI, M.M. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on soil CO₂ emissions in central Iowa. **Applied Soil Ecology**, Ames, v. 39, n. 3, p. 264–270, 2008.

2 DISPONIBILIDADE DE NITROGÊNIO EM SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR RELACIONADA À ROTAÇÃO COM CROTALÁRIA

Resumo

A rotação de culturas com leguminosas tem potencial de incrementar a produtividade da cana-de-açúcar por meio do aumento da disponibilidade de N no solo. A hipótese deste trabalho é de que áreas manejadas anteriormente com leguminosas durante a reforma do canavial apresentarão aumento na disponibilidade de N no solo para as soqueiras subsequentes. O objetivo é avaliar o efeito da rotação de culturas nas transformações do carbono C e N da biomassa microbiana, no conteúdo de N mineral e do N da fração Illinois Soil Nitrogen Test (N-ISNT) durante o ciclo da primeira soqueira. Os experimentos foram instalados em quatro regiões representativas de cultivo de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil: Quatá/SP (Local A); Iracemápolis/SP (Local B); Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D). Em cada local, foi instalado um experimento em esquema de parcelas subdivididas no delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições, em áreas submetidas (com rotação) ou não (sem rotação) ao plantio de leguminosa do gênero crotalária. Após a colheita da cana planta, foram implantados os seguintes tratamentos: 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N e um controle (sem N), aplicados superficialmente sobre a palhada. Foram realizadas três amostragens para determinação do conteúdo de N mineral, N facilmente decomponível (N-ISNT) e C e N da biomassa microbiana (C-BM e N-BM). A rotação com crotalária aumentou o conteúdo de N mineral principalmente no solo de textura média (Local A) e em profundidade em determinados locais. Houve predomínio das espécies de N-NH₄⁺ sobre N-NO₃⁻ + N-NO₂⁻ no tratamento com rotação. A rotação com crotalária aumentou o conteúdo de N-ISNT no local A e nos períodos mais secos do ano (julho). O N-ISNT aumentou em profundidade no tratamento com rotação nos locais C e D. O conteúdo de C-BM aumentou no tratamento com rotação, porém sem efeito para o N-BM nos locais A e C. As variações no conteúdo de N mineral, N-ISNT e C-BM proporcionado pela rotação com crotalária indicou aumento na disponibilidade do N do solo com possibilidade de suprir, em parte, a exigência de N da cultura e reduzir a dose de N-fertilizante em soqueira.

Palavras-chave: N mineral; ISNT; Biomassa microbiana; *Saccharum* spp.

NITROGEN AVAILABILITY IN SOILS CULTIVATED WITH SUGARCANE RELATED TO ROTATION WITH SUNN HEMP

Abstract

Crop rotation with legumes has potential to improve sugarcane yield by increasing N availability in the soil. The hypothesis is that cultivation of legumes in sugarcane reform period will show increases in N availability in soil for the sugarcane ratoon. The objective is to evaluate the effect of crop rotation on the transformations of C and N of microbial biomass, mineral N and ISNT-N content during the sugarcane ratoon cycle. The field trials were installed in four representative regions of cultivation of sugarcane in Brazil: Quatá/SP (Site A); Iracemápolis/SP (Site B); Chapadão do Céu/GO (Site C) e Quirinópolis/GO (Site D). At each site, a field trial was installed in split plot in a randomized block experimental design with four replications, in areas sowed (rotation) and not sowed (no rotation) with sunn hemp.

After the harvest of cane-plant, the following treatments were applied: 60, 120 and 180 kg ha⁻¹ of N and a control (without N), over the straw. Three sampling were performed to determine the mineral N content, ISNT-N, C and N of microbial biomass (BM-C and N). Sunn hemp rotation increased mineral N content in medium-texture soil (Site A) and in depth in certain sites. There was a predominance of NH₄⁺-N on NO₃⁻-N + NO₂⁻-N in rotation treatment. Sunn hemp rotation increased INST-N on site A and in driest periods of the year (july). The ISNT-N increased in depth in rotation treatment in sites C and D. BM-C increased on site A and C in rotation treatment, but with no effect in the BM-N. Changes in concentrations of mineral N content, ISNT-N and BM-C and N provided by sunn hemp rotation indicated increase in soil N availability, with possibility to supply part of the N requirement of sugarcane ratoon and has potential to reduce N-fertilizer rate in sugarcane ratoon.

Keywords: Mineral N; ISNT; Microbial biomass; *Saccharum* spp.

2.1 Introdução

O solo é a principal fonte de N para as culturas, visto que ~ 95% do N total se encontra na forma orgânica. A mineralização da MOS pode disponibilizar de 80 a 200 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, considerando que 2 a 5% do N orgânico seja mineralizado ao ano, na camada de 0-20 cm, a partir de um conteúdo de N orgânico do solo de 2 g kg⁻¹ (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). A taxa de mineralização do N é variável, pois depende de diversos fatores como o clima, composição do resíduo vegetal adicionado e das características químicas e físicas do solo. Por essas razões, é complexo recomendar doses de fertilizante nitrogenado para as culturas com base somente na MOS. Entretanto, o conteúdo de MOS pode ser correlacionado com a disponibilidade de N em situações que a região apresente clima, textura do solo e drenagem semelhantes, pois é provável que as taxas de mineralização deste elemento nestes locais sejam também similares (SANTOS, 2008).

A quantificação do C e N da biomassa microbiana do solo (C-BM e N-BM) tem sido recomendada em diversos estudos como um indicador biológico da qualidade do solo com a finalidade de avaliar a sustentabilidade das áreas agrícolas, porque apresenta sensibilidade às mudanças ambientais e poluição de solo (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; PAUL, 2014). Os microrganismos do solo estão diretamente envolvidos no ciclo biogeoquímico e na dinâmica de liberação do C, N, P e S (BÜNEMANN; SCHWENKE; VANZWIETEN, 2006), já que sua composição química é constituída em maior parte por C e N, sendo P e S usados para a produção de ácidos nucleicos/fosfolipídios, proteínas e outros componentes celulares (DALAL, 1998; PAUL, 2014). A biomassa microbiana é mais susceptível às mudanças no manejo da cobertura vegetal do que o C orgânico e N total do solo, uma vez que é influenciada principalmente pelas variações de temperatura, conteúdo de água e aeração, densidade e disponibilidade de nutrientes. Os microrganismos podem exercer função de dreno

no solo quando imobilizam temporariamente os nutrientes para obtenção de energia e síntese de suas próprias células, ou função de reserva, em que os libera após sua morte e decomposição da MOS (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007). A rotação de culturas regula a quantidade e qualidade de resíduo vegetal que entra no sistema solo-planta, principalmente por meio da biomassa de raiz que permanece no sistema, e desta maneira afeta a comunidade microbiana do solo (C-BM, número de bactérias, atividade enzimática, etc.) (MAHAMA et al., 2016). Experimentos de longa duração no Canadá mostraram que cinco anos de rotação com trigo-aveia-cevada-pastagem em solos cultivados anteriormente com monocultura por 50 anos, apresentaram aumento nas entradas de C orgânico e na porcentagem biológica de C e N no solo (PAUL, 2014). O efeito da rotação de 2,5 anos com cereais-pastagem em comparação com o cultivo contínuo de cereais mostrou aumento de 29% e 56% no C-BM e N-BM, respectivamente, nas camadas superiores do solo (DALAL, 1998).

O N mineral é liberado ao solo pelos processos de transformações microbianas durante a mineralização dos compostos orgânicos nitrogenados, sendo encontrado no solo nas formas de amônio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-), que são prontamente disponíveis para as culturas. Essas formas de N são muito dinâmicas, pois podem participar de diversas transformações no solo, como a imobilização de NH_4^+ pela microbiota heterotrófica, e nitrificação, onde o NO_3^- gerado pode ser absorvido pelas plantas, ou perdido por desnitrificação ou lixiviação do perfil do solo (FOLLMANN, 2015). O compartimento “N mineral” retrata a quantidade de N disponível no solo, embora seu conteúdo possa ser alterado por fatores climáticos, como as chuvas. Em geral, a extração das formas de N mineral no solo em laboratório é realizada através da troca iônica com solução salina, como $\text{KCl } 2 \text{ mol L}^{-1}$ e $\text{K}_2\text{SO}_4 2 \text{ mol L}^{-1}$, por exemplo (MULVANEY, 1996).

Em estudos sobre a rotação de leguminosas com trigo, Blackshaw et al. (2001) observaram que esta prática resultou em aumento da disponibilidade de N mineral de 16 para 52 kg ha^{-1} no solo para a cultura sucessora. Similarmente, os resíduos das leguminosas promoveram aumento da disponibilidade do N para o sorgo em sucessão, o que refletiu em vários benefícios, como: maior índice de clorofila, maior taxa fotossintética, e aumentos no rendimento de grãos, no número de sementes por planta e absorção de N para os grãos (MAHAMA et al., 2016). A manutenção dos resíduos culturais pode favorecer o acúmulo da MOS devido a decomposição lenta e contínua do material orgânico no solo (AMADO, 2001; SÁ et al., 2008). Além disso, o potencial de perda de NO_3^- no solo por lixiviação é minimizada no período entre a colheita e o plantio da próxima safra quando se utiliza plantas de cobertura, geralmente não leguminosas, devido a uma maior retenção de nutrientes na

rizosfera (BLANCO-CANQUI et al., 2015). No entanto, a rotação com a soja no período de entressafra do milho pode acarretar na diminuição das perdas de NO_3^- por lixiviação em proporções mínimas, pois tal fato é bastante dependente das condições climáticas do ambiente (DINNES et al., 2002). Por este motivo, estes resultados devem ser analisados com cautela.

A fração do N mineralizável do solo pode ser estimada pelo método químico de hidrólise alcalina denominado Illinois Soil Nitrogen Test (ISNT), que utiliza um extrator básico (NaOH 2 mol L^{-1}) capaz de extrair o conteúdo de N amino açúcares de bactérias e amida e NH_4^+ trocável do solo (KHAN; MULVANEY; HOEFT; 2001). Diversos estudos (p. ex.: WILLIAMS et al., 2007; LABOSKI et al., 2008; ROBERTS et al., 2011; OTTO et al., 2013) avaliaram o ISNT em prever a resposta de áreas à fertilização nitrogenada, em culturas como a do milho, arroz e cana-de-açúcar, obtendo-se resultados promissores, como também negativos. Para a cana-de-açúcar e em condições brasileiras, os graus de responsividade ao N podem ser classificados com base nos seguintes valores de N-ISNT: (a) áreas altamente responsivas ($< 57 \text{ mg kg}^{-1}$); (b) áreas moderadamente responsivas (entre 57 e 85 mg kg^{-1}) e (c) áreas não responsivas ($> 175 \text{ mg kg}^{-1}$); tais graus baseiam-se no estudo de 6 experimentos no Estado de São Paulo por Otto et al. (2013).

A combinação de estimativas que quantifiquem as frações de N no solo, considerando em paralelo fatores como as características edafoclimáticas da região e do solo, possibilita um melhor entendimento da relação entre os processos de imobilização/mineralização e permite estabelecer uma melhor previsão da disponibilidade de N durante o ano agrícola que, conseqüentemente, refletirá em uma recomendação mais segura de adubação nitrogenada para as culturas (SANTOS, 2008). Portanto, é necessário mensurar o potencial da rotação de culturas em melhorar as propriedades do solo, especialmente os de baixa fertilidade, arenosos, degradados ou sujeitos à erosão; além disso, avaliar o efeito dessa prática a longo prazo em solo e produção vegetal, a fim de identificar as variações de clima de ano para ano (MAHAMA et al., 2016). Pouca informação está disponível a respeito da contribuição de leguminosas no suprimento de N para soqueiras de cana-de-açúcar cultivadas em sistema de plantio direto. Os sistemas de gestão agrícola que envolvem a prática do plantio direto com leguminosas apresentam grande potencial em gerar benefícios econômicos, como também ambientais, ressaltando a diminuição da erosão do solo, emissões de C e redução no uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos.

A hipótese deste estudo é de que áreas manejadas com crotalária durante a reforma do canavial apresentarão aumento na disponibilidade de N no solo. Espera-se que o N proveniente da crotalária supra em parte a exigência de N da soqueira, permitindo que a

adubação nitrogenada de cobertura seja eliminada ou reduzida. O objetivo é avaliar o efeito da rotação com crotalária nas transformações do N em três compartimentos do solo: (a) N mineral, (b) N-ISNT e (c) C e N da biomassa microbiana, em área com rotação e área de pousio, no ciclo de primeira soqueira de cana-de-açúcar.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em quatro locais, situados nos municípios de Quatá-SP (Local A), Iracemápolis-SP (Local B), Chapadão do Céu-GO (Local C) e Quirinópolis-SP (Local D) (Figura 2.1). Os locais A e B representam áreas tradicionais de cultivo de cana-de-açúcar, enquanto os locais C e D representam áreas de expansão de cultivo da cana-de-açúcar na região do Cerrado. Todos os experimentos encontram-se na região Centro Sul de produção de cana-de-açúcar no Brasil. Informações adicionais das áreas experimentais são exibidas na Tabela 2.1.

Figura 2.1 - Localização das áreas experimentais nos Estados de São Paulo e Goiás (A = município de Quatá/SP; B = município de Iracemápolis/SP; C = município de Chapadão do Céu/GO; D = município de Quirinópolis/GO)

Tabela 2.1 - Características das áreas experimentais

Informação	Local			
	A	B	C	D
Coordenadas geográficas	22° 14'S	22° 34'S	18° 25'S	18° 32'S
	50° 42'O	47° 31'O	42° 33'O	50° 26'O
Altitude (m)	540	608	850	500
Precipitação média anual (mm)	1280	1420	1850	1400
Tipo de solo (Embrapa, 2013)	Latossolo Vermelho álico	Nitossolo Vermelho eutrófico	Latossolo Vermelho distrófico	Latossolo Vermelho acriférico
Textura	Média	Muito argilosa	Argilosa	Argilosa

A = Quatá/SP; B = Iracemápolis/SP; C = Chapadão do Céu/GO e D = Quirinópolis/GO

O clima do local A é classificado como subtropical húmido Cfa, de acordo com Köppen, com temperatura média de 20,8°C e precipitação média anual de 1280 mm, mais intensa em janeiro e com menor precipitação em agosto. No local B, o clima é Cwa caracterizado como subtropical chuvoso com verão quente e inverno seco, com temperatura média de 20,4°C e pluviosidade média anual de 1420 mm. O local C apresenta clima tropical de monções Am, com temperatura média de 22,5°C, e o mês de outubro se apresenta como o mais quente do ano. Exibe pluviosidade média anual de 1850 mm com verão que pode apresentar chuvas torrenciais que podem durar alguns dias e inverno com possíveis períodos de estiagem. O clima do local D é classificado como Aw (tropical) com temperatura média de 24,4°C, pluviosidade média anual de 1400 mm e inverno seco. A chuva se concentra no verão, com a maior média de precipitação em janeiro e menor em junho (Alvares et al., 2013). Como pode ser observado, os locais A e B se encontram no mesmo Estado (Figura 2.1), porém apresentam solos de textura média e muito argilosa, respectivamente. Os locais C e D, por sua vez, apresentam diferenças na altitude do terreno de aproximadamente 300 m, o que justifica a escolha dos mesmos pois o regime das águas e a temperatura são distintas.

Os dados de temperatura máxima, mínima e média (°C) e precipitação (mm) do período de Janeiro/2013 a Julho/2015 foram registrados pelas estações experimentais próximas aos locais dos experimentos (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Temperatura média mensal e precipitação (mm) registrados no período de janeiro/2013 a julho/2015 em A = Quatá/SP, B = Iracemápolis/SP, C = Chapadão do Céu/GO e D = Quirinópolis/GO. As setas brancas indicam a data de plantio e colheita da cana-planta, respectivamente; enquanto que as setas pretas a época de coleta de solo para avaliações do N no solo

Antes do plantio da cultura, foi realizada amostragem de solo para caracterização das áreas nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e 60-100 cm. Para avaliar os atributos químicos (Tabela 2.2) realizou-se a determinação do CT; pH em CaCl_2 0,01 mol L⁻¹ (1:2,5); Al trocável extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹; teor de P, K, Ca e Mg por extração com resina trocadora de íons e posterior determinação de P por colorimetria, K por fotometria de chama e Ca, Mg e Al por espectrofotometria de absorção atômica. As análises foram realizadas conforme metodologia de Raij et al., (2001). Na avaliação dos atributos físicos, determinou-se a granulometria e densidade do solo. A densidade do solo foi determinada na implantação do experimento em amostra indeformada através do método do anel volumétrico (GEE & BAUDER, 1986). Para a quantificação dos teores de argila (<0,002 mm), silte (0,002–0,05 mm) e areia (>0,02 mm) utilizou-se o método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

Para análise do estoque de N e C total no solo, coletaram-se amostras de solo nas áreas com e sem rotação nas camadas supracitadas logo após a colheita da cana-planta (entre julho e agosto de 2014), ou seja, antes das avaliações na primeira soqueira. A amostragem foi feita na posição intermediária entre a linha de cana e a posição da entrelinha (cerca de 30 cm da linha). Adicionalmente, foram coletadas amostras indeformadas para avaliação da densidade do solo, permitindo calcular o estoque de N e C total até 1,0 m. O teor de N e C total foi determinado por combustão a seco, conforme metodologia descrita em Nelson e Sommers (1996), por meio do equipamento LECO TruSpec CN (Tabela 2.3).

Tabela 2.2 - Atributos químicos e físicos das áreas experimentais antes da instalação do experimento

Camada cm	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al	H+Al	S	CTC	V %	Areia	Silte	Argila	Ds kg dm ⁻³
mmol _c dm ⁻³														
g kg														
Local A														
0-10	5,1	24,2	0,8	16	5,7	0,3	13	20,8	36	63	853	60	87	1,70
10-20	4,7	16,0	0,3	10	3,2	4,5	17	12,8	31	42	832	60	108	1,84
20-40	4,6	9,0	0,3	10	2,8	5,2	17	19,7	30	43	801	57	142	1,76
40-60	4,5	7,0	0,2	8	2,2	6,2	18	12,5	28	35	783	73	144	1,68
60-100	4,5	5,5	0,2	7	2,2	6,7	18	23,0	28	34	763	78	159	1,67
Local B														
0-10	4,4	76,8	7,6	20	8,7	13,5	54	64	90	40	148	206	646	1,38
10-20	4,4	48,8	6,9	19	7,5	12,5	60	52	93	36	145	189	666	1,37
20-40	4,5	28,0	6,6	17	7,2	7,8	45	51	76	44	126	188	686	1,27
40-60	4,7	8,3	6,7	18	6,5	3,8	38	51	70	46	92	167	739	1,17
60-100	4,7	7,7	7,1	17	6,0	3,8	36	48	66	46	85	157	758	1,15
Local C														
0-10	5,1	14,7	2,9	33	12,3	0,7	27	11,7	76	64	218	161	621	1,15
10-20	5,2	11,8	2,1	28	8,5	0,7	28	11,3	67	58	208	150	642	1,15
20-40	4,8	6,0	1,2	16	4,6	2,6	37	31,0	58	37	200	145	655	1,15
40-60	4,8	5,0	1,0	13	3,0	2,0	31	31,8	47	35	181	138	681	1,14
60-100	4,8	4,5	1,0	12	3,0	1,5	27	35,5	43	38	177	104	719	1,14
Local D														
0-10	5,5	9,5	5,8	44	15,8	0,2	23	6,8	89	74	267	186	547	1,37
10-20	5,5	8,2	3,7	43	12,2	0,0	23	6,2	82	72	249	190	561	1,29
20-40	5,6	6,7	2,6	33	8,3	0,2	21	13,5	65	68	225	195	580	1,23
40-60	5,6	6,8	0,9	28	6,3	0,2	20	9,3	55	64	226	175	599	1,20
60-100	5,7	6,2	0,7	22	6,8	0,3	18	8,3	48	62	234	171	595	1,19

CTC= capacidade de troca catiônica a pH 7 ($T = [SB+H] + Al$); V= saturação por bases ($V = [SB/T] * 100$); H+Al= tampão SMP; SB = soma de bases ($SB = Ca+Mg+K+Na$); A = Quatá; B = Iracemópolis; C = Chapadão do Céu e D = Quirinópolis

Tabela 2.3 - Conteúdo de C e N total no solo das quatro áreas experimentais na implantação dos experimentos (julho/agosto de 2014)

2014)

Camada	Rotação de culturas							
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
cm	Local A		Local B		Local C		Local D	
	C total (g kg ⁻¹)							
0-10	6,6	7,5	25,8	25,2	35,3	30,1	27,2	26,2
10-20	5,3	5,2	24,2	22,0	25,4	23,1	20,0	20,3
20-40	5,0	4,9	16,0	17,1	19,4	17,8	13,3	15,7
40-60	4,7	4,7	11,8	12,6	14,3	13,8	12,2	10,8
60-100	4,4	4,5	10,7	10,2	11,3	10,4	9,5	8,8
	N total (g kg ⁻¹)							
0-10	0,2	0,3	2,1	2,2	1,9	1,9	2,3	2,1
10-20	0,1	0,2	2,0	1,9	1,6	1,4	1,8	1,7
20-40	0,2	0,2	1,5	1,6	1,0	1,0	0,9	1,3
40-60	0,2	0,2	1,0	1,2	0,6	0,7	1,0	0,8
60-100	0,1	0,1	0,9	0,8	0,5	0,5	0,7	0,6

2.2.2 Tratamentos e delineamento experimental

A instalação dos experimentos foi realizada no período entre dezembro/2012 e janeiro/2013 em área comercial de cana-de-açúcar (Tabela 2.4). Inicialmente em todos os locais, realizou-se a reforma do canavial a partir da dessecação da soqueira com herbicida e posteriormente feito o preparo do solo com gradagem e subsolagem. A área experimental foi dividida em duas faixas: em uma delas plantou-se crotalária e a outra foi deixada em pousio. A crotalária foi plantada entre dezembro e janeiro e a dessecação realizada com glifosato 75 a 90 dias após o plantio; realizou-se a roçagem somente no local B, onde plantou-se a *Crotalaria juncea*. A densidade de plantio foi de 25 kg de sementes de crotalária por hectare. Antes do plantio da cana-de-açúcar, cinco amostras de resíduos da crotalária foram coletadas para análise química de macro e micronutrientes (Tabela 2.5). A medição da biomassa seca da crotalária foi realizada no campo com auxílio de um gabarito em 1 m² de área útil de cada parcela, em seis repetições, e as amostras foram pesadas antes e após a secagem em estufa a 65°C até obtenção de massa constante. A quantidade de N acumulado na parte aérea da cultura de rotação variou de 127 (Local C) a 192 kg ha⁻¹ de N (Local D) (calculado a partir da Tabela 2.5).

Foi realizada sulcação da área e posteriormente o plantio manual da cana-de-açúcar, em espaçamento de 1,5 m. Todas as áreas receberam a adubação de plantio conforme práticas usuais de adubação das próprias Usinas (Tabela 2.4). Cada manejo (área com e sem rotação) possuía quatro repetições, com parcelas compostas por cinco linhas de cana-de-açúcar com 9 m de comprimento e espaçamento entre linhas de 1,5 m em esquema de parcelas subdivididas

no delineamento blocos ao acaso. Após 60 dias da colheita da cana planta, realizou-se a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de K₂O em soqueira e avaliações do N no solo.

As usinas contribuíram com o fornecimento das sementes da *C. spectabilis* para a execução do experimento, porém no local B houve troca da semente por *C. juncea*. No local A, a crotalária não germinou adequadamente, por isso foi necessário posterior replantio no mês de fevereiro. Devido a estes acontecimentos, não foi possível comparar estatisticamente os quatro locais.

A cultivar de cana-de-açúcar utilizada foi a RB96 6928, que apresenta rusticidade, boa brotação em cana planta e em soqueira, boa produtividade, época de colheita entre abril e junho, favorável para ambientes “A” até “D1” e possui elevada sanidade às principais doenças (carvão, ferrugem marrom, escaldadura e mosaico) (DINARDO-MIRANDA; VASCONCELOS; LANDELL, 2008).

A quantidade de palha encontrada após a colheita da cana planta foi: 8,6; 15,8; 15,6 e 16,6 Mg de massa seca de palha ha⁻¹ em Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D), respectivamente.

Tabela 2.4 - Informações sobre a instalação e condução do experimento

Informações	Local			
	A	B	C	D
Espécie cultivada	<i>C. spectabilis</i>	<i>C. juncea</i> ²	<i>C. spectabilis</i>	<i>C. spectabilis</i>
Plantio ¹	06/02/2013 ³	22/01/2013	06/12/2012	20/12/2012
Dessecação ¹	29/03/2013	04/04/2013	18/03/2013	06/03/2013
Adução (kg ha ⁻¹)	500 / 08-25-25	300 / 12-23-23	500 / 08-28-20	500 / 08-25-25
Calcário (t ha ⁻¹)	2,0	2,0	1,6	-
Gesso (t ha ⁻¹)	1,0	-	1,5	-
Plantio	30/04/2013	24/04/2013	10/04/2013	20/03/2013
Colheita	16/06/2014	02/07/2014	09/06/2014	04/06/2014
Produtividade Cana planta	Com	57	119	169
	Sem	48	121	144

1 = da cultura de rotação; 2 = Somente na Usina Iracema foi plantado a *C. juncea*; 3 = a crotalária foi plantada em 16/11/12, porém não germinou adequadamente e foi replantada em fevereiro/2013. A = Quatá/SP; B = Iracemápolis/SP; C = Chapadão do Céu/GO e D = Quirinópolis/GO

Tabela 2.5 – Teor de macro e micronutrientes e massa de resíduos das leguminosas

Local	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Massa seca
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹					Mg ha ⁻¹
A	26	4,3	17,0	8,9	3,2	3,7	19	10	358	58	41	6,5
B	20	3,6	14,6	6,7	2,5	1,7	18	10	637	126	23	8,5
C	15	2,2	23,7	3,6	1,8	1,5	13	12	82	11	29	8,3
D	24	2,4	15,6	9,1	2,2	1,7	14	19	1142	43	26	8,1

A = Quatá; B = Iracemápolis; C = Chapadão do Céu e D = Quirinópolis

2.2.3 Avaliações

2.2.3.1 Conteúdo de amônio (NH_4^+) e nitrato + nitrito ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) no solo

As amostras para N-mineral foram coletadas nas parcelas controle (sem N mineral) para não ter influência do N-fertilizante aplicado. A amostragem foi realizada até 100 cm nas duas áreas (com e sem rotação) em julho/2014, janeiro/2015 e julho/2015. As épocas de julho e janeiro apresentam temperatura e precipitação pluviométrica discrepantes, influenciando em mudanças nos processos microbiológicos de transformação do N do solo. A elevada temperatura e alta precipitação pluviométrica no período de janeiro pode favorecer uma maior atividade microbiana no solo, e o contrário espera-se em julho, pois representa período de temperaturas mais baixas e baixo índice pluviométrico. Foram coletados seis pontos por parcela nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-100 cm em cada um dos tratamentos (com e sem rotação), para obtenção de uma amostra composta de cada camada, por meio de trado holandês. As subamostras de cada parcela foram imediatamente conservadas em isopor contendo gelo até o transporte ao laboratório, e posteriormente mantidas em congelador (-17°C) até a análise.

Para a extração das formas de N mineral, pesou-se 5 g de solo úmido em triplicata e adicionou-se 25 ml de $\text{KCl } 2 \text{ mol L}^{-1}$ (BURESH; AUSTIN; CRASWELL, 1982). Posteriormente, realizou-se a agitação por 1 h em mesa agitadora horizontal à 180 rev min^{-1} e filtragem do extrato por gravidade em papéis de filtragem lenta (12,5 mm de diâmetro, Nalgon, faixa azul) previamente lixiviados com $\text{KCl } 2 \text{ mol L}^{-1}$. Outra subamostra foi pesada antes e após secagem em estufa (à 105°C durante 24 h) para determinação da umidade, permitindo transformar os resultados para base seca (mg kg^{-1}). O N inorgânico (N-NH_4^+ e $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$) foi determinado por meio de sistema de análise por injeção em fluxo (FIA), conforme Kamogawa e Teixeira (2009). Foi utilizado uma solução estoque de 1000 mg kg^{-1} de N contendo as duas espécies N-NH_4^+ e N-NO_3^- a partir de NH_4NO_3 (Sigma Aldrich, Brasil). As curvas de calibração foram preparadas por diluição da solução estoque com concentrações de 0,25; 0,5; 1,25; 2,5 e $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ para N-NH_4^+ e 0,5; 1,0; 2,5; 5,0 e $10,0 \text{ mg L}^{-1}$ para N-NO_3^- . Os sistemas FIA descritos nas figuras 2.3a e 2.3b, foram utilizados na determinação dos teores das espécies amoniacais e nítricas. O equipamento opera separando uma alíquota da amostra que recebe, por confluência, uma solução de $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1} + 0,1\% \text{ (m/v)}$ de EDTA. Esta produz a espécie volátil NH_3 , que é separada na câmara de difusão gasosa e capturada na solução de bromocresol púrpura, alterando sua cor proporcionalmente a concentração de amônia do meio. A espécie formada foi monitorada

espectrofotometricamente em 605 nm com uso de um fotômetro de led acoplado ao equipamento. Para a determinação do $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$, fixou-se uma coluna de zinco granulado antes do difusor gasoso, figura 2.3b, visando à redução eletroquímica de todo o $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ em N-NH_4^+ . O resultado foi obtido pela diferença entre esta leitura e a de N-NH_4^+ lida anteriormente da mesma amostra.

Figura 2.3 - Sistema de análise por injeção em fluxo para a) análise de nitrogênio amoniacal e b) nitrogênio amoniacal e nítrico. Ind = indicador de pH bromo cresol púrpura 20 mg L⁻¹ ajustado a pH 7,0, vazão de 1,6 mL min⁻¹; NaOH = solução 0,5 mol L⁻¹ de NaOH e 0,1% (m/v) de EDTA, vazão de 0,7 mL min⁻¹; ST = solução transportadora, água desmineralizada, vazão de 1,6 mL min⁻¹; V1 = válvula de amostragem; B1 = bobina de mistura; BP = bomba peristáltica; CD = câmara de difusão gasosa; D = detector 605 nm; Desc. = descarte.

2.2.3.2 Nitrogênio hidrolisável do solo – Illinois Soil Nitrogen Test (N-ISNT)

A fração hidrolisável do N orgânico do solo foi determinada pelo método de difusão Illinois Soil Nitrogen Test (ISNT), conforme Khan et al. (2001) que analisa frações facilmente mineralizáveis da MOS, sendo útil para identificar solos não responsivos à adubação nitrogenada (KHAN; MULVANEY; HOEFT, 2001). A determinação da fração amino-açúcares do N orgânico do solo é realizado por meio de difusão direta do solo em contato com solução de NaOH em câmaras do tipo Mason Jar. Foram utilizadas as mesmas amostras de solo nas quais foi quantificado o N mineral. O solo foi descongelado, seco em estufa com ventilação forçada à 40°C, moído em moinho de martelo e passado em peneira com malha de 2 mm. Pesou-se 1 g de solo, em triplicata, adicionou-se 5 ml da solução indicadora H_3BO_3 a

4% em placas de petri de acrílico, mantidas em suspensão por um sistema adaptado nas tampas. O solo foi adicionado a uma câmara de difusão do tipo Mason Jar (Pote Arjex Berlim C/TP Garra; capacidade 0,650 L – Frascolex Ind e Com LTDA) e em seguida, tratado com 10 mL de solução NaOH 2 mol L⁻¹. A câmara foi fechada rapidamente. Antes do posicionamento das Mason Jars sobre as chapas aquecedoras, estas foram pré-aquecidas a 54°C por 2h, de modo que a verificação da temperatura ocorreu por meio de um termômetro inserido dentro da câmara de difusão sem tampa contendo cerca de 100 mL de água deionizada. Realizou-se a rotação das jarras após 1,5 h e 3,0 h, e retiradas após 5 h. Adicionou-se 5 mL de água deionizada às placas de petri, com posterior titulação potenciométrica (Modelo 877 Tritino plus; Metrohm, Herisau, Switzerland) com solução de H₂SO₄ (0,01 mol L⁻¹) padronizada. O conteúdo de N-ISNT (mg kg⁻¹) foi obtido pela quantidade de H₂SO₄ necessária para atingir o pH inicial da solução contendo 5 mL da solução indicadora de H₃BO₃ (4%) e 5 mL de água deionizada, por meio de eletrodo de superfície plana acoplado no titulador automático. Mais detalhes da metodologia de determinação do N-ISNT podem ser obtidas em ¹⁵N Analysis Service (2011).

2.2.3.3 Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana

O C e N da biomassa microbiana (C-BM e N-BM) foram avaliados pelo método da fumigação-extração (VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987). Este método recupera o material celular liberado pela parede celular após a exposição do solo ao clorofórmio, por meio de fraco (K₂SO₄ 0,5 mol L⁻¹).

A amostragem foi realizada por meio de trado holandês, sendo coletado seis pontos por parcela nas camadas de 0-10 e 10-20 cm a 20 cm de distância da linha de plantio, para constituição das subamostras, que foram agrupadas para obter-se a amostra composta. O solo das amostras foi acondicionado em sacos plásticos com a boca vedada por papel higiênico preso por elástico, com a finalidade de manter a oxigenação do solo e, em seguida, armazenadas em caixa de isopor com gelo para manter refrigeração até o transporte ao laboratório. A coleta foi realizada em janeiro e repetida em julho de 2015. As amostras foram peneiradas e passadas em malha de 2 mm e a umidade do solo ajustada para próximo de 60% da capacidade máxima de retenção de água. Pesaram-se duas amostras de 10 g de solo por parcela, sendo uma fumigada e outra não. Para as amostras fumigadas, pesou-se em recipiente de vidro e colocou-se em dessecador forrado com papel de filtro umedecido com água. Por meio de uma bomba, retirou-se o ar de dentro do dessecador e as amostras foram deixadas no escuro por 24 h juntamente com 25 mL de clorofórmio posicionado no centro. As amostras

não fumigadas foram colocadas em recipiente de acrílico e deixadas na mesma sala. Após esse período, adicionou-se 40 mL da solução extratora K_2SO_4 ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$) e as amostras foram agitadas em agitador horizontal (200 rev min^{-1}) por 30 min. O extrato foi filtrado em papel de filtro para determinação do C e N da biomassa microbiana.

Para a determinação do C-BM, utilizou-se uma alíquota de 8 mL do extrato fumigado e não fumigado, adicionou-se 2 mL de $K_2Cr_2O_7$ $66,7 \text{ mmol L}^{-1}$ e 15 mL da mistura catalisadora ácida de ácido sulfúrico/fosfórico 2:1 ($H_2SO_4 + H_3PO_4$). Foi efetuado a digestão em banho maria à 100°C por 30 min, e posteriormente determinação por titulação com sulfato ferroso amoniacal padronizado [$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$] $33,3 \text{ mmol L}^{-1}$. O C-BM foi obtido pela diferença do excedente de $K_2Cr_2O_7$ nas amostras fumigadas e não fumigadas utilizando a equação 1:

$$(1) \text{ C-BM (mg C kg}^{-1}\text{)} = [(CF - CNF) / K_C]$$

Onde: CF e/ou $CNF = [(Va - Vb) \times 1200 \times 5 \times r] / ms$;

Nas equações acima, o CF é a quantidade de C na amostra fumigada (mg kg^{-1}) e CNF é a quantidade de C na amostra não fumigada (mg kg^{-1}). Va e Vb representam o volume de SFA gasto na titulação da amostra (mL) e branco (mL), respectivamente; 1200 é quantidade em μg de C oxidado por mL de $K_2Cr_2O_7$; 5 é referente aos 10 g de solo úmido; r é a razão entre o volume de $K_2Cr_2O_7$ e o volume sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação do branco); o ms é massa de solo seco obtido após 24 h em estufa a 105°C e K_C é o fator de recuperação do C-BM (0,40).

O N-BM foi determinado pelo método da ninhiidrina reativa (Brookes; Joergensen, 1990) e pelo método da destilação de Kjeldahl adaptado de Brookes et al. (1985). A coleta de Janeiro/2015 foi avaliada pela metodologia da ninhiidrina e em Julho/2015 optou-se por utilizar o método da destilação pelo fato deste método apresentar maior recuperação do N-BM. Devido à elevada variabilidade dos resultados obtidos em Jan/15, decidiu-se por não apresentar os resultados desta época de coleta, limitando-se a apresentar os resultados de Jul/15.

No método da destilação de Kjeldahl para determinar o N-BM, utilizou-se 8 mL do extrato fumigado e não fumigado e 7 mL da mistura digestora. Levou-se ao bloco digestor na temperatura inicial de 100°C , elevando lentamente a temperatura até atingir 360°C . Após atingir essa temperatura, esperou as amostras esfriarem e realizou-se a destilação em

destilador à vapor com 10 mL de ácido bórico 2%. Em seguida, titulou-se as amostras com H_2SO_4 padronizado ($0,0125 \text{ mol L}^{-1}$). O N-BM foi calculado utilizando a equação 2:

$$(2) \text{ N-BM} = (\text{N}_t\text{F} - \text{N}_t\text{NF}) / K_N$$

Onde: N_tF é a quantidade de N total encontrado na amostra fumigada; N_tNF é a quantidade de N total encontrado na amostra não fumigada e K_N é o fator de recuperação do N-BM (0,50).

2.2.4 Análise estatística

Os efeitos de manejo (com e sem rotação), camadas de solo, épocas de amostragem e interações, foram avaliados por meio de análise de medidas repetidas utilizando o PROC GLIMMIX do pacote estatístico SAS. Considerou-se manejo como variável fixa e bloco como variável aleatória. Utilizou-se o índice Akaike (AIC) como critério de seleção para determinar o modelo mais adequado de covariância para a variável repetida (dados avaliados sequencialmente no tempo). Em cada local, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e quando o F da análise de variância foi significativo, foi realizado o teste de comparação de médias LSD de Fisher ($P \leq 0.05$). Para o processamento dessas análises utilizou-se o programa SAS 9.3 (2010). O conjunto de dados foi analisado para a presença de “outliers” antes da realização do teste estatístico.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1. Conteúdo de amônio (N-NH_4^+) e nitrato + nitrito ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$) no solo

Os resíduos provenientes do cultivo de crotalaria influenciaram o conteúdo de N-NH_4^+ no solo (Tabela 2.6). Os quatro locais apresentaram efeito da interação tripla entre o manejo da rotação, época e camada de solo no conteúdo de N-NH_4^+ do solo ($P < 0.05$). Os teores de N-NH_4^+ nos quatro locais reduziram ao longo do perfil do solo.

De maneira geral, o comportamento do N-NH_4^+ nas camadas superficiais apresentou variação entre os locais. O conteúdo verificado nas camadas inferiores foi maior no tratamento que recebeu rotação, apresentando diminuição no período chuvoso (janeiro/2015). No balanço das formas de N mineral no solo, encontrou-se maior conteúdo de N-NH_4^+ ao de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ até a profundidade de 100 cm (Figura 2.4), que é consistente com os estudos realizados por Carvalho (2006) e Carmo et al. (2005). O NH_4^+ é o primeiro produto

da mineralização da matéria orgânica e dos resíduos culturais, enquanto o NO_3^- é produto da oxidação microbiana do NH_4^+ (CANTARELLA, 2007). Ou seja, espera-se redução no conteúdo de N-NH_4^+ à medida que se aumenta o de N-NO_3^- no solo. Além disso, o NH_4^+ apresenta preferência de imobilização pelos microrganismos do solo em relação ao NO_3^- , apresentando maior tempo de residência no sistema. O NO_3^- , por sua vez, apresenta maior mobilidade no solo podendo deslocar-se para camadas mais profundas ou ainda ser absorvido pelas raízes da cana-de-açúcar.

O local A apresentou o menor conteúdo de N-NH_4^+ dentre os locais, variando de 2,0 a 6,6 mg kg^{-1} na camada de 0-10 cm, 1,4 a 4,4 mg kg^{-1} em 10-20 cm, 1,5 a 5,6 mg kg^{-1} em 20-40 cm, 1,3 a 6,0 mg kg^{-1} em 40-60 cm e 0,6 a 5,1 mg kg^{-1} em 60-100 cm. O solo do local A apresenta textura média e menor conteúdo de C e N total (Tabela 2.3) dentre os solos e, portanto, menor quantidade de substrato para os microrganismos do solo produzirem N-NH_4^+ . Além disso, apresenta a menor precipitação pluviométrica anual em comparação às demais áreas de estudo (Figura 2.2), desfavorecendo ainda mais a atividade microbiana. Neste solo, a rotação com crotalária aumentou o conteúdo de N-NH_4^+ nas camadas inferiores do solo nas épocas de jul/14 e jan/15. Em jul/15, a rotação promoveu acréscimo de 2 para 4,8 mg kg^{-1} na camada de 0-10 cm, o qual representa em termos de estoque de N mineral no solo 4,8 kg ha^{-1} de N-NH_4^+ para a soqueira (conforme o cálculo $2,8 \text{ mg kg}^{-1} \times 1,72 \text{ kg dm}^{-3} \times 0,10 \text{ m} = 4,8 \text{ kg ha}^{-1}$). Além disso, a proteção física da MOS em solos de textura média (baixo teor de argila) é baixa (AMADO et al., 2001), o que pode ter contribuído para acelerar o processo de decomposição dos resíduos neste local. Mesmo nessas condições, foi possível observar aumento do conteúdo de N-NH_4^+ no solo após mais de um ano da adoção da rotação de cultura, indicando que a liberação do N da mineralização dos resíduos culturais é lenta.

No local B, o conteúdo de N-NH_4^+ do tratamento com rotação superou o de sem rotação, nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, nas duas primeiras amostragens. Verificou-se variação do conteúdo N-NH_4^+ de 4,1 a 11,3 mg kg^{-1} na camada de 0-10 cm, de 2,4 a 9,9 mg kg^{-1} em 10-20 cm, 4,6 a 9,7 mg kg^{-1} em 20-40 cm, 3,6 a 7,4 mg kg^{-1} em 40-60 cm e de 0,2 a 7,3 mg kg^{-1} em 60-100 cm. No entanto, o comportamento se inverteu na última coleta (julho/2015), com conteúdo de N-NH_4^+ superior no tratamento sem rotação (Tabela 2.6). Estas constatações indicam que pode ter ocorrido nitrificação do N-NH_4^+ presente em maiores quantidades na área com rotação, uma vez que houveram condições favoráveis de temperatura e umidade que beneficiaram a atividade de bactérias nitrificadoras, favorecendo a oxidação de N-NH_4^+ para $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ (CANTARELLA et al., 2007).

No local C, que apresenta a maior altitude e a melhor distribuição de chuvas, observou-se o maior conteúdo de N-NH_4^+ no perfil de solo. O conteúdo relativamente elevado de C e N total (Tabela 2.3) neste solo, associados à ausência de períodos longos de estiagem, favoreceram a atividade microbiana e por consequência o maior acúmulo de N-NH_4^+ observado. O conteúdo de N-NH_4^+ encontrado neste local variou de 7,6 a 12,1 mg kg^{-1} na camada de 0-10 cm, 8,1 a 10,1 mg kg^{-1} em 10-20 cm, 4,7 a 9,3 mg kg^{-1} em 20-40 cm, 7,3 a 13,3 mg kg^{-1} em 40-60 cm e de 0,9 a 13,5 mg kg^{-1} em 60-100 cm. Entretanto, o efeito do manejo da rotação foi observado somente no período com maiores temperaturas (janeiro/2015), em que o tratamento com rotação apresentou maior conteúdo de N-NH_4^+ nas camadas de 20 a 100 cm, com aumento acima de 100%. Este acréscimo foi de 4,7; 3,3 e 4,3 mg kg^{-1} para 9,3; 13,3 e 12,8 mg kg^{-1} nas camadas de 20-40, 40-60 e 60-100 cm, respectivamente, o que equivale a um acréscimo em termos de estoque de N no solo de 11; 23 e 37 kg ha^{-1} .

No local D os resultados não seguiram o mesmo comportamento das demais áreas. Em algumas camadas de solo, o tratamento sem rotação apresentou maior conteúdo de N-NH_4^+ do que na área com rotação, principalmente na última coleta (julho/2015) (Tabela 2.6). Entretanto, foi observado que na camada de 60 a 100 cm, o tratamento com rotação apresentou maior conteúdo de N-NH_4^+ em relação ao $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ na primeira e última amostragem. O maior conteúdo de N-NH_4^+ no tratamento sem rotação observado em algumas camadas mais superficiais pode estar relacionado à imobilização de N pelos microrganismos na área submetida à rotação. Pode ser que tenha ocorrido imobilização do N-NH_4^+ na biomassa microbiana no processo de decomposição dos resíduos vegetais da crotalária. Dois fatores adicionais que podem ter sido responsáveis pelas diferenças observadas nesta área: 1) o local D apresenta as maiores temperaturas dentre as quatro áreas avaliadas; e 2) somente no local D a crotalária foi plantada perpendicularmente à linha da cana-de-açúcar. O local D apresentou conteúdo de N-NH_4^+ variando de 7,5 a 13,1 mg kg^{-1} na camada de 0-10 cm, 7,4 a 13,5 mg kg^{-1} em 10-20 cm, 5,8 a 12,5 mg kg^{-1} em 20-40 cm, 3,9 a 6,7 mg kg^{-1} em 40-60 cm e de 3,8 a 10,5 mg kg^{-1} em 60-100 cm.

A interação tripla entre o manejo da rotação, época e camada de solo, no que diz respeito ao conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ ($P < 0.05$) foi observada apenas nos locais C e D (Tabela 2.7). De modo geral, os teores apresentaram diminuição ao longo das épocas de amostragem. O conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ encontrado no local A foi baixo em todas as épocas (Tabela 2.7). Em jul/15, o conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ foi de 8,9 e 0,2 mg kg^{-1} no tratamento com e sem rotação, respectivamente, na camada de 60 a 100 cm. Ou seja, a rotação

com crotalaria tem potencial de alterar a dinâmica de N no solo mesmo em camadas profundas do solo. Na coleta de jan/15, o conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ foi praticamente nulo (inferiores ao limite de quantificação do equipamento) em todas as camadas avaliadas em ambos manejos. Isso pode estar relacionado à elevada absorção de N pela cana-de-açúcar nesse período, que representa a máxima taxa de acúmulo de biomassa e de N pela cultura (OLIVEIRA, 2011). Em jul/15, o conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ foi superior no tratamento sem rotação em relação ao tratamento com rotação, em todas as camadas avaliadas (Tabela 2.7). Este comportamento inesperado pode estar relacionado à maior nitrificação nas parcelas que não tiveram rotação com crotalaria, ou seja, nas parcelas que houve rotação, o N pode ter sido mantido na forma de NH_4^+ ou ter sido imobilizado pelos microrganismos.

O local B só apresentou diferença no conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ entre as épocas de avaliação ($P < 0.001$). Em jul/14, observou-se conteúdo elevado de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ em todas as camadas avaliadas, em ambos manejos. Este conteúdo elevado em todo perfil do solo pode estar relacionado à uma irrigação complementar que foi realizada nesta área semanas antes à amostragem de solo. Esta irrigação foi realizada devido à intensa seca que ocorreu nesta área (Figura 2.2), que poderia prejudicar a brotação da soqueira subsequente. A secagem do solo com posterior umedecimento favorece a mineralização de N e a posterior nitrificação (GUO et al., 2014), devido à utilização do C e N da biomassa morta como fonte de substrato para a nova comunidade microbiana que se estabelece. O elevado conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ observado na camada de 60-100 cm, em jan/15, pode estar relacionado à movimentação vertical do NO_3^- presente em quantidades elevadas em todo perfil de solo em jul/14, para camadas mais profundas do solo. Este comportamento é um indicativo do potencial de perdas de NO_3^- por lixiviação que ocorre em solos cultivados com cana-de-açúcar em algumas situações (GUIBERTO et al., 2015). Em jul/15, apesar do maior conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ verificado no tratamento com rotação em todo perfil do solo, não houve efeito do manejo de rotação.

No local C o tratamento sem rotação apresentou maior conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ do que o tratamento com rotação somente nas camadas de 0-10 e 10-20 cm em jul/14 (Tabela 2.7). Este comportamento pode estar relacionado à imobilização do N-NH_4^+ na biomassa microbiana no tratamento com rotação, liberando menos substrato para as bactérias nitrificadoras. Por outro lado, o comportamento se inverteu na camada de 60-100 cm (KEMMITT et al., 2008). Nas demais épocas não houve diferença no conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ entre os manejos, porém foi observada diminuição nas épocas subsequentes, o que pode estar relacionado à absorção pela cana-de-açúcar. No local D, o comportamento foi

semelhante ao local C. O tratamento sem rotação apresentou maior conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ na camada de 10-20 cm em jul/14, porém não se observou diferença nas demais camadas e épocas. Também se observou diminuição do conteúdo de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ nas demais épocas de avaliação, possivelmente associado à absorção pela cana-de-açúcar.

O reservatório de N disponível às plantas refere-se à soma do conteúdo de NH_4^+ , NO_3^- e NO_2^- . Nesse sentido, observa-se que a rotação com crotalaria aumentou o conteúdo de N mineral em diversas ocasiões durante as épocas de avaliação (Figura 2.4). No local A, o N mineral foi maior no perfil do solo no tratamento com rotação em jul/14; no local B, foi maior em jan/15 e jul/15 na camada de 60-100 cm; no local C, foi maior na camada 60-100 cm em jul/14 e nas camadas 20-40, 40-60 e 60-100 cm em jan/15; no local D, foi maior na camada de 60-100 cm tanto em jul/14 quanto em jan/15 (Figura 2.4). Em algumas épocas e em determinadas camadas, o N mineral foi maior no tratamento sem rotação, o que pode estar relacionado à movimentação do NO_3^- no perfil do solo para profundidades abaixo dos 100 cm, alterando o conteúdo de N mineral no perfil do solo entre as épocas de amostragem.

Os resultados da Figura 2.4 indicam ainda a elevada variabilidade na disponibilidade de N mineral entre os solos. No local A, por exemplo, o conteúdo de N mineral raramente ultrapassou 10 mg kg^{-1} em todas as épocas. Por outro lado, no local B o conteúdo foi tão alto quanto 40 mg kg^{-1} em jul/14. Os locais C e D apresentaram conteúdo intermediário de N mineral, variando de 10 a 20 mg kg^{-1} na maioria das camadas e épocas avaliadas. Conteúdo relativamente elevado de N mineral foi observado na camada 60-100 cm nos locais B, C e D na avaliação de jan/15. Resultados recentes têm indicado que pode ocorrer lixiviação de NO_3^- em solos cultivados com cana-de-açúcar no Brasil (GHIBERTO et al., 2015). Além disso, os estudos têm mostrado que a movimentação do NO_3^- ocorre no período chuvoso, quando normalmente há fluxo descendente de água e presença do ânion no perfil do solo (PORTOCARRERO; ACRECHE, 2014). Os resultados obtidos neste estudo confirmam que pode haver movimentação de NO_3^- no perfil do solo no período chuvoso do ano. Vale lembrar que o conteúdo de N mineral apresentado na Figura 2.4 foi obtido de amostras coletadas nas parcelas controle, ou seja, sem influência do fertilizante nitrogenado. Os resultados da Figura 2.4 indicam que solos de textura mais argilosa, com maiores conteúdos de C e N total, tem maior potencial de perdas de N por lixiviação do solo quando comparados aos solos de textura média (Local A), aonde o conteúdo de N mineral é inferior no perfil do solo.

Tabela 2.6 - Distribuição do conteúdo do N-NH₄⁺ no solo em áreas com e sem rotação de culturas em diferentes épocas em Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D)

Época	Rotação de culturas														Média							
	com		sem		com		sem		com		sem		com		sem		Com	Sem				
	0-10 cm		10-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-100 cm													
	NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)																					
Local A																						
Jul/14	3,7	B	6,6	aA	4,4	3,5	5,6	aA	2,3	B	6,0	aA	1,5	B	2,6	b	0,6	b	4,5	2,9		
Jan/15	2,8		3,0	b	2,4	2,3	4,2	aA	1,8	B	4,4	a	3,2		5,1	a	3,4	a	3,8	2,7		
Jul/15	4,8	A	2,0	bB	2,3	1,4	1,5	b	2,0		1,3	b	2,1		2,6	b	1,0	b	2,5	1,7		
P _{manejo}	<0.001																					
P _{época}	<0.001																					
P _{manejo*época}	0.295																					
P _{manejo*época*camada}	0.002																					
Local B																						
Jul/14	9,5	A	4,1	bB	9,8	aA	2,4	bB	7,2	a	6,3	b	5,6		3,6	b	1,8	b	0,2	b	6,8	3,3
Jan/15	8,0	A	5,2	bB	6,3	bA	4,0	bB	4,6	b	6,3	b	5,7		7,1	a	7,3	aA	2,5	bB	6,4	5,0
Jul/15	8,9	B	11,3	aA	7,1	bB	9,9	aA	6,9	aB	9,7	aA	4,0	B	7,4	aA	5,7	a	5,4	a	6,5	8,7
P _{manejo}	0.009																					
P _{época}	<0.001																					
P _{manejo*época}	<0.001																					
P _{manejo*época*camada}	0.004																					
Local C																						
Jul/14	10,6		12,1	a	9,9	8,1	7,9		5,1		8,0	b	9,8	a	13,5	aA	0,9	bB	10,0	7,2		
Jan/15	10,7		9,5	ab	10,1	7,6	9,3	A	4,7	B	13,3	aA	3,3	bB	12,6	aA	4,3	abB	11,2	5,9		
Jul/15	7,9		7,6	b	8,1	9,1	7,2		7,4		8,0	b	7,3	a	8,2	b	7,1	a	7,9	7,7		
P _{manejo}	<0.001																					
P _{época}	0.212																					
P _{manejo*época}	<0.001																					
P _{manejo*época*camada}	<0.001																					
Local D																						
Jul/14	12,4	a	13,1	a	10,5	8,7	b	6,1	B	12,5	aA	6,7		4,9	b	10,5	aA	4,2	B	9,3	8,7	
Jan/15	7,5	b	8,4	b	7,4	7,4	b	6,0		5,7	b	5,6		3,9	b	4,9	b	3,8		6,3	5,8	
Jul/15	9,3	bB	12,8	aA	9,6	B	13,5	aA	7,6	B	11,6	aA	6,4		7,4	a	8,4	aA	5,4	B	8,3	10,2
P _{manejo}	0.348																					
P _{época}	<0.001																					
P _{manejo*época}	0.006																					
P _{manejo*época*camada}	<0.001																					

Os resultados representam a média de quatro repetições em julho/2014, janeiro/2015 e julho/2015. Médias seguidas por letras minúsculas iguais na mesma coluna indicam não haver diferença entre as épocas para a mesma camada dentro de cada manejo, enquanto letras maiúsculas diferentes na linha indicam haver diferença entre os manejos para a mesma época e camada pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

Tabela 2.7 - Distribuição do conteúdo do $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ no solo em áreas com e sem rotação de culturas em diferentes épocas em Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D)

Rotação de culturas													Média	
Época	com	sem	com	sem	com	sem	com	sem	com	sem	Com	Sem		
	0-10 cm		10-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-100 cm					
NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ (mg kg ⁻¹)														
Local A														
Jul/14	0,3	0,8	0,8	0,2	1,0	<0,1	0,8	<0,1	2,4	<0,1	1,1 A	0,2 B		
Jan/15	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
Jul/15	<0,1	9,9	<0,1	8,6	0,5	9,5	0,3	8,7	<0,1	7,8	0,2 B	8,9 A		
P _{manejo}					<0.001									
P _{época}					<0.001									
P _{manejo*época}					<0.001									
P _{manejo*época*camada}					0.236									
Local B														
Jul/14	27,2	35,4	29,7	32,0	25,6	23,0	19,6	21,5	12,9	18,5	23,0	26,1		
Jan/15	0,6	1,1	0,4	0,1	1,3	0,6	6,1	6,7	18,6	14,8	5,4	4,7		
Jul/15	1,9	0,5	2,1	0,6	4,1	1,3	4,8	0,9	12,8	0,9	5,1	0,8		
P _{manejo}					0.582									
P _{época}					<0.001									
P _{manejo*época}					0.061									
P _{manejo*época*camada}					0.498									
Local C														
Jul/14	4,9 aB	12,1 aA	0,2 B	7,9 aA	0,6	0,4	5,8 a	2,1	8,4 aA	0,3 B	4,0	4,6		
Jan/15	0,2 b	<0,1 b	<0,1	<0,1 b	<0,1	<0,1	0,2 b	<0,1	<0,1 b	<0,1	0,1	<0,1		
Jul/15	<0,1 b	0,2 b	<0,1	<0,1 b	<0,1	<0,1	<0,1 b	<0,1	<0,1 b	<0,1	<0,1	<0,1		
P _{manejo}					0.678									
P _{época}					<0.001									
P _{manejo*época}					0.800									
P _{manejo*época*camada}					<0.001									
Local D														
Jul/14	2,2	2,6	1,1 B	5,3 aA	1,0	1,6	2,0	0,1	4,3 ab	3,8	2,1	2,7		
Jan/15	0,1	0,4	0,8	0,1 b	<0,1	<0,1	0,1	0,6	6,8 a	2,7	1,6	0,8		
Jul/15	0,1	0,2	<0,1	<0,1 b	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1 b	<0,1	0,1	<0,1		
P _{manejo}					0.814									
P _{época}					0.002									
P _{manejo*época}					0.290									
P _{manejo*época*camada}					<0.001									

Os resultados representam a média de quatro repetições em julho/2014, janeiro/2015 e julho/2015. Médias seguidas por letras minúsculas iguais na mesma coluna indicam não haver diferença entre as épocas para a mesma camada dentro de cada manejo, enquanto letras maiúsculas diferentes na linha indicam haver diferença entre os manejos para a mesma época e camada pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

Figura 2.4 - Distribuição da soma do conteúdo de $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ (mg kg^{-1}) no solo em áreas com e sem rotação de culturas nas três épocas nos locais A = Quatá/SP, B = Iracemápolis/SP, C = Chapadão do Céu/GO e D = Quirinópolis/GO. As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$)

2.3.2 Nitrogênio hidrolisável do solo – Illinois Soil Nitrogen Test (N-ISNT + NH_4^+)

O ISNT avalia a fração facilmente mineralizável da MOS associada aos amino-açúcares presentes no conteúdo celular de bactérias, além de N amídico do solo (KWON et al., 2009). Dessa forma, espera-se que as áreas submetidas à rotação com crotalária apresentem maior conteúdo de N-ISNT, uma vez que a rotação de culturas promove aumento da biodiversidade microbiana do solo (DALAL, 1998). O conteúdo de N-ISNT foi altamente variável de local para local, o que pode ser um indicativo da influência da textura e do manejo do solo (ROBERTS et al., 2009). As menores oscilações do conteúdo de N-ISNT entre uma época de amostragem e outra ocorreram no tratamento com rotação com crotalária, apresentando diminuição em função das camadas de amostragem nas duas áreas (Tabela 2.8).

Dos quatro locais, somente o local A apresentou baixo conteúdo de N-ISNT, variando de 50 a 69 mg kg^{-1} na camada de 0-10 cm, de 41 a 62 mg kg^{-1} em 10-20 cm, de 41 a 62 mg kg^{-1} em 20-40 cm, de 41 a 51 em 40-60 cm e de 37 a 45 mg kg^{-1} em 60-100 cm (Tabela 2.8). O baixo conteúdo de N-ISNT observado no local A o enquadraria como altamente responsivo a adubação nitrogenada ($\text{N-ISNT} < 57 \text{ mg kg}^{-1}$) com base no estudo de Otto et al. (2013). No local A, o conteúdo de N-ISNT foi maior no tratamento com rotação em duas épocas de avaliação (jan/15 e jul/15). Em média, o conteúdo do tratamento com rotação superou ao sem rotação em 18% ($P < 0.001$), com valores de 51,7 e 43,7 mg kg^{-1} em jan/2015 e de 50,5 e 42,7 mg kg^{-1} em jul/15, respectivamente. Os resultados mostram uma tendência interessante da rotação com crotalária em aumentar a reserva de N facilmente decomponível para a soqueira, que poderia refletir na diminuição da resposta à adubação nitrogenada.

Nos demais locais, caracterizados por solos de textura argilosa e muito argilosa e maior conteúdo de C total, a diferença no conteúdo de N-INST entre os manejos da rotação não foi tão evidente quanto no local A. O local B, por exemplo, não apresentou efeito do manejo e época no conteúdo de N-ISNT provavelmente devido ao histórico da área. Esta área encontra-se próxima à usina e por isso recebeu altas doses de vinhaça por vários anos, o que pode ter acarretado em aumentos do C total no solo (Tabela 2.3), limitando o efeito da rotação no conteúdo de N-ISNT ao longo do ciclo da cultura. De fato, a aplicação de vinhaça aumenta a biomassa microbiana do solo (YANG et al., 2013) e com isso pode resultar em aumento no conteúdo de N-ISNT. A resposta da cultura à adubação nitrogenada é afetada pela mineralização da MOS, uma vez que está associada com a disponibilidade de N mineral (RUFFO et al., 2006); porém as áreas com histórico de adubação orgânica ou nitrogenada ainda não possuem respostas claras à variação encontrada no conteúdo de N-ISNT

(BARKER; SAWYER; AL-KAISI, 2006). O conteúdo relativamente elevado de N-ISNT, associado ao histórico de aplicação de vinhaça, indicam que esta área possui elevada capacidade de mineralização de N da MOS, o que pode diminuir a resposta da soqueira à adubação nitrogenada nesta área.

Houve efeito da interação tripla (manejo da rotação, época de amostragem e camada) para os locais C e D. No local C, o conteúdo de N-ISNT entre os manejos de rotação foram variáveis e diferente do comportamento esperado. Por exemplo, enquanto o N-ISNT foi maior no tratamento sem rotação na camada de 10-20 e 20-40 cm em jul/14, o comportamento se inverteu na camada de 40-60 cm nesta mesma época e também na camada de 60-100 cm em jul/15 (Tabela 2.8). No local D também houve variação entre o conteúdo de N-ISNT entre as camadas e períodos de amostragem. O tratamento com rotação apresentou maior conteúdo de N-ISNT na camada de 0-10 cm em jul/14 e na camada de 20-40 cm em jul/15. Por outro lado, o tratamento sem rotação apresentou maior teor de N-ISNT na camada de 0-10 cm nas avaliações de jan/15 e jul/15 (Tabela 2.8).

A elevada variabilidade no conteúdo de N-ISNT no perfil do solo, assim como em relação ao manejo da rotação nos locais C e D, podem ser explicadas pelas complexas transformações do N orgânico avaliado por essa técnica. Por exemplo, a variação do conteúdo de N-ISNT em profundidade pode estar relacionada à conversão de compostos orgânicos em formas mais recalcitrantes da MOS nos primeiros 15 cm de profundidade, formadas pela alta taxa de atividade microbiana e humificação (ROBERTS et al., 2009). Roberts et al. (2009) destacam que as formas orgânicas e N-NH_4^+ trocável quantificados pelo ISNT podem ser lixiviadas para camadas mais profundas de acordo com a textura do solo. Por se tratar de solo argiloso, a movimentação destes compostos para a subsuperfície (BARKER et al., 2006; ROBERTS et al., 2009) pode ter ocorrido através da complexação entre a argila e compostos orgânicos da superfície, resultando na estratificação do ISNT no solo (WALL et al., 2010). Além disso, não se pode descartar a presença de resquícios de raízes da crotalaria em decomposição nas camadas inferiores do solo, que podem ter contribuído como fonte de N para a microbiota do solo, aumentando assim o conteúdo de N-ISNT. Kemmitt et al. (2008) demonstraram que mesmo em camadas mais profundas do solo ainda há ocorrência de atividade microbiana e que, geralmente, a MOS encontrada em profundidade é pouco humificada, o que favorece a atividade dos microrganismos.

Um comportamento interessante observado nas quatro áreas de estudo foi a variação no conteúdo de N-ISNT nas épocas de avaliação. Na média de todas as camadas, houve redução do conteúdo de N-ISNT em função das épocas, em todos locais avaliados (Tabela

2.8). Esse comportamento era esperado, uma vez que as amostras de solo foram coletadas nas parcelas controle, sem adubação nitrogenada. A contínua absorção de N mineral pela cultura possivelmente diminuiu o conteúdo de N-ISNT, relacionado à fração mineralizável da MOS, favorecendo o acúmulo de compostos mais recalcitrantes da MOS ao longo do tempo.

As avaliações de N-ISNT realizadas até 100 cm neste estudo diferenciam-se daquelas realizadas por outros autores, que concentraram as avaliações nas camadas superficiais do solo. Isso é interessante, uma vez que a cana-de-açúcar apresenta sistema radicular bem desenvolvido, que explora camadas mais profundas do solo (OTTO et al., 2009). Por fim, o conteúdo de N-ISNT encontrado nos locais B, C e D se assemelha ao observado por Khan et al. (2001), Barker et al. (2006) e Laboski et al. (2008) em condições de clima temperado. Já o conteúdo do local A foi bem inferior, porém similar ao observado por Mariano (2015) e Otto et al. (2013) em solos cultivados com cana-de-açúcar em condições brasileiras. Esses resultados indicam que o conteúdo de N-ISNT é bastante variável em condições tropicais e está mais relacionado às características do solo como textura e teor de C e N total do que variações climáticas.

Tabela 2.8 - Efeito da época e da rotação de culturas no conteúdo do N-ISNT no solo em Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D).

Época	Rotação de culturas										Média	
	com	sem	com	sem	com	sem	com	sem	com	sem		
	0-10 cm		10-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-100 cm		Com	Sem
N-ISNT (mg kg ⁻¹)												
Local A												
Jul/14	60	56	59	62	62	55	51	50	38	47	54	54
Jan/15	69	55	59	41	49	41	43	40	39	41	52 A	44 B
Jul/15	63	50	60	44	48	41	44	41	38	37	51 A	43 B
P _{manejo}					0.001							
P _{época}					<0.001							
P _{manejo*época*camada}					0.176							
Local B												
Jul/14	264	258	248	269	203	199	148	149	94	110	191	197
Jan/15	246	239	245	223	210	205	147	150	114	113	192	186
Jul/15	255	233	240	231	181	179	143	119	99	86	184	170
P _{manejo}					0.128							
P _{época}					0.001							
P _{manejo*época*camada}					0.078							
Local C												
Jul/14	250	237 ab	183 bB	213 aA	157 aB	171 aA	146 aA	123 aB	107 a	100 a	168	169
Jan/15	226	253 a	218 a	206 ab	164 a	153 b	125 b	118 a	91 b	85 b	165	163
Jul/15	209	193 b	196 ab	178 b	144 b	148 b	108 c	108 b	94 bA	85 bB	150	142
P _{manejo}					0.359							
P _{época}					<0.001							
P _{manejo*época*camada}					<0.001							
Local D												
Jul/14	299 aA	276 bB	242	241 ab	192	212 a	158	133	104	104	199	193
Jan/15	272 bB	306 aA	250	261 a	190	202 a	143	148	104	97	192	203
Jul/15	246 cB	286 abA	238	227 b	201 A	172 bB	139	129	121	101	189	183
P _{manejo}					0.937							
P _{época}					0.053							
P _{manejo*época*camada}					0.012							

Os resultados representam a média de quatro repetições em julho/2014, janeiro/2015 e julho/2015. Médias seguidas por letras minúsculas iguais na mesma coluna indicam não haver diferença entre as épocas para a mesma camada dentro de cada manejo, enquanto letras maiúsculas diferentes na linha indicam haver diferença entre os manejos para a mesma época e camada pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

2.3.3 Conteúdo de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (C-BM e N-BM)

O local A apresentou o menor conteúdo de C-BM dentre os locais, com variações de 92 a 216 mg kg⁻¹ na camada de 0-10 cm e 88 a 169 mg kg⁻¹ em 10-20 cm (Tabela 2.9). Apesar do manejo da rotação apresentar efeito ($P<0.05$), a diferença só foi encontrada entre a média das duas épocas de amostragem, que foram de 148 e 113 mg kg⁻¹ para os tratamentos com e sem rotação, respectivamente. O mesmo comportamento foi observado no local C, onde o conteúdo de C-BM do tratamento com rotação (480 mg kg⁻¹) foi maior que do tratamento sem rotação (427 mg kg⁻¹). Menor conteúdo de C-BM no local A está relacionado ao menor conteúdo de C e N total neste solo em relação aos demais (Tabela 2.3). Os resultados indicaram que a rotação com crotalaria conserva a MOS e mantém teores adequados de nutrientes no compartimento biológico do solo (PAUL, 2014). Os resultados corroboram as observações de Dalal (1998) e Balota et al. (2002), de que a prática de plantio direto e rotação de culturas melhoram a qualidade do solo via quantidade de C dos resíduos culturais que retornam ao solo. A biomassa microbiana é responsável pelas transformações da MOS, bem como de sua ciclagem, uma vez que representa uma fonte potencial de N e outros nutrientes (BÜNEMANN; SCHWENKE; VANZWIETEN, 2006). No local B, não foi observado diferença no conteúdo de C-BM em função da rotação com crotalaria e época de amostragem (Tabela 2.9). Além disso, o conteúdo de C-BM foi elevado, variando de 474 a 638 mg kg⁻¹ na camada de 0-10 cm e de 382 a 476 mg kg⁻¹ em 10-20 cm. Esses resultados sugerem que em áreas de cana-de-açúcar que receberam aplicações de vinhaça por longos períodos, há manutenção do conteúdo de biomassa microbiana do solo, corroborando com as observações de Silva et al. (2012). O Local D apresentou resultados diferentes do esperado. No tratamento com rotação, o conteúdo de C-BM foi menor em jan/15 em comparação com jul/15; por outro lado, no tratamento sem rotação, o conteúdo de C-BM foi maior em jan/15 (Tabela 2.9). Além da inesperada flutuação dos teores entre as épocas de amostragem no tratamento com rotação, em jan/15 o conteúdo médio de C-BM foi menor no tratamento com rotação em comparação ao sem rotação (médias de 290 e 405 mg kg⁻¹, respectivamente). Interessante observar que, nesta mesma época, o conteúdo de ISNT também foi inferior no tratamento com rotação do que no tratamento sem rotação (Tabela 2.8), indicando que pode haver relação entre o conteúdo de C-BM e N-ISNT e que pode ter ocorrido limitações ao crescimento microbiano nesta época nas parcelas submetidas ao tratamento com rotação. Os valores de C-BM encontrados neste estudo são semelhantes aos verificados por outros autores

em solos cultivados com cana-de-açúcar no Brasil (GALDOS; CERRI; CERRI, 2009; SILVA et al., 2012; MARIANO et al., 2015).

Não foi possível realizar análise do conteúdo de N-BM em todas épocas de avaliação; esta avaliação foi realizada somente em jul/15. Em todos os locais, na média das camadas, o conteúdo absoluto de N-BM foi superior no tratamento com rotação em comparação ao sem rotação, porém sem efeito significativo (Tabela 2.10). Assim como obtido para C-BM, o Local A apresentou o menor conteúdo de N-BM, demonstrando a relação existente entre o C e N do conteúdo celular dos microrganismos. Entretanto, o efeito da rotação com crotalária no N-BM foi pouco expressivo, muito possivelmente devido ao extenso período de tempo entre o plantio das culturas de rotação (dez/12 a jan/13) e a época de avaliação do N-BM (jul/15). Possivelmente qualquer efeito positivo da rotação com crotalária no conteúdo de N-BM tenha desaparecido com o tempo. O conteúdo de N-BM observado neste estudo se assemelha com ao encontrado por Balota et al. (2002).

Tabela 2.9 – Efeito da rotação de culturas e época no C da biomassa microbiana (C-BM) em Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D)

Época	Rotação de culturas				Média	
	Com		Sem			
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm	Com	Sem
C - BM (mg kg ⁻¹)						
Local A						
Jan/15	216	169	184	117	192	151
Jul/15	105	101	76	73	103	74
Média	-	-	-	-	148 A	113 B
P _{rotação}	0.021					
P _{época}	<0.001					
P _{época*rotação}	0.641					
P _{rotação*época*camada}	0.534					
Local B						
Jan/15	474	382	638	427	428	532
Jul/15	503	443	556	476	473	516
Média	-	-	-	-	451	524
P _{rotação}	0.161					
P _{época}	0.778					
P _{época*rotação}	0.548					
P _{rotação*época*camada}	0.631					
Local C						
Jan/15	514	401	450	338	457	394
Jul/15	532	473	491	426	502	459
Média	-	-	-	-	480 A	427 B
P _{rotação}	0.006					
P _{época}	0.005					
P _{época*rotação}	0.549					
P _{rotação*época*camada}	0.897					
Local D						
Jan/15	281	299	426	384	290 b	405 a
Jul/15	420	388	328	373	404 a	351 b
Média	-	-	-	-	347	378
P _{rotação}	0.410					
P _{época}	0.431					
P _{época*rotação}	0.039					
P _{rotação*época*camada}	0.164					

Os resultados representam a média de quatro repetições em janeiro/2015 e julho/2015. Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes na linha indicam haver diferença entre os manejos para a mesma camada e época, enquanto letras minúsculas iguais na mesma coluna indicam não haver diferença entre as épocas para o mesmo manejo pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

Tabela 2.10 – Nitrogênio da biomassa microbiana (N-BM) em julho/2015 em áreas com e sem rotação de culturas em Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D).

Época	Rotação de culturas				Média	
	Com		Sem		Com	Sem
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm		
N - BM (mg kg ⁻¹)						
Local A						
Jul/15	14	16	16	11	15 A	14 A
P _{rotação}			0.196			
P _{prof}			0.370			
P _{rotação*camada}			0.070			
Local B						
Jul/15	41	41	44	31	42 A	36 A
P _{rotação}			0.086			
P _{prof}			0.423			
P _{rotação*camada}			0.116			
Local C						
Jul/15	23 A	19 A	12 B	18 A	21 A	15 A
P _{rotação}			0.032			
P _{prof}			0.528			
P _{rotação*camada}			0.008			
Local D						
Jul/15	44	27	36	37	36 A	36 A
P _{rotação}			0.962			
P _{prof}			0.080			
P _{rotação*camada}			0.054			

Os resultados representam a média de quatro repetições em julho/2015. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha indicam haver diferença entre os manejos para mesma camada pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

2.4 Conclusões

A rotação de culturas na época de renovação do canavial alterou as formas de N no solo, indicando que a mineralização dos resíduos da crotalaria pode aumentar a disponibilidade do N no solo ao longo do ciclo da primeira soqueira.

Houve predomínio das espécies de N-NH_4^+ sobre $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ no tratamento com rotação. O conteúdo de N mineral apresentou aumento em profundidade, com efeito para o tratamento com rotação em jul/2014 e jan/2015;

A rotação de culturas aumentou o conteúdo de N-ISNT no solo de textura média e nos períodos mais secos do ano (julho) na maioria dos locais. A rotação de culturas também pode alterar o conteúdo de N-ISNT em profundidade. O conteúdo de C-BM foi superior no tratamento com rotação em dois dos quatro locais avaliados, indicando que o plantio de leguminosas em rotação pode afetar a ciclagem de nutrientes a longo prazo.

Referências

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES GONÇALVES, J.L.;

SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Cidade, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 189–197, 2001.

ARAÚJO, A.S.F.; MONTEIRO, R.T.R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, p. 66–75, set. 2007.

BALOTA, E.L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D.S.; DICK, R.P. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 38, n. 1, p. 15–20, 2003.

BARKER, D.W.; SAWYER, J.E.; AL-KAISI, M.M. Assessment of the amino sugar–nitrogen test on Iowa soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 5, p. 1345–1351, 2006.

BLACKSHAW, R.E.; MOYER, J.R.; DORAM, R.C.; BOSWALL, A.L.; SMITH, E.G. Suitability of undersown sweetclover as a fallow replacement in semiarid cropping systems. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 4, p. 863–868, 2001.

BLANCO-CANQUI, H.; SHAVER, T.M.; LINDQUIST, J.L.; SHAPIRO, C.A.; ELMORE, R.W.; FRANCIS, C.A.; HERGERT, G.W. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, n. 6, p. 2449–2474, 2015.

BÜNEMANN, E.K.; SCHWENKE, G.D.; VAN ZWIETEN, L. Impact of agricultural inputs on soil organisms: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Clayton, v. 44, n. 4, p. 379–406, 2006.

BURESH, R.J.; AUSTIN, E.R.; CRASWELL, E.T. Analytical methods in ^{15}N research. **Fertilizer Research**, Alabama, v. 3, n. 1, p. 37–62, 1982.

BROOKES, P.; LANDMAN, A.; PRUDEN, G.; JENKINSON, D. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen : a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 17, n. 6, p. 837–842, 1985.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.; V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 7, p. 376–449.

CARMO, J.B.; ANDRADE, C.A.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C. Disponibilidade de nitrogênio e fluxos de N_2O a partir de solo sob pastagem após aplicação de herbicida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 735–746, 2005.

CARVALHO, J.L.N. **Conversão do Cerrado para fins agrícolas na Amazônia e seu impacto nas mudanças climáticas**. 2006. 174 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior e Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

DALAL, R.C. Soil microbial biomass: what do the numbers really mean? **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 38, n. 2, p. 649–665, 1998.

DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.de A. **Cana-de-açúcar**. Instituto Agronômico, Campinas, 882 p., 2008.

DINNES, D.L.; KARLEN, D.L.; JAYNES, D.B.; KASPAR, T.C.; HATFIELD, J.L. Review and interpretation: nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in Tile-Drained Midwestern Soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 1, p. 153–171, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013. 353 p.

FOLLMANN, D.D. **Dinâmica do nitrogênio mineral no solo e produção vegetal em função da adubação nitrogenada da pastagem e do milho em sistema de integração lavoura-pecuária**. 2015. 61 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2015.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, n. 3/4, p. 347–352, 2009.

GEE, G.W. & BAUDER, J.W. **Particle-size analysis**. In: Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, p. 383-411, 1986.

GUIBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; TRIVELIN, P.C.O. Nutrient leaching in an Ultisol cultivated with sugarcane. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 31, p. 141–149, 2015. doi: 10.1016/j.agwat.2014.09.027.

GUO, X.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; REYNOLDS, W.D.; FAN, R.Q. The extent of soil drying and rewetting affects nitrous oxide emissions, denitrification, and nitrogen mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 78, n. 1, p. 194-204, 2014. doi: 10.2136/sssaj2013.06.0219.

KAMOGAWA, M.Y.; TEIXEIRA, M.A. Autoamostrador de baixo custo para análise por injeção em fluxo: nota técnica. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 6, p. 1644–1646, 2009.

KHAN, S.A.; MULVANEY, R.L.; HOEFT, R.G. A simples soil test for detecting sites that are nonresponsive to nitrogen fertilization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1751-1760, 2001.

KEMMITT, S.J.; WRIGHT, D.; MURPHY, D.V.; JONES, D.L. Regulation of amino acid biodegradation in soil as affected by depth. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 44, n. 7, p. 933–941, 2008.

- 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, p. 1033–1043, 2009. doi:10.2136/sssaj2008.0233.
- 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, n. 4, p. 1070–1076, 2008.
- MAHAMA, G.Y.; PRASAD, P.V.V.; ROOZEBOOM, K.L.; NIPPERT, J.B.; RICE, C.W. Cover crops, fertilizer nitrogen rates, and economic return of grain sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, n. 1, p. 1, 2016.
- MARIANO, E. **Predição da necessidade de fertilizante nitrogenado pela cana-de-açúcar e reações do nitrogênio orgânico e mineral dissolvidos em palha e solo de canaviais**. 2015. 146 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia do solo**. Lavras: Ed. UFLA, 2002. 626 p.
- MULVANEY, R.L. Nitrogen: inorganic forms. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; LMKE, P.A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P.N., TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMMER, M.E. (Ed). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. pt. 3: Chemical methods, chap. 38, p. 1123-1184.
- ¹⁵N ANALYSIS SERVICE. **The Illinois soil nitrogen test for amino sugar-N: Estimation of potentially mineralizable soil N and ¹⁵N**. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2011. (Technical Note, 02-01). Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20100615201627/http://illinoissoilntest.nres.uiuc.edu/~files/papers/TN02-01f.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2011.
- NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMMER, M.E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. pt. 3: Chemical methods, chap. 34, p. 961-1010.
- OLIVEIRA, E.C.A. **Balanço nutricional da cana-de-açúcar relacionado à adubação nitrogenada**. 2011. 213 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultras "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- OTTO, R.; MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; TRIVELIN, P.C.O. Quantifying soil nitrogen mineralization to improve fertilizer nitrogen management of sugarcane. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 49, n. 7, p. 893–904, 2013.
- 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, n. 4, p. 398-405, 2009.

PAUL, E.A. **Soil microbiology, ecology, and biochemistry**. 4th ed. Colorado: Academic Press, 2014. 598 p.

PORTOCARRERO, R.A.; ACRECHE, M.M. Nitrate leaching in an Argiudoll cultivated with sugarcane. **Sugar Technology**, Famailla, v. 16, p. 329-332, 2014. doi: 10.1007/s12355-013-0287-9.

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

ROBERTS, T.L.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON, 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, 2009.

ROBERTS, T.; ROSS, W.; NORMAN, R.; SLATON, N.; WILSON, C. Predicting nitrogen fertilizer needs for rice in arkansas using alkaline hydrolyzable-nitrogen. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, n. 3, p. 1161, 2011.

RUFFO, M.L.; BOLLERO, G.A.; BULLOCK, D.S.; BULLOCK, D.G. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 7, n. 5, p. 327–342, 2006.

SÁ, J.C.M., SÁ, M.F.M., SANTOS, J.B., FERREIRA, A. O. Dinâmica da matéria orgânica nos campos gerais. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S. da; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 443-461.

SANTOS, G.A. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 654 p.

SILVA, D.K.A.; FREITAS, N.O.; SOUZA, R.G. de; SILVA, F.S.B. da; ARAUJO, A.S.F. de; MAIA, L.C. Soil microbial biomass and activity under natural and regenerated forests and conventional sugarcane plantations in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 189/190, p. 257–261, 2012.

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Columbia, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987.

WALL, D.P.; WEISZ, R.; CROZIER, C.R.; HEINIGER, R.W.; WHITE, J.G. Variability of the Illinois soil nitrogen test across time and sampling depth. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, n. 6, p. 2089, 2010.

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, n. 3, p. 735, 2007.

YANG, S.D.; LIU, J.X.; WU, J.; TAN, H.W.; LI, Y.R. Effects of vinasse and press mud application on the biological properties of soils and productivity of sugarcane. **Sugar Tech**,

Guangxi, v. 15, p. 152–158, 2013. doi:10.1007/s12355-012-0200-y.

3 PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR RELACIONADA À ROTAÇÃO COM CROTALÁRIA

Resumo

A rotação de culturas com leguminosas na renovação do canavial tem potencial de aumentar a produtividade e reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos para produção sustentável da cana-de-açúcar. A hipótese deste trabalho é que a rotação de culturas promoverá redução da resposta da soqueira de cana-de-açúcar à adubação nitrogenada. Objetivou-se avaliar parâmetros produtivos da primeira soqueira de cana-de-açúcar submetida à aplicação de doses de N em área manejada com ou sem rotação com crotalária na implantação do canavial. Foi instalado um experimento em esquema de parcelas subdivididas no delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições, em áreas submetidas (com rotação) ou não (sem rotação) ao plantio de crotalária, em quatro locais: Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D). Após a colheita da cana-planta, foram implantados os seguintes tratamentos: 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N e um controle N (sem N), aplicados superficialmente sobre a palhada. Entre 150 a 180 dias após a colheita da cana planta, foram realizadas avaliações de perfilhamento e índice SPAD. Na colheita, avaliou-se a biomassa da parte aérea, a produtividade de colmos e os atributos tecnológicos. Também foi calculada a eficiência de uso do N (EUN). A adubação nitrogenada aumentou o perfilhamento e o índice SPAD no solo de textura média (Local A), porém não resultou em aumento de produtividade neste local. A rotação com crotalária aumentou a produtividade da primeira soqueira nos Locais C e D, com ganhos de produtividade variando de 8,1 e 13,1 Mg ha⁻¹ de colmos. A hipótese de que a rotação de culturas diminui a resposta da soqueira à adubação nitrogenada não foi aceita; a rotação de culturas pode promover aumento na EUN, porém não reduziu a demanda de fertilizante nitrogenado. Solos argilosos e com elevado conteúdo de C e N total apresentaram maior resposta à adubação nitrogenada do que o solo de textura média (Local A). A adubação nitrogenada aumentou a biomassa da parte aérea, porém a rotação de culturas pode interferir negativamente na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Esta pesquisa demonstrou a viabilidade da rotação de culturas mesmo em solos argilosos e com elevado conteúdo de C e N total, com potencial de aumento na produtividade de soqueira, porém sem redução da dose de N a ser aplicada.

Palavras-chave: Adubo verde; EUN; Índice SPAD; *Saccharum* spp.

SUGARCANE YIELD RELATED TO ROTATION WITH SUNN HEMP

Abstract

The establishment of cover crops in rotation with sugarcane has potential to increase yield and reduce of N synthetic fertilizer dependence for sustainable production of sugarcane. The hypothesis of this study is that crop rotation will promote a reduction in the sugarcane ratoon response to N fertilization. The objective was to evaluate productive parameters of the first sugarcane ratoon in function of different N rates in areas subjectived or not to sunn hemp rotation. The field trials were installed in four representative regions of cultivation of sugarcane in Brazil: Quatá/SP (Site A); Iracemápolis/SP (Site B); Chapadão do Céu/GO (Site C) e Quirinópolis/GO (Site D). At each site, a field trial was installed in split plot in a randomized block experimental design with four replications, in areas sowed (rotation) and

not sowed (no rotation) with sunn hemp. After the harvest of cane-plant, the following treatments were applied: 60, 120 and 180 kg ha⁻¹ of N and a control (without N), over the straw. Between 150 to 180 days after the harvest of cane-plant, sugarcane tillering was counted and SPAD index measured. At harvest of sugarcane ratoon, biometric parameters, stalks yield and quality parameters were evaluated. At sugarcane ratoon harvest (july 2015), the stalks yield was recorded. It was also calculated the N use efficiency (NUE). The N fertilization increased tillering and SPAD index on medium-texture soil (Site A), but didn't result in an increase of yield. Sunn hemp rotation increased sugarcane ratoon yield in C and D sites, with yield gains ranging from 8.1 and 13.1 Mg ha⁻¹ of stalks. The hypothesis that crop rotation reduces sugarcane ratoon response to N fertilization was not accepted; crop rotation can promote increase in NUE, but did not reduce the N fertilizer requirement. Clay soils with high total C and N content presented more response to N fertilization than medium-texture soil (Local A). N fertilization increased dry biomass, but crop rotation may interfere negatively in quality parameters of sugarcane ratoon. This research demonstrated the viability of crop rotation in clay soils with high total C and N content, with potential to increase sugarcane ratoon yield, but without reducing N-fertilizer rate applied.

Keywords: Green manuring; NUE; SPAD index; *Saccharum* spp.

3.1 Introdução

Os sistemas de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) apresentaram mudanças significativas nos últimos anos devido à adoção do plantio direto, que resultou na redução do número de operações no preparo do solo e consequente diminuição dos custos (46,9% a menos na comparação com o preparo convencional) (DUARTE JUNIOR; COELHO, 2008). A palhada deixada sobre a superfície do solo após a colheita influencia os tratos culturais de soqueira, principalmente o manejo da adubação, devido às dificuldades para incorporação dos fertilizantes ao solo. Atualmente, tem-se buscado novos fertilizantes nitrogenados e um modo mais adequado de aplicação de fertilizantes que resultem em menores perdas de N para o ar ou água, diminuindo assim os problemas ambientais decorrentes do uso dos mesmos (OTTO et al., 2013).

O consumo global de fertilizantes apresentou relevante crescimento nos últimos anos devido à grande demanda por alimentos, atingindo 184 milhões de Mg em 2015. Estimativas da *Internacional Fertilizer Industry Association* (IFA, 2015) preveem que o consumo deverá ultrapassar 200 milhões de Mg em 2018. O Brasil foi o quarto consumidor mundial de fertilizantes em 2011, consumindo 6,3% do total global, ficando abaixo da China (31,4%), Índia (15%) e Estados Unidos (10,9%) (BRASIL - SEAE, 2015). A cana-de-açúcar é a terceira cultura que mais consome fertilizantes no Brasil e este insumo representa, em geral, 20% do custo de produção da cultura no interior de São Paulo (KANEKO; TARSITANO, 2009; CONAB, 2013).

Historicamente, a cana-de-açúcar têm apresentado baixa eficiência de uso do N (EUN) quando comparada com culturas anuais, como o milho. Estimativas indicam que, do total de N aplicado em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, cerca de 26% é absorvido pela planta em um ano agrícola, 32% é imobilizado na biomassa microbiana, 16% é perdido por volatilização (NH_3), 5,6% é perdido por lixiviação, 1,84% por desnitrificação e 19% por outras vias de perdas (NH_3 e NO_2 foliar, por exemplo.) (OTTO et al., 2016). Devido à pequena proporção do N-fertilizante que é absorvido pela planta e evidências concretas de que o solo é o maior contribuidor para o fornecimento de N à cultura (DOURADO-NETTO et al., 2010; FRANCO et al., 2011; VIEIRA-MEGDA et al., 2015), espera-se que estratégias que aumentem a biodiversidade do solo e favoreçam a manutenção dos estoques de matéria orgânica do solo (MOS) possam contribuir para redução das doses de N aplicadas com manutenção da produtividade da cana-de-açúcar. De fato, conforme Otto et al. (2016), a manutenção da palhada sobre o solo, a rotação com espécies que fixam N e a otimização do uso de subprodutos (torta de filtro e vinhaça) podem reduzir a demanda de fertilizantes nitrogenados pela cana-de-açúcar.

As leguminosas são plantas que apresentam alto teor de proteínas, vitaminas e minerais e possuem capacidade de fixar N atmosférico a partir da associação com bactérias diazotróficas. O acúmulo de N na planta pode variar de 30 a 200 kg de N ha^{-1} (HERRIDGE; PEOPLES; BODDEY, 2008). As leguminosas também contribuem para mitigação da emissão de gases de efeito estufa, já que possuem potencial para reduzir o uso de fertilizantes sintéticos, cuja produção exige grande consumo de energia. Além dos diversos benefícios, o cultivo de leguminosas promove desenvolvimento rural e pode reduzir custos de produção, uma vez que a rotação de culturas apresenta relação custo-benefício favorável a longo prazo (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2016; CHERR; SCHOLBERG; MCSORLEY, 2006).

Diversas pesquisas avaliaram a eficiência do uso de leguminosas como fonte alternativa de adubação nitrogenada para a cana-de-açúcar, visando aumento da disponibilidade do N do solo. Em condições de campo, a recuperação do N de fertilizantes minerais pela cana-de-açúcar pode variar entre 20% a 40%, enquanto que a de adubos verdes raramente ultrapassa 20% (TRIVELIN et al., 2002; VITTI et al., 2007; FRANCO et al., 2008; AMBROSANO et al., 2011a, 2013b; LIMA FILHO et al., 2014). Porém, a lenta liberação do N proveniente dos resíduos da leguminosa pode favorecer a sincronia de absorção de N pela planta (DINNES et al., 2002). O suprimento a longo prazo do N via entrada de resíduos orgânicos de leguminosas (AMBROSANO et al., 2013b) pode também fornecer N para a

biomassa microbiana, favorecendo assim a ciclagem do nutriente e a EUN do próprio fertilizante, com reflexos na produtividade da cultura. De fato, é reportado que a adubação verde pode aumentar o teor de MOS e a biomassa microbiana, além de reduzir infestações de plantas daninhas (AULAKH et al., 2000).

Nos últimos anos, diversos estudos têm apresentado incremento de ~ 35% na produtividade da cana-de-açúcar pela rotação de culturas em relação ao pousio, demonstrando que esta prática pode proporcionar benefícios econômicos (DINARDO-MIRANDA; GIL, 2005; UMRIT; BROLAH; KWONG, 2009; AMBROSANO et al., 2010, 2013a, 2013b). Em estudo desenvolvido por Garside (1997), na ausência de adubo nitrogenado, a cana-de-açúcar produziu 100 Mg ha⁻¹ em rotação com soja, enquanto em área de pousio a produtividade foi de 62 Mg ha⁻¹, demonstrando o efeito positivo da rotação de cultura na produtividade de colmos naquela situação. De forma semelhante, Duarte Junior; Coelho, (2008) reportaram que a produtividade da cana-de-açúcar sob plantio direto e rotação com leguminosas foi 37% superior à produtividade obtida no sistema convencional de preparo de solo e sem rotação de culturas em condições brasileiras.

Além de aumentar a produtividade da cultura subsequente, a rotação de culturas também pode reduzir a demanda de fertilizantes nitrogenados para a mesma. Por exemplo, Mahama et al., 2016 relataram maior produtividade (~ 43%) do sorgo grão (*Sorghum bicolor*) após rotação com crotalária em relação ao tratamento de pousio sem adição de N fertilizante; além disso, verificaram potencial da rotação de culturas em reduzir ou suprimir parcialmente a demanda de N na produção do sorgo grão. Em experimento com arroz, a mineralização do N dos resíduos vegetais de leguminosas reduziu em 25% o requerimento de N para atingir produtividade ótima de arroz (AULAKH et al., 2000). Essa tendência já foi avaliada em cana-de-açúcar por Garside e Bell (2001) na Austrália, onde verificaram que é possível diminuir ou mesmo eliminar a fertilização nitrogenada em cana planta quando cultivada após rotação com leguminosas. Ambrosano et al. (2011b) constataram que em época seca, todo o N na cana-de-açúcar é derivado da mineralização dos resíduos da crotalária; foi observado no primeiro ano do ciclo recuperação de 10% do N da crotalária e 40% da fonte mineral (sulfato de amônio); contudo, no ano seguinte caracterizado por poucas chuvas, a recuperação do N foi de 6% e 0%, respectivamente.

No Brasil, as doses de N usualmente utilizadas no plantio da cana-de-açúcar são baixas, variando de 30 a 60 kg ha⁻¹ de N (CANTARELLA et al., 2007). O benefício da redução da adubação nitrogenada proporcionado pela rotação com leguminosas, tanto em termos econômicos quanto ambientais, será pouco expressivo no ciclo de cana planta no

Brasil, considerando-se as baixas doses de N-fertilizante atualmente usadas em áreas sem rotação. Evidentemente, este benefício será mais significativo em locais onde a dose de N aplicada no plantio é maior, como por exemplo, na Austrália (SCHROEDER et al., 2006) e nos Estados Unidos (LEGENDRE et al., 2001). Por outro lado, as doses de N-fertilizante aplicadas em soqueira são mais elevadas tanto no Brasil quanto em outros países produtores de cana-de-açúcar. No Brasil, por exemplo, as doses de N-fertilizante aplicadas em soqueira variam de 60 a 120 kg ha⁻¹ de N conforme os boletins oficiais de recomendação de adubação (SPIRONELLO et al., 1997), podendo atingir até 150 kg ha⁻¹ em lavouras comerciais de elevada produtividade. Considerando as maiores doses de N aplicadas nesta condição, a possibilidade de redução da adubação nitrogenada promovida pela rotação de culturas em áreas de soqueira seria mais significativa. Estudos desta natureza já foram realizados na Austrália, onde Park et al. (2010) observaram, por meio de estudos de modelagem, que a rotação com soja sem colheita dos grãos permite reduzir as doses de N-fertilizante em 100%, 60%, 25% e 10% do total aplicado na primeira, segunda, terceira e quarta soqueiras, respectivamente. Estudos desta natureza não foram realizados em condições brasileiras, especialmente sob condições de campo e utilizando culturas de rotação comercialmente empregadas no país, como as do gênero crotalária.

Diante do exposto acima, a hipótese deste trabalho é de que a rotação com crotalária adotada na renovação do canavial promoverá redução da resposta da soqueira subsequente à adubação nitrogenada. Objetivou-se avaliar parâmetros produtivos da primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em áreas submetidas ou não a rotação com crotalária, em quatro condições de cultivo de cana-de-açúcar no Brasil.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Caracterização das áreas experimentais

As áreas experimentais utilizadas neste capítulo são as mesmas descritas no capítulo 2 desta dissertação.

3.2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Em todos os locais, após 60 dias da colheita da cana planta, foi realizada aplicação de fertilizante nitrogenado sobre a palha, sem incorporação, nas doses 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N e um controle (sem N). O N foi aplicado na forma de nitrato de amônio (32% N), para evitar perdas de NH₃ por volatilização. Também se aplicou potássio (KCl) na dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O para evitar deficiência deste nutriente. A aplicação foi feita manualmente sobre a palha,

~ 15 cm da linha da cana-de-açúcar. Foi usado o esquema de parcelas subdivididas no delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições.

3.2.3 Avaliações

3.2.3.1 Densidade de colmos

A avaliação da densidade de colmos foi realizada entre 150 a 180 dias após a colheita da cana planta (no período de janeiro/fevereiro de 2015), ou seja, na época de máximo crescimento vegetativo da cultura. Realizou-se a contagem dos perfilhos nas duas linhas centrais de cada parcela, em 8 m sequenciais. A densidade de colmos (colmos m^{-1}) foi obtida pela média das duas linhas. Perfilhos pouco desenvolvidos (muito finos e com menos de 50 cm de altura) e atacados por pragas não foram contabilizados.

3.2.3.2 Índice SPAD

Foi realizado a quantificação não-destrutiva dos teores relativos de clorofila por meio do clorofilômetro portátil SPAD - Soil Plant Analysis Development, modelo SPAD-502 (Minolta Corporation, Ramsey, Japan), previamente calibrado de acordo com o manual. As leituras foram realizadas no terço médio de 15 lâminas de folhas diagnóstico +1 (TVD – *Top Visible Dewlap Leaf*), na mesma ocasião da avaliação da densidade de colmos. Utilizou-se a média das 15 leituras para representar o índice SPAD de cada parcela. Folhas atacadas por pragas e doenças não foram utilizadas na avaliação.

3.2.3.3 Avaliação da produtividade de colmos (Mg ha^{-1}), índice EUN, biomassa seca e atributos tecnológicos

A produtividade foi estimada por meio da colheita das três linhas centrais de cada parcela. A colheita foi realizada com colhedora e a massa de colmos registrada em transbordo equipado com célula de carga, permitindo estimar a produtividade de colmos (Mg ha^{-1}). Quando não foi possível em razão da indisponibilidade do equipamento (Locais A e C), as linhas da cultura foram colhidas manualmente com despalhamento, e a massa registrada em célula de carga acoplada em trator garra. Antes da colheita, foi realizada uma avaliação biométrica, onde foram coletadas as plantas presentes em 2 m de uma linha por parcela. A planta foi separada em colmo, ponteiro e folha seca para quantificação da massa fresca em balança eletrônica (precisão de $\pm 0,01$ kg), porém os resultados foram somados e apresentados como biomassa da parte aérea. Em seguida, os tecidos vegetais foram picados em trituradora

de forragem. Posteriormente foi obtida uma subamostra de cerca de 500 g de cada compartimento, sendo que a subamostra de colmo e ponteiro armazenados em isopor com gelo para evitar a fermentação do material. As amostras foram levadas para o laboratório, aonde foram pesadas antes e após secagem em estufa (65° C durante 72 h) para determinação da umidade do material, permitindo estimar a massa de matéria seca da parte aérea (Mg ha^{-1}). Também foram coletados 10 colmos por parcela para avaliação dos parâmetros tecnológicos (Pol da cana (%), Pureza (%), Fibra (%), e Açúcar Total Recuperável – ATR (kg Mg^{-1}), conforme metodologia descrita em Fernandes (2011).

O índice de eficiência de utilização do N (EUN) foi calculado conforme Doberman (2005), pela equação:

$$\text{EUN (Mg colmos kg}^{-1} \text{ de N aplicado)} = \text{Produtividade de colmos (Mg ha}^{-1}) / \text{dose de N aplicada (kg ha}^{-1}).$$

3.2.4 Análise Estatística

Em cada local, a rotação e doses de N foram considerados como efeitos fixos, e bloco como efeito aleatório em esquema de parcelas subdivididas no delineamento de blocos ao acaso, utilizando o PROC GLIMMIX do pacote estatístico SAS 9.3 (2010). Realizou-se a análise de variância (ANOVA) e quando o F da análise de variância foi significativo, foi realizado o teste de comparação de médias LSD de Fisher ($P \leq 0.05$). O conjunto de dados foi analisado para a presença de “outliers” antes da realização do teste estatístico.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Densidade de colmos

A rotação com crotalária promoveu diferenças no perfilhamento da primeira soqueira nos quatro locais ($P < 0.05$). Verificou-se que o tratamento com rotação apresentou maior densidade de colmos nos locais A e C, porém menor nos locais B e D (Tabela 3.1). Não foi constatado efeito da interação do manejo da rotação e doses de N.

Diversos fatores podem influenciar o perfilhamento da soqueira, como variações nas condições edafoclimáticas (água, luminosidade e temperatura), nutrientes e cultivar, as quais podem refletir na produtividade e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar (SILVA; JERONIMO; LÚCIO, 2008). A maior densidade de colmos foi observada no tratamento com rotação nos locais A e C. Este comportamento pode estar associado com o período de baixas precipitações (Junho a Outubro/2014) (Figura 2.2 do cap.2) apresentado por estes locais, uma vez que em época seca, todo o N na cana-de-açúcar pode vir da mineralização dos resíduos da

crotalária (AMBROSANO et al., 2011b). Além disso, a palhada da crotalária também pode ter acelerado crescimento inicial e uniforme dos perfilhos devido à manutenção da umidade no solo e redução da amplitude térmica do solo, possibilitando que houvesse fechamento mais rápido da entrelinha e aproveitamento mais eficiente da energia luminosa pela cultura (SILVA et al., 2007).

No local B a redução no perfilhamento foi elevada no tratamento com rotação (Tabela 3.1) e pode não estar relacionada com o efeito da rotação com crotalária. No momento da colheita da cana planta, realizada em julho de 2015, observou-se que a colhedora promoveu maior arranquio de soqueira na área que anteriormente havia sido cultivada com crotalária. Isso porque a colheita começou pelo lado que havia sido manejada com crotalária, sendo realizada com pior qualidade. À medida que a colheita avançou para a outra metade da área (sem rotação), as condições de colheita melhoraram, reduzindo o arranquio de soqueira. Desta maneira, os resultados de perfilhamento, assim como de produtividade, deverão ser interpretados com cautela no caso de Iracemápolis/SP (Local B).

No local D, houve redução na densidade de colmos em 8,4% no tratamento com rotação. Pode ser que tenha havido influência da imobilização de nutrientes no processo de decomposição dos resíduos vegetais da crotalária (baixa relação C/N), acarretando no menor perfilhamento. As elevadas temperaturas e precipitação observadas durante os anos de 2013 e 2014 (Figura 2.2, capítulo 2) podem ter contribuído para aceleração da mineralização do N (MEIER et al., 2006), o que resultou na competição do N entre a microbiota do solo e as plantas nos meses seguintes. Adicionalmente, a influência negativa da camada espessa de palhada em superfície pode ter dificultado a emergência da soqueira (SOUZA et al., 2005) e consequentemente, um fechamento mais lento do canavial, causando competição dos perfilhos por luz (MACHADO et al., 1982) e diminuição na densidade.

Analizando o efeito das doses de N na densidade de colmos, observou-se efeito favorável das doses de N no Local A ($P=0.009$). Observa-se que, na média dos tratamentos com e sem rotação, os valores absolutos foram mais elevados para os tratamentos com 120 e 180 kg ha⁻¹ de N em relação ao controle e ao tratamento com 60 kg ha⁻¹ de N (Figura 3.1). Nos demais locais não houve efeito das doses de N. O efeito das doses de N na densidade de colmos do local A e ausência nos demais pode ser explicado pelo fato do local A apresentar solo de textura média e baixo conteúdo de C e N total. Nessa condição, a capacidade de mineralização e disponibilização de N para a cana-de-açúcar é limitada, fazendo com que o N fornecido via fertilizante possa influenciar a densidade de colmos de forma mais efetiva. Nos demais locais, com maior conteúdo de C e N total, a mineralização do N da MOS e dos

resíduos culturais supriu em totalidade a demanda da cultura em N, permitindo perfilhamento adequado em todos os tratamentos. O número de perfilhos observado aos ~180 dias neste estudo se assemelha com o de estudos realizados por Megda, (2013); Almeida et al., (2008) e Oliveira et al.,(2010).

Tabela 3.1 – Densidade de colmos da primeira soqueira em função da rotação de culturas e doses de N em janeiro/ 2015 em Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D)

Doses N	Rotação de culturas											
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
	Local A			Local B			Local C			Local D		
kg ha ⁻¹	Perfilhos m ⁻¹											
0	11,4	10,0	10,7 b	7,3	14,4	10,8	14,7	13,2	13,9	11,6	12,1	11,9
60	11,8	11,1	11,4 ab	8,1	13,2	10,6	14,2	13,5	13,8	11,6	13,2	12,4
120	12,3	11,3	11,8 a	8,6	12,9	10,7	14,8	14,0	14,4	12,4	13,6	13,0
180	12,2	11,7	11,9 a	9,3	13,9	11,6	15,0	13,0	14,0	12,0	12,6	12,3
Média	11,9 A	11,0 B		8,3 B	13,6 A		14,7 A	13,4 B		11,9 B	12,9 A	
P _{rotação}	0.001			<0.001			0.038			0.009		
P _{dose}	0.009			0.898			0.878			0.154		
P _{rotação*dose}	0.603			0.764			0.832			0.622		

Os resultados representam a média de quatro repetições. Letras maiúsculas diferentes na mesma linha indicam haver diferença significativa entre os manejos, enquanto letras minúsculas iguais na mesma coluna indicam não haver diferença entre as doses de N pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

Figura 3.1 – Densidade de colmos da primeira soqueira em janeiro/2015 em função das doses de N no local A = Quatá/SP. Os resultados representam a média de quatro repetições. As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$). Letras minúsculas iguais indicam não haver diferença entre as doses de N pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

3.3.2 Índice SPAD

O índice SPAD variou em função da rotação com crotalária (Local B) e apresentou interação ($P < 0.05$) entre o manejo da rotação e dose de N (Local A) (Tabela 3.2). No local A, o índice SPAD foi maior no tratamento com rotação do que no tratamento sem rotação na parcela controle (Figura 3.2). Considerando o efeito favorável da nutrição com N no aumento dos índices SPAD, que é relacionado ao conteúdo de clorofila na folha (MEGDA, 2013), este resultado é um indicativo de que a rotação com crotalária aumentou a absorção de N pela planta quando não houve fornecimento de N por meio de fertilizante. Outra evidência da melhor nutrição nitrogenada proporcionada pela rotação pode ser observada no Local B, que apresentou maior índice SPAD na média do tratamento com rotação do que sem rotação. Entretanto, no Local A também se observou redução do índice SPAD com o aumento da dose de N (a partir de 120 kg ha^{-1}) no tratamento com rotação, o que não foi observado no tratamento sem rotação. Esse comportamento pode estar relacionado à absorção excessiva de N pela planta quando se associou doses elevadas de N e rotação com crotalária. Nessa situação, pode haver absorção em excesso de N e, uma vez que altas concentrações de amônio são tóxicas no tecido vegetal, a planta pode emitir amônia para a parte aérea como forma de reduzir a concentração interna de N (MATTSSON et al., 1998), consequentemente reduzindo o conteúdo de clorofila.

Nos locais C e D não houve efeito do manejo da rotação e doses de N no índice SPAD (Tabela 3.2 e Figura 3.2). Esse resultado é um indicativo que nestes locais não houve restrição no fornecimento de N pelo solo para manutenção de teores elevados de clorofila nas folhas. Isso pode estar relacionado ao alto conteúdo de C e N total nestes locais (Tabela 2.3, capítulo 2) e as condições de temperatura e umidade favoráveis ao processo de mineralização do N, lembrando que esta avaliação foi realizada em época de intensa chuva e temperaturas elevadas (Figura 2.2, capítulo 2). A ausência de aumento no índice SPAD nestes locais pode estar associada com a estabilização da intensidade da cor verde causada pelo adequado fornecimento de N. Nestas condições, a planta não produz clorofila acima da sua necessidade, logo o N não é mais assimilado e, consequentemente, não é detectado pelo medidor de clorofila (ABREU; MONTEIRO, 1999; ZUFFO et al., 2012).

O menor índice SPAD observado no Local A (média de 36) em relação aos demais Locais (medias acima de 41) pode estar relacionado ao menor fornecimento de N pelo solo no Local A, que apresenta menor conteúdo de C e N total (Tabela 2.3, capítulo 2). O aumento da intensidade de cor verde observado nas folhas da cana-de-açúcar nos locais B, C e D pode estar atribuído também à manutenção de água no solo destes locais em relação ao Local A.

Silva et al. (2007) verificaram declínio do índice SPAD devido ao estresse por água, uma vez que o estresse hídrico pode causar degradação da clorofila. O Local A, além de apresentar solo com menor teor de argila e, portanto, menor capacidade de armazenamento de água, é o ambiente que apresentou a menor precipitação acumulada ao longo do ciclo da soqueira (Figura 2.2, capítulo 2). Estes resultados estão de acordo com observações de Megda (2013), de que o uso do clorofilômetro tem possibilitado determinar indiretamente o estado nutricional de N e o nível de estresse fisiológico e hídrico da cana-de-açúcar. A avaliação do índice SPAD pode atuar como ferramenta importante na avaliação da necessidade de adubação nitrogenada complementar de cultivos (WYLLYAM; PRADO, 2009).

Tabela 3.2 – Índice SPAD em função da rotação de culturas e doses de N em janeiro/2015 em Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D)

Dose de N	Rotação de culturas											
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
	Local A			Local B			Local C			Local D		
kg ha ⁻¹	Índice SPAD											
0	38 aA	34 B	36	43	40	42	42	42	42	42	42	42
60	38 ab	36	37	42	42	42	42	42	42	41	40	41
120	35 b	37	36	43	42	43	42	43	42	42	41	41
180	36 b	36	36	43	40	42	41	42	42	41	42	41
Média	37	36		43 A	41 B		41 A	42 A		41 A	41 A	
P _{rotação}	0.257			0.006			0.160			0.920		
P _{dose}	0.803			0.461			0.761			0.414		
P _{rotação*dose}	0.042			0.092			0.466			0.310		

Os resultados representam a média de quatro repetições. Letras maiúsculas diferentes na mesma linha indicam haver diferença entre os manejos, enquanto letras minúsculas iguais na mesma coluna indicam não haver diferença entre as doses de N pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

Figura 3.2 – Índice SPAD em função da rotação de culturas e doses de N no local A = Quatá/SP As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$). Letras maiúsculas diferentes indicam haver diferença entre os manejos, enquanto letras minúsculas iguais para o mesmo manejo indicam não haver diferença entre as doses de N pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

3.3.3 Produtividade de colmos, índice EUN e biomassa seca

A hipótese deste trabalho é de que a rotação de culturas na implantação do canavial irá refletir em aumento na produtividade do canavial nos ciclos subsequentes, assim como redução na resposta à adubação nitrogenada, o que estaria relacionado ao aumento na disponibilidade do N. Como esperado, o plantio de crotalária aumentou a produtividade da primeira soqueira em dois dos quatro locais avaliados (Tabela 3.3). Nos locais C e D, a leguminosa proporcionou incrementos na produtividade de 5,8% ($8,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) e 8,7% ($13,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) comparado com o manejo sem rotação, respectivamente. Por outro lado, a produtividade não foi influenciada pela rotação nos locais A e B. A ausência de efeito positivo da rotação no Local A pode estar relacionado às limitações químicas e físicas do solo, que acabaram limitando a produtividade do canavial. No Local B, a ausência de efeito positivo pode estar relacionada aos problemas na colheita da área manejada sob rotação, conforme já mencionado. Interessante observar que normalmente a rotação com crotalária é recomendada apenas para ambientes restritivos e não é adotada em ambientes mais favoráveis, por acreditar-se que nessas situações a rotação não irá resultar em ganhos de produtividade. Todavia, os resultados deste estudo indicam o contrário, de que em áreas com alto potencial produtivo (ambientes favoráveis) também é vantajoso se realizar a rotação de culturas.

Aumentos de produtividade de $20,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ foram observados no ciclo de cana planta em áreas submetidas à rotação com crotalária-juncea, em estudo relatado por Dinardo-Miranda; Gil, (2005). O aumento na produtividade da cana planta pode possibilitar ainda aumento na produtividade do canavial nos ciclos subsequentes, uma vez que a cana-de-açúcar é um cultura semi-perene e a reserva energética do sistema radicular pode resultar em ganhos de produtividade nas safras seguintes (VITTI et al., 2007). Caceres e Alcarde (1995) observaram ganhos acumulados de 19 a 25 Mg ha^{-1} de colmos em três anos consecutivos em áreas manejadas sob rotação com *C. juncea* e *C. spectabilis*, respectivamente. Ambrosano et al. (2011a) observaram aumento médio de 30% na produtividade do canavial, considerando cinco anos de cultivo, em relação à área de pousio. Ambrosano et al. (2011, 2013b, 2010) observaram ainda geração de renda líquida positiva após a rotação com crotalária, proporcionando vantagem econômica comparada com a área sem cultivo prévio com a leguminosa.

Resultados positivos de rotação com leguminosas também são normalmente relatados para outras culturas. Mahama et al. (2016) obtiveram aumento de 43% na produtividade dos grãos de sorgo após rotação com crotalária, comparado com o tratamento que não recebeu N.

Estes autores observaram possível redução de uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos com a rotação com crotalária. Liebman et al. (2012) observaram aumento do acúmulo de biomassa seca e produtividade de grãos do milho devido à rotação com leguminosas, atribuindo os resultados à maior disponibilidade de N no solo. Os autores observaram ainda possibilidade de redução de 70 a 184 kg ha⁻¹ de N após o manejo com leguminosas, os quais representariam considerável economia de uso de energia fóssil.

Em relação à diminuição da adubação nitrogenada da cana-de-açúcar em áreas submetidas à rotação, normalmente é reportado eliminar o uso de N-fertilizante no ciclo de cana planta em áreas manejadas sob rotação (CANTARELLA et al., 2007; PENATTI, 2013; FERREIRA; OTTO; VITTI, 2015). Por outro lado, o manejo da adubação com N em áreas de soqueiras normalmente é igual em áreas submetidas ou não a rotação com leguminosas. Park et al. (2010), na Austrália, observaram possibilidade de redução significativa no uso de fertilizantes nitrogenados em soqueiras de cana-de-açúcar após rotação com soja. Otto et al. (2013), no Brasil, observaram variabilidade na resposta das soqueiras à adubação nitrogenada e associaram ao fato das áreas apresentarem diferentes históricos de manejo, como plantio de leguminosas em rotação ou uso de subprodutos orgânicos como torta de filtro ou vinhaça, que podem diminuir a resposta à adubação nitrogenada. Neste estudo, a rotação com crotalária afetou a disponibilidade de N mineral no solo, o C da biomassa microbiana e os teores N facilmente decomponível (N-ISNT) (Capítulo 2), fornecendo evidências do potencial de redução nas doses de N sem causar efeitos deletérios na produtividade do canavial. Entretanto, a maior produtividade obtida nas áreas manejadas sob rotação (Tabela 3.3) também é um indicativo do aumento da exigência nutricional nessas áreas.

Diferentemente do esperado, não houve interação entre a rotação com crotalária e a resposta à adubação com N em três dos quatro locais avaliados (Tabela 3.3), indicando que nestas condições, o plantio de crotalária não afetou a resposta das soqueiras à adubação nitrogenada. Apesar do plantio da crotalária ter afetado a dinâmica do N no solo, as maiores produtividades obtidas no tratamento com rotação podem ter provocado aumento na demanda de N-fertilizante. No Local B, apesar da interação entre a rotação e doses de N ter ocorrido, a resposta à adubação foi maior no tratamento com rotação do que sem rotação. Este efeito contrário do esperado pode estar relacionado aos problemas de brotação na área com rotação devido à problemas na colheita da cana planta nesse local.

Houve efeito significativo das doses de N nos quatro locais avaliados (Tabela 3.3). Na média dos tratamentos com e sem rotação, as doses de 60 e 120 kg ha⁻¹ N promoveram maiores ganhos de produtividade no Local A (Figura 3.3). No Local B, na área com rotação a

maior produtividade foi obtida com 180 kg ha^{-1} de N, enquanto na área sem rotação não houveram diferenças entre as parcelas adubadas e o controle. A baixa produtividade obtida na parcela controle (93 Mg ha^{-1}) do tratamento com rotação é um indicativo do problema de brotação que esta área sofreu devido aos problemas da colheita, uma vez que na parcela sem rotação a produtividade foi de 106 Mg ha^{-1} neste mesmo tratamento. Portanto, neste local a resposta à adubação observada deve ser interpretada com cautela.

No Local C, a maior produtividade foi obtida no tratamento com 120 kg ha^{-1} de N. Neste tratamento, a produtividade foi de $154,8 \text{ Mg ha}^{-1}$, ou seja, $20,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ superior ao tratamento controle, que obteve $134,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 3.3). No Local D, a dose de 180 kg ha^{-1} N promoveu a maior produtividade. Neste tratamento, a produtividade foi de $167,3 \text{ Mg ha}^{-1}$, cerca de $22,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ superior ao tratamento controle, que obteve $145,1 \text{ Mg ha}^{-1}$. Calculando em termos percentuais, a resposta à adubação foi de 9, 15 e 15% respectivamente nos locais A, C e D. Estes resultados indicam que, neste estudo, os ambientes mais favoráveis, com elevada fertilidade, alto conteúdo de C e N total (Tabelas 2.2 e 2.3, capítulo 2) foram aqueles que apresentaram as maiores respostas à adubação. Estes resultados de certa forma contrariam os resultados de Otto et al. (2013), que observaram resposta a adubação de 30% em um solo arenoso de baixa fertilidade e ausência de resposta nos solos de textura argilosa e com altos teores de matéria orgânica. Mariano (2015) também observou elevada variabilidade na resposta à adubação nitrogenada da cana-de-açúcar, sem observar correlações entre diversos métodos de predição do N do solo. Tanto o estudo de Otto et al. (2013) quanto o de Mariano (2015) foram realizados em regiões tradicionais de cultivo de cana-de-açúcar, em áreas com vários anos sob cultivo desta cultura.

Se por um lado não se observou efeito de interação entre a rotação de culturas e as doses de N, por outro lado é possível observar que as parcelas com rotação apresentaram, na maioria das vezes, produtividades mais elevadas do que as parcelas sem rotação (Tabela 3.3). Ou seja, com mesma dose de N, obteve-se maior produtividade de colmos de cana-de-açúcar nas parcelas manejadas sob rotação, fornecendo evidências de que a rotação pode ter aumentado a absorção de N pela cultura. A Figura 3.4 apresenta um índice de eficiência de uso do N (EUN) que indica a quantidade de colmos produzidos por unidade de N aplicada. É possível observar que houve variação da EUN entre os locais e também entre as doses de N. Por outro lado, os efeitos da rotação com crotalaria são bem menos evidentes. Os Locais B, C e D apresentaram maior EUN quando comparados ao Local A, devido às maiores produtividades obtidas (Tabela 3.3). Em relação às doses de N, observa-se diminuição na EUN com o aumento das doses nos três locais, o que corrobora com as observações de

Doberman (2005) de que a EUN decresce com o aumento da taxa de N adicionado via fertilizante. Apesar da ausência de diferença significativa entre os manejos ($P>0.05$), as médias de EUN na maioria dos locais foram superiores no tratamento com rotação do que no tratamento sem rotação nas doses de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N. Esse comportamento sugere que em sistemas de rotação de culturas o N fixado pela leguminosa consegue incrementar a produtividade da cana-de-açúcar a partir da mesma dose de N-fertilizante. A ausência de diferença entre os manejos pode estar relacionada ao único ano de avaliação; as diferenças poderão ser maiores se considerados os resultados dos próximos anos. Além do aumento na disponibilidade do N do solo em si, favorecendo sua absorção pela cultura, a leguminosa pode acelerar no estreitamento da relação C/N da palha da cana-de-açúcar no solo após a colheita mecânica (AMBROSANO et al., 2013a), a qual pode contribuir para aumento da disponibilidade de N e produtividade da cultura.

A produção de biomassa de parte aérea é um parâmetro pouco avaliado em experimentos de campo com a cultura da cana-de-açúcar. Representa a produção de biomassa nos compartimentos colmo, folha seca e ponteiro. Neste estudo, a biomassa da parte aérea (Tabela 3.4) seguiu comportamento semelhante ao observado para produtividade de colmos, uma vez que o compartimento colmo representa a maior porcentagem da biomassa da parte aérea. Ocorreu efeito das doses de N na biomassa da parte aérea nos locais A e C, além da interação rotação e doses no local B (Figura 3.5). Estes resultados estão na mesma ordem de grandeza daquele obtidos por Faroni (2008). Para produção de etanol de primeira geração, o compartimento colmo é a matéria prima mais importante, pois além de conter o caldo que é utilizado para produção de açúcar e etanol, dá origem ao bagaço que é utilizado para produção de energia. Porém, à medida que se desenvolvem tecnologias para produção de etanol de segunda geração, através da hidrólise enzimática de lignina e celulose, os compartimentos folha seca e ponteiro tornam-se importantes, pois podem ser usados para essa finalidade. De fato, atualmente há interesse das unidades sucroenergéticas em aumentar a produção de biomassa para produção de etanol e energia através do recolhimento integral da matéria prima do campo (SORDI & MANECHINI, 2013). Nesse sentido, o aumento da produção de biomassa proporcionados pela adubação nitrogenada ou a rotação de culturas, como observado neste estudo, torna-se importante.

Tabela 3.3 - Produtividade de colmos da primeira soqueira em função da rotação de culturas e doses de N em Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D)

Dose de N	Rotação											
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
	Local A			Local B			Local C			Local D		
kg ha ⁻¹	Colmos (Mg ha ⁻¹)											
0	84,4	82,3	83,3 b	92,7 aB	106,4 aA	99,6	138,4	129,8	134,1 b	150,0	140,1	145,1 b
60	96,9	89,7	93,3 a	107,2 b	116,3 a	111,8	144,0	142,2	143,1 b	163,9	146,9	155,4 b
120	91,2	90,2	90,7 a	107,4 b	102,2 b	104,8	157,0	152,6	154,8 a	167,9	150,6	159,3 ab
180	91,9	87,1	89,5 ab	120,3 c	113,6 a	117,0	149,5	131,7	140,6 b	171,3	163,3	167,3 a
Média	91,1	87,3		106,9	109,6		147,2 A	139,1 B		163,3 A	150,2 B	
P _{rotação}	0.124			0.290			0.015			0.013		
P _{doses}	0.044			<0.001			<0.001			0.028		
P _{rotação*doses}	0.791			0.018			0.309			0.868		

Os resultados representam a média de quatro repetições. Letras maiúsculas diferentes na mesma linha indicam haver diferença entre os manejos, enquanto letras minúsculas iguais na mesma coluna indicam não haver diferença entre as doses de N para o mesmo manejo pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

Figura 3.3 - Produtividade da primeira soqueira (julho/2015) em função das doses de N nos locais A = Quatá/SP, C = Chapadão do Céu/GO e D = Quirinópolis/GO (Local D); e produtividade em função do manejo e doses de N no local B = Iracemápolis/SP. As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$)

Figura 3.4 - Índice de eficiência de uso do N (EUN) nos locais A = Quatá/SP, locais B = Iracemápolis/SP, C = Chapadão do Céu/GO e D=Quirinópolis/GO. As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$)

Tabela 3.4 – Biomassa seca da parte aérea em função da rotação de culturas e doses de N em Quatá/SP (Local A), Iracemápolis/SP (Local B), Chapadão do Céu/GO (Local C) e Quirinópolis/GO (Local D)

Doses N	Rotação de culturas											
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
	Local A			Local B			Local C			Local D		
kg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹											
0	31,9	35,9	33,9 c	38,5 b	40,3	39,4	52,4	45,6	49,0 b	52,5	61,5	59,3
60	45,4	40,2	42,8 b	41,6 b	35,1	38,3	62,3	49,7	56,0 ab	61,1	62,8	58,0
120	47,0	48,2	47,6 ab	43,1 b	43,9	43,5	62,1	62,5	62,3 a	60,0	51,0	56,6
180	47,2	50,1	48,7 a	59,2 aA	41,9 B	50,5	60,6	51,2	56,0 ab	58,4	51,0	55,3
Média	42,9	43,6		45,6 A	40,3 B		59,4 A	52,2 B		58,0	56,6	
P _{rotação}	0.739			0.030			0.020			0.573		
P _{dose}	<0.001			0.004			0.028			0.178		
P _{dose*rotação}	0.390			0.025			0.434			0.053		

Os resultados representam a média de quatro repetições. Letras maiúsculas diferentes na mesma linha indicam haver diferença entre os manejos, enquanto que letras minúsculas iguais na mesma coluna indicam não haver diferença entre as doses de N para o mesmo manejo pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

Figura 3.5 – Biomassa da parte aérea (massa de matéria seca) em função das doses de N nos locais A = Quatá/SP e C = Chapadão do Céu/GO; e produção de matéria seca total em função do manejo e doses de N no local B = Iracemápolis/SP. As barras representam o erro padrão da média ($n = 4$)

3.3.4 Atributos tecnológicos

Apesar de poucos parâmetros mostrarem diferença ($P < 0.05$), a variedade RB96 6928 apresentou respostas interessantes nos quatro locais em relação às variáveis PC, ATR e fibra, que foram afetadas pela rotação de culturas (Tabela 3.5). De maneira geral, o ATR diminuiu na seguinte ordem: Local D < Local C < Local B < Local A, representando o efeito da colheita na maturação da cana-de-açúcar, uma vez que o local D foi o primeiro a ser colhido e o Local A foi o último, favorecendo o acúmulo de sacarose nos colmos. Em geral, os valores de ATR obtidos neste estudo são considerados elevados em relação aos valores médios esperados para a cana-de-açúcar colhida em Julho na safra 2014/2015 (Circular Consecana – UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA - UDOP, 2016).

O acúmulo de sacarose nos colmos está diretamente relacionado com o florescimento da cana-de-açúcar, variando conforme a variedade utilizada e o clima do local. Por sua vez, o florescimento causa o aumento do teor de fibra, por meio do processo conhecido como “isoporização”, sendo controlado por uma interação de fatores, entre eles o fotoperíodo, temperatura, umidade e radiação solar (CAPUTO et al., 2007). Somente ocorreu florescimento da cana-de-açúcar no local C, possivelmente relacionado às temperaturas mais baixas e adequada umidade do solo quando comparado aos demais locais. Nesse local, a rotação aumentou 0,3% o teor de fibra enquanto as doses de N diminuíram o teor de fibra. O aumento no teor de fibra no tratamento com rotação pode estar relacionado ao aumento da infiltração e retenção da água do solo (SANTOS, 2008), o que pode ter intensificado o florescimento da cana-de-açúcar. Esta característica não é interessante para a indústria sucroalcooleira, pois acarreta em um menor rendimento na extração do caldo durante a moagem dos colmos. O controle e a dose 180 kg ha⁻¹ de N proporcionaram maiores porcentagens de fibra que as doses 60 e 120 kg ha⁻¹ de N (Figura 3.6).

Houve incremento no Pol da cana (%) e no ATR no tratamento com rotação do local B, o que irá promover aumento na produtividade de açúcar neste local. Ambrosano et al. (2010) também constatou aumento de 35% na produção de açúcares (Mg Pol ha⁻¹) após a rotação com crotalária-junceia.

As condições ambientais que ocorreram no local A antes da colheita, como precipitações de baixa intensidade observadas em Junho, podem ter favorecido a maturação da cana-de-açúcar neste local, que apresentou o maior teor de ATR dentre os locais avaliados. Entretanto, a rotação com crotalária reduziu cerca de 5% o ATR em relação ao tratamento sem rotação. Também verificou-se queda no Pol da cana no tratamento com rotação. A primeira hipótese para a diminuição no ATR é que a rotação com crotalária tenha favorecido a

manutenção da umidade do solo, devido ao efeito na infiltração de água e no teor de matéria orgânica do solo (SILVA; JERONIMO; LÚCIO, 2008), diminuindo o déficit hídrico e afetando o acúmulo de sacarose; outra hipótese está relacionada à maior absorção de N nas parcelas com rotação, favorecendo o crescimento vegetativo em detrimento à maturação da planta. Estes fatores influenciaram negativamente o acúmulo de sacarose nos colmos nas parcelas com rotação.

A qualidade da pureza do caldo foi afetada pela rotação com crotalária no local A, possivelmente devido a maior produção de biomassa da cana-de-açúcar que pode ter levado maiores quantidades de impurezas vegetais para a colhedora. Houve efeito das doses de N na pureza do caldo no local B (Figura 3.6), em que a dose 60 kg ha^{-1} de N proporcionou a menor porcentagem.

Tabela 3.5 - Atributos tecnológicos da primeira soqueira (Safrá Julho/2015) em função da rotação de culturas e doses de N em Quatá/SP, Iracemápolis/SP, Chapadão do Céu/GO e Quirinópolis/GO

Dose de N	Pol da cana (%)		Fibra (%)		Média	Pureza (%)		Média	ATR (kg Mg ⁻¹)	
	Com	Sem	Com	Sem		Com	Sem		Com	Sem
kg ha ⁻¹					Local A					
0	16,1	16,2	12,2	12,1		91,5	91,7		158,6	160,2
60	16,2	16,6	12,0	12,5		91,6	92,5		160,2	163,4
120	15,3	16,5	11,9	12,2		90,2	91,9		151,4	163,0
180	15,2	16,5	12,2	12,1		90,0	91,7		150,6	162,9
Média	15,7 B	16,5 A	12,1	12,2		90,8 B	91,9 A		155,2 B	162,4 A
P rotação	0.004		0.421			0.002			0.004	
P dose	0.367		0.861			0.058			0.387	
P dose*rotação	0.226		0.611			0.306			0.247	
					Local B					
0	14,4	13,7	10,7	10,3		84,2	86,0	85,1 a	145,1	137,6
60	14,7	14,1	11,0	10,4		82,5	83,1	82,8 b	147,6	141,9
120	14,3	14,4	10,7	10,7		86,7	86,0	86,3 a	143,2	144,2
180	14,5	14,3	10,5	10,6		85,4	85,3	85,3 a	145,4	143,8
Média	14,5 A	14,1 B	10,7	10,5		84,7	85,1		145,3 A	141,5 B
P rotação	0.037		0.235			0.617			0.029	
P dose	0.382		0.589			0.019			0.368	
P dose*rotação	0.242		0.401			0.649			0.210	
					Local C					
0	14,0	14,4	11,1	10,7	10,9 a	84,6	86,5		141,4	144,6
60	14,0	14,1	10,3	10,2	10,2 b	86,5	86,4		140,8	141,8
120	14,3	14,3	10,7	10,5	10,6 b	88,2	85,9		143,4	144,2
180	14,4	14,2	10,7	10,3	10,5 b	88,3	87,5		144,3	142,9
Média	14,2	14,2	10,7 A	10,4 B		86,9	86,6		142,5	143,4
P rotação	0.562		0.045			0.595			0.428	
P dose	0.390		0.013			0.120			0.416	
P dose*rotação	0.428		0.905			0.184			0.573	
					Local D					
0	12,7	13,2	11,1	11,4		85,5	87,0		127,8	132,4
60	13,4	12,9	11,0	11,0		86,6	86,0		134,2	130,1
120	13,4	13,1	11,0	11,4		86,7	87,1		134,0	131,2
180	13,2	13,4	11,0	11,3		86,5	87,4		132,6	134,1
Média	13,2	13,2	11,0	11,3		86,3	86,9		132,2	132,0
P rotação	0.930		0.056			0.291			0.920	
P dose	0.682		0.514			0.638			0.691	
P dose*rotação	0.374		0.708			0.466			0.396	

Os resultados representam a média de quatro repetições. Letras maiúsculas diferentes na mesma linha indicam haver diferença entre os manejos para um mesmo local, enquanto que letras minúsculas iguais na mesma coluna indicam não haver diferença entre as doses de N para o mesmo manejo pelo teste de Fisher ($P < 0.05$)

Figura 3.6 – Atributos tecnológicos em função das doses de N da primeira soqueira (safra julho/2015) nos locais B = Iracemápolis/SP e C = Chapadão do Céu/GO

3.4 Conclusões

A adubação nitrogenada aumentou o perfilhamento e o índice SPAD da cana-de-açúcar no solo de textura média, porém não resultou em aumento de produtividade neste local.

A rotação de culturas aumentou a produtividade da primeira soqueira em dois locais, com ganhos de produtividade variando de 8,1 e 13,1 Mg ha⁻¹ de colmos.

As doses de N aumentaram a produtividade de colmos nos quatro locais avaliados, independentemente da rotação ou não com leguminosas. A hipótese desta pesquisa não foi aceita; a rotação de culturas pode aumentar a eficiência de uso do N (EUN), porém não reduziu a demanda de fertilizante nitrogenado.

Solos argilosos e com elevada fertilidade apresentaram maior resposta à adubação nitrogenada do que o solo de textura média. A adubação nitrogenada aumentou a biomassa da

parte aérea, porém a rotação de culturas pode interferir negativamente na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar.

Referências

- ABREU, J.B.R.; MONTEIRO, F.A. Produção e nutrição do capim-marandu em função de adubação nitrogenada e estádios de crescimento. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 56, n. 2, p. 137–146, 1999.
- ALMEIDA, A. C. dos S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, . G. V. S.; FILHO, G. M.; JÚNIOR, R. A. F. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441–1448, 2008.
- AMBROSANO, E.J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMAS, E.A.; DIAS, F.L.F.; ROSSI, F.; TERAMOTO, J.R.S. Crop rotation biomass and effects on sugarcane yield in Brazil. **InTech Open Minds**, Piracicaba, v. 2, p. 1-40, 2013a.
- AMBROSANO, E.J.; FOLTRAN, D.E.; CAMARGO, M.S.; ROSSI, F.; SCHAMMASS, E.A.; SILVA, E.C.; AMBROSANO, G.M.B.; DIAS, F.L.F. Acúmulo de biomassa e nutrientes por adubos verdes e produtividade da cana- planta cultivada em sucessão , em duas localidades de São Paulo. **Revista Brasileira de Agroecologia**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 199–209, 2013b.
- AMBROSANO, E.J.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMASS, E.A.; GUIRADO, N.; ROSSI, F.; MENDES, P.C.D.; MURAOKA, T. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 6, p. 534–542, 2005.
- AMBROSANO, E.J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMASS, E.A.; DIAS, F.L.F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P.C.O.; MURAOKA, T.; SACHS, R.C.C.; AZCÓN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 810–818, 2011a.
- AMBROSANO, E. J.; CESAR, P.; TRIVELIN, O.; CANTARELLA, H.; MARIA, G.; AMBROSANO, B.; SCHAMMASS, E. A.; MURAOKA, T.; ROSSI, F. N-labeled nitrogen from green manure and ammonium sulfate utilization by the sugarcane ratoon
Aproveitamento do nitrogênio-15 da adubação verde e do sulfato de amônio pela soqueira da cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 3, p. 361–368, 2011b.
- AMBROSANO, E.J.; AZCON, R.; CANTARELLA, H.; BOVI AMBROSANO, G.M.; SCHAMMASS, E.A.; MURAOKA, T.; OCHEUZE TRIVELIN, P.C.; ROSSI, F.; GUIRADO, N.; GONCALVES UNGARO, M.R.; SALOME TERAMOTO, J.R. Crop rotation biomass and arbuscular mycorrhizal fungi effects on sugarcane yield. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 6, p. 692–701, 2010.
- AULAKH, M.S.; KHERA, T.S.; DORAN, J.W.; KULDIP-SINGH, B.-S. Yields and nitrogen dynamics in a rice – wheat system using green manure and inorganic fertilizer. **Soil Science Society of America Journal**, Ludhiana, v. 64, p. 1867–1876, 2000.

BRASIL. Ministério da Fazenda. Secretaria de Acompanhamento Econômico. **Panorama do mercado de fertilizantes**. 2015. Disponível em: <<http://www.seae.fazenda.gov.br/central-de-documentos/panoramas-setoriais>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

CACERES, N.T.; ALCARDE, J.C. Adubação verde com leguminosas em rotação com cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). **STAB. Açúcar, Álcool e Suprodutos**, Piracicaba, v. 13, p. 16-20, 1995.

CANTARELLA, H. Simpósio sobre nitrogênio e Enxofre na agricultura brasileira. In: CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: IPNI, 2007. cap. 11, p. 355-392.

CAPUTO, M.M.; DE SILVA, M.A.; BEAUCLAIR, E.G.F. de; GAVA, G.J.C. de. Acúmulo de sacarose, produtividade e florescimento de cana-de-açúcar sob reguladores vegetais. **Interciencia**, Jaú, v. 32, n. 12, p. 834-840, 2007.

CHERR, C.M.; SCHOLBERG, J.M.S.; MCSORLEY, R. Green manure approaches to crop production: a synthesis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 2, p. 302-319, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Custos de produção da cana-de-açúcar – SP 2011 a 2013**. 2013. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1558&t=2>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

DINARDO-MIRANDA, L.L.; GIL, M.A. Efeito da rotação com crotalaria juncea na produtividade da cana-de-açúcar, tratada ou não com nematicidas no plantio. **Nematologia Brasileira**, Piracicaba, v. 29, p. 63-66, 2005.

DINNES, D.L.; KARLEN, D.L.; JAYNES, D.B.; KASPAR, T.C.; HATFIELD, J.L. Review and interpretation: nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in Tile-Drained Midwestern Soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 1, p. 153-171, 2002.

DOBERMANN, A.R. **Nitrogen use efficiency: state of the art**. Lincoln: Agronomy & Horticulture -- Faculty Publ., 2005. (Paper 316). Disponível em: <<http://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/316>>. Acesso em: 05 jul. 2016.

DOURADO-NETO, D.; POWLSON, D.; BAKAR, R.A.; BACCHI, O.O.S.; BASANTA, M.V.; CONG, P.T.; KEERTHISINGHE, G.; ISMAILI, M.; RAHMAN, S.M.; REICHARDT, K.; SAFWAT, M.S.A.; SANGAKKARA, R.; TIMM, L.C.; WANG, J.Y.; ZAGAL, E.; VAN KESSEL, C. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, n. 1, p. 139, 2010.

DUARTE JÚNIOR, J.B.; COELHO, F.C. A cana-de-açúcar em sistema de plantio direto comparado ao sistema convencional com e sem adubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 576-583, 2008.

FARONI, C.E. **Eficiência agrônômica das adubações nitrogenadas de plantio e após o primeiro corte avaliada na primeira soca da cana-de-açúcar**. 2008. 190 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana de açúcar**. 3. ed. Piracicaba: Sociedade dos Técnicos Açucareiros Alcooleiros do Brasil, 2011. 416 p.

FERREIRA D.A., FRANCO H.C.J., OTTO R., VITTI A.C., FORTES C., FARONI C.E., GARSIDE A.L., TRIVELIN P.C.O. (2015) Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. **Global Change Biol Bioenergy**.p 1-8. doi:10.1111/gcbb.12292

FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Aproveitamento pela cana-de-açúcar da adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2763–2770, 2008. Edição especial.

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. doi: 10.1016/j.fcr.2010.11.011

GARSIDE, A.L. Yield decline research in the Australian sugar industry. **Proceedings South African Sugar Technologists' Association**, Townsville, v. 71, p. 3-18, 1997

GARSIDE, A.L.; BELL, M.J. Fallow legumes in the Australian sugar industry: Review of recent research findings and implications. **Proceedings of the Australian Society Sugar Cane Technologists**, Brisbane, v. 23, p. 230-235, 2001.

HERRIDGE, D.F.; PEOPLES, M.B.; BODDEY, R.M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. **Plant and Soil**, The Hague, v. 311, n. 1/2, p. 1–18, 2008.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION. 2015. Disponível em: <http://www.fertilizer.org/en/doc_library/Newsletters/2015_ifa_fert_agric_may.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2016.

KANEKO, F.H.; TARSITANO, M.A.A.; RAPASSI, R.M.A.; CHIODEROLI, C.A.; NAKAYAMA, F.T. Análise econômica da produção de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Jataí, v. 39, n. 3, p. 266–270, 2009.

LEGENDRE, B.L. **Sugarcane production handbook 2001**. Baton Rouge: Louisiana State University, 2001. 41 p.

LIEBMAN, M.; GRAEF, R.; NETTLETON, D.; CAMBARDELLA, C.A. Use of legume green manures as nitrogen sources for corn production. **Renewable Agriculture Food Systems**. Syracuse, v. 27, p. 180–191, 2012. doi:10.1017/S1742170511000299

LIMA FILHO, O.F. de; AMBROSANO, E.J.; ROSSI, F.; CARLOS, J.A.D. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília: EMBRAPA, 2014. v. 1, 507 p.

MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; JOEL, E.F.; HERMANO, V.A.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 71-76, 1982.

MAHAMA, G.Y.; PRASAD, P.V.V.; ROOZEBOOM, K.L.; NIPPERT, J.B.; RICE, C.W. Cover crops, fertilizer nitrogen rates, and economic return of grain sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, n. 1, p. 1, 2016.

MARIANO, E. **Predição da necessidade de fertilizante nitrogenado pela cana-de-açúcar e reações do nitrogênio orgânico e mineral dissolvidos em palha e solo de canaviais**. 2015. 146 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

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

MEGDA, M.X.V. **Transformações do n derivado do fertilizante no solo e a eficiência de utilização pela cultura da cana-de-açúcar cultivada em solo coberto por palha**. 2013. 156 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

MEIER, E.A.; THORBURN, P.J.; WEGENER, M.K.; BASFORD, K.E. The availability of nitrogen from sugarcane trash on contrasting soils in the wet tropics of North Queensland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Brisbane, v. 75, n. 1/3, p. 101–114, 2006.

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.

OLIVEIRA, E. C.A.; OLIVEIRA, R. I.; ANDRADE, B. M.T.; FREIRE, F. J.; JÚNIOR, M. A. L.&MACHADO, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 951–960, 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. 2016. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/leguminosas-podem-ajudar-a-combater-as-mudancas-climaticas-a-fome-e-a-obesidade/>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

OTTO, R.; MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; TRIVELIN, P.C.O. Quantifying soil nitrogen mineralization to improve fertilizer nitrogen management of sugarcane. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 49, n. 7, p. 893–904, 2013.

OTTO, R.; CASTRO, S.A.Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S.G.Q.; FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O. (2016) Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is next? **BioEnergy Research**, p. 1-18. DOI: 10.1007/s12155-016-9763-x.

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, n. 2/3, p. 331–341, 2010.

PENATTI, C.P. **Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência**. Itu: Ottoni Ed., 2013. 347 p.

SANTOS, G.A. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e**

subtropicais. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 654 p.

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 of the Australian Society Sugar Cane Technologists**, Brisbane, v. 28, p. 142-154, 2006.

SILVA, M.D.A.; JERONIMO, E.M.; LÚCIO, A.D. Perfilhamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 979-986, 2008.

SILVA, M.D.A.; JIFON, J.L.; SILVA, J.A.G. da; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Weslaco, v. 19, n. 3, p. 193-201, 2007a.

SILVA, M.D.A.; CASTRO GAVA, G.J. de; CAPUTO, M.M.; PINCELLI, R.P.; JERÔNIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S. Uso de reguladores de crescimento como potencializadores do perfilhamento e da produtividade em cana-soca. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 545-552, 2007b.

SORDI, R.A.; MANECHINI, C. Utilization of trash: a view from the agronomic and industrial perspective. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, p. 1-2, 2013.

SOUZA, Z.M. de; PAIXÃO, A.C.S.; PRADO, R.M.; CESARIN, L.G.; SOUZA, S.R. de. Manejo de palhada de cana colhida sem queima, produtividade do canavial e qualidade do caldo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 1062-1068, 2005.

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: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. p. 233-239. (IAC. Boletim Técnico, 100)

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

TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIES, G.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, p. 445-450, 2002.

UMRIT, G.; BROLAH, M.A.; KWONG, K.F.N.K. Nitrogen benefits of legume green manuring in sugarcane farming systems in Mauritius. **Sugar Tech**, Ithaca, v. 5, n. 11, p. 12-16, 2009.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. **Circular Consecana do Estado de São Paulo**. Disponível em: <http://www.udop.com.br/cana/tabela_consecana_saopaulo.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2016.

VIEIRA-MEGDA, M.X.; MARIANO, E.; LEITE, J.M.; FRANCO, H.C.J.; VITTI, A.C.; MEGDA, M.M.; KHAN, S.A.; MULVANEY, R.L.; TRIVELIN, P.C.O. Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 101, p. 241-257, 2015. doi: 10.1007/s10705-015-9676-7.

VITTI, G.C.; MAZZA, J.A. Encarte técnico planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 19, p. 1–16, 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 Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 249–256, 2007.

WYLLYAM, D.; PRADO, D.M. Adubação com NPK e o estado nutricional de “ citrumelo ” por medida indireta de clorofila. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 2, p. 266–271, 2009.

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

ZUFFO, A.M.; ANDRADE, F.R.; SCHOSSLER, T.R.; MACHADO, D.M.; PIAUILINO, A.C. Eficiência na determinação indireta do nitrogênio foliar a partir do índice SPAD. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 802–820, 2012.

ANEXOS

Amostragem de solo para análise do N mineral, N-ISNT e C e N-biomassa microbiana

Avaliação biométrica, SPAD, adubação e colheita da cana-de-açúcar

Extração das formas de N mineral do solo e determinação em sistema por injeção em fluxo

(a) Extração de 5 g de solo úmido com $\text{KCl } 2 \text{ mol L}^{-1}$ para determinação do N mineral; (b) Leitura do NH_4^+ e $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ no sistema de fluxo - FIA

Análise do C e N-biomassa microbiana do solo

(c) Fumigação com clorofórmio em sistema à vácuo; (d) Extração do solo com K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$; (e) Determinação do C-BM por titulação; (f) Digestão do extrato para determinação do N-BM por destilação

Análise do N-ISNT no solo

(g) Pré-monitoramento da temperatura da chapa aquecedora para 54°C ; (h) Adição de 5 mL da solução indicadora H_3BO_3 4 % na placa de petri suspensa na tampa; (i) Adição de 10 mL de NaOH 10 mol L^{-1} em 1 g de solo seco (2 mm); (j) Fechamento da câmara de difusão do tipo “Mason Jar”; (k) Câmaras de difusão na chapa aquecedora; (l; m) Solução indicadora H_3BO_3 4% antes (coloração rósea) e após (coloração esverdeada) adição de 5 mL de água desionizada ($< 5 \mu\text{S}$); (n) Titulação potenciométrica do N-ISNT em titulador automático