

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE AGRONOMIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**  
**CIÊNCIA DO SOLO**

**TESE**

**Eficiência de Recuperação de Nitrogênio pela  
Cana-de-açúcar em Função da Adubação  
Nitrogenada de Plantio e da Inoculação com  
Bactérias Promotoras do Crescimento Vegetal**

**Willian Pereira**

**2017**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
CIÊNCIA DO SOLO**

**EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE NITROGÊNIO PELA  
CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA  
DE PLANTIO E DA INOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS PROMOTORAS  
DO CRESCIMENTO VEGETAL**

**WILLIAN PEREIRA**

*Sob a Orientação da Professora*  
**Sonia Regina de Souza**

*e Co-orientação da Professora*  
**Veronica Massena Reis**

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo.

Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2017

*Ficha Catalográfica*

P436e      Pereira, Willian , 1983-  
Eficiência de recuperação de nitrogênio pela cana de-açúcar em função da adubação nitrogenada de plantio e da inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal / Willian Pereira. - 2017.  
104 f.

Orientadora: Sônia Regina de Souza.  
Coorientadora: Veronica Massena Reis.  
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Agronomia Ciência do Solo, 2017.

1. Saccharum. 2. Técnicas isotópicas. I. de Souza, Sônia Regina, 1962-, orient. II. Reis, Veronica Massena, 1961-, coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Agronomia Ciência do Solo. IV. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta tese, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE AGRONOMIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

**WILLIAN PEREIRA**

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

TESE APROVADA EM 17/02/2017

---

Sonia Regina de Souza. Dra. UFRRJ  
(Orientadora)

---

Eduardo Lima. Dr. UFRRJ

---

Nivaldo Schultz. Dr. UFRRJ

---

Raquel Capistrano Moreira Valtas Cunha. Dra. Petrobrás Biocombustível

---

Fábio Lopes Olivares. Dr. UENF

Pai, mãe e irmão,  
Dedico a vocês essa tese.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, Pai, soberano e criador.

A Jesus Cristo, pela vida.

Aos meus pais, a quem dedico essa tese. Obrigado pai, mãe e irmão, pelo amor, exemplo e por sempre acreditarem em mim.

Ao querido amigo e irmão, Alisson Pereira, braço direito nessa tese.

A querida Lóren César, pela paciência e companhia.

À orientadora prof. Dr<sup>a</sup> Sonia Regina de Souza e

À co-orientadora Dr<sup>a</sup> Veronica Massena Reis, pela orientação, confiança, suporte e exemplo.

Ao amigo Alessandro Clementino pela amizade e força na caminhada, sempre.

Aos amigos sempre presentes mesmo na ausência!

Ao Dr. Segundo Urquiaga pelas valiosas contribuições.

Ao amigo prof. Dr. Nivaldo Schultz pela amizade, disposição e exemplo.

Aos pesquisadores da Embrapa Agrobiologia sempre dispostos a ajudar.

À excelente equipe de trabalho: Rafael Cassador, Julian Builes, Gloria Queiroz, Renan Pedula, Valfredo Chaves, Jailson Silva, Otávio Queiroz, Robson Palha, José Neto, Silvana Gomes, obrigado pelas contribuições fundamentais que vocês deram!

Aos companheiros de Piracicaba: Guilherme Hipólito, Guilherme Franco, José Marcos Leite, Juliano Toledo e Aijânio.

Aos técnicos Wilson e Lúcio, ao sempre presente Geraldo Baêta e todos os colegas do laboratório de Gramíneas.

Aos colegas do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da UFRRJ.

Aos funcionários da Embrapa Agrobiologia, principalmente do campo experimental “Terraço” pela colaboração e suporte. Vocês fazem parte dessa conquista!

Ao engenheiro agrônomo e amigo José Nicomedes Jr. pela amizade e confiança no trabalho.

A Usina Cruz Alta/Guarani pelo fornecimento das mudas de cana-de-açúcar.

Ao CENPES/Petrobrás pela oportunidade de trabalho e financiamento da pesquisa.

A Embrapa Agrobiologia, pela formação e toda estrutura de trabalho.

Ao Curso de Pós-graduação em Agronomia/Ciência do Solo, pela oportunidade e excelente formação. Ressaltando todos os funcionários e todos os professores pela orientação e formação.

Ao Câmpus Campos dos Goytacazes da UFRRJ, minha nova casa.

Ao CNPq, FAPERJ e Petrobrás pelos auxílios financeiros.

## **BIOGRAFIA**

Willian Pereira, natural de Governador Valadares, Minas Gerais, tem formação técnica na área de Mecânica de Manutenção Industrial pelo SENAI-GV (2000-2001), trabalhou na área em 2002 e 2003. Ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em abril 2004. Durante a graduação foi estagiário do laboratório de fertilidade do solo da UFRRJ (2004 e 2005) e bolsista de Iniciação Científica na Embrapa Agrobiologia (2005-2008). Graduou-se em janeiro de 2009, ano que ingressou no Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo da UFRRJ, sob orientação dos pesquisadores da Embrapa Agrobiologia Veronica Massena Reis e Segundo Urquiaga. Os trabalhos desenvolvidos na Iniciação Científica e no mestrado renderam prêmios em nível regional e nacional. Após o mestrado (2011) ingressou no Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da empresa Raízen Energia, atuando no desenvolvimento de novas tecnologias para o setor sucroenergético (2011-2013). Depois trabalhou junto ao CENPES/Petrobrás (2013-2015) atuando no planejamento, acompanhamento e execução de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação na área de biocombustíveis. Ingressou no doutorado Agronomia/Ciência do Solo da UFRRJ em 2013, sob orientação da professora da UFRRJ Sonia Regina de Souza e co-orientação da pesquisadora da Embrapa Agrobiologia Veronica Massena Reis. Atualmente é Engenheiro Agrônomo/pesquisador na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro no Câmpus Campos dos Goytacazes, atuando no desenvolvimento de novas tecnologias para a produção sustentável de cana-de-açúcar.

## RESUMO GERAL

PEREIRA, Willian. **Eficiência de recuperação de nitrogênio pela cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada de plantio e da inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal**. 2017. 104f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

O fertilizante nitrogenado é um dos principais responsáveis pelo consumo de energia fóssil e emissões de gases de efeito estufa no ciclo de produção da cana-de-açúcar. O aumento da eficiência no uso do nitrogênio (N) é um assunto de interesse na redução de custos de produção e no aumento do balanço energético na produção da cana-de-açúcar. A busca por tecnologias que aumentem a eficiência da fertilização nitrogenada por variedades de cana-de-açúcar produtivas e eficientes na utilização do N é relevante e estratégica para a produção de cana-de-açúcar no Brasil. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de recuperação do N-fertilizante pela cana-de-açúcar inoculada com bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCV) e a eficiência de recuperação de N por três variedades comerciais de cana-de-açúcar. Para tanto, foram conduzidos dois experimentos no campo experimental da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ. O primeiro foi instalado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico por três anos e o segundo em um Argissolo Amarelo distrófico, sendo colhida a cana planta e a primeira soqueira. No primeiro experimento foram instaladas microparcels com aplicação de  $^{15}\text{N}$  nos tratamentos que receberam a adubação nitrogenada, tanto na cana planta quanto nas soqueiras avaliadas. No segundo experimento foram utilizadas três variedades de cana-de-açúcar: RB867515, IACSP95-5000 e CTC 15 e aplicadas duas doses de N no plantio (50 e 100 kg ha<sup>-1</sup>) e a testemunha sem adubação. Após a colheita da cana planta o experimento foi reinstalado com aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (sulfato de amônio aplicado em cobertura) em todos os tratamentos. Na cana planta, foram instaladas microparcels com aplicação de  $^{15}\text{N}$ -ureia na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N e na primeira soqueira as microparcels foram instaladas com aplicação de  $^{15}\text{N}$ -sulfato de amônio em todos os tratamentos. No primeiro experimento a inoculação com BPCV aumentou o conteúdo de N na parte aérea em algumas avaliações ao longo do ciclo da cana planta, mas esse resultado não se estendeu até a colheita. A participação do N fertilizante na nutrição da planta foi de 13% na média dos três ciclos estudados, outras fontes foram responsáveis por grande parte do N na parte aérea. A eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante foi de 50, 30 e 20% na cana planta, primeira e segunda soqueira, respectivamente, porém sem diferenças entre os tratamentos. No segundo experimento a adubação nitrogenada promoveu aumento no crescimento, produtividade de colmos e na extração de N nas três variedades estudadas. As variedades alteraram as características químicas do solo em função da adubação nitrogenada de plantio. A variedade RB867515 foi a mais produtiva e com as maiores extrações de N na cana planta. A adubação nitrogenada de plantio refletiu em aumento de produtividade na soqueira subsequente somente na variedade RB867515. A recuperação média do N-fertilizante pelas variedades no ciclo da cana planta foi de 41%. Individualmente, a recuperação foi de 38, 39 e 47%, nas variedades RB867515, CTC 15 e IACSP95-000, respectivamente. Na primeira soqueira a adubação nitrogenada de plantio influenciou na eficiência de recuperação de N na variedade CTC 15, sendo a mais eficiente em relação às demais. O manejo da adubação nitrogenada de plantio em função da variedade pode influenciar em ganho de produtividade, sendo neste caso verificado na soqueira da RB867515.

**Palavras-chave:** Bactérias endofíticas. *Saccharum* sp. Técnicas isotópicas.



## ABSTRACT

PEREIRA, Willian. **Efficiency of nitrogen recovery by sugarcane due to nitrogen fertilization of planting and inoculation with plant growth promoting bacteria.** 2017. 104p. Thesis (Doctor Science in Agronomy, Soil Science) Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

Nitrogen fertilizer is one of the main responsible for fossil energy consumption and greenhouse gases emissions on sugarcane production cycle. The increase of efficiency on use of N is a matter of interest in reducing production costs and increasing energy balance of sugarcane production. The search for technologies that increase the efficiency of nitrogen fertilization and for productive and efficient varieties of sugar cane in the use of N is relevant and strategic for sugarcane production in Brazil. This work objective was to evaluate the recovery efficiency of N fertilizer by sugarcane inoculated with plant growth promoting bacteria (BPCV) and N recovery efficiency by three commercial varieties of sugarcane. Two experiments were installed in the experimental field of Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ. The first experiment was installed in a dystrophic Yellow Red Ultisol and conducted for three years. A second experiment was installed in a dystrophic Yellow Ultisol, where the cane plant and first ratoon were harvested. On first experiment microparcels with  $^{15}\text{N}$  application were installed in treatments that received nitrogen fertilization, both in cane plant and evaluated soeches. On second trial three sugarcane varieties were used: RB867515, IACSP95-5000 and CTC 15 and two nitrogen rates (50 and 100 kg N ha<sup>-1</sup>) plus one control without fertilization were applied. In cane plant, microparcels were installed with  $^{15}\text{N}$ -urea at a dose of 50 kg of N ha<sup>-1</sup> and on first ratoon the microparcels were installed with application of  $^{15}\text{N}$ -ammonium sulphate in all treatments. On the first experiment the inoculation with BPCV increased the content of N in the aerial part in some evaluations throughout the cycle of plant cane, but this result did not extend until the harvest. N fertilizer participation in plant nutrition was 13% on the average of the three cycles studied, other sources accounted for a large part of N in the aerial part. The  $^{15}\text{N}$ -fertilizer recovery efficiency was 50, 30 and 20% in cane plant, first and second ratoon, respectively, but without differences between treatments. On second experiment nitrogen fertilization promoted growth increase, shoot yield and N extraction on three varieties studied. The varieties altered the chemical characteristics of soil in function of nitrogen fertilization of planting. The RB867515 variety was the most productive and with the largest extractions of N in cane plant. Nitrogen fertilization of planting reflected in increased productivity on sequent soybean only in RB867515 variety. The average recovery of N-fertilizer by the varieties in plant cane cycle was 41%. Individually, the recovery was 38, 39 and 47%, on varieties RB867515, CTC 15 and IACSP95-000, respectively. At the first stand the nitrogen fertilization of planting influenced the recovery efficiency of N in CTC 15 variety, being the most efficient over the others. The management of nitrogen fertilization of planting in function of the variety can influence the productivity gain of subsequent ryegrass of RB867515.

**Key words:** Endophytic Bacteria. *Saccharum* sp. Isotopic Techniques.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL .....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Cana-de-açúcar no Brasil: Situação Atual e Perspectivas.....	3
2.2 Nutrição Nitrogenada da Cana-de-açúcar.....	4
2.3 Fontes de N para a Cana-de-açúcar .....	5
2.3.1 Solo .....	5
2.3.2 Fertilizantes minerais e adubação nitrogenada .....	5
2.3.3 Resíduos agrícolas e da indústria da cana-de-açúcar .....	6
2.3.4 Adubação verde.....	8
2.3.5 Reserva do tolete .....	8
2.3.6 Fixação biológica de nitrogênio .....	8
2.4 Absorção de N por Cana-de-açúcar.....	9
2.4.1 Sistema radicular da cana-de-açúcar.....	9
2.4.2 Associação da cana-de-açúcar com microrganismos promotores do crescimento vegetal .....	10
2.4.3 Transportadores de N em cana-de-açúcar.....	11
2.5 Eficiência no Uso do N na Cana-de-açúcar .....	12
3 CAPÍTULO I.....	14
EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE <sup>15</sup> N-FERTILIZANTE PELA VARIEDADE RB92579 INOCULADA COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DO CRESCIMENTO VEGETAL.....	14
3.1 RESUMO.....	15
3.2 ABSTRACT .....	16
3.3 INTRODUÇÃO.....	17
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.4.1 Caracterização da área.....	19
3.4.2 Preparo de solo e adubação .....	19
3.4.3 Inoculante e inoculação .....	20
3.4.4 Variedade e plantio.....	20
3.4.5 Delineamento experimental.....	20
3.4.6 Avaliações e colheita.....	21
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
3.5.1 Balanço hídrico-climatológico .....	23
3.5.2 Avaliações na cana planta .....	23
3.5.3 Avaliações na primeira e segunda soqueira da cana-de-açúcar.....	33
3.6 CONCLUSÕES .....	40
4 CAPÍTULO II.....	41
EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE <sup>15</sup> N-FERTILIZANTE POR TRÊS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA DE PLANTIO .....	41
4.1 RESUMO.....	42
4.2 ABSTRACT .....	43

4.3 INTRODUÇÃO.....	44
4.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	46
4.4.1 Área.....	46
4.4.2 Preparo do solo.....	47
4.4.3 Variedades de cana-de-açúcar.....	47
4.4.4 Instalação do experimento.....	48
4.4.5 Delineamento experimental.....	48
4.4.6 Coletas e avaliações.....	49
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.5.1 Balanço hídrico climatológico.....	53
4.5.2 Parâmetros biométricos na cana planta.....	53
4.5.3 Diagnose nutricional.....	58
4.5.4 Características químicas do solo.....	61
4.5.5 Produtividade de raiz na cana-de-açúcar.....	63
4.5.6 Produtividade da parte aérea na cana-de-açúcar.....	66
4.5.7 Qualidade tecnológica das variedades de cana-de-açúcar.....	70
4.5.8 Acúmulo de N e eficiência de recuperação de <sup>15</sup> N-fertilizante em variedades de cana-de-açúcar.....	73
4.6 CONCLUSÕES.....	81
5 CONCLUSÕES GERAIS.....	82
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com cerca de 35% da produção global (FAO, 2016). A produção brasileira vem crescendo nas últimas décadas e na safra 2015/2016 alcançou uma moagem de 665 milhões de toneladas ocupando um total de nove milhões de hectares (BRASIL, 2016a). A área representa cerca de 2,8 % do total de terras agricultáveis (340 milhões de hectares) e 1,1% do total do território nacional (851 milhões de hectares) (MANZATTO et al., 2009; MORAES; ZILBERMAN, 2014; IBGE, 2016). Atualmente, o país é o maior produtor e exportador mundial de açúcar e o segundo maior produtor mundial de etanol. Na matriz energética brasileira, a biomassa da cana-de-açúcar é a segunda maior fonte primária de energia, com mais de 15% da oferta energética interna. A cana-de-açúcar também é a segunda maior cultura agrícola em valor de produção no Brasil. Considerando a conversão da cana-de-açúcar em açúcar, etanol e bioeletricidade, o valor movimentado pelo setor canavieiro é ainda maior, tornando a cadeia da cana-de-açúcar a mais importante do agronegócio brasileiro no quesito valor da produção (UNICA, 2016; NEVES; TROMBIN, 2014).

Estima-se que o consumo mundial de N-fertilizante seja de 104.252 Mt toneladas, com previsão de aumento da demanda para 115,8 Mt em 2017 (IFA, 2013a), sendo que aproximadamente 55% desse N seja usado para a produção de cereais (IFA, 2013b). A obtenção do fertilizante nitrogenado ocorre através de processos industriais que demandam grandes quantidades de energia. Para a produção de 1 kg de N-ureia, principal N fertilizante utilizado hoje no mundo, são gastos 1,3 litros de combustível fóssil (RAMÍREZ; WORRELL, 2006), o que torna seu custo elevado em termos econômicos e ambientais. A cana-de-açúcar consome anualmente no Brasil, mais de quatro milhões de toneladas de fertilizantes, o que corresponde a cerca de 14% das vendas totais de fertilizantes no país, perdendo em participação somente para soja e milho. Com relação aos fertilizantes nitrogenados a cultura se posiciona como a segunda maior demanda nacional de N fertilizante (IFA, 2013). Considerando a área plantada de mais de nove milhões de hectares, a produtividade média de 70 Mg de colmos  $\text{ha}^{-1}$  e a exigência média de 1,0 kg N para produzir uma tonelada de colmo, chega-se a um valor de 630 mil toneladas de N extraído e exportado com os colmos, que em sua maioria não retorna ao solo (IBGE, 2016; VITTI et al., 2008).

Tendo em vista a baixa recuperação do N fertilizante pela cultura (entre 10 a 40%), significativas perdas de N ocorrem no sistema de produção da cana-de-açúcar. Este ponto é importante e crítico, uma vez que os fertilizantes são responsáveis por 22% da energia fóssil consumida ( $\text{MJ tc}^{-1}$ ) e por 11% da emissão de gases de efeito estufa na produção de cana-de-açúcar (MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008). Principalmente em relação aos fertilizantes nitrogenados, que além das suas emissões de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) um dos principais gases de efeito estufa, demanda grandes quantidades de energia no seu processo produtivo. Uma molécula de  $\text{N}_2\text{O}$  na atmosfera tem um potencial de efeito estufa 298 vezes maior do que a de  $\text{CO}_2$  (IPCC, 2007). Os números expressivos ressaltam a grande necessidade de um melhor entendimento dos mecanismos relacionados à nutrição nitrogenada da planta e o desenvolvimento de novas tecnologias visando a melhor utilização desse nutriente.

A aplicação de bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCV) pode contribuir com a nutrição e crescimento de diversas culturas agrícolas (BASHAN et al., 2014; FARRAR et al., 2014). Na cana-de-açúcar, os benefícios na nutrição nitrogenada da planta podem ocorrer de forma direta através da FBN (OLIVEIRA et al., 2006; BAPTISTA et al., 2014) e indireta através de uma maior exploração do solo pelo aumento do sistema radicular (GÍRIO et al., 2015; SUMAN et al., 2005). O aumento da contribuição da FBN na cana-de-açúcar

e/ou ganhos na promoção do crescimento do sistema radicular, com maior absorção de nutrientes pode contribuir com a nutrição nitrogenada da planta e obtenção de maior produtividade, aumento do balanço energético e redução nas emissões de gases de efeitos estufa no sistema cana-de-açúcar (YADAV et al., 2009).

Em diversas culturas agrícolas os estudos de aquisição e uso do N avançaram consideravelmente e têm contribuído para uma maior eficiência no uso desse nutriente (MACHADO; FERNANDES, 2001; GAJU et al., 2011; CHEN et al., 2015; JU et al., 2015). Na cana-de-açúcar algumas informações ainda são incipientes, como os mecanismos de aquisição, transporte e remobilização do N (ROBINSON et al., 2014).

Estudos de identificação de genótipos de cana-de-açúcar mais eficientes no uso do N estão mais avançados em outros países produtores de cana-de-açúcar, já no Brasil, poucos trabalhos foram desenvolvidos em relação à eficiência na absorção e eficiência de recuperação do N nos diferentes genótipos da cana-de-açúcar em condições de campo. É possível que as diferentes variedades plantadas nos canaviais brasileiros sejam contrastantes quanto à eficiência no uso do N e podem ter um manejo diferenciado buscando uma maior produção por unidade de N aplicado. Nesse sentido, é importante e estratégica a busca por variedades mais eficientes no uso do N (OTTO et al., 2016; KOLLN, 2016). Levando em consideração a relevância da cultura da cana-de-açúcar no cenário nacional e mundial, a busca por essas informações é de grande importância e trará retorno econômico e ambiental.

Com base nesses questionamentos as hipóteses consideradas nesta tese foram: a) a inoculação com BPCV contribui com a nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar pelo aumento da eficiência de absorção do N-fertilizante; b) Há diferenças entre as variedades de cana-de-açúcar com relação à nutrição e eficiência de recuperação do N proveniente do fertilizante em função da adubação nitrogenada na cana planta e seu efeito residual na primeira soqueira.

A tese foi organizada em dois capítulos, que foram: I) Eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante pela variedade RB92579 inoculada com bactérias promotoras do crescimento vegetal e, II) Eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante por três variedades de cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada de plantio.

Os objetivos deste trabalho foram:

- Avaliar se a inoculação com bactérias promotoras de crescimento influencia na nutrição nitrogenada, na produtividade e na eficiência de recuperação do N-fertilizante pela variedade RB92579 na cana planta, primeira e segunda soqueira;
- Verificar a contribuição do N-fertilizante na nutrição nitrogenada da variedade RB92579 na cana planta e nas duas soqueiras subsequentes;
- Avaliar a resposta de três variedades comerciais de cana-de-açúcar ao N-fertilizante na nutrição, desenvolvimento de raízes e parte aérea na cana planta e o efeito residual da adubação nitrogenada de plantio na primeira soqueira;
- Verificar a eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante de três variedades comerciais de cana-de-açúcar na cana planta e primeira soqueira, em função da adubação nitrogenada de plantio.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Cana-de-açúcar no Brasil: Situação Atual e Perspectivas

A produção brasileira de cana-de-açúcar vem crescendo nas últimas décadas, alcançando uma moagem de 665 milhões de toneladas na safra 2015/2016 (BRASIL, 2016a). Atualmente o país é o maior produtor e exportador mundial de açúcar, com produção de 36 milhões de toneladas, e um total de 24 milhões de toneladas exportadas na safra 2014/2015, valores que equivalem a 20% e 40% do volume mundial, respectivamente. O Brasil também é o segundo maior produtor mundial de etanol, com produção de 26,8 bilhões de litros, representando 28% da oferta mundial deste biocombustível em 2015, atrás apenas dos Estados Unidos, com 55,7 bilhões de litros e 58% da oferta mundial (ETHANOL RFA, 2016).

Na matriz energética brasileira, a biomassa da cana-de-açúcar é a segunda maior fonte primária de energia, perfazendo 15,7% da oferta interna total de energia no ano de 2014 (BRASIL, 2015a). Apenas a cana-de-açúcar já posicionaria o Brasil acima da média mundial no uso de fontes renováveis (13,2% em 2012), mas a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira foi de 39,4% em 2015, o que inclui também a energia hidráulica (11,5%), a lenha e o carvão vegetal (8,1%) e as outras fontes renováveis (4,1%). A energia produzida pelo bagaço e pela palha da cana-de-açúcar distribuída na rede foi o equivalente ao atendimento de quase 10 milhões de residências no ano de 2014, o que se estima ter evitado a emissão de 8,3 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (UNICA, 2016).

A cana-de-açúcar ocupou um total de 9,7 milhões de hectares na safra 2015/2016, o que representa 2,8 % do total de terras agricultáveis (340 milhões de hectares) e 1,1% do total do território nacional (851 milhões de hectares) (MANZATTO et al., 2009; MORAES; ZILBERMAN, 2014). O Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar foi sancionado em 2009 pelo governo brasileiro, permitindo a expansão dos atuais 9,7 milhões para um máximo de 64,7 milhões de hectares. Apesar de permitir um aumento de quase sete vezes da área cultivada, o Zoneamento proíbe a expansão de canaviais e a implantação de novas usinas em diversas regiões brasileiras. Esses critérios resultaram na exclusão de 92,5% do território nacional como área onde é permitido o cultivo de cana-de-açúcar (MORAES; ZILBERMAN, 2014).

A cana-de-açúcar é a segunda maior cultura agrícola em valor de produção no Brasil. Considerando a conversão da cana-de-açúcar em açúcar, etanol e bioeletricidade, o valor movimentado pelo setor canavieiro é ainda maior, tornando a cadeia da cana-de-açúcar a mais importante do agronegócio brasileiro no quesito valor da produção (NEVES; TROMBIN, 2014). Além dos produtos tradicionais, outros destinos têm sido dados à cana-de-açúcar, agregando mais valor à sua cadeia produtiva (CHEAVEGATTI-GIANOTTO et al., 2011).

No entanto, apesar da experiência adquirida ao longo de séculos e da sua proeminência nos mercados nacional e mundial, o setor sucroenergético brasileiro tem vivido uma de suas piores crises na história; resultado de uma conjunção de fatores econômicos, tecnológicos e climáticos, sendo o estopim a crise financeira que se iniciou em 2007 nos Estados Unidos e logo se alastrou pelo mundo, diminuindo o ritmo de investimentos na economia mundial como um todo. Nesse mesmo ano, a política energética do governo brasileiro começou a sofrer uma guinada em favor dos combustíveis fósseis (e em detrimento dos biocombustíveis) como consequência da descoberta de grandes reservas de petróleo na camada pré sal do litoral brasileiro, com volume de aproximadamente 50 bilhões de barris.

Por causa dessa crise, mais de 80 usinas já foram fechadas, de modo que atualmente existem 371 usinas no Brasil, sendo que mais de 60 delas estão em recuperação judicial, considerando tanto as usinas em operação quanto as inativas (UNICA, 2016). Apenas nos últimos dois anos, houve uma perda de mais de 100 mil empregos diretos no setor produtivo,

e ainda hoje muitas empresas do setor sucroenergético apresentam uma elevada dívida líquida e estão com uma parcela significativa de suas receitas comprometidas com o pagamento de juros.

Apesar de todos os problemas, o setor tem vislumbrado sinais de que poderá retomar seu crescimento. Segundo uma projeção para 2024 da OECD-FAO (2015), os preços do açúcar refinado e da cana-de-açúcar devem crescer respectivamente 2,6% e 4,8% ao ano. A área cultivada deverá aumentar 2,9% ao ano, atingindo um total de 11,5 milhões de hectares até 2024, e nesse mesmo período as exportações de açúcar devem crescer de 25,7 para 31,9 milhões de toneladas. Com relação ao etanol, a demanda doméstica de etanol anidro e hidratado está novamente apresentando tendência de crescimento. O etanol deverá seguir com um papel importante no mercado de ciclo Otto, tendo em vista que os flex-fuel constituiram 58% da frota nacional de veículos leves em 2013 (20,7 milhões de um total de 35,8 milhões), e a projeção é que alcancem 78% de participação no ano de 2023 (EPE, 2014a).

O capital estrangeiro segue com presença marcante no complexo canavieiro brasileiro. As empresas estrangeiras buscam aproveitar a competitividade dos açúcares, do bagaço e da palha da cana-de-açúcar enquanto matérias-primas, pois tem se estimado que o cultivo, a colheita e o transporte da biomassa representem de 80 a 90% do custo total de produção dos biocombustíveis. Essa vantagem comparativa da cana brasileira e a maturidade do setor sucroenergético permitem que se vislumbre uma exportação crescente para os diversos países que precisam cumprir metas de redução nas emissões de gases do efeito estufa, principalmente depois dos acordos firmados em 2015 na 21ª Cúpula do Clima de Paris (COP 21). No caso do Brasil, a meta é que os biocombustíveis, que hoje respondem por 15% da matriz energética, passem a representar 18% em 2030, e que até 2050 sejam produzidos 50 bilhões de litros de etanol por ano, o que significa 20 bilhões de litros acima da atual produção.

Essa situação indica que novas oportunidades deverão se abrir para o Brasil nos próximos anos, e o país deverá continuar figurando como um dos protagonistas no comércio internacional e no desenvolvimento tecnológico relacionado à cana-de-açúcar e aos diferentes produtos derivados dessa cultura agrícola (OECD-FAO, 2015).

## **2.2 Nutrição Nitrogenada da Cana-de-açúcar**

O N é um dos elementos mais abundantes na atmosfera, mas está em forma pouco disponível para as plantas e, depois do carbono, é o mais exigido para o crescimento vegetal, sendo componente das proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, co-enzimas, hormônios vegetais e metabólitos secundários. Sua baixa disponibilidade no solo normalmente limita o rendimento da maioria das culturas agrícolas (ROBERTSON; VITOUSEK, 2009).

A cana-de-açúcar é uma cultura com alta demanda e extração de N. Considerando a área plantada no Brasil de nove milhões de hectares, a produtividade média de 70 Mg de colmos ha<sup>-1</sup> e a exigência média de 1,0 kg N para produzir uma tonelada de colmo, chega-se a um valor de 630 mil toneladas de N extraído e exportado com os colmos, que podem não retornar ao solo (IBGE, 2016; VITTI et al., 2008). O N na cana-de-açúcar está envolvido em diversos processos, entre eles o crescimento da planta, expansão das folhas e colmos e formação de proteínas (BELL et al., 2015).

Na deficiência do N os sintomas mais nítidos são a redução do tamanho dos perfilhos, redução da área foliar e longevidade das folhas, clorose das folhas mais velhas, diminuição da atividade meristemática da parte aérea. Dessa forma, a falta de N afeta todo o processo fotossintético e de assimilação de CO<sub>2</sub>, resultando em redução da produtividade e da longevidade do canavial (SCHROEDER et al., 2015).

O acúmulo de N acompanha o crescimento da cana-de-açúcar e está diretamente relacionado com o desenvolvimento da planta. Na fase inicial de crescimento a extração é baixa, tanto na cana planta quanto para a soca. Na segunda fase acentuam-se as extrações e são observados os maiores acúmulos de N. A terceira fase tem o menor acúmulo de N na parte aérea com 10% do total acumulado no ciclo, para a cana planta e soca (FRANCO et al., 2011; LEITE et al., 2016).

Na colheita, a extração de N excede a quantidade de N fertilizante aplicada. Os valores de exportação de N nos colmos chegam a valores acima de 150 kg de N ha<sup>-1</sup> (SCHULTZ et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2010). A quantidade de N removida nos colmos em sua maioria não retorna ao sistema de produção (N exportado). Já o N acumulado na parte subterrânea (raiz + rizoma), folhas secas e ponteiros (no sistema de colheita sem queima), permanecem e são posteriormente disponibilizados para os ciclos seguintes, sendo esse tempo variável em função de diversos fatores (FORTES et al., 2013; TRIVELIN et al., 2013).

Como fornecedores de N para os canaviais, destacam-se o solo, fertilizantes minerais, adubos verdes, resíduos e subprodutos da produção agrícola e industrial, a reserva do tolete plantado e a fixação biológica de N (FBN) (OTTO et al., 2013; MARIANO et al., 2016; AMBROSANO et al., 2005; CARNEIRO; TRIVELIN; VITORIA, 1995; URQUIAGA et al., 2012). De acordo com o manejo da cultura cada fonte terá maior ou menor importância na nutrição da planta.

## **2.3 Fontes de N para a Cana-de-açúcar**

### **2.3.1 Solo**

A matéria orgânica do solo é indiscutivelmente a principal reserva de N para as plantas e 95% do total do N da superfície do solo são encontrados como complexos orgânicos (DOURADO-NETO et al., 2010; OTTO et al. 2013). A mineralização da matéria orgânica libera N inorgânico, que constitui a principal fonte de N em muitos sistemas agrícolas (HOLST et al., 2012). A fração do N do solo que participa do ciclo de reações de mineralização-imobilização que em algum momento resulta em formas disponíveis para as plantas varia com o tipo de solo e manejo. Em alguns solos brasileiros o conteúdo de N pode variar de 800 a 6.000 kg de N ha<sup>-1</sup> na camada superficial (CANTARELLA, 2007).

O N está disponível no solo em diversas formas, incluindo amônio, nitrato, aminoácidos e peptídios. Nitrato e amônio são as principais fontes de N inorgânico absorvidos pelas plantas. O nitrato geralmente está presente em maiores concentrações (1-5 mM) que o amônio (100-200 µM), na solução dos solos agrícolas (HAWKESFORD et al., 2012). O nitrato é também mais móvel no solo que o amônio e, portanto, mais disponível para as plantas (MILLER; CRAMER, 2004). Nos solos agrícolas não fertilizados, o amônio pode estar presente em maiores concentrações que o nitrato, e aminoácidos podem ser uma fonte de N adicional. Concentrações de aminoácidos na solução do solo variando entre 0,1 a 100 µM dominam o *pool* de N ligado as partículas do solo (JONES et al., 2002; JAMTGARD et al., 2010) e podem ser uma considerável fonte de N na nutrição da cana-de-açúcar (HOLST et al., 2012; BRACKIN et al., 2015).

### **2.3.2 Fertilizantes minerais e adubação nitrogenada**

Para suprir a carência de N nos solos, principalmente os tropicais, uma das principais estratégias adotadas é a aplicação de fertilizantes nitrogenados (LADHA et al., 2005). E de fato, os incrementos de produtividade com a fertilização nitrogenada são significativos em diversas culturas agrícolas (MARIANO et al., 2016; HARTMANN et al., 2015; JU et al.,



2015) o que a torna uma prática de grande importância para o atendimento da demanda crescente de alimentos no mundo (SNYDER, 2009).

Estima-se que o consumo mundial de N fertilizante seja de 104.252 Mt toneladas, com previsão de aumento da demanda para 115,8 Mt em 2017 (IFA, 2013a), sendo que aproximadamente 55% desse N seja usado para a produção de cereais (IFA, 2013b). A obtenção do fertilizante nitrogenado ocorre através de processos industriais que demandam grandes quantidades de energia. Para a produção de 1 kg de N-ureia, principal N fertilizante utilizado hoje no mundo, são gastos 1,3 litros de combustível fóssil (RAMÍREZ; WORRELL, 2006), o que torna seu custo elevado em termos econômicos e ambientais.

A cana-de-açúcar consome anualmente mais de quatro milhões de toneladas de fertilizantes, o que corresponde a cerca de 14% das vendas totais de fertilizantes no Brasil, perdendo em participação somente para soja e milho (IFA, 2013a). Já em relação aos fertilizantes nitrogenados a cultura se posiciona com a segunda maior demanda de N fertilizante no país com uma participação de 22% do total, o que corresponde a 628 mil toneladas (IFA - International Fertilizer Industry Association, 2013a). Considerando a área plantada de mais de nove milhões de hectares, a produtividade média de 70 Mg de colmos  $\text{ha}^{-1}$  e a exigência média de 1,0 kg N para produzir uma tonelada de colmo, chega-se a um valor de 630 mil toneladas de N extraído e exportado com os colmos, que em sua maioria não retorna ao solo (IBGE, 2016; VITTI et al., 2008).

As principais fontes de N utilizadas na fertilização da cana-de-açúcar são a ureia, sulfato de amônio e nitrato de amônio. Pelo menor custo por unidade de N, a ureia (45% de N) é a fonte de N mais utilizada no Brasil e no mundo, inclusive na cana-de-açúcar (MEGDA et al., 2015). Além do menor custo de produção, apresenta vantagens em relação ao transporte e aplicação em relação aos outros fertilizantes nitrogenados sólidos. Sua desvantagem é a possibilidade de perdas por volatilização da  $\text{NH}_3$ , principalmente quando aplicada na superfície do solo (CANTARELLA et al., 2008). O sulfato de amônio (20% de N) tem o maior preço por unidade de N, além do maior custo com transporte e aplicação. Já o nitrato de amônio (33% de N) tem restrições na produção, comercialização e transporte, o que dificulta sua utilização (CANTARELLA, 2007; MALAVOLTA et al., 2011).

Outras fontes de N menos utilizadas são os fertilizantes fluidos. A aquamônia, a amônia anidra, uran e sulfuran são alternativas com preços competitivos. Entretanto, requerem equipamentos especiais por necessitarem de incorporação ao solo, manuseio e aplicação (CANTARELLA, 2007). Quando incorporados ao solo tem eficiência comparável à outras fontes de N (TRIVELIN et al., 1996).

A adubação nitrogenada de plantio nas condições de cultivo comercial no Brasil é concentrada no sulco de plantio no momento da instalação da cultura, com aplicação média de 50 kg N  $\text{ha}^{-1}$  (VITTI et al., 2008). Já em soqueira, a adubação é maior, em média de 100 kg N  $\text{ha}^{-1}$  (FORTES et al., 2013), sendo o fertilizante aplicado em cobertura após a brotação, com ou sem incorporação (VITTI; MAZZA, 2002). Em solos com textura arenosa recomenda-se o parcelamento da adubação, no entanto, em função das grandes áreas e do custo de produção, a adubação das soqueiras é efetuada em uma única parcela, aproximadamente 30 a 40 dias após o corte (VITTI et al., 2008).

### **2.3.3 Resíduos agrícolas e da indústria da cana-de-açúcar**

Uma das características da produção da cana-de-açúcar e seus produtos é a grande produção de resíduos, sejam eles oriundos da produção agrícola ou da indústria, dentre os quais alguns são fontes de N e aplicados nas lavouras. Entre eles se destacam a torta de filtro, a vinhaça, a palha proveniente da colheita crua e aqui se considerará também a biomassa do sistema radicular do ciclo anterior.

A torta de filtro é um resíduo proveniente da produção de açúcar. A produção média é de 30 kg de torta de filtro  $\text{Mg}^{-1}$  de cana moída, com umidade em torno de 75%. Na sua composição química se destacam as porcentagens de P e Ca, e o N varia entre 0,87 a 1,4% da matéria seca (ORLANDO FILHO et al., 1983). A torta de filtro é aplicada principalmente em cana-planta, nas dosagens de 30  $\text{Mg ha}^{-1}$  e 60  $\text{Mg ha}^{-1}$ , no sulco de plantio e em área total, respectivamente. O que corresponderia a uma adição de 75 e 150  $\text{kg ha}^{-1}$  de N, no sulco de plantio e em área total, respectivamente (ORLANDO FILHO et al., 1983).

A vinhaça, resíduo líquido resultante da etapa de destilação do etanol, é produzida em média, na proporção de 10 a 14 litros para cada litro de etanol. Sua composição química é bastante variável, principalmente em função do tipo de mosto utilizado na fermentação para produção de etanol (CHRISTOFOLETTI et al., 2013). De acordo com o tipo de mosto apresentará diferentes quantidades de N, variando de 0,2 a 0,8  $\text{kg m}^{-3}$  de N de vinhaça (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1984). Ou seja, quando aplicada adequadamente, a aplicação de 150  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  de vinhaça equivaleria a uma adubação entre 30 a 120  $\text{kg ha}^{-1}$  de N. Resende et al. (2006) estimou que a aplicação de 80  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  de vinhaça adicionaria anualmente uma quantidade 22,7  $\text{kg ha}^{-1}$  de N.

Além destes, a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, sem queima, adiciona na superfície do solo uma cobertura de palha que varia de 10 a 30  $\text{Mg}$  de massa seca  $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ , o que corresponde a uma quantidade entre 40 a 100  $\text{kg ha}^{-1}$  de N (ROBERTSON; THORBURN, 2000; SCHULTZ et al., 2010; FORTES et al., 2013; CARVALHO et al., 2013). Entretanto, a dinâmica de decomposição e liberação de nutrientes desse material depende de fatores ambientais como aeração, evapotranspiração e umidade do solo (ROBERTSON; THORBURN, 2000) e a composição bioquímica desses resíduos, relação C:N, nutrientes, lignina, celulose, hemicelulose e polifenóis (FORTES et al., 2012). Com relação C:N da palha de 100:1, em média, a decomposição proporciona intensa imobilização pela biomassa microbiana do solo e uma baixa mineralização. Podendo resultar em consumo de N de outras fontes de N do solo ou fertilizante. Sendo uma média de recuperação por ano de 5% do N disponibilizado (VITTI, 2003; TRIVELIN et al., 2013). Os estudos de balanço de  $^{15}\text{N}$  indicaram que os resíduos culturais são suplementares a fontes de N para a cana-de-açúcar e podem contribuir para a redução da necessidade de N fertilizante desde que a palha seja adicionada ao solo anualmente (FORTES et al., 2013). Entretanto, para compensar a imobilização de N durante a decomposição da palha, o aumento da adubação nitrogenada nas soqueiras em áreas de cana-crua foi sugerido (ROSSETO et al., 2010). A estimativa é que o sistema entre em equilíbrio com fornecimento constante de 40  $\text{kg ha}^{-1}$  de N em 40 anos (TRIVELIN et al., 2013).

Já a biomassa abaixo da superfície do solo, composta pelas raízes e rizomas da cana-de-açúcar, muitas vezes não é considerada no balanço de N. Carvalho et al. (2013) encontrou valores entre 6,68 e 7,33 e entre 3,85 e 6,62  $\text{Mg ha}^{-1}$  de matéria seca (MS) de raízes e rizoma na cana planta e 1ª soqueira, respectivamente. Com valores de estoque de N abaixo da superfície em média de 34  $\text{kg ha}^{-1}$  de N (OLIVEIRA, 2011). Considerando que a cana-de-açúcar remobiliza o N da parte aérea para o sistema radicular no final do ciclo e parte desse N é utilizado para a rebrota da soqueira seguinte, essa biomassa abaixo da superfície é uma fonte de N para a cana-de-açúcar (ROBINSON et al., 2009). No momento da renovação do canavial, as operações de preparo de solo expõem esse material com consequente mineralização e disponibilização do N, apesar da recuperação desse N ser considerada baixa (TRIVELIN et al., 2013).

### 2.3.4 Adubação verde

Em geral, adota-se a prática da adubação verde, sobretudo com leguminosas, por ocasião da reforma do canavial antes do plantio da cana de ano e meio, quando o solo está em pousio (WUTKE; AREVALO, 2006). Essa prática pode aportar consideráveis quantidades de N ao solo. Ambrosano et al. (2003) obtiveram valores de 9,1 Mg ha<sup>-1</sup> de massa seca de parte aérea e 1,1 Mg ha<sup>-1</sup> de raízes de crotalária contendo 240 kg ha<sup>-1</sup> de N. Outros aportes consideráveis de N foram apresentados por Wutke; Arevalo (2006), onde os adubos verdes: *Crotalaria juncea*, soja e feijão de porco, aportaram 313, 261 e 190 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente.

Ambrosano et al. (2005) avaliaram o aproveitamento do N proveniente do adubo verde (*C. juncea*) e/ou sulfato de amônio, ambos marcados com <sup>15</sup>N. Os autores observaram que independentemente da fonte, a recuperação do N foi semelhante, com recuperação de N mineral + N do adubo de 39% na colheita aos 18 meses após o plantio. Concluiu-se que a adubação verde com o aporte de N pode suprimir a adubação nitrogenada de plantio sem prejuízos a produtividade da cana planta.

### 2.3.5 Reserva do tolete

No período de desenvolvimento inicial, até os 90 dias após o plantio, a reserva do tolete supre boa parte das necessidades nutricionais e tem efeito significativo no desenvolvimento inicial da planta (CARNEIRO; TRIVELIN; VITORIA, 1995). Após a emergência, 65% do N da reserva do tolete pode ser liberado até 90 dias da emergência, e cerca de 85% do N translocado pode ser direcionado para a parte aérea (SAMPAIO et al., 1988). Carneiro; Trivelin; Vitoria (1995) evidenciaram que nos 50-60 dias seguintes ao plantio, as maiores taxas de translocação do N do tolete deram suporte à emergência e ao desenvolvimento inicial de raízes de fixação e do perfilho primário.

No plantio comercial da cana-de-açúcar utiliza-se em torno de 10 a 18 Mg ha<sup>-1</sup> de colmos para o plantio manual e mecanizado, respectivamente (RIPOLLI et al., 2007). Considerando um teor médio de N nos colmos de 0,4 a 0,8%, o valor de N pode variar de 10 a 18 kg ha<sup>-1</sup>, dependendo da quantidade de colmos plantados, o que representa cerca de 10% da necessidade da cultura para produção de 100 Mg ha<sup>-1</sup> (FRANCO et al., 2010; VITTI et al., 2008). Essa quantidade suficiente para atender as necessidades da planta nos estágios iniciais (CARNEIRO; TRIVELIN; VITORIA, 1995).

### 2.3.6 Fixação biológica de nitrogênio

A hipótese de ocorrência da FBN na cana-de-açúcar teve como base o trabalho pioneiro de Döbereiner (1953) quando foi verificada a ocorrência de *Azotobacter chroococcum* em solos ácidos da baixada fluminense, no estado do Rio de Janeiro. Nos anos seguintes a presença de *Beijerinckia fluminensis* associada à rizosfera de cana-de-açúcar (DÖBEREINER; RUSCHEL, 1958) e *Azotobacter paspali* associada à rizosfera de *Paspalum notatum*, cultivar batatais (DÖBEREINER, 1966), sendo essas duas últimas fixadoras de N<sub>2</sub> atmosférico. Posteriormente diversas bactérias com capacidade para fixar o N atmosférico foram isoladas de tecidos internos da cana-de-açúcar (BALDANI et al., 2002).

Estudos de quantificação da FBN foram conduzidos ao ar livre, em potes contendo solo enriquecido com <sup>15</sup>N (LIMA et al., 1987). Neste ensaio foram testadas quatro variedades e apenas duas apresentaram resultados positivos, na mais promissora, CB47-89, 60% do N necessário para a cultura veio da FBN. Em outro experimento pioneiro, também com solo marcado com <sup>15</sup>N e *Brachiaria* como controle negativo, foi avaliado a FBN em mais 10 variedades de cana-de-açúcar por três anos. A resposta foi variada novamente, e a variedade

SP70-1143 foi a mais promissora, recebendo via FBN, 60% do N presente em seus tecidos, e como no caso anterior, decresceu ao longo dos anos (URQUIAGA et al., 1992). Em estudos posteriores, já com a seleção e reinoculação de bactérias fixadoras de N observou-se um incremento na nutrição da planta via FBN de cerca de 30% (OLIVEIRA et al., 2002).

Entretanto, estudos desenvolvidos em outros países não mostraram contribuição significativa da FBN na nutrição da cana-de-açúcar (BIGGS et al., 2000; HOEFSLOOT et al., 2005) e a ocorrência da FBN na cana-de-açúcar com frequência é questionada (BIGGS et al., 2000; JORIS, 2015). No entanto, Baptista et al. (2014) confirmaram que algumas variedades brasileiras de cana-de-açúcar podem receber significativas quantidades de N via FBN.

Embora progressos tenham sido realizados em relação ao entendimento da interação planta/bactéria fixadora de N, essa contribuição no balanço de N ainda é pouco clara. Mais conhecimento e novas técnicas de avaliação e quantificação da FBN são necessárias para estender seus benefícios para outras espécies agricultáveis (OLIVARES; BEDMAR; SANJUÁN, 2013).

Nesse sentido, foi realizado recentemente um estudo inovador que evidenciou que a planta modelo para C4 *Setaria viridis*, recebeu significativo aporte de N via FBN. As raízes de *S. viridis* foram efetivamente colonizadas pela bactéria inoculada resultando em um aumento no crescimento da planta. A utilização do marcador com <sup>13</sup>N forneceu evidência direta da captação do marcador e incorporação em proteína pela planta. Os autores ainda ressaltaram que a adoção de *S. viridis* como um modelo pode promover as pesquisas sobre os mecanismos de FBN com bactérias associativas e elucidar mecanismos ainda pouco claros (PANKIEVICZ et al., 2015).

## **2.4 Absorção de N pela Cana-de-açúcar**

As concentrações e disponibilidade de N no solo podem variar substancialmente no tempo e espaço, em função de inúmeros fatores inerentes às características químicas, físicas e biológicas do solo. Como consequência, as plantas têm desenvolvido mecanismos para modular sua eficiência de aquisição de N em resposta a disponibilidade e forma do N externo, assim como sua demanda de N durante seu ciclo de vida (ROBINSON et al., 2014). Dentre esses mecanismos, aqui será destacada o desenvolvimento de um sistema radicular eficiente na exploração do solo, associação com microrganismos promotores de crescimento vegetal e os sistemas de transportadores que mediam a absorção de N nas diferentes concentrações.

### **2.4.1 Sistema radicular da cana-de-açúcar**

Um eficiente sistema radicular influencia diretamente na absorção de N. Na cana-de-açúcar, as raízes de fixação originadas dos primórdios radiculares são as primeiras a se desenvolverem e, até os 30 dias auxiliam na absorção de água e nutrientes (BACCHI, 1983). Posteriormente, inicia-se o desenvolvimento das raízes dos perfilhos, que após os 90 dias após o plantio é a principal fonte de absorção de água e nutrientes da planta (DILLEWIJN, 1952). A proporção de cada tipo de raiz, desenvolvimento, arquitetura e morfologia dependerá do fator genético, das propriedades químicas e físicas do solo e de fatores climáticos (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2008).

Um dos fatores de maior importância é a arquitetura e distribuição do sistema radicular da planta, assim como sua dinâmica de crescimento. O desenvolvimento do sistema radicular tem influência direta sobre algumas características da planta, entre elas, a eficiência na absorção dos nutrientes do solo (HERMANS et al., 2006). Na fase de crescimento um extenso sistema radicular com grande crescimento horizontal e vertical permite explorar um grande volume de solo e maior captura de N durante o desenvolvimento da cultura (ROBINSON et al 2009).

Na deficiência de N, o crescimento da raiz é acelerado e as raízes laterais aumentam de tamanho, com aumento substancial da morfologia do sistema radicular (TRANBARGER et al., 2003; LOPES-BUICO et al., 2003). Otto et al. (2009) estudando a distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada de plantio observou que a adubação não promoveu maior acúmulo de raízes, mas causou mudanças na distribuição do sistema radicular no solo. A ausência da adubação nitrogenada promoveu melhor distribuição do sistema radicular no perfil do solo, com 50, 34 e 16 % nas camadas de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m de profundidade, respectivamente; nos tratamentos fertilizados, em média, as raízes concentraram-se na camada superficial, com 70, 17 e 13 % para as mesmas camadas.

GuoHua et al. (2010) sugerem um idiótico de sistema radicular para milho, com arquitetura para eficiente aquisição de N, incluindo raízes profundas e com alta atividade para absorver N antes que esse se mova para camadas profundas do solo; crescimento vigoroso das raízes laterais sob condições de alto fornecimento de N mas também com aumento de N disponível no solo.

#### **2.4.2 Associação da cana-de-açúcar com microrganismos promotores do crescimento vegetal**

A cana-de-açúcar é capaz de se associar com uma grande diversidade de bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCV) e obter diversos benefícios (OLIVARES et al., 1996; BENEDUZI et al., 2013). Alguns efeitos estão direta ou indiretamente relacionados com a nutrição da planta, como maior absorção de N (SUMAN et al., 2005), FBN (OLIVEIRA et al., 2006; PANKIEVICZ et al., 2015), produção de fitormônios e sideróforos (SPAEPEN; VANDERLEYDEN, 2011; LOGESHWARAN et al., 2009), aumento da brotação e da biomassa (de LA CRUZ et al., 2014; GÍRIO et al., 2015) e solubilização de fósforo e zinco (SUNDARA et al., 2002; SARAVANAN et al., 2007).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos com inoculação de BPCV selecionadas em cana-de-açúcar (MUNOZ-ROJAS; CABALLERO-MELLADO, 2003; SILVA et al., 2009; SCHULTZ et al., 2014) e o aumento da biomassa do sistema radicular é um dos principais benefícios obtidos pela inoculação com BPCV (SILVA et al., 2012). O aumento da área radicular com consequente aumento do volume de solo explorado contribui para uma maior exploração do solo, com consequente maior absorção de água e nutrientes, entre eles o N (SUMAN et al., 2005; MUTHUKUMARASAMY et al., 2006).

Mantelin; Torraine (2004) afirmaram que tanto BPCV quanto a disponibilidade de  $\text{NO}_3^-$  afetam a absorção de  $\text{NO}_3^-$  e arquitetura radicular. Segundo os autores a baixa disponibilidade externa de  $\text{NO}_3^-$  induz a expressão de genes dos transportadores de  $\text{NO}_3^-$  e também promove o alongamento das raízes laterais. Afirmam também, que apesar da capacidade de fixar o N atmosférico, as BPCV não são capazes de fornecer grandes quantidades de N para as plantas. No entanto, tem grande impacto na nutrição nitrogenada pelo aumento da capacidade de absorver  $\text{NO}_3^-$ , indiretamente como uma consequência do estímulo ao desenvolvimento de raízes laterais e possivelmente de forma direta pelo estímulo ao sistema de transportadores de  $\text{NO}_3^-$ . Ressalta-se, no entanto, que em cana-de-açúcar não foram realizados estudos avaliando se a aplicação de BPCV estimula a expressão de genes relacionados aos transportadores de N.

Robinson et al. (2014) ressaltaram que enquanto o estudo relacionado a FBN e interação planta/bactéria em cana-de-açúcar recebeu maior atenção nas últimas décadas, o conhecimento sobre a interação entre a cana-de-açúcar e fungos micorrízicos, e os benefícios dessa interação tem sido limitada. A maior parte das plantas terrestres forma simbiose com fungos micorrízicos, que estende seu sistema radicular, aumentando a absorção de nutrientes. Micorrizas arbusculares (MA) são provavelmente a maior simbiose terrestre formada com 70-

90% de espécies de plantas terrestres (PARNISKE, 2008), aumentando o acesso das plantas aos nutrientes, especialmente P e N (ROONEY et al., 2009).

Alguns estudos desenvolvidos na África do Sul, Índia e Austrália mostraram efeitos positivos da inoculação com fungos micorrízicos na cana-de-açúcar (JAMAL et al. 2004; KIERS et al., 2011). Algumas práticas agrícolas auxiliam na associação entre planta e micorrizas. Reis et al. (1999) analisando a composição da rizosfera da cana-de-açúcar em três regiões brasileiras observou a presença de 14 espécies de MA. Com a diversidade de fungos mantida quando a cana não era queimada previamente a colheita. A rotação de culturas também beneficia a associação micorrizica com aumento de produtividade de colmos e de açúcar (AMBROSANO et al., 2010).

O melhoramento das culturas modernas tem, sem perceber, selecionado contra a simbiose com MA por seleção de cultivares sob altas doses de fertilizantes. Variedades selecionadas em condições de baixo suprimento de fertilizantes são mais responsivas a colonização de MA. Esse estudo não tem sido realizado com cana-de-açúcar (ROBINSON et al., 2014). Mas há evidências que algumas variedades de cana-de-açúcar no Brasil possuem menor afinidade para associação com fungos micorrízicos em condições de baixo suprimento de fósforo (ARRUDA, 2015). Segundo Scortecchi et al., (2012) geneticistas e fisiologistas de cana-de-açúcar deveriam somar esforços para criar ferramentas para permitir programas de melhoramento desenvolver genótipos com alto potencial de micorrização, que poderia certamente ter grande impacto na produção, inclusive na nutrição das plantas.

### 2.4.3 Transportadores de N em cana-de-açúcar

A absorção de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$  ocorre através de sítios específicos (proteínas integrais de membrana) que permitem a passagem de íons do meio externo para o interior das células. A absorção desses íons ocorre através de processos dependentes de energia. As bombas de prótons ( $\text{P-H}^+\text{ATPase}$ ) hidrolisam ATP bombeando  $\text{H}^+$  para fora da célula, gerando um gradiente de potencial eletroquímico, que é composto do potencial elétrico através da membrana ( $\Delta\Psi$ ) e da diferença de potencial químico para o íon  $\text{NH}_4^+$  ou  $\text{NO}_3^-$  ( $\Delta\mu \text{NH}_4^+$  ou  $\Delta\mu \text{NO}_3^-$ ) entre o interior e o exterior da célula (FERNANDES; SOUZA, 2006). O gradiente de prótons gera uma força próton motriz, direcionando os  $\text{H}^+$  do exterior da célula para o citossol. O gradiente de potencial eletroquímico contribui favoravelmente para a entrada de cátions na célula, ao passo que os ânions são absorvidos acompanhando o fluxo de prótons. Desse modo, a absorção do  $\text{NH}_4^+$  é passiva e pode ocorrer através de um transportador do tipo uniporte, enquanto a absorção do  $\text{NO}_3^-$  é um processo ativo secundário, em simporte com 2  $\text{H}^+$  (FERNANDES; SOUZA, 2006).

Os sistemas de transporte são classificados de acordo com a afinidade dos mesmos pelo íon transportado, sendo denominados de sistema de transporte de alta afinidade (HATS – high affinity transport system) ou sistema de transporte de baixa afinidade (LATS – low affinity transport system). De uma forma geral, a concentração de  $1 \text{ mmol L}^{-1}$  de  $\text{NH}_4^+$  ou  $\text{NO}_3^-$  pode ser tomada como um limite de concentração, abaixo do qual opera o sistema de alta afinidade, e acima opera o sistema de baixa afinidade (SOUZA; FERNANDES, 2006; HAWKESFORD et al., 2012).

Os HATS operam sob baixas concentrações de  $\text{NO}_3^-$ , podendo ser divididos em constitutivos (cHATS) que operam a concentrações de aproximadamente  $0,2 \text{ mM}$  e os induzidos (iHATS) que operam a concentrações menores que  $0,2 \text{ mM}$ . Já os transportadores de baixa afinidade são caracterizados como constitutivos, ativados quando em presença de concentrações externas de  $\text{NH}_4^+$  e/ou  $\text{NO}_3^-$  acima de  $1 \text{ mmol L}^{-1}$  (SOUZA; FERNANDES, 2006; HAWKESFORD et al., 2012).

Estudos moleculares identificaram famílias de genes que codificam para os transportadores de amônio (AMT-ammonium transporter) e nitrato (NRT-nitrato transporter). Os membros da família de transportadores AMT1 são responsáveis pelo transporte de alta afinidade em plantas (HATS), e os AMT2, pelo transporte de baixa afinidade. Para nitrato, nessa família os genes NRT1 codificam para os transportadores de baixa afinidade e os genes NRT2 para os sistemas de alta afinidade. Dois membros da família NRT2: AtNRT2.1 e AtNRT2.2, corresponderiam ao sistema iHATS, enquanto AtNRT2.3, AtNRT2.4, AtNRT2.5, AtNRT2.6 e AtNRT2.7 corresponderiam ao sistema cHATS (SOUZA; FERNANDES, 2006). Os dois membros de NRT1 (AtNRT1.1 e AtNRT1.2) e NRT2 (AtNRT2.1 e AtNRT2.2) facilitam a absorção de nitrato nas raízes (Tsay et al. 2007; Dechorgnat et al. 2011). Outros membros da família NRT1 estão envolvidos com o carregamento e descarregamento de nitrato no xilema (NRT1.5, NRT1.8) e floema (NRT1.9), enquanto outros membros de NRT2 facilitam o transporte de nitrato para o vacúolo (TSAY et al. 2007; DECHORGNAT et al. 2011).

Absorção do N orgânico, incluindo aminoácidos e di e tripeptídeos pelas raízes de *Arabidopsis* ocorreram principalmente através de transportadores de aminoácidos AtLHT1 e AtAPP5 (NASHOLM et al. 2009) e transportadores de peptídeos AtPTR1 e AtPTR5 (KOMAROVA et al. 2008).

Os transportadores de N foram caracterizados em diversas culturas agrícolas e com muitos homólogos em diferentes espécies (PLETT et al., 2010). Porém, poucos estudos sobre caracterização dos transportadores de N foram realizados com cana-de-açúcar (ROBINSON et al., 2014). Nesse sentido, alguns estudos foram iniciados sobre a caracterização fisiológica e molecular de transportadores de nitrato e amônio em cana-de-açúcar (LIMA et al., 2012; VITTI et al., 2012).

VITTI et al. (2012) estudando a regulação diferencial de genes dos transportadores de amônio em cana-de-açúcar encontraram dois genes de AMTs, nas subfamílias, AMT1 com dois membros e AMT2 com quatro membros. Nesse estudo, durante a fase de privação de N, o aumento do influxo de <sup>15</sup>N-amônio foi seguido por uma alta expressão das isoformas ScAMT2;3 e ScAMT3;1, indicando um papel desses transportadores para absorção de amônio durante a deficiência de N. Os autores ressaltaram que a caracterização dos transportadores de amônio na cana-de-açúcar é o primeiro passo em direção a uma visão mais abrangente sobre a eficiência de absorção e remobilização de N e a eficiência no uso do N na cana-de-açúcar.

Em estudo sobre a regulação de transportadores de nitrato na cana-de-açúcar, Lima et al. (2012) encontrou 22 membros da família NRT/PTR. O aumento da expressão dos níveis exibidos pelo transportador de nitrato de dupla afinidade ScNRT1.1, e o de baixa afinidade ScNRT1.2 durante deficiência de N sugerem um papel desses genes na absorção de nitrato nas raízes. Os transcritos responsáveis pelo carregamento (ScNRT1.5) e descarregamento (ScNRT1.8) do xilema foram diferencialmente regulados sob a carência de N, o que sugere uma resposta adaptativa para manter a homeostase de nitrato nas raízes sob limitação de N no solo. O papel dos membros da família NRT1, ScNRT1.4 no acúmulo e ScNRT1.9 no transporte de nitrato da raiz para a parte aérea foi indicado pela alta transcrição acumulada no colmo. Os autores salientaram que a coordenação do transporte do nitrato é mediada por membros de NRT1 na cana e pode garantir uma apropriada distribuição do nitrato em diferentes órgãos e tecidos para neutralizar a flutuação do status do N que ocorre no solo.

## **2.5 Eficiência no uso do N na cana-de-açúcar**

A eficiência no uso do N (EUN) pode ser definida como a máxima produtividade por unidade de N aplicado, absorvido, utilizado ou remobilizado pela planta para produzir grão ou biomassa (MOLL et al., 1982; XU; FAN; MILLER, 2012; BELL et al., 2015). Definições de

EUN têm sido agrupadas ou classificadas como eficiência de absorção e utilização, eficiência agrônômica, eficiência fisiológica, eficiência de recuperação aparente e fator parcial de produtividade do N aplicado (DOBERMANN, 2007).

A determinação da EUN em cultivos agrícolas é uma importante abordagem para avaliar a aplicação de N fertilizantes e seu papel na produtividade das culturas (FAGERIA; BALIGAR, 2005) e são ferramentas importantes a serem inseridas nos programas de melhoramento genético para obtenção de materiais mais produtivos e eficientes no uso do N (GAJU et al., 2011). Assim como a adoção de práticas de manejo que consideram o tipo de solo, a cultura, o clima, o sistema de cultivo, e tecnologias, como utilização de fertilizantes de liberação controlada e variedades mais eficientes no uso do N são necessárias para o aumento da eficiência de nutrientes fornecidos pelo solo e fertilizantes.

Existem diversas definições e formas de determinação da EUN descritas na literatura (MOLL et al., 1982; DOBERMANN, 2007, BELL et al., 2015). Entre os parâmetros de eficiência de fertilizantes utilizados: eficiência agrônômica ( $EA_N$ ), eficiência aparente de recuperação ( $EAR_N$ ), eficiência fisiológica ( $EF_N$ ) e o fator de parcial de produtividade do N aplicado ( $FPP_N$ ) (NOVOA; LOOMIS, 1981; XU; FAN; MILLER, 2012). Com algumas modificações esses índices são comumente usados na pesquisa agrônômica para avaliar a eficiência do N aplicado. Em estudos de campo estes índices são calculados baseados na diferença de produção da cultura e no total de N absorvido na biomassa da parte aérea entre parcelas fertilizadas e não fertilizadas (método da diferença), ou, de forma mais precisa utilizando fertilizante com marcação com o isótopo  $^{15}N$  para determinar a recuperação do N aplicado (DOBERMANN et al., 2007; TRIVELIN et al., 1994).

A aplicação de métodos com o isótopo estável  $^{15}N$  permitem monitorar as transformações individuais do N no solo, mesmo quando múltiplas transformações ocorrem simultaneamente no meio. Esses métodos traçam o movimento dos dois isótopos de N ( $^{15}N$  e  $^{14}N$ ) simultaneamente fornecendo informações acerca do sistema e estimando as taxas de transformações do N (FRANCO et al., 2011). O uso do  $^{15}N$ -fertilizante possibilita o acompanhamento e quantificação do N na planta nos diferentes compartimentos de um sistema em estudo. A principal vantagem é a possibilidade de distinção do N na planta, do proveniente do solo e o N do fertilizante (TRIVELIN et al., 1994)

De uma forma geral, o aproveitamento do N fertilizante é baixo para a maioria das culturas. Em cereais as perdas de N podem ser significativas dependendo da cultura e do manejo (RAUN; JOHNSON, 1999). Na cana-de-açúcar a eficiência de recuperação do N fertilizante também é baixa e varia em média de 10 a 40% (PRASERTSAK et al., 2002; BASANTA et al., 2003; ISA et al., 2006; FORTES et al., 2013). O N derivado dos fertilizantes não absorvido pelas plantas pode ser imobilizado na matéria orgânica do solo ou pode ser perdido para o ambiente. Nesse caso, é um potencial para tornar um poluente, no solo ou lençol freático, ou contribuir para a emissão de gases de efeito estufa (CHIEN et al., 2009; SNYDER et al., 2009; OITA et al., 2016). Dessa forma, o aumento da EUN é essencial para a sustentabilidade dos sistemas de produção da cana-de-açúcar.



### **3 CAPÍTULO I**

## **EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE <sup>15</sup>N-FERTILIZANTE PELA VARIEDADE RB92579 INOCULADA COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DO CRESCIMENTO VEGETAL**

### 3.1 RESUMO

O N é essencial para o desenvolvimento das plantas e sua baixa disponibilidade nos solos é um dos fatores de limitação da produtividade agrícola. A busca por informações e tecnologias que contribuam com a nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar e aumentem a eficiência no uso do N é relevante e estratégica para a cultura. Nesse sentido, a aplicação de bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCV) é apontada como uma tecnologia potencial para contribuir com a nutrição e maior eficiência no uso do N na cana-de-açúcar. O objetivo do trabalho foi avaliar se a inoculação com BPCV influencia na nutrição nitrogenada e na eficiência de recuperação do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante na variedade de cana-de-açúcar RB92579, na cana planta e na colheita das duas soqueiras subsequentes. Um experimento foi instalado em um Argissolo Vermelho-Amarelo no campo experimental da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ. O estudo foi conduzido durante três ciclos (cana planta, primeira e segunda soqueira) e a variedade de cana-de-açúcar utilizada foi a RB92579. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições e quatro tratamentos: controle sem N e sem inoculação com BPCV, controle sem N e com inoculação, nitrogenado sem inoculação e nitrogenado com inoculação. Foram avaliados os seguintes parâmetros: acúmulo de N na parte aérea e suas fontes, a contribuição da fixação biológica de nitrogênio (FBN) na nutrição das plantas, a eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante e a produtividade final da biomassa aérea. Para avaliar a eficiência de recuperação de N pela cana-de-açúcar inoculada ou não inoculada com BPCV foram instaladas microparcelsas com aplicação de  $^{15}\text{N}$ -ureia e  $^{15}\text{N}$ -sulfato de amônio, na cana planta e soqueiras, respectivamente. A inoculação com BPCV aumentou o conteúdo de N na parte aérea em algumas avaliações ao longo do ciclo da cana planta, mas esse resultado não se estendeu até a colheita. A participação do N fertilizante na nutrição da planta foi apenas 13% na média dos três ciclos estudados, outras fontes foram responsáveis por grande parte do N na parte aérea. As plantas receberam aportes de N via FBN, no entanto a inoculação não interferiu nesse processo. A eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante foi de 50, 30 e 20% na cana planta, primeira e segunda soqueira, respectivamente, porém sem diferenças entre os tratamentos. A hipótese de que a inoculação com BPCV aumentaria a eficiência de recuperação do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante na variedade RB92579 não foi comprovada.

**Palavras-chave:** Isótopos.  $^{15}\text{N}$ -fertilizante. Cana-de-açúcar.

### 3.2 ABSTRACT

Nitrogen (N) is essential for the development of plants and their low availability in soils is one of the factors limiting agricultural productivity. The search for information and technologies that contribute to the nitrogen nutrition of sugarcane and increase the efficiency in the use of N is relevant and strategic for the crop. In this sense, the application of plant growth promoting bacteria (BPCV) is indicated as a potential technology to contribute to nutrition and greater efficiency in the use of N in sugarcane. The objective of this study was to evaluate if the inoculation with BPCV influences the nitrogen nutrition and recovery efficiency of  $^{15}\text{N}$ -fertilizer in the sugarcane variety RB92579, during the cane plant cycle and in the harvest of the two subsequent ratoon. An experiment was installed in a dystrophic Yellow Red Ultisol in the experimental field of Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ. The study was conducted during three cycles (cane plant, first and second ratoon) and the variety of sugarcane used was RB92579. The experimental design was a randomized complete block design with four replications and four treatments: control without N and without inoculation with BPCV, control without N and with inoculation, nitrogen without inoculation and nitrogen with inoculation. The following parameters were evaluated: aerial N accumulation and its sources, the contribution of biological nitrogen fixation (BNF) in plant nutrition,  $^{15}\text{N}$ -fertilizer recovery efficiency and aerial biomass final productivity. In order to evaluate the efficiency of recovery of N by inoculated sugar cane and not inoculated with BPCV, microparcels with  $^{15}\text{N}$ -urea and  $^{15}\text{N}$ -ammonium sulphate were installed in sugarcane and ryegrass respectively. The inoculation with BPCV increased the N content in the aerial part in some evaluations throughout the plant cane cycle, but this result did not extend until the harvest. The participation of N fertilizer in plant nutrition was only 13% in the average of the three cycles studied, other sources were responsible for much of the N in the aerial part. The plants received N uptake via FBN, however the inoculation did not interfere in this process. The recovery efficiency of  $^{15}\text{N}$ -fertilizer was 50, 30 and 20% in the cane plant, first and second ratoon, respectively, but without differences between treatments. The hypothesis that BPCV inoculation would increase the recovery efficiency of  $^{15}\text{N}$ -fertilizer in the variety RB92579 has not been proven. The studied variety received N via FBN, however inoculation with BPCV did not interfere with the process. Although there has been an increase in delta  $^{15}\text{N}$  in the inoculated treatment giving indications that the benefit provided by the inoculant in the sugar cane can come from other forms of promotion of plant growth.

**Key words:** Isotopes.  $^{15}\text{N}$  fertilizer. Sugarcane.

### 3.3 INTRODUÇÃO

O N é considerado o macronutriente mineral mais importante na composição química das plantas (XU et al, 2012). Depois do carbono, o N é o mais exigido para o crescimento vegetal, sendo componente das proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, co-enzimas, hormônios vegetais e metabólitos secundários (ROBERTSON; VITOUSEK, 2009). A cana-de-açúcar é uma cultura com alta demanda e extração de N e boa parte da reposição de N no sistema que se preconiza é através da fertilização nitrogenada (OLIVEIRA et al., 2010; OTTO et al., 2016). A grande extensão em área plantada somada ao volume de N fertilizante aplicado anualmente resulta em uma significativa quantidade de N fertilizante consumido pela cultura. Esse volume de adubo nitrogenado aplicado confere à cana-de-açúcar o segundo maior consumo de N fertilizante no Brasil (IFA, 2013).

Tendo em vista a baixa eficiência do uso do N pela cana-de-açúcar em relação a outras culturas agrícolas significativas perdas de N podem ocorrer no sistema de produção da cultura (VALLIS et al., 1994; BASANTA et al., 2003). O N derivado do fertilizante não absorvido pode ser imobilizado na matéria orgânica do solo ou pode ser perdido para o ambiente. Nesse caso, é um potencial para se tornar um poluente, no solo ou lençol freático, ou ainda contribuir para a emissão de gases de efeito estufa (CHIEN et al., 2009, OITA et al., 2016). Aumentar a eficiência no uso do N é estratégico para a sustentabilidade do sistema de produção da cana-de-açúcar, em termos de custos de produção e em relação aos danos ambientais associados a sua utilização que são cada vez mais significativos (GOOD et al. 2004).

A aplicação de bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCV) pode contribuir com a nutrição e crescimento de diversas culturas agrícolas (BASHAN et al., 2014; FARRAR et al., 2014). Na cana-de-açúcar, os benefícios na nutrição nitrogenada da planta podem ocorrer de forma direta através da FBN (OLIVEIRA et al., 2006; BAPTISTA et al., 2014) e indiretamente através de maior exploração do solo pelo aumento do sistema radicular (GÍRIO et al., 2015). O aumento da contribuição da FBN na cana-de-açúcar e/ou ganhos na promoção do crescimento do sistema radicular, com conseqüente aumento de absorção de N pode contribuir para a nutrição nitrogenada da planta com conseqüente obtenção de maior produtividade, aumento do balanço energético e redução nas emissões de gases de efeitos estufa no sistema cana-de-açúcar (YADAV et al., 2009).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos com inoculação de BPCV selecionadas em cana-de-açúcar (MUNOZ-ROJAS; CABALLERO-MELLADO, 2003; SILVA et al., 2009; SCHULTZ et al., 2014) e o aumento da biomassa do sistema radicular é um dos principais benefícios obtidos pela inoculação com BPCV (SILVA et al., 2012). O aumento da área radicular com conseqüente aumento do volume de solo explorado contribui para uma maior exploração do solo, com conseqüente maior absorção de água e nutrientes, entre eles o N (SUMAN et al., 2005; MUTHUKUMARASAMY et al., 2006). No entanto, os trabalhos desenvolvidos com inoculação de BPCV na cana-de-açúcar não mostraram se a inoculação aumenta a eficiência de recuperação do N fertilizante aplicado ou, se a inoculação influencia na nutrição nitrogenada da planta de outra forma, via FBN, por exemplo. Nesse sentido, os objetivos deste trabalho foram:

- Avaliar se a inoculação com bactérias promotoras de crescimento influencia na nutrição nitrogenada e na produtividade da variedade RB92579 na cana planta, primeira e segunda soqueira;

- Verificar a contribuição do N-fertilizante na nutrição nitrogenada da variedade RB92579 na cana planta e nas duas soqueiras subsequentes;
- Avaliar o efeito da inoculação com BPCV na eficiência de recuperação do N-fertilizante da parte da área da variedade RB92579 na cana planta, primeira e segunda soqueira.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em maio de 2011 e fez parte do trabalho desenvolvido por Pedula (2013) e Pedula et al. (2016) no ciclo da cana planta. O presente trabalho foi desenvolvido no mesmo experimento com avaliações também na cana planta, e nas duas soqueiras subsequentes, resultando em três anos de estudo.

#### 3.4.1 Caracterização da área

O experimento foi instalado no campo experimental da Embrapa Agrobiologia, em Seropédica-RJ (22° 44' 38" S e 43° 42' 28" W e 26 m de altitude). O clima da região, segundo a classificação de Köppen é o Aw, com verão úmido e inverno seco, apresentando temperatura média de 24,6 °C e precipitação média de 1.200 mm por ano. Foi elaborado um balanço hídrico climatológico do período de condução do experimento - 2011-2014, apresentado na Figura 1. Para isso foram utilizados dados de evapotranspiração da cultura e dados pluviométricos e de temperatura obtidos em uma estação climatológica distante dois quilômetros da área experimental. Os cálculos foram realizados mediante o uso de planilhas eletrônicas (ROLIM; SENTELHAS; BARBIERI, 1998).

O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (SANTOS et. al., 2013). Na Tabela 1 encontra-se o resultado da análise química de amostra de terra, realizada nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, antes da instalação do experimento e antes da aplicação de calcário.

**Tabela 1.** Análise química da amostra de terra para fins de fertilidade da área experimental na profundidade de 0 a 20 e 20 a 40 cm.

Prof	pH	K	P	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V
--cm--	H <sub>2</sub> O	---mg dm <sup>-3</sup> ---				-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				%
0-20	5,76	47,5	13,46	2,83	1,31	0,09	4,43	4,26	8,69	49,0
20-40	5,34	29,2	1,42	2,17	0,86	0,11	3,93	3,10	7,04	43,9

Média de 4 repetições. C (Walkley e Black); N (Kjeldahl); P e K disponível (Mehlich 1); Al, Ca e Mg (KCl 1 mol.l<sup>-1</sup>); H+Al (acetato de cálcio 1 mol.l<sup>-1</sup>). SB: soma de bases.

#### 3.4.2 Preparo de solo e adubação

O preparo do solo consistiu de uma aração, seguida de gradagem, aplicação em área total de 1.000 kg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico, 45 dias antes do plantio. Foi realizada uma segunda gradagem e finalizando com a sulcação.

A adubação de plantio consistiu da aplicação no fundo do sulco de plantio de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (superfosfato simples), 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (cloreto de potássio), 40 kg ha<sup>-1</sup> de micronutrientes (fonte FTE BR 12), 0,4 kg ha<sup>-1</sup> de móbdenio (molibdato de amônio) e 50 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de ureia, nos tratamentos com aplicação de N. Complementando a adubação potássica, foi aplicado em cobertura, 60 dias após o plantio, 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, também na forma de cloreto de potássio.

As adubações de soqueira consistiram da aplicação por cobertura de 160 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, parcelados em duas doses de 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, aos 30 e 60 dias após o corte. Nos tratamentos nitrogenados foi aplicado em cobertura 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na forma de sulfato de

amônio. O fertilizante nitrogenado foi aplicado ao lado da linha da cana-de-açúcar sendo levemente incorporado ao solo, aos 30 dias após a reinstalação do experimento, na primeira e segunda soqueira.

### 3.4.3 Inoculante e inoculação

As bactérias utilizadas no estudo compõe o inoculante desenvolvido pela Embrapa (REIS et al., 2009). O inoculante é composto por uma mistura de cinco espécies de bactérias diazotróficas: *Gluconacetobacter diazotrophicus* (estirpe BR11281), *Herbaspirillum seropedicae* (BR11335), *Herbaspirillum rubrisubalbicans* (BR11504), *Paraburkholderia tropica* (BR11366) e *Nitrospirillum amazonense* (BR11145). O crescimento das bactérias e o preparo do inoculante seguiu a metodologia descrita por Silva et al. (2009). Após o crescimento das estirpes as células foram ajustadas para  $10^8$  células  $\text{mL}^{-1}$  por estirpe. Posteriormente foram adicionados 75 mL do inóculo em 175 g do veículo (turfa moída, neutralizada e esterilizada) embalado em sacos de polietileno. Cada grama de turfa conteve no mínimo  $10^8$  cel  $\text{g}^{-1}$  de cada estirpe. Os sacos plásticos foram mantidos a  $30^\circ\text{C}$  por sete dias. O produto final foi composto por cinco pacotes (250 g) contendo as cinco estirpes individualizadas, somaram 1.250 g de inoculante turfoso.

Para a inoculação da cana planta o inoculante (uma dose) foi diluído em 100 litros de água. Após o corte dos colmos, os toletes foram acondicionados em sacos de rafia e submetidos à inoculação por imersão na suspensão inoculante por uma hora. Após cada corte da cana-de-açúcar foi rapidamente realizada limpeza das linhas de plantio nas soqueiras com a retirada da palhada sobre as mesmas. Em seguida a reinoculação a aplicação do inoculante foi feita por pulverização com auxílio de um aplicador costal, com jato dirigido na superfície de corte com aplicação de 100 litros por hectare.

### 3.4.4 Variedade e plantio

A variedade de cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a RB92579, principal variedade de cana-de-açúcar plantada na Região Nordeste, e uma das principais plantadas na Região Centro-Sul do Brasil (RIDESA, 2015). É uma variedade de alta produtividade agrícola, sem restrição a ambiente de produção, maturação média e elevado teor de sacarose (BARBOSA et al., 2003).

Os colmos da variedade RB92579 foram obtidos do próprio campo experimental da Embrapa Agrobiologia. Depois de selecionados no campo, os colmos foram subdivididos em toletes contendo três gemas e posteriormente foram plantados com uma densidade de 15 gemas por metro linear. Após a distribuição dos toletes os sulcos de plantio foram fechados manualmente.

### 3.4.5 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com 4 repetições e quatro tratamentos: 1- controle, sem N-fertilizante e sem inoculação; 2- inoculação, sem N-fertilizante; 3- adubação com N, sem inoculação; 4- adubação com N e com inoculação. As doses de N utilizadas para a cana planta e soqueiras foram de 50 e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, respectivamente.

As parcelas experimentais foram constituídas de 8 linhas com 5 m de comprimento, com espaçamento de 1,2 m. As quatro primeiras linhas foram adotadas para amostragem seriada (cana planta), de maneira que a primeira linha era bordadura, seguida por linha útil, totalizando 2 linhas úteis. Dentro de cada linha útil foi adotado meio metro de bordadura decorrente do metro amostrado o que proporcionou 3 coletas em cada linha útil, totalizando 6

coletas por parcela. As quatro linhas restantes foram adotadas para obter a produtividade final (cana planta e soqueiras), com a colheita das duas linhas centrais.

### **3.4.6 Avaliações e colheita**

#### **a) Acúmulo de biomassa e extração de N na parte aérea**

Durante o crescimento da cana planta foram realizadas seis coletas, aos 100, 130, 168, 212, 261 e 295 dias após o plantio (DAP). Nas coletas, as amostras da parte aérea foram retiradas e subdivididas, e se quantificou a massa de material seco e o teor de N. Com estes dois parâmetros determinou-se a extração de N em cada compartimento da parte aérea (colmos, folhas secas e ponteiros) proveniente do N-fertilizante e de outras fontes, o que diferenciou do estudo desenvolvido por Pedula et al. (2016).

As amostras foram retiradas em um metro de comprimento nas linhas destinadas a coleta seriada. Depois de retiradas e subdivididas, as mesmas foram pesadas e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C (até massa constante). Com a estabilização da massa e posterior pesagem, as amostras foram moídas em moinho do tipo Wiley e utilizadas para determinação das concentrações de N nos compartimentos da parte aérea. Após a determinação da massa seca dos compartimentos da cana-planta ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e das concentrações de N ( $\text{g kg}^{-1}$ ) foi obtida a extração de N pela parte aérea ao longo da cana planta e na colheita da primeira e segunda soqueira.

#### **b) Abundância de átomos de $^{15}\text{N}$ (%atom $^{15}\text{N}$ ) e eficiência de recuperação do $^{15}\text{N}$ -fertilizante na parte aérea da cana-de-açúcar**

Na cana planta, as parcelas com aplicação de 50  $\text{kg ha}^{-1}$  de N (com ou sem inoculação) receberam adubo enriquecido com 1,5 % átomos de  $^{15}\text{N}$ -ureia em excesso nas duas linhas de 5 m destinadas a coleta seriada. E nas parcelas destinadas a colheita final na cana planta foram instaladas microparcels de dois metros de comprimento que também receberam o  $^{15}\text{N}$ -ureia enriquecido com 1,5% átomos de  $^{15}\text{N}$  em excesso.

Após a colheita da cana planta, as microparcels foram mantidas, mas sem a reaplicação do fertilizante marcado com  $^{15}\text{N}$ . Foram instaladas novas microparcels do lado oposto a primeira microparcela, com aplicação de sulfato de amônio enriquecido com 1% de átomos de  $^{15}\text{N}$ , com a dose equivalente a 100  $\text{kg ha}^{-1}$  de N. E na segunda soqueira foram mantidas as microparcels instaladas na cana planta e as microparcels instaladas na primeira soqueira, com aplicação de N-fertilizante sem marcação com  $^{15}\text{N}$ . Foram instaladas novas microparcels novamente com aplicação de sulfato de amônio enriquecido com 1% de átomos de  $^{15}\text{N}$ , também na dose de 100  $\text{kg ha}^{-1}$  de N. Dessa forma foi possível avaliar a recuperação pela cana-de-açúcar inoculada e não inoculada das adubações nitrogenadas aplicadas nos anos anteriores e sua contribuição na nutrição da planta.

Na ocasião da colheita, a coleta de amostras foi realizada de acordo com Trivellin et al. (1994; 1995). Foram retiradas sub amostras de colmos, folhas secas (palha) e folhas verdes (ponteiros) em cada coleta seriada e na colheita da cana planta, primeira e segunda soqueira. As amostras foram pesadas e secadas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até atingirem massa constante. Após a secagem as sub amostras foram inicialmente passadas em moinho tipo Wiley (2 mm) para depois serem finamente moídas em um sistema similar ao de Arnold; Schepers (2004). Em seguida foram realizadas as determinações de N segundo o método semimicro-Kjeldahl (NOGUEIRA; SOUZA, 2005).

A análise de abundância natural de  $^{15}\text{N}$  (atom  $^{15}\text{N}$ ) foi realizada nas sub amostras dos compartimentos da parte aérea (colmo, palha e ponteiro) com o objetivo de avaliar se ao longo do desenvolvimento da cana planta há diferenças entre a marcação com o  $^{15}\text{N}$  nestes compartimentos. Para isso, após a análise do teor de N total nas folhas-bandeira, foram



determinados os pesos para análise de delta  $^{15}\text{N}$ , dividindo-se o valor 4 pelo teor de N total em percentual, atendendo o espectro de ação do espectrômetro de massas (Finnigan MAT, Bremen, Germany) do Laboratório de Isótopos Estáveis John M Day da Embrapa Agrobiologia (RAMOS et al., 2001).

Com estes resultados foram feitos os cálculos referente a quantidade de N na planta proveniente do fertilizante (NPPF), N na planta proveniente de outras fontes (NPPOF) e recuperação do N fertilizante (R%), (Trivellin et al., 1994; 1995).

$$\text{NPPF (\%)} = (a/b) \times 100$$

$$\text{NPPF (kg ha}^{-1}\text{)} = [\text{NPPF (\%)} / 100] \times \text{NT (kg ha}^{-1}\text{)}$$

$$\text{R (\%)} = [\text{NPPF (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{NF (kg ha}^{-1}\text{)}] \times 100$$

$$\text{NPOF (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{NT (kg ha}^{-1}\text{)} - \text{NPPF (kg ha}^{-1}\text{)}$$

Onde:

NPPF- Nitrogênio na planta proveniente do Fertilizante (kg ha<sup>-1</sup>).

a e b – Átomos  $^{15}\text{N}$  em excesso na planta e no fertilizante, respectivamente.

NT- Nitrogênio total acumulado (kg ha<sup>-1</sup>).

NF- Nitrogênio fertilizante aplicado (kg ha<sup>-1</sup>).

NPOF = Nitrogênio na planta proveniente de outras fontes (kg ha<sup>-1</sup>).

### **c) Produtividade da parte aérea**

As avaliações de produtividade foram realizadas no final dos ciclos da cana planta, primeira e segunda soqueira. As parcelas foram cortadas manualmente sendo colhidas e pesadas as duas linhas centrais destinadas para esse fim. Os compartimentos da parte aérea: colmos, folhas secas (palha) e folhas verdes (ponteiros) foram separados e pesados. Nessas amostras foi determinada a massa de material natural diretamente do campo. Dessa amostragem retiraram-se subamostras que acondicionadas em sacos plásticos foram levadas imediatamente para o laboratório para determinação da biomassa fresca. As amostras foram levadas para estufas de circulação fechada a 65°C até a estabilização das massas, onde foi obtida a massa seca de material vegetal.

Os dados obtidos foram extrapolados para Mg ha<sup>-1</sup> considerando o espaçamento de 1,20 m, obtendo dessa forma a produtividade da parte aérea fresca e seca e a TCH (tonelada de colmo por hectare).

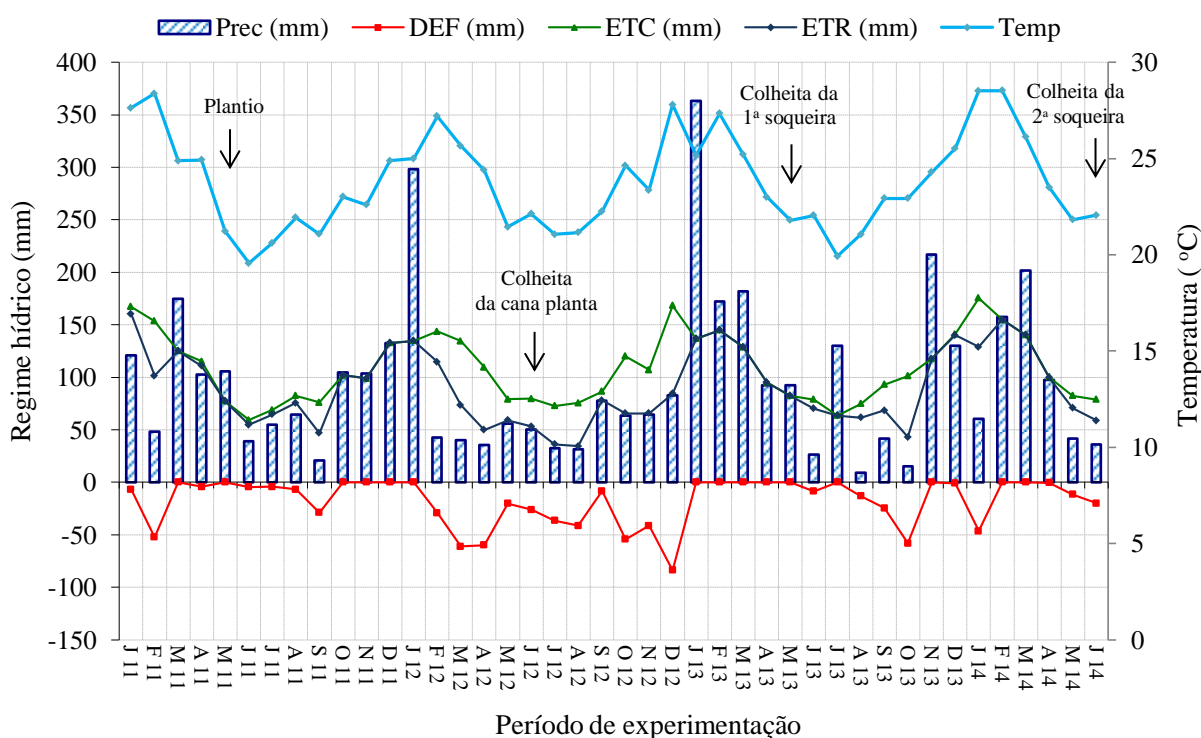
### **d) Análise estatística**

Os dados foram submetidos à análise estatística para verificar a normalidade e homogeneidade das variâncias pelos testes de Lilliefors e Cochran e Bartlett, respectivamente, pelo software SAEG 9.1. Os resultados foram submetidos à análise de variância, por meio do teste de F ao nível de 95% de confiança. Quando o teste F apresentou significância na ANOVA foi aplicado o teste de Tukey a 95% de confiança para comparar as médias.

## 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.5.1 Balanço hídrico-climatológico

O balanço hídrico mostrou que durante o ciclo da cana planta a precipitação foi de 1.148 mm e o déficit hídrico de -241 mm, sendo o déficit mais acentuado nos cinco meses que antecederam a colheita (Figura 1). Este déficit seguiu nos seis meses iniciais de desenvolvimento da primeira soqueira (-265 mm) e no final do ciclo a precipitação foi de 1.253 mm, concentrada principalmente nos três primeiros meses de 2013. Já na segunda soqueira a precipitação foi de 1.164 mm com déficit de -180 mm, sendo este principalmente em janeiro de 2014, com maior média de temperatura e evapotranspiração.



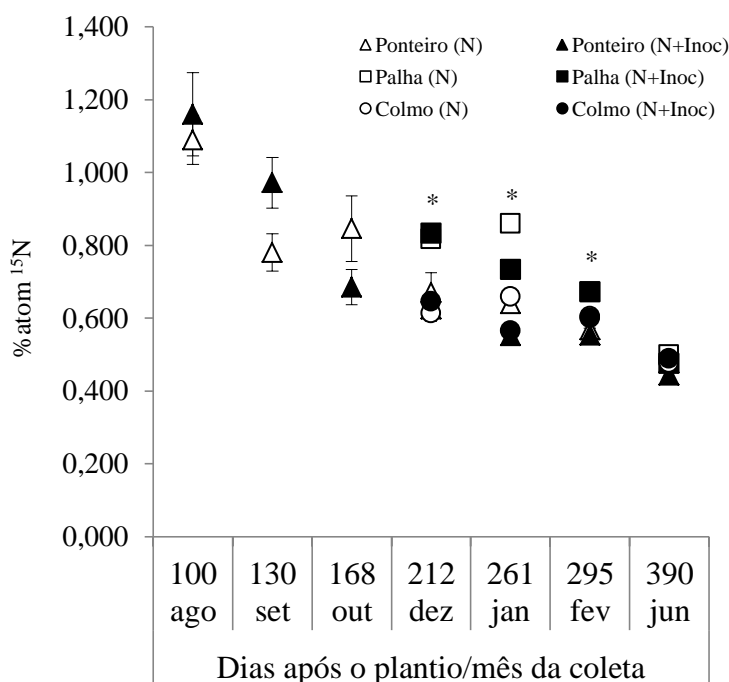
**Figura 1.** Balanço hídrico climatológico do ciclo agrícola da cana planta (2011/2012), primeira soqueira (2012/2013) e segunda soqueira (2013/2014). Precipitação (Prec), déficit hídrico (DEF), evapotranspiração potencial da cultura (ETC), evapotranspiração real da cultura (ETR) e temperatura. Plantio em maio de 2011. Colheita da cana planta, 1ª soqueira e 2ª soqueira, em junho de 2012, maio de 2013 e em junho de 2014, respectivamente.

### 3.5.2 Avaliações na cana planta

#### a) Abundância de átomos $^{15}\text{N}$

A abundância de  $^{15}\text{N}$  (%atom  $^{15}\text{N}$ ) nos tratamentos com aplicação de  $^{15}\text{N}$ -ureia (dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N) iniciada aos 100 dias após o plantio foi decrescente ao longo das avaliações até a colheita (Figura 2). Até a terceira coleta, a amostragem foi realizada com a coleta da planta inteira (até então formada principalmente por folhas), sem fracionar os compartimentos da parte aérea. A partir da quarta coleta, a parte aérea foi subdividida em ponteiro (folhas verdes), palha (folhas secas) e colmo. Com essa subdivisão foi possível

observar que as marcações com  $^{15}\text{N}$  foram significativamente maiores na palha em relação ao ponteiro e o colmo. Essa diferença foi diminuindo até a colheita final, onde a marcação com o  $^{15}\text{N}$  foi semelhante nas partes amostradas.



**Figura 2.** Enriquecimento com átomos de  $^{15}\text{N}$  nos compartimentos da parte aérea nos tratamentos com  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, com e sem inoculação ao longo do ciclo da cana planta. \*diferença significativa entre os compartimentos em cada tratamento dentro de cada época de coleta pelo teste de Tukey a 5%.

Esse resultado mostra que ao longo do crescimento da cana-de-açúcar ocorreram diferenças na marcação com o  $^{15}\text{N}$ -fertilizante. O N fertilizante absorvido inicialmente e translocado para a parte aérea não foi totalmente remobilizado para os tecidos em crescimento ao longo do ciclo, uma vez que a abundância de  $^{15}\text{N}$  das folhas secas foi significativamente superior à marcação dos outros compartimentos da parte aérea.

A amostragem feita em apenas um compartimento da parte aérea, como a folha +3, em experimentos que avaliam o N derivado do fertilizante ao longo do crescimento da cana planta pode levar a conclusões equivocadas. Sampaio et al. (1984) também ressaltaram que o cálculo da eficiência de absorção do N fertilizante ao longo do ciclo da cana planta, baseado somente nas percentagens de  $^{15}\text{N}$  das folhas verdes coletadas em estágios iniciais de crescimento da cana-de-açúcar pode resultar em desvios com relação ao valor real.

Já na colheita, 390 dias após o plantio, não foram observadas diferenças quanto abundância de  $^{15}\text{N}$  nos compartimentos da parte aérea (Figura 2). Diversos estudos foram realizados partindo do pressuposto de que os valores da abundância de  $^{15}\text{N}$  em folhas da cana-de-açúcar pode representar o valor médio da abundância de  $^{15}\text{N}$  de toda a parte aérea da planta no momento da colheita em plantas adubadas com  $^{15}\text{N}$ -fertilizante (CARNAÚBA, 1989; TRIVELIN et al., 1995; FRANCO et al., 2011; MEGDA et al., 2015) ou não adubadas (BODDEY et al., 2001; BAPTISTA et al., 2014). Carnaúba (1989) sugeriu que a folha +1 ou outra folha verde poderia ser usada como indicador da abundância de  $^{15}\text{N}$  na planta. Neste caso, a utilização de apenas de um compartimento da parte aérea facilita a amostragem e reduz os custos de experimentos que utilizam  $^{15}\text{N}$ -fertilizante.

No entanto, alguns estudos mostraram resultados contrastantes. Sampaio et al. (1984) observaram que na colheita da cana planta da variedade Co997 a abundância de  $^{15}\text{N}$  foi maior nas folhas secas (coletadas no chão), seguido dos colmos e com menor marcação as folhas verdes. Da mesma forma, Trivelin et al. (1995) observaram essas diferenças em um experimento com a variedade SP70-1143, colhida aos 12 meses. No estudo, houve maior abundância de  $^{15}\text{N}$  nas folhas secas quando comparado com o ponteiro e o colmo, tanto no tratamento com aplicação de ureia quanto na aplicação com aquamônia, ambos marcados com  $^{15}\text{N}$ . Os autores ressaltaram que a utilização apenas da folha +3 para a avaliação do N derivado do fertilizante na colheita deve ser utilizada com cautela, pois pode subestimar a recuperação do N fertilizante.

O maior enriquecimento com o  $^{15}\text{N}$  nas folhas secas pode estar relacionado com remobilização incompleta do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante absorvido. É possível que o N absorvido inicialmente não seja totalmente remobilizado para os tecidos em formação, o que resultaria em uma maior marcação naquelas folhas formadas inicialmente. Nos primeiros estágios de crescimento há uma maior contribuição do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante na nutrição da cana-de-açúcar e ao longo do crescimento outras fontes se tornam as principais fontes de N para a planta (MEGDA et al., 2015). Com isso pode ocorrer a diluição do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante e no final do ciclo os tecidos amostrados tenham a mesma marcação. Além disso, ao longo do crescimento da cana-de-açúcar novas folhas são formadas e as folhas velhas podem ficar aderidas ao colmo ou caírem no solo dependendo da variedade. Como estas folhas podem estar com maior marcação, as folhas secas formadas por último podem ter uma menor marcação que as primeiras.

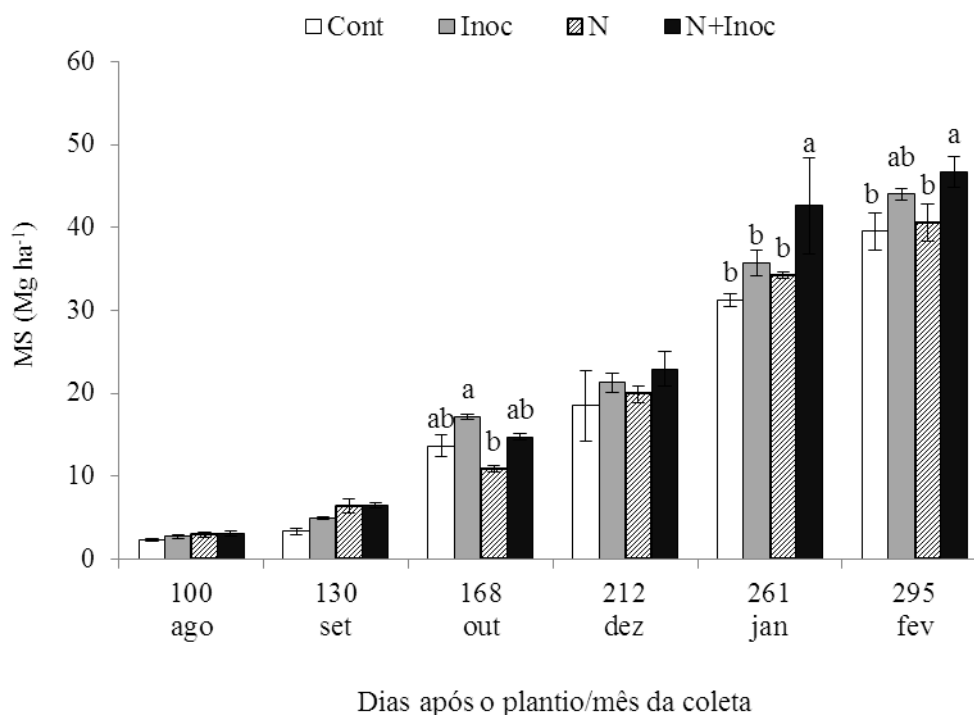
Além dessas possibilidades, a remobilização do N da parte aérea para as partes subterrâneas pode contribuir para essa uniformidade da marcação no final do ciclo da cana-de-açúcar. Próximo e após a maturação ocorre decréscimo nos teores de N da parte aérea (WOOD et al., 1996; KUMARA; BANDARA, 2001). O possível destino desse N são os tecidos abaixo da superfície do solo (TRIVELIN et al, 1996). A biomassa subterrânea inclui rizomas e raízes, que correspondem de 15 a 60% da biomassa aérea e 20 a 41% do N da planta. Robinson et al. (2009) observaram que plantas fertilizadas e não fertilizadas alocaram, 67% e 72% do N nos colmos, respectivamente, e 30% do N nos tecidos abaixo da solo independente da dose de N aplicada. Estes mesmos autores ressaltaram que se realmente ocorre a remobilização de N dos colmos para os tecidos subterrâneos esse mecanismo tem sido pouco estudado.

#### **b) Produção de biomassa**

As amostragens para avaliação da biomassa seca foram feitas ao longo do ciclo da cana planta até a sexta avaliação (292 dias após o plantio) e na colheita realizada aos 390 dias após o plantio. O acúmulo de biomassa seca foi crescente na variedade RB92579 ao longo do crescimento da cana planta (Figura 3). No período de avaliação as condições climáticas foram favoráveis ao bom desenvolvimento da cultura (Figura 1).

Nas duas primeiras avaliações, período onde houve déficit hídrico, não se observou diferenças entre os tratamentos. Já na terceira, quinta e sexta avaliação diferentes respostas foram obtidas. Na terceira avaliação a inoculação na ausência do N fertilizante promoveu significativo acúmulo de biomassa em comparação com a aplicação do N. Na quinta e sexta avaliação o tratamento com aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N com inoculação obteve maior incremento de biomassa em relação aos demais tratamentos. Deve ser ressaltado que essas avaliações ocorreram de outubro a fevereiro, período de maior precipitação e menor déficit hídrico, condições que favoreceram o acúmulo de biomassa observado. Na comparação entre os dois tratamentos nitrogenados, com e sem inoculação, observou-se que ao longo das

avaliações houve maior incremento de biomassa com a inoculação com BPCV sendo esse aumento significativo apenas nas duas últimas avaliações.

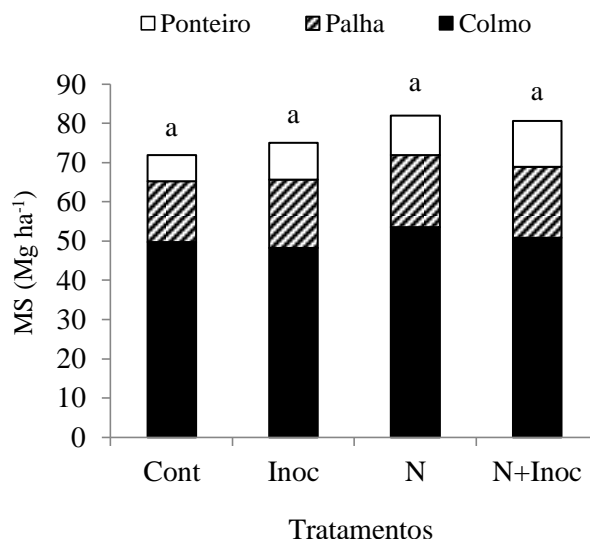


**Figura 3.** Massa seca (MS) da parte aérea da variedade RB92579 ao longo do ciclo da cana planta com e sem adubação com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (ureia, aplicado no sulco de plantio), com ou sem inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal. As diferentes letras nas colunas indicam que não houve diferenças entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

Independente do tratamento aplicado as produtividades alcançadas, acima de 70 Mg de massa seca por hectare, indicaram que as condições do clima, do solo e manejo favoreceram o desenvolvimento e o potencial produtivo da variedade na cana planta na colheita final (Figura 4). Contudo, nem a aplicação do N-ureia, aplicada no sulco de plantio, nem a inoculação via imersão influenciou nos parâmetros avaliados. Os ganhos de biomassa observados nas duas últimas coletas que precederam a colheita não refletiram em aumento na produtividade final. É possível que o acentuado déficit hídrico nos quatro meses que antecederam a colheita tenha contribuído para a redução dos efeitos observados na avaliação feita aos 295 DAP (Figura 3).

Esse resultado corrobora com outros trabalhos que observaram baixa resposta da cana-planta à adubação nitrogenada (CANTARELLA; RAIJ, 1985; AZEREDO et al., 1986; FRANCO et al., 2010; 2015). Vários fatores são atribuídos a essa baixa resposta, como a mineralização da matéria orgânica do solo e dos restos culturais incorporados no momento do preparo do solo, às condições climáticas como pluviosidade e temperatura mais favoráveis na ocasião do plantio, à melhoria do solo após a reforma dos canaviais associada a calagem, à incorporação dos restos culturais da cultura anterior, à adubação feita na reforma do canavial, ao maior vigor do sistema radicular da cana-planta em relação ao da soqueira, às perdas de N fertilizante seja por volatilização ou lixiviação, à contribuição do Nestocado no tolete, à FBN

e a mecanismos de controles genético-fisiológicos (AZEREDO et al., 1986; TRIVELIN et al., 1995; ORLANDO FILHO et al., 1999; URQUIAGA et al., 1992; SCHULTZ et al., 2012).



**Figura 4.** Massa seca (MS) dos compartimentos da parte aérea (colmo, palha e ponteiros) da variedade RB92579 na colheita da cana planta com ou sem adubação com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (fonte ureia, aplicado no sulco de plantio), com ou sem inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal. As letras iguais nas colunas indicam que não houve diferenças entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

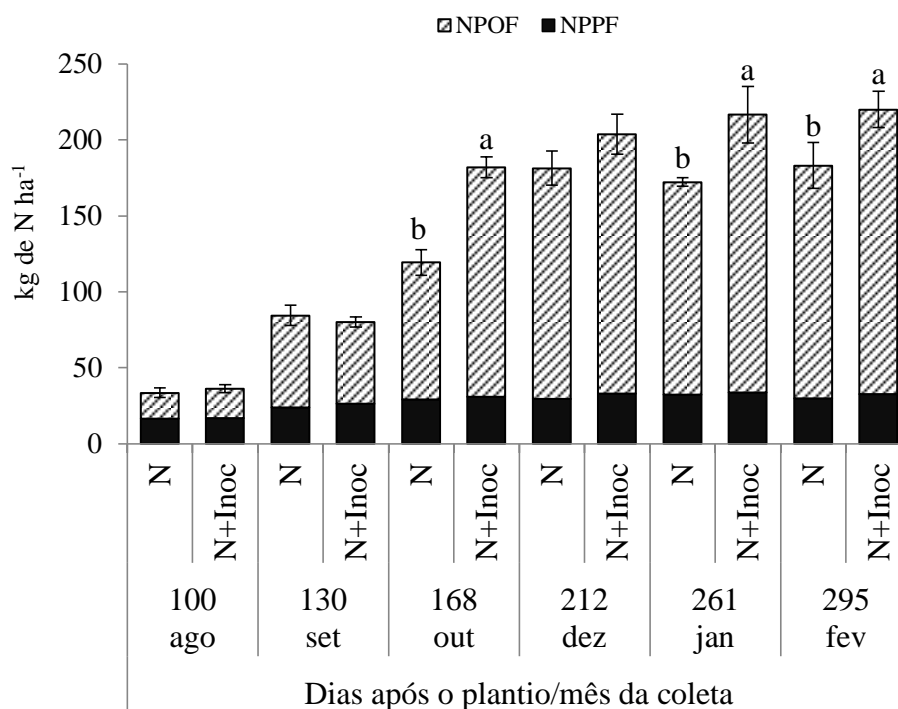
Da mesma forma, a aplicação do inoculante não influenciou na produtividade da variedade RB92579 na cana planta. Diferentes resultados foram reportados em estudos de inoculação com BPCV na cana-de-açúcar. Efeitos positivos, ausência de resposta e até efeitos negativos já foram obtidos em experimentos a campo. Schultz (2012) envolvendo vários experimentos concluiu que a cana-de-açúcar apresenta grande variabilidade de resposta à adubação nitrogenada e à inoculação, em função da variedade e condições edafoclimáticas. O autor observou frequência nos incrementos de produtividade na variedade RB867515 e redução nas variedades RB72454 e CTC 2 quando inoculadas com bactérias diazotróficas. No geral, o inoculante promoveu incrementos na produtividade de colmos superior a 10% em 80% dos experimentos avaliados.

Pereira et al. (2013) estudaram o acúmulo de biomassa em seis variedades de cana-de-açúcar inoculadas com diferentes estirpes de bactérias diazotróficas e observaram aumento de produtividade de colmos em apenas duas variedades. Silva et al. (2009) desenvolveram um estudo de inoculação em um Argissolo Amarelo de baixa fertilidade, sendo observados significativos incrementos de produtividade de colmos, tanto na variedade RB867515 quanto na RB72454. Já em condições controladas os resultados com a inoculação foram mais consistentes e mostraram que a inoculação promove o crescimento das plantas de cana-de-açúcar (GIRIO et al., 2015; CHAVES et al., 2015).

#### c) Extração de N e eficiência de recuperação do <sup>15</sup>N-fertilizante

O acúmulo de N e a contribuição do N fertilizante no total extraído pela parte aérea foram avaliados nos tratamentos com aplicação da dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (ureia), com e sem inoculação. A extração de N pela parte aérea da variedade RB92579 acompanhou o

crescimento da planta e na última avaliação o acúmulo de N foi acima de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N. Cabe aqui enfatizar que desse total apenas uma pequena parte foi proveniente do fertilizante (NPPF), cerca de 30 kg ha<sup>-1</sup> de N. Nas duas primeiras avaliações não foi observado efeito da inoculação no acúmulo de N. Já na terceira, quinta e sexta avaliação, a inoculação promoveu significativo aumento no conteúdo de N da parte aérea da variedade RB92579 em relação ao controle não inoculado. Cabe ressaltar que esse resultado não foi em decorrência de uma absorção do N fertilizante, e sim, em virtude de maior acúmulo de N proveniente de outras fontes (Figura 5).

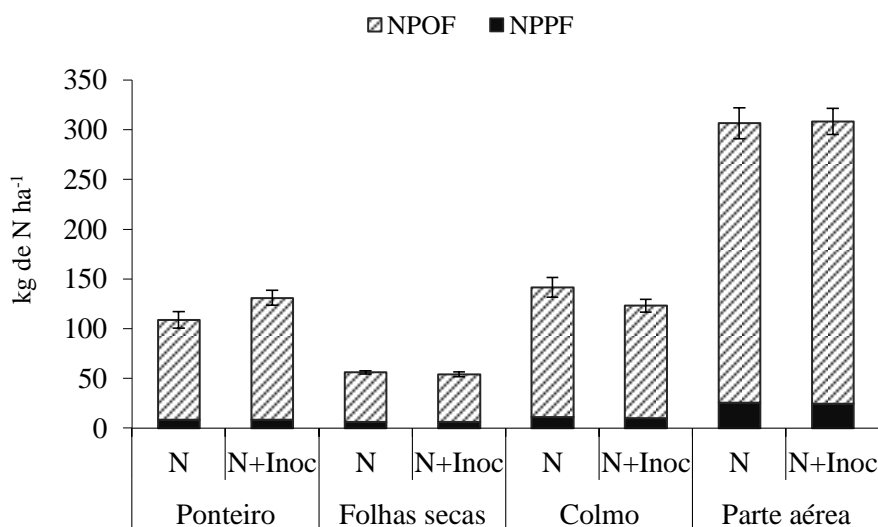


**Figura 5.** Acúmulo de N na parte aérea (kg ha<sup>-1</sup>) proveniente do fertilizante (NPPF) e de outras fontes (NPOF) na variedade RB92579, ao longo do ciclo da cana planta, adubada com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (fonte ureia, aplicado no sulco de plantio), com ou sem inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal. Letras diferentes dentro de cada época de coleta indicam que houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

O maior aproveitamento do N pela cana-de-açúcar inoculada com BPCV também foi observado por outros autores. Suman et al. (2005) estudaram o efeito de doses de N-ureia associadas a inoculação com diferentes estirpes de *G. diazotrophica* no crescimento e absorção de N na variedade de cana-de-açúcar CoSe92423. Segundo os autores a inoculação aumentou a concentração, o acúmulo e a recuperação aparente de N na parte aérea das plantas. Muthukumarasamy et al. (2006) evidenciaram que o total de biomassa e N na folha da variedade Co 86032 foram maiores nas plantas inoculadas com *G. diazotrophica* associadas com 50% da dose recomendada de N em relação às plantas fertilizadas com o total de N recomendado para a cultura. Os autores concluíram que a inoculação pode mitigar consideravelmente a aplicação de N fertilizante no cultivo da cana-de-açúcar. Estes resultados evidenciam que a inoculação com BPCV contribui com a nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar. No entanto, todos estes trabalhos não utilizaram a técnica isotópica com o <sup>15</sup>N-

fertilizante. Dessa forma não foi possível concluir se a inoculação contribuiu para maior absorção e aproveitamento do N fertilizante aplicado, ou se houve uma contribuição direta da inoculação via FBN, por exemplo, ou uma e outra fonte de N na nutrição da cana-de-açúcar. Vale ressaltar que no presente estudo grande parte do N na planta não foi proveniente do N-fertilizante, mas principalmente de outras fontes.

Na colheita, realizada 390 DAP, a extração de N na parte aérea foi acima de 300 kg ha<sup>-1</sup>. Desse total apenas 25 kg foram provenientes do fertilizante, ou seja, menos de 10% do N acumulado na parte aérea foi proveniente do adubo nitrogenado (Figura 6). Os resultados das duas últimas coletas mostram que não houve aumento do N total acumulado na parte aérea da cana planta na colheita final.

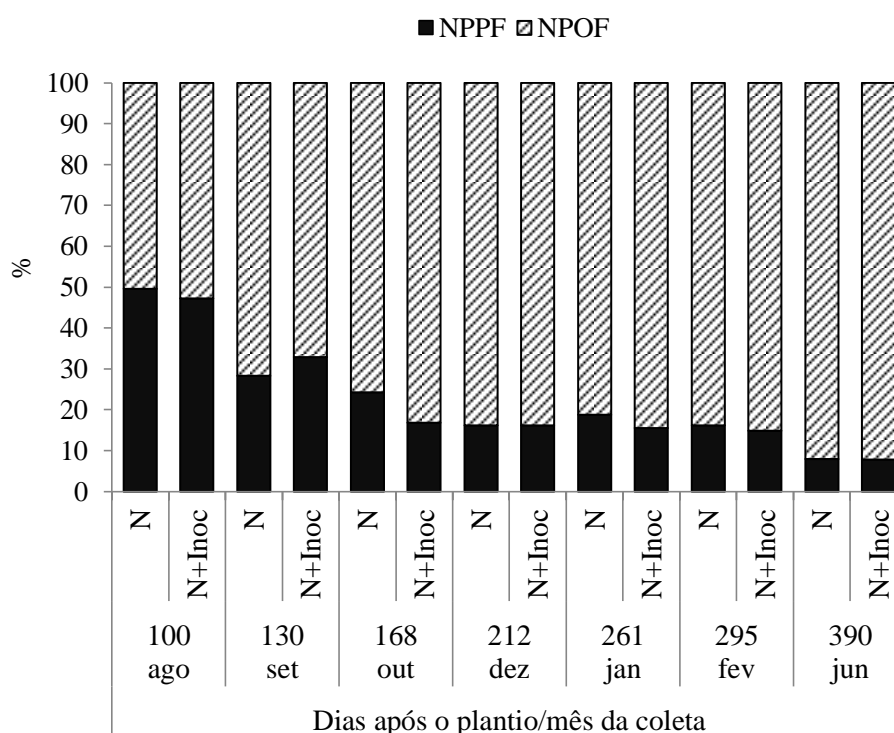


**Figura 6.** Acúmulo de N (kg ha<sup>-1</sup>) proveniente do fertilizante (NPPF) e de outras fontes (NPOF) na parte aérea (colmo, palha ponteiro) na colheita da cana planta da variedade RB92579 adubada com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (fonte ureia, aplicado no sulco de plantio), com ou sem inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal. A ausência de letras em cada compartimento indica que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

A participação do N-fertilizante no total de N na parte aérea foi maior nas fases iniciais de crescimento, sendo responsável por cerca de 50% do N acumulado aos 100 dias após o plantio. Essa porcentagem foi diminuindo ao longo do ciclo e na colheita a contribuição do N proveniente do fertilizante foi de apenas 10% (Figura 7).

Esse resultado ressalta a importância do N fertilizante na nutrição da cana-de-açúcar nos estágios iniciais do desenvolvimento. Resultados obtidos por Franco et al. (2011) mostraram que 40% e 70% do N da planta no período inicial de crescimento foram derivados do fertilizante, na cana planta e primeira soqueira, respectivamente. E na colheita a participação do N-fertilizante variou entre 5-10% para a cana planta, e 10-35% para a soqueira. Da mesma forma Sampaio et al. (1984) obtiveram resultados onde a contribuição relativa do fertilizante no total de N da parte aérea decresceu de 44%, aos três meses após a aplicação do adubo, para menos de 10% na colheita.





**Figura 7.** Distribuição em porcentagem do N da parte aérea proveniente do fertilizante (NPPF) e de outras fontes (NPOF) na variedade RB92579 ao longo do ciclo da cana planta e na colheita final nos tratamentos com aplicação de 50 kg de N ha<sup>-1</sup> (fonte ureia, aplicado no sulco de plantio), com ou sem inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal.

Em relação a eficiência de recuperação do <sup>15</sup>N fertilizante (ER%) os resultados mostraram variação durante o crescimento da cultura (Tabela 2). Inicialmente a ER% foi baixa (34%) e a medida que a planta foi se desenvolvendo a eficiência aumentou chegando a mais de 67%, aos 261 dias após o plantio no tratamento inoculado. Contudo, a inoculação não influenciou na eficiência de recuperação do <sup>15</sup>N fertilizante.

**Tabela 2.** Eficiência de recuperação do <sup>15</sup>N-ureia (%) ao longo do ciclo da cana planta pela variedade RB92579 com e sem inoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal.

DAP	Ponteiro		Palha		Colmo		Parte aérea	
	N	N+Inoc	N	N+Inoc	N	N+Inoc	N	N+Inoc
	-----%-----							
<b>100</b>	-	-	-	-	-	-	33,2	34,1
<b>130</b>	-	-	-	-	-	-	47,9	52,8
<b>168</b>	-	-	-	-	-	-	58,1	61,6
<b>212</b>	41,7	48,8	4,1	2,9	13,3	14,3	59,0	65,9
<b>261</b>	38,7	39,8	6,7	8,4	19,3	19,2	64,7	67,4
<b>295</b>	22,8	30,4	13,6	12,4	23,2	22,8	59,6	65,6

DAP: dias após o plantio. N: aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (fonte ureia, aplicado no sulco de plantio). N+Inoc: aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N e inoculação com bactérias promotoras do

crescimento vegetal. A ausência de letras na linha em cada compartimento da parte aérea indica que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

No final do ciclo da cana planta a ER% foi em média de 50%, nos tratamentos com e sem inoculação, não diferindo entre si (Tabela 3). A recuperação média nos compartimentos da parte aérea foi de 21, 12 e 16% no colmo, palha e ponteiro, respectivamente. Em relação às avaliações realizadas anteriormente houve redução da eficiência no final do ciclo da cana planta. Este resultado ressalta que esta avaliação feita somente na colheita pode subestimar a eficiência de absorção de N fertilizante pela cana-de-açúcar.

A queda das folhas secas ao longo do ciclo (folhas com maior marcação de  $^{15}\text{N}$ ) e a redistribuição do N da parte aérea para a parte subterrânea pode contribuir para uma subestimativa da recuperação do N-fertilizante na colheita. Megda et al. (2015) avaliaram a recuperação de N em uma soqueira de cana-de-açúcar e encontraram valores de recuperação de N de 60% aos 73 dias após a adubação, e de 20% na colheita final.

Na colheita da cana planta também foi avaliado o aproveitamento do N fertilizante (ureia) aplicado no plantio pelas soqueiras subsequentes. Essa recuperação foi baixa, tanto na primeira quanto na segunda soqueira. Na soma dos três anos avaliados a recuperação do N-ureia aplicado no plantio foi de 54% (Tabela 2). Esse baixo valor pode indicar que a remobilização do N da parte aérea para a parte subterrânea, para posterior utilização do ciclo subsequente pode ser menor, ou menos eficiente que o relato em alguns estudos (ROBINSON et al., 2009; 2014).

**Tabela 3.** Recuperação de  $^{15}\text{N}$ -ureia do plantio pela cana planta, primeira e segunda soqueira da variedade RB92579 com ou sem inoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal.

Tratamento	Colmo	Folhas secas	Ponteiro	Parte aérea
	-----%-----			
Cana planta				
N	22,0	12,3	16,6	50,9
N+Inoc	20,0	12,8	16,6	49,5
CV%	23	4	19	13
1ª soqueira				
N	0,6	0,5	0,6	1,6
N+Inoc	0,5	0,5	0,6	1,7
CV%	24	29	35	16
2ª soqueira				
N	1,2	0,4	0,4	2,0
N+Inoc	1,3	0,4	0,4	2,1
CV%	24	15	30	17
Soma dos três ciclos				
N	23,8	13,2	17,6	54,6
N+Inoc	21,9	13,8	17,7	53,3
CV%	22	3	19	12

\*N: cana planta: 50 kg ha<sup>-1</sup> (fonte ureia, aplicado no sulco de plantio); \*\*N na cana soca: 100 kg ha<sup>-1</sup> (fonte sulfato de amônio, aplicado em cobertura). N+Inoc: aplicação de N e inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal. CV: coeficiente de variação. A ausência de letras na coluna indica que não houve diferença significativa entre os tratamentos na comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A absorção do  $^{15}\text{N}$ -ureia aplicado no plantio pela parte aérea foi de 50, 1,6 e 2%, na cana planta, primeira e segunda soqueira, respectivamente. Outros estudos também mostraram uma pequena recuperação do N de plantio pelos ciclos subsequentes. Fortes et al. (2011) obtiveram nestes mesmos ciclos valores de 31, 5 e 4% de recuperação do N-ureia aplicado no plantio. Já Basanta et al. (2003), do 1º ao 3º corte obtiveram, respectivamente, 63, 11, 4% de eficiência de recuperação do N-sulfato de amônio. Franco et al. (2010) obtiveram uma recuperação de 35% do N aplicado no plantio somando os três anos de avaliação. Os autores concluíram que a fertilização nitrogenada de plantio pode ser usada pelas soqueiras sequentes e que a quantidade recuperada dependerá do manejo da cultura. Após o primeiro ano o N proveniente do fertilizante pode ser incorporado na matéria orgânica do solo e/ou biomassa microbiana e ficar no solo como uma fonte recuperável pela soqueira seguinte (FORTES et al., 2011).

Efeitos positivos da adubação de plantio na soqueira sequente foram observados por Vitti et al. (2007), onde houve significativo aumento de produtividade nas soqueiras que foram adubadas com N no plantio.

Os mecanismos envolvidos no aumento da absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar inoculada com BPCV não estão totalmente claros, e podem estar indiretamente relacionados com os efeitos das bactérias no desenvolvimento da planta (CARVALHO et al., 2014). Mantelin; Torraine (2004) afirmaram que tanto BPCV quanto a disponibilidade de  $\text{NO}_3^-$  afetam a absorção de  $\text{NO}_3^-$  e a arquitetura radicular. Segundo os autores a baixa disponibilidade externa de  $\text{NO}_3^-$  induz a expressão de genes dos transportadores de  $\text{NO}_3^-$  e também promove a alongação das raízes laterais. Afirmaram também, que apesar da capacidade de fixar o N atmosférico, as BPCV não são capazes de fornecer grandes quantidades de N para as plantas via FBN. No entanto, tem grande impacto na nutrição nitrogenada pelo aumento da capacidade de absorver  $\text{NO}_3^-$ , indiretamente como uma consequência do estímulo ao desenvolvimento de raízes laterais e possivelmente de forma direta pelo estímulo ao sistema de transportadores de  $\text{NO}_3^-$ . Contudo, ressalta-se que em cana-de-açúcar ainda não foram realizados estudos avaliando se a aplicação de BPCV estimula a expressão de genes relacionados aos transportadores de N.

O maior acúmulo de N na parte aérea não foi devido a uma maior absorção do N fertilizante. Ao longo de todo o ciclo da cana planta e na colheita final não foram observadas diferenças entre os tratamentos em relação ao aumento da capacidade da planta em absorver o  $^{15}\text{N}$ -fertilizante. Outras fontes forneceram as maiores quantidades de N para a planta e a inoculação influenciou de forma significativa na nutrição nitrogenada durante o período de crescimento da cultura. Fontes como a matéria orgânica, água da chuva e ainda, a absorção de amônia da atmosfera pela folhagem são fontes de N para a cana-de-açúcar (TRIVELIN et al., 2002; PRASERTSAK et al., 2002; DOURADO-NETO et al., 2010; OTTO et al., 2013; MEIER et al., 2006; TRIVELIN et al., 2013). Além destes, a FBN também é considerada uma fonte significativa de N para a cana-de-açúcar (LIMA et al., 1987; URQUIAGA et al., 1992; 2012; BAPTISTA et al., 2014).

A caracterização do solo da área experimental do presente estudo e a quantificação da FBN foi tema do trabalho desenvolvido por Pedula (2013). O autor mostrou aumento do N disponível até a camada de 40 cm de profundidade e o enriquecimento do solo com o isótopo  $^{15}\text{N}$  até os 60 cm. O trabalho também mostrou que a FBN também contribuiu com a nutrição da variedade RB92579 ao longo do ciclo de crescimento da cana planta (Tabela 4).

**Tabela 4:** Delta ( $\delta^{15}\text{N}$ ) e N derivado da FBN da variedade RB92579 inoculada com bactérias promotoras de crescimento e do controle (PEDULA, 2013).

DAP/ mês da coleta	Delta $^{15}\text{N}$ Folha Bandeira		% FBN		$\delta^{15}\text{N}$ do solo (‰)
	Controle	Inoculado	Controle	Inoculado	
100/ago	9,79 $\pm$ 0,73 b	11,09 $\pm$ 0,19 a	24,07 a	13,98 b	12,92* $\pm$ 0,84
130/set	7,84 $\pm$ 0,29 a	7,82 $\pm$ 1,09 a	39,21 a	39,36 a	
168/out	7,57 $\pm$ 0,10 a	8,46 $\pm$ 1,03 a	41,32 a	34,42 a	
212/dez	7,60 $\pm$ 0,93 a	8,36 $\pm$ 0,90 a	41,04 a	35,18 a	
261/jan	8,66 $\pm$ 0,79 a	9,17 $\pm$ 1,85 a	32,87 a	28,85 a	
295/fev	7,73 $\pm$ 0,29 a	8,28 $\pm$ 0,68 a	40,06 a	35,84 a	
390/jun	8,72 $\pm$ 1,11 a	8,90 $\pm$ 0,49 a	32,37 a	30,96 a	
CV%	8,8		17,2		

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

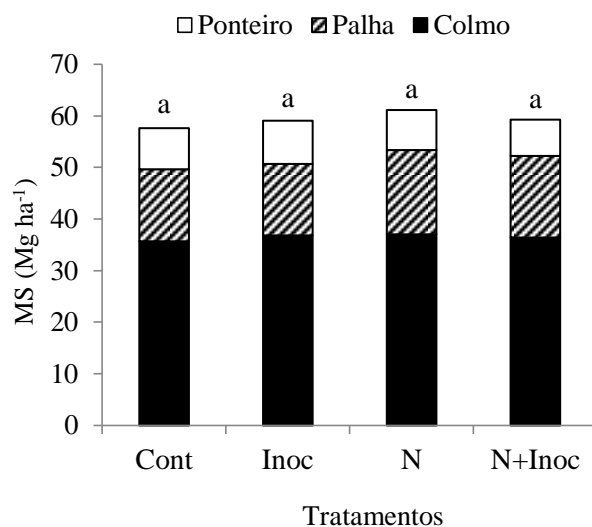
\*Comparação na linha dos valores de delta ( $\delta^{15}\text{N}$ ) do solo em relação ao controle e tratamento inoculado, significativo pelo Tukey a 5%. CV%: coeficiente de variação.

Vários estudos demonstraram que a cana-de-açúcar recebe aportes de N via FBN de forma natural (LIMA et al, 1987, BODDEY et al, 2003, URQUIAGA et al., 2012). Nessas estimativas da quantificação da FBN os valores alcançados mostraram que as plantas tiveram entre 25 e 60% (URQUIAGA et al., 1992; BODDEY et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2002; URQUIAGA et al., 2012). Essa grande variação nos valores de estimativa de FBN por essa técnica gera dúvidas sobre a real contribuição da FBN para a nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar (JORIS, 2015). Herridge; Peoples; Boddey (2008) relatam que para as condições brasileiras de produção da cana-de-açúcar a contribuição da FBN estaria em torno de 40 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N. Urquiaga et al. (2012) também observou em um estudo de longo prazo (15 anos) através de avaliações de abundância natural de  $^{15}\text{N}$  e balanço de N total no solo estaria próximo deste valor.

### 3.5.3 Avaliações na primeira e segunda soqueira da cana-de-açúcar

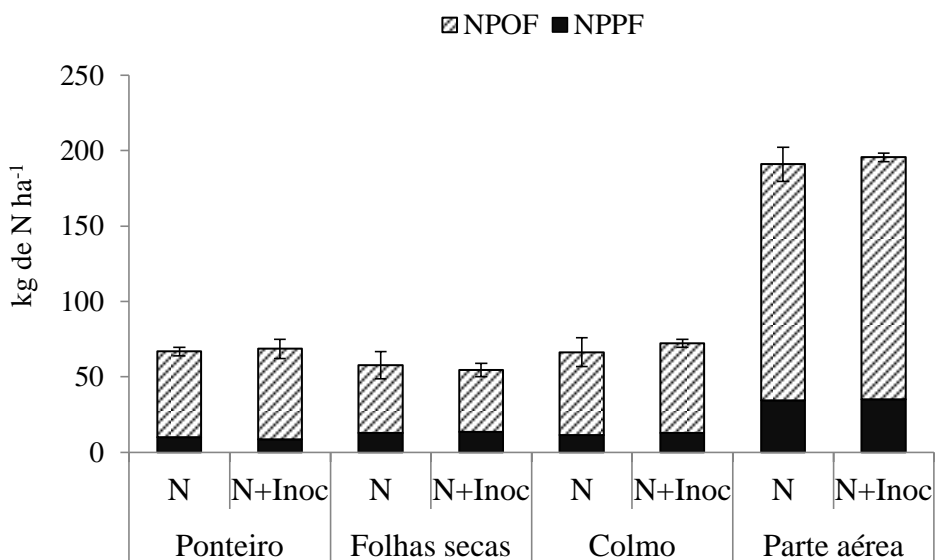
Após a colheita da cana planta o experimento foi reinstalado, com a condução da primeira soqueira. Nos tratamentos nitrogenados a fonte de N utilizada nas duas soqueiras foi o sulfato de amônio, sendo aplicado ao lado da linha (cerca de 20 cm), 30 dias após a colheita. Na ocasião, o adubo nitrogenado foi levemente incorporado ao solo. Já a inoculação foi feita via pulverização imediatamente ao corte da planta. Os primeiros seis meses de condução da primeira soqueira foram caracterizados por um intenso déficit hídrico (-293 mm), posteriormente, as condições de disponibilidade hídrica melhoraram até a colheita (Figura 1).

Nesse contexto de condução da primeira soqueira, a produtividade média foi de 59 Mg de massa seca ha<sup>-1</sup>, com rendimento menor que na cana planta. Assim como no primeiro ano do estudo não houve diferenças na produtividade da biomassa seca nos compartimentos da parte aérea entre os tratamentos (Figura 8).



**Figura 8.** Massa seca (MS) dos compartimentos da parte aérea (colmo, palha ponteiro) da variedade RB92579 na colheita da primeira soqueira com ou sem adubação com 100 kg de N ha<sup>-1</sup> (fonte sulfato de amônio, aplicado em cobertura), com ou sem inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal. As letras iguais nas colunas indicam que não houve diferenças entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

Na primeira soqueira a inoculação não influenciou no acúmulo de N na parte aérea da variedade RB92579 (Figura 9). Da mesma forma, não se observou efeito da inoculação na eficiência de recuperação do <sup>15</sup>N-fertilizante (NPPF) e no acúmulo de N proveniente de outras fontes (NPOF). A participação do N-fertilizante no total de N na parte aérea foi de 18%.



**Figura 9.** Acúmulo de N (kg ha<sup>-1</sup>) proveniente do fertilizante (NPPF) e de outras fontes (NPOF) na parte aérea (colmo, palha ponteiro) na colheita da primeira soqueira da variedade RB92579 adubada com 100 kg de N ha<sup>-1</sup> (fonte sulfato de amônio, aplicado em cobertura), com ou sem inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal. A ausência de letras em cada compartimento indica que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

Na primeira soqueira a recuperação foi de 34,3 e 35,3%, nos tratamentos controle e inoculado, respectivamente (Tabela 5). Não houve diferenças entre os tratamentos em nenhum compartimento. O maior acúmulo de N foi nas folhas secas, seguido do colmo e ponteiro. O <sup>15</sup>N-sulfato de amônio aplicado na primeira soqueira foi aproveitado, ainda que em pequena quantidade (1,6%), pela segunda soqueira.

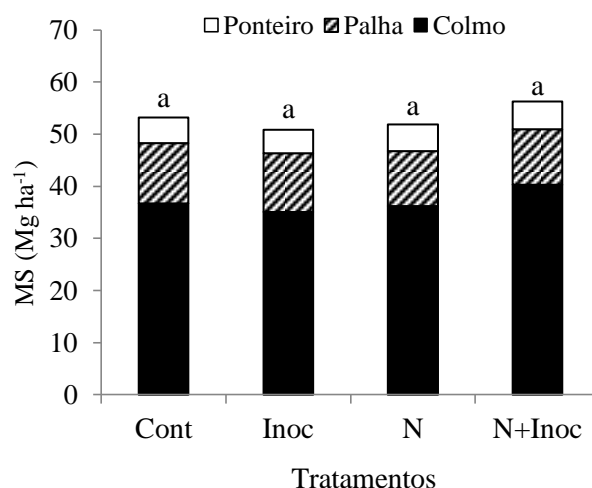
**Tabela 5.** Recuperação de <sup>15</sup>N-sulfato de amônio aplicado em cobertura após o corte da cana planta pela primeira e segunda soqueira da variedade RB92579 com ou sem inoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal.

Tratamento	Colmo	Folhas secas	Ponteiro	Parte aérea
	-----%-----			
<b>1ª soqueira</b>				
<b>N</b>	11,5	12,8	9,9	34,3
<b>N+Inoc</b>	12,9	13,6	8,7	35,3
<i>CV%</i>	33	11	21	15
<b>Residual da 1ª soqueira na 2ª soqueira</b>				
<b>N</b>	1,0	0,3	0,3	1,6
<b>N+Inoc</b>	1,1	0,2	0,3	1,6
<i>CV%</i>	28	26	35	21

\*N: na cana soca: 100 kg ha<sup>-1</sup> (fonte sulfato de amônio, aplicado em cobertura). N+Inoc: aplicação de N e inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal. CV: coeficiente de variação. A ausência de letras na coluna indica que não houve diferença significativa entre os tratamentos na comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

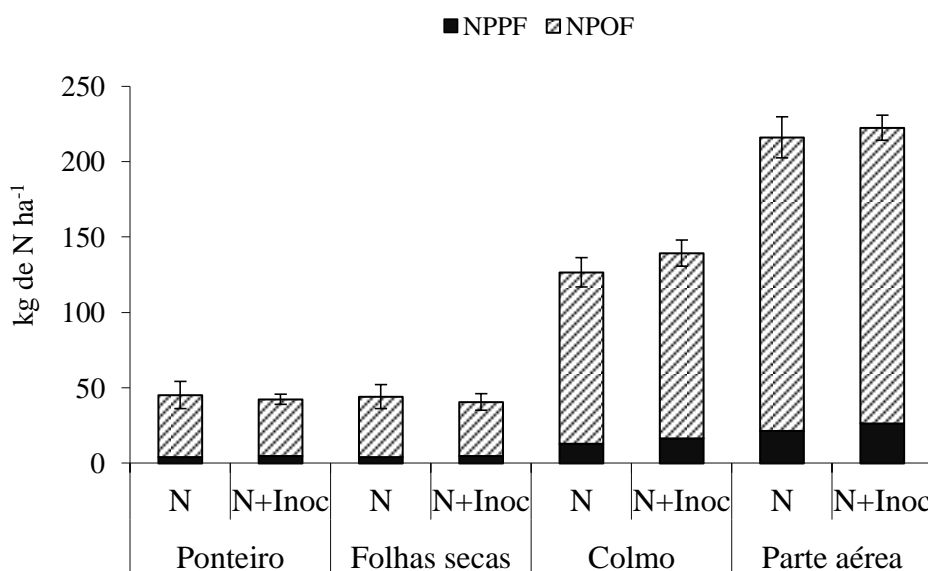
Na segunda soqueira foram mantidos os tratamentos e os procedimentos para a reinstalação da segunda soqueira. As condições climáticas não favoreceram o desenvolvimento da cultura (Figura 1). Houve déficit nos primeiros meses de desenvolvimento da planta e em janeiro, sétimo mês do desenvolvimento da cultura, e onde em geral se observa elevados ganhos de massa houve acentuado déficit hídrico. Mesmo nestas condições a produção de massa seca foi acima de 50 Mg ha<sup>-1</sup>. Assim como nos dois ciclos anteriores a adubação nitrogenada e a inoculação com BPCV não influenciaram no rendimento da massa seca da parte aérea (Figura 10).

Nas soqueiras, a resposta a adubação nitrogenada é maior que na cana-planta (VITTI et al., 2008). Nos estágios iniciais da soqueira a maior compactação do solo, a baixa temperatura e umidade desfavorecem a atividade microbiana e a imobilização do N. Além disso, a decomposição da matéria orgânica de alta relação C:N (restos culturais e raízes) em um período de grande exigência pela cultura faz com a adição de N no solo seja acompanhada de uma rápida resposta da soqueira em crescimento e produtividade (TRIVELIN et al., 2013). No entanto, a aplicação do N não promoveu aumento da biomassa em nenhum compartimento da parte aérea da variedade RB92579. É possível que o N presente no solo tenha fornecido as quantidades de N necessárias para o desenvolvimento e produtividade das soqueiras.



**Figura 10.** Massa seca (MS) dos compartimentos da parte aérea (colmo, palha ponteiro) da variedade RB92579 na colheita da segunda soqueira com ou sem adubação com 100 kg de N ha<sup>-1</sup> (fonte sulfato de amônio, aplicado em cobertura), com ou sem inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal. As letras iguais nas colunas indicam que não houve diferenças entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

A inoculação novamente não influenciou no acúmulo de N na parte aérea da variedade RB92579 (Figura 11). Da mesma forma, não se observou efeito da inoculação na eficiência de recuperação do <sup>15</sup>N-fertilizante (NPPF) e no acúmulo de N proveniente de outras fontes (NPOF). A participação do N-fertilizante no total de N na parte aérea foi 11%.



**Figura 11.** Acúmulo de N (kg ha<sup>-1</sup>) proveniente do fertilizante (NPPF) e de outras fontes (NPOF) na parte aérea (colmo, palha ponteiro) na colheita da segunda soqueira da variedade RB92579 adubada com 100 kg de N ha<sup>-1</sup> (fonte sulfato de amônio, aplicado em cobertura), com ou sem inoculação com bactérias promotoras do crescimento vegetal. A ausência de letras em cada compartimento indica que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

Já na segunda soqueira a recuperação do  $^{15}\text{N}$ -sulfato de amônio foi menor que no ciclo anterior, com 21,6 e 26,6%, nos tratamentos controle e inoculado, respectivamente. E como nos anos anteriores a inoculação não influenciou na recuperação do N fertilizante (Tabela 6). A maior recuperação do  $^{15}\text{N}$ -sulfato de amônio ocorreu nos colmos, com as folhas secas e o ponteiro com a mesma recuperação.

**Tabela 6.** Recuperação de  $^{15}\text{N}$ -sulfato de amônio pela segunda soqueira da variedade RB92579 com e sem inoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal.

Tratamento	Colmo	Palha	Ponteiro	Parte aérea
	-----%----- 2 <sup>a</sup> soqueira			
N	13,0	4,3	4,3	21,6
N+Inoc	16,7	4,8	5,1	26,6
CV%	32	12	23	22

N na cana soca: 100 kg ha<sup>-1</sup> (sulfato de amônio). CV: coeficiente de variação. A ausência de letras na coluna indica que não houve diferença significativa entre os tratamentos na comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na colheita, a extração de N excede a quantidade de N fertilizante aplicada (OLIVEIRA et al., 2010; SCHULTZ et al., 2010). Oliveira (2011) observou uma extração de 186,4 kg ha<sup>-1</sup> de N na cana planta, com aplicação de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N. A quantidade removida nos colmos não retorna ao sistema de produção (N exportado). Já o N acumulado na parte subterrânea (raiz + rizoma), folhas secas e ponteiros (no sistema de colheita sem queima), permanecem e são posteriormente disponibilizados para os ciclos seguintes, sendo esse tempo variável em função de diversos fatores (FORTES et al., 2013; TRIVELIN et al., 2013). Os valores de exportação de N nos colmos foram ainda mais elevados nas avaliações realizadas por Schultz et al. (2010), onde a exportação de N nos colmos na variedade RB867515, em sistema de colheita crua chegou a 162 e 108 kg ha<sup>-1</sup> de N, na cana planta e primeira soqueira, respectivamente. Já Oliveira et al. (2010a) avaliou a extração de N em diferentes variedades de cana-de-açúcar sob irrigação plena, a extração média de N das variedades estudadas foi de 92 kg ha<sup>-1</sup> de N, com as maiores extrações obtidas pelas variedades SP81-3250 e RB92579, com extrações de 168 e 167 kg de N ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

O maior acúmulo de N na parte aérea não foi devido a uma maior absorção do N fertilizante. A mineralização da matéria orgânica constitui a principal fonte de N em muitos sistemas agrícolas (HOLST et al., 2012; OTTO et al., 2013). O aumento do volume e/ou área radicular nos tratamentos inoculados com conseqüente aumento da exploração do solo pode ter contribuído para uma maior absorção do N do solo. Além do N inorgânico, proveniente da matéria orgânica, outra fonte de N para a cana-de-açúcar pouco estudada são os aminoácidos (HOLST et al., 2012). Recentes resultados obtidos por Brackin et al. (2015) sugerem que a contribuição relativa do N inorgânico na nutrição da planta pode estar superestimada e o N orgânico pode ter uma contribuição bem maior do que se preconizava até agora. Ressalta-se a necessidade de estudos envolvendo a BPCV com a dinâmica, disponibilidade e absorção de aminoácidos no solo, além do seu papel na nutrição da cana-de-açúcar.

Os resultados obtidos no presente trabalho mostraram uma maior eficiência na absorção do N fertilizante na cana planta em relação às soqueiras. O que contrasta com outros trabalhos onde a eficiência de absorção do N-fertilizante nas soqueiras geralmente é maior que na cana planta (FORTES et al., 2013). Franco et al. (2011) mostraram que 70 e 30% do N da cana soca foi proveniente do fertilizante, nos estágios iniciais do desenvolvimento e na



colheita, respectivamente. No mesmo trabalho os autores mostraram que essa contribuição foi significativamente maior que a observada na cana planta.

A eficiência de absorção do N também está relacionada ao manejo adotado. Prasertsak et al. (2002) observaram que a aplicação de diferentes formas, em superfície e na subsuperfície do solo há significativa diferença na recuperação do N-ureia. Os autores observaram que aos 166 dias após a fertilização, 35,1% do N-ureia foi recuperado pela variedade Q138 na aplicação do N em subsuperfície e 24,9% na aplicação em superfície. Aos 334 dias essa recuperação decresceu para 28,8% e 18,9%, respectivamente.

É possível que o efeito varietal possa estar relacionado com a maior eficiência na absorção do  $^{15}\text{N}$  fertilizante. A variedade RB92579 já mostrou que tem uma grande capacidade de extração e acúmulo de N na cana planta (OLIVEIRA et al., 2010). Kolln (2016) estudando a eficiência no uso do N por diferentes genótipos de cana-de-açúcar em condições controladas evidenciou que algumas variedades brasileiras contrastam quanto a eficiência no uso do N. Estudos desta natureza também foram desenvolvidos por pesquisadores australianos, onde foi observado que existem diferenças entre as variedades de cana-de-açúcar quanto a capacidade de absorver e utilizar o N (ROBINSON et al., 2007, 2009, WHAN et al., 2010). Variedades mais adaptadas às condições de baixa disponibilidade de N são capazes de absorver o N mesmo em baixas concentrações, no entanto, esses genótipos são poucos responsivos a condições onde há fornecimento de N (SANTOS et al., 2011).

A variedade RB92579 também recebeu aportes de N via FBN na primeira e segunda soqueira. Na primeira soqueira a análise da abundância natural de delta  $^{15}\text{N}$  nas folhas-bandeira, coletadas no momento da colheita indica que houve diferença entre o controle e o tratamento inoculado (Tabela 7). Pela diferença entre os valores de delta  $^{15}\text{N}$  da cana inoculada em relação ao controle evidencia que o inoculante influenciou a FBN na variedade RB92579. Já na segunda soqueira apesar dos valores de delta do tratamento inoculado terem sido numericamente maiores em relação ao controle, estes não foram significativos.

**Tabela 7:** Delta ( $\delta$ ) $^{15}\text{N}$  da folha bandeira e N derivado da FBN da variedade RB92579 inoculada com bactérias promotoras de crescimento e do controle na primeira e segunda soqueira.

Ciclo	$\delta^{15}\text{N}$ Folha Bandeira		% FBN		$\delta^{15}\text{N}$ do solo* (‰)
	Controle	Inoculado	Controle	Inoculado	
1ª soqueira	7,40 $\pm$ 0,55 b	8,15 $\pm$ 0,65 a	42,64 a	36,81 b	
2ª soqueira	7,52 $\pm$ 0,16 a	8,61 $\pm$ 0,83 a	41,75 a	33,23 a	12,92 $\pm$ 0,84
CV% 1ªsoq		4,6		7,0	
CV% 2ªsoq		12,4		21,3	

CV: coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%. \* $\delta^{15}\text{N}$  do solo (‰) obtido por Pedula (2013).

Esse resultado corrobora com os resultados obtidos por Schultz et al. (2012; 2014) onde os autores concluíram que é possível que o aumento nos valores de delta  $^{15}\text{N}$  no tratamento inoculado não esteja relacionado ao processo de FBN, mas por uma maior exploração do solo em maiores profundidades onde há maior enriquecimento do isótopo  $^{15}\text{N}$  em profundidade (Figura 8). Schultz et al. (2012) ainda constataram que o inoculante pode influenciar a marcha de absorção do N disponível no solo, provavelmente alterando a morfologia do sistema radicular, comprometendo assim a quantificação do N derivado do

processo de FBN. Já Oliveira et al. (2002; 2006) mostraram que a inoculação com o mesmo inoculante utilizado no presente estudo contribuiu com o aumento da FBN. Todavia, estes resultados não foram observados por Schultz et al. (2012; 2014). Da mesma forma, Joris (2015) mostrou aumento nos valores de delta  $^{15}\text{N}$  na cana-de-açúcar inoculada com o mesmo inoculante, porém, sem diferenças estatísticas entre os tratamentos. O autor ressaltou que houve indícios da entrada de  $\text{N}_2$  proveniente da atmosfera nas plantas de cana-de-açúcar. Todavia as estimativas foram variáveis, com os valores da entrada de N via FBN variando de 0 a 41%, sem efeito da inoculação.

Há certo consenso que as técnicas para medida da contribuição de FBN em gramíneas, como a cana-de-açúcar ainda precisam de alguns ajustes (BAPTISTA et al., 2014; JORIS, 2015). No entanto, técnicas mais precisas mostraram que a planta modelo para C4 *Setaria viridis*, recebeu significativo aporte de N via FBN (PANKIEVICZ et al., 2015). No estudo as plantas foram inoculadas com *Azospirillum brasilense* e as raízes de *S. viridis* foram efetivamente colonizadas pela bactéria inoculada resultando em um aumento no crescimento da planta. A utilização do marcador com  $^{13}\text{N}$  forneceu evidência direta da captação do marcador e incorporação em proteína pela planta. Os autores ainda ressaltaram que a adoção de *S. viridis* com um modelo pode promover as pesquisas sobre os mecanismos de FBN com bactérias associativas e elucidar mecanismos ainda pouco claros.

Não é possível afirmar, no entanto, que essa mesma contribuição da FBN obtida nos tratamentos sem adubação nitrogenada ocorreu nos tratamentos que receberam N fertilizante. Estudos mostraram que o N fertilizante, ou o N do solo em teores elevados pode influenciar na população de bactérias promotoras de crescimento e na atividade da enzima nitrogenase (REIS JUNIOR et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2003; MEDEIROS et al., 2006). No entanto, um estudo recente na Austrália mostrou que o N fertilizante em baixas doses não influencia e não gera condições favoráveis à FBN (YEOH et al., 2016).

### 3.6 CONCLUSÕES

- A inoculação com BPCV influenciou na produção de biomassa e na nutrição nitrogenada da variedade RB92579 durante o crescimento da cana planta, porém, este efeito não se estendeu até a colheita;
- O N fertilizante desempenhou um papel importante nos estágios iniciais do desenvolvimento da cana-de-açúcar, mas a maior parte do N acumulado no final do ciclo, tanto na cana planta, quanto na primeira e segunda soqueira é proveniente de outras fontes, entre elas a FBN;
- A inoculação com BPCV não influenciou na eficiência de recuperação do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante da cana planta, primeira e segunda soqueira na variedade RB92579.

## **4 CAPÍTULO II**

# **EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE <sup>15</sup>N-FERTILIZANTE POR TRÊS VARIETADES DE CANA-DE-ÇÚCAR EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA DE PLANTIO**

## 4.1 RESUMO

O fertilizante nitrogenado é uma das principais fontes de N para a nutrição da cana-de-açúcar, sendo assim responsável pelo consumo de energia fóssil e emissões de gases de efeito estufa no ciclo de produção da cultura. A busca pelo entendimento da nutrição nitrogenada e eficiência no uso do N em diferentes variedades de cana-de-açúcar é essencial para a sustentabilidade do sistema de produção da cana-de-açúcar no Brasil. O objetivo do trabalho foi avaliar a nutrição, a produção de biomassa aérea e de raízes e a eficiência na recuperação do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante por três variedades comerciais de cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada de plantio e do efeito residual do N do plantio na primeira soqueira. Um experimento foi instalado em março de 2013 em um Argissolo Amarelo distrófico no campo experimental da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ. As variedades utilizadas foram: RB867515, IACSP95-5000 e CTC 15. No plantio foram aplicadas duas doses de N (50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N-ureia) e uma testemunha sem adubação. Na primeira soqueira todos os tratamentos receberam a mesma dose de N (100 kg ha<sup>-1</sup> de N-sulfato de amônio). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Na cana planta, foram instaladas microparcelas com aplicação de  $^{15}\text{N}$ -ureia na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N e na primeira soqueira as microparcelas receberam  $^{15}\text{N}$ -sulfato de amônio em todos os tratamentos. A cana planta foi colhida dezessete meses após o plantio e a primeira soqueira doze meses após a reinstalação do experimento. Os parâmetros avaliados foram o crescimento, o efeito das variedades e das doses de N nas características químicas do solo, a nutrição das plantas através a diagnose foliar, produção de biomassa aérea e de raízes, o acúmulo de N na parte aérea e raízes e suas fontes e a eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$  fertilizante em função das doses de plantio e seu efeito residual na primeira soqueira. Na cana planta a adubação nitrogenada promoveu aumento no crescimento, produtividade de colmos e na extração de N nas três variedades. As variedades alteraram as características químicas do solo em função da adubação nitrogenada de plantio. A variedade RB867515 foi a mais produtiva e com as maiores extrações de N. A principal resposta da RB867515 ao N fertilizante foi no perfilhamento o que resultou em maior produtividade. A adubação nitrogenada de plantio refletiu em aumento de produtividade na soqueira sequente somente na variedade RB867515. Não houve diferenças entre as variedades quanto a produtividade de colmos na primeira soqueira. A recuperação média do N-fertilizante pelas variedades no ciclo da cana planta foi de 41%. Individualmente, a recuperação foi de 38, 39 e 47%, nas variedades RB867515, CTC 15 e IACSP95-000, respectivamente. Na primeira soqueira a adubação nitrogenada de plantio influenciou na eficiência de recuperação de N na variedade CTC 15, sendo a mais eficiente em relação as demais. O manejo da adubação nitrogenada de plantio em função da variedade pode influenciar em ganho de produtividade da soqueira subsequente da RB867515.

**Palavras-chave:** Produtividade. Variedades. Eficiência no uso do N.

## 4.2 ABSTRACT

Nitrogen fertilizer is one of the main sources of N for sugarcane nutrition, but one of the main responsible for the consumption of fossil energy and greenhouse gas emissions in the crop production cycle. The search for the understanding of nitrogen nutrition and efficiency in the use of N in different varieties of sugarcane is essential for the sustainability of the system of production of sugarcane in Brazil. The objective of this work was to evaluate nutrition, aerial and root biomass production and the efficiency of the recovery of  $^{15}\text{N}$ -fertilizer by three commercial varieties of sugarcane as a function of nitrogen fertilization and the residual effect of nitrogen planting at the first ratoon. An experiment was installed in March 2013 in a dystrophic Yellow Ultisol in the experimental field of Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ. The varieties used were: RB867515, IACSP95-5000 and CTC 15. Two nitrogen doses (50 and 100 kg ha<sup>-1</sup> of N-urea) and one control without fertilization were applied at planting. At the first pile, all treatments received the same dose of N (100 kg ha<sup>-1</sup> of ammonium N-sulfate). The experimental design was a randomized block design, with four replications. In the plant cane, micropores were applied with  $^{15}\text{N}$ -urea at a dose of 50 kg of N ha<sup>-1</sup> and at the first pile the micropores received  $^{15}\text{N}$ -ammonium sulfate in all treatments. The cane plant was harvested seventeen months after planting and the first ratoon twelve months after reinstallation of the experiment. The parameters evaluated were the growth, the effect of varieties and N doses on soil chemical characteristics, plant nutrition through leaf diagnosis, aerial and root biomass production, N accumulation in shoot and root and their Sources and recovery efficiency of  $^{15}\text{N}$  fertilizer as a function of planting rates and their residual effect on the first tiller. In the cane plant nitrogen fertilization promoted growth increase, shoot yield and N extraction in the three varieties studied. The varieties altered the chemical characteristics of the soil as a function of the nitrogenous fertilization of planting. The RB867515 variety was the most productive and with the highest extractions of N. The main response of RB867515 to N fertilizer was in tillering, which resulted in higher productivity. Nitrogen fertilization of planting reflected in increased productivity in the sequent soybean only in variety RB867515. There were no differences between the varieties regarding the yield of stalks at the first stump. The average recovery of N-fertilizer by the varieties in the plant cane cycle was 41%. Individually, the recovery was 38, 39 and 47%, in the varieties RB867515, CTC 15 and IACSP95-000, respectively. At the first stand the nitrogen fertilization of planting influenced the recovery efficiency of N in the CTC 15 variety, being the most efficient in relation to the others. The management of nitrogen fertilization from planting as a function of the variety can influence the productivity gain of the subsequent ryegrass of RB867515.

**Key words:** Productivity. Varieties. Nitrogen Use Efficiency.

### 4.3 INTRODUÇÃO

O N é um nutriente essencial para as plantas, mas sua baixa disponibilidade no solo normalmente limita o desenvolvimento vegetal (ROBERTSON; VITOUSEK, 2009). Para suprir a carência de N nos solos uma das principais estratégias adotadas é a aplicação de fertilizantes nitrogenados (LADHA et al., 2005). E de fato, os incrementos de produtividade com a fertilização nitrogenada são significativos em diversas culturas agrícolas (HARTMANN et al., 2015; JU et al., 2015; FORTES et al., 2013) o que a torna uma prática de grande importância para o atendimento da demanda crescente de alimentos no mundo (SNYDER, 2009).

Estima-se que o consumo mundial de N fertilizante seja de 104.252 Mt toneladas, com previsão de aumento da demanda para 115,8 Mt em 2017 (IFA, 2013a), sendo que aproximadamente 55% desse N seja usado para a produção de cereais (IFA, 2013b). No entanto, a obtenção do fertilizante nitrogenado ocorre através de processos industriais que demandam grandes quantidades de energia. Para a produção de 1 kg de N-ureia, principal N fertilizante utilizado hoje no mundo, sejam gastos 1,3 litros de combustível fóssil (RAMÍREZ; WORRELL, 2006), o que torna seu custo elevado em termos econômicos e ambientais.

O aproveitamento do N-fertilizante é baixo para a maioria das culturas. Em cereais as perdas de N podem ser significativas dependendo da cultura e do manejo (RAUN; JOHNSON, 1999) e na cana-de-açúcar esses valores variam entre 20 a 40% (PRASERTSAK et al., 2002; BASANTA et al., 2003; ISA et al., 2006; FORTES et al., 2013). O N derivado dos fertilizantes não absorvidos pelas plantas pode ser imobilizado na matéria orgânica do solo ou pode ser perdido para o ambiente. Nesse caso, é um potencial para tornar um poluente, no solo ou lençol freático, ou contribuir para a emissão de gases de efeito estufa (CHIEN; PROCHNOW; CANTARELLA, 2009; SNYDER et al., 2009).

A cana-de-açúcar é uma cultura com alta demanda e extração de nitrogênio (OLIVEIRA et al., 2010). No Brasil é a segunda maior consumidora de N fertilizante, sendo responsável por 22% do consumo deste insumo, o que corresponde a 628 mil toneladas (IFA - International Fertilizer Industry Association, 2013). Os fertilizantes nitrogenados são responsáveis por 22% da energia fóssil consumida ( $\text{MJ tc}^{-1}$ ) e por 11% da emissão de gases de efeito estufa na produção de cana-de-açúcar (MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008), sendo a fertilização nitrogenada a principal contribuinte para emissões de gases de efeito estufa no sistema de produção (LISBOA et al., 2011).

Em diversas culturas agrícolas os estudos de aquisição e uso do N avançaram consideravelmente e têm contribuído para uma maior eficiência no uso desse nutriente (MACHADO; FERNANDES, 2001; GAJU et al., 2011; CHEN et al., 2015; JU et al., 2015). Na cana-de-açúcar algumas informações ainda são incipientes, como os mecanismos de aquisição, transporte e remobilização do N (ROBINSON et al., 2014). Estudos de identificação de genótipos de cana-de-açúcar mais eficientes no uso do N estão mais avançados em outros países produtores de cana-de-açúcar, já no Brasil, poucos trabalhos foram desenvolvidos em relação à eficiência na absorção e eficiência de recuperação do N nos diferentes genótipos da cana-de-açúcar, principalmente em condições de campo. É possível que as diferentes variedades plantadas nos canaviais brasileiros sejam contrastantes quanto à eficiência no uso do N e podem ter um manejo diferenciado buscando uma maior produção por unidade de N aplicado. Nesse sentido, é importante e estratégica a busca por variedades mais eficientes no uso do N (OTTO et al., 2016; KOLLN, 2016). Diante da relevância da

cultura da cana-de-açúcar no cenário nacional e mundial, a busca por essas informações é de grande importância e trará retornos em níveis ambientais e econômicos. Nesse sentido, os objetivos deste capítulo foram:

- Avaliar a resposta de três variedades comerciais de cana-de-açúcar ao N fertilizante na nutrição, produtividade de raiz e da parte aérea na cana planta e o efeito residual da adubação nitrogenada de plantio na primeira soqueira;
- Verificar a eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante de três variedades comerciais de cana-de-açúcar na cana planta e primeira soqueira, em função da adubação nitrogenada de plantio.



## 4.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.4.1 Área

O experimento foi instalado em março de 2013 no campo experimental da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ. A área estava anteriormente sob cobertura de pastagem sem manejo agrônômico. O clima da região, segundo a classificação de Köppen é Aw, com verão úmido e inverno seco, com temperatura média de 24,6 °C e precipitação média de 1.200 mm por ano, sendo julho e agosto os meses mais secos.

Foi elaborado um balanço hídrico climatológico do período de condução do experimento (2013-2015). Para isso foram utilizados dados de evapotranspiração da cultura e dados climáticos obtidos em uma estação climatológica distante dois quilômetros da área experimental. Os cálculos foram realizados mediante o uso de planilhas eletrônicas (ROLIM; SENTELHAS; BARBIERI, 1998).

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Amarelo distrófico (SANTOS et. al, 2013). Para a caracterização química e física do solo foram abertas quatro trincheiras e amostras foram coletadas até 1 metro de profundidade (Tabelas 8 e 9).

**Tabela 8.** Análise química da amostra de terra para fins de fertilidade da área experimental na profundidade de 0 a 100 cm.

Prof cm	pH H <sub>2</sub> O	C %	N %	P -mg dm <sup>-3</sup> -	K %	Ca %	Mg %	Al %	H+Al %	SB %	T %	V %	m
0-10	5,86	0,63	0,04	9,78	48	0,82	0,47	0,03	0,82	1,41	2,23	63	1
10-20	4,85	0,53	0,03	5,07	25	0,18	0,19	0,32	0,98	0,44	1,31	33	22
20-40	4,77	0,34	0,03	2,82	12	0,10	0,10	0,47	1,38	0,22	1,60	14	29
40-60	4,72	0,23	0,02	2,00	6	0,00	0,04	0,51	1,33	0,06	0,95	6	37
60-80	4,62	0,27	0,02	2,03	6	0,09	0,05	0,69	1,41	0,15	1,39	11	44
80-100	4,57	0,31	0,02	1,80	9	0,41	0,12	1,10	1,57	0,55	1,91	29	51

Média de 4 repetições. C (Walkley e Black); N (Kjeldahl); P e K disponível (Mehlich 1); Al, Ca e Mg (KCl 1 mol.l<sup>-1</sup>); H+Al (acetato de cálcio 1 mol.l<sup>-1</sup>).

**Tabela 9.** Densidade e textura do solo da área experimental na profundidade de 0 a 100 cm.

Prof cm	Densidade g cm <sup>-3</sup>	Areia %	Silte %	Argila %	Classificação
0-10	1,45	839	40	121	Areia franca
10-20	1,63	803	37	160	Areia franca
20-40	1,64	760	30	210	Franco argilo arenosa
40-60	1,65	722	22	256	Franco argilo arenosa
60-80	1,66	560	13	427	Franco argilosa
80-100	1,62	509	4	487	Argila

EMBRAPA (1997).

#### 4.4.2 Preparo do solo

O sistema de preparo de solo foi o convencional, inicialmente com uma gradagem aradora (Figura 12a), seguida de duas gradagens intermediárias. Posteriormente foram aplicados  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário dolomítico, incorporado com uma gradagem intermediária (Figura 12b). Decorridos 30 dias, foi realizada uma gradagem niveladora (Figura 12c) e finalizou-se o preparo com a abertura dos sulcos de plantio com profundidade entre 25 e 30 cm, e espaçamento de 1,50 m (Figura 12d).



**Figura 12.** Etapas do preparo de solo da área experimental: a) gradagem aradora; b) incorporação de calcário com gradagem intermediária; c) área após gradagem niveladora; d) sulcos de plantio e marcação das parcelas.

#### 4.4.3 Variedades de cana-de-açúcar

Foram utilizadas três variedades de cana-de-açúcar, sendo duas indicadas para ambientes restritivos (RB867515 e CTC 15) e uma indicada para ambientes de alta produtividade (IACSP95-5000). As mudas foram provenientes de área de viveiro da Usina Cruz Alta/Guarani, localizada no município de Olímpia-SP. O resumo das indicações de ambientes de produção e o período de colheita das três variedades está apresentado na Tabela 10.

**Tabela 10.** Indicação de ambientes de produção e época de colheita recomendada para as variedades de cana-de-açúcar utilizadas no experimento.

Variedades	Ambiente de produção					Época de colheita							
	A	B	C	D	E	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov
RB867515			X	X	X				X	X	X		
CTC 15				X	X				X	X	X	X	
IACSP95-5000	X	X	X					X	X	X	X	X	

Ambiente A: solo com alta fertilidade e boa disponibilidade hídrica, produtividade esperada acima de 90 Mg ha<sup>-1</sup>. – ambiente E: Solo de baixa fertilidade, baixa disponibilidade de água, produtividade esperada em torno de 68 Mg ha<sup>-1</sup> (PRADO et al., 2008).

As mudas foram cortadas e mantidas no campo, sendo carregadas e transportadas para Seropédica quatro dias após o corte. Antes do plantio, foram realizadas amostragens dos colmos de cada variedade para avaliação do teor de macro e micro nutrientes presentes no “colmo semente”. A partir desses dados e pelo peso médio dos colmos plantados foi feita uma estimativa da quantidade de macro e micronutrientes inseridos no experimento através dos colmos plantados (Tabela 11).

**Tabela 11.** Teores de macro e micronutrientes presentes nos colmos utilizados como muda no experimento.

Variedade	N	P	K	Ca	Mg	S	mg kg <sup>-1</sup>				
							Cu	Fe	Zn	Mn	B
RB867515	7,0	0,87	8,4	0,9	0,60	1,9	4	104	10	30	6
CTC 15	6,3	0,77	17,0	1,2	0,82	2,7	10	256	14	22	13
IACSP95-5000	8,4	0,92	9,7	1,4	0,85	2,4	4	88	13	42	8
							g ha <sup>-1</sup>				
RB867515	21,0	2,6	25,2	2,7	1,8	5,7	12	312	30	90	18
CTC 15	18,9	2,3	51,0	3,6	2,5	8,1	30	768	42	66	39
IACSP95-5000	25,2	2,8	29,1	4,2	2,6	7,2	12	264	39	126	24

Malavolta et al. (1997). Valores são médias de quatro repetições.

#### 4.4.4 Instalação do experimento

O experimento foi instalado em março de 2013. A adubação de plantio consistiu na aplicação de 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, na forma de superfosfato simples e 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, na forma de cloreto de potássio. Posteriormente foram aplicados 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 40 kg ha<sup>-1</sup> de FTE BR 12 com fonte de micronutrientes em cobertura. O cálculo para a adubação de plantio foi baseado na análise química do solo e na recomendação da adubação preconizada para a cana-planta na Região Centro-Sul (VITTI et al., 2008).

Os colmos foram distribuídos e cortados dentro do sulco de plantio. Cada sulco recebeu seis colmos inteiros, resultando em uma média de 10 a 12 gemas por metro. Após a distribuição e corte dos colmos foi realizado o fechamento dos sulcos manualmente.

#### 4.4.5 Delineamento experimental

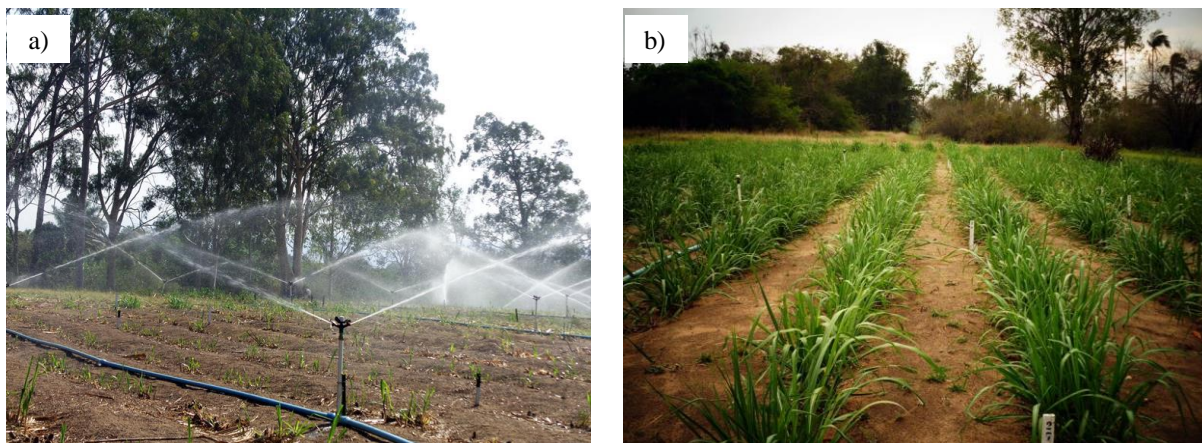
O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos na cana planta consistiram das três variedades de cana-de-açúcar sob três doses de N: 0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, na forma de ureia aplicados no fundo do sulco de plantio. As parcelas experimentais consistiram de 5 linhas de 5 metros de comprimento, com

espaçamento entre linhas de 1,50 m, resultando em uma área de 35 m<sup>2</sup> por parcela. O experimento ocupou uma área útil de 1.260 m<sup>2</sup>.

Após a colheita da cana planta (set/14) o experimento foi reinstalado. A adubação consistiu na aplicação de 160 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, na forma de cloreto de potássio, parcelado em duas vezes (80 + 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O), 30 e 60 dias após o corte da cana planta. Também foi aplicado 500 kg ha<sup>-1</sup> de calcário, levemente incorporado ao solo, 30 dias após a colheita da cana planta.

O N na forma de sulfato de amônio (100 kg ha<sup>-1</sup> de N) foi aplicado em cobertura ao lado da linha da soqueira, 30 dias após o plantio, em todas as parcelas. O objetivo foi detectar efeito residual da adubação nitrogenada de plantio na produtividade e na recuperação de N na primeira soqueira.

Para a brotação e desenvolvimento inicial da soqueira foram aplicadas lâminas de água que totalizaram 120 mm distribuídos nos quatro primeiros meses após a reinstalação do experimento (Figura 13 a e b). As lâminas aplicadas foram contabilizadas no balanço hídrico. Posteriormente não foi possível a manutenção da irrigação de salvamento devido a baixa disponibilidade de água nos reservatórios da Embrapa Agrobiologia.



**Figura 13.** a) Irrigação após o corte da cana planta e b) desenvolvimento inicial da primeira soqueira.

#### 4.4.6 Coletas e Avaliações

##### a) Avaliações biométricas

Foram realizadas seis avaliações não destrutivas aos: 114, 169, 230, 301, 396 e 526 dias após o plantio (DAP). Em cada parcela foram marcadas vinte plantas (linhas 2 e 4), nas quais foram realizadas medições de altura, diâmetro de colmo, contagem de perfilhos, comprimento e largura da folha +3, contagem do número de folhas, área foliar (AF) e índice de área foliar (IAF).

O número médio de folhas verdes por perfilho, em cada unidade experimental, foi determinado considerando-se as folhas com pelo menos 20% de área foliar verde. A altura foi determinada pela medição do solo até a folha +1 com auxílio de uma trena. O diâmetro foi medido na base do perfilho com auxílio de um paquímetro digital. Já a brotação e o perfilhamento foram avaliados pela contagem de todos os perfilhos nas três linhas centrais da parcela.

A área foliar por perfilho (AF) foi determinada pela contagem do número de folhas verdes (folha totalmente expandida com o mínimo de 20% de área verde, contada a partir da folha +1) e pelas medições nas folhas +3 (sistema de classificação de Kuijper), sendo obtidos o comprimento e a largura da folha na porção mediana, segundo metodologia descrita por

Hermann; Câmara (1999):  $AF = C \times L \times 0,75 \times (N + 2)$ , em que C é o comprimento da folha +3, L é a largura da folha +3, 0,75 é o fator de correção para área foliar da cultura, e N é o número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde.

#### **b) Diagnose nutricional**

As folhas foram coletadas no estágio de máximo desenvolvimento da cultura (6 e 5 meses para cana planta e soqueira, respectivamente). Foram coletadas folhas-diagnóstico segundo Raij; Cantarella (1997), sendo coletadas aleatoriamente em cada parcela 10 folhas na posição +1 (sistema Kuijper) que constituíram uma amostra composta. Em cada folha +1 foi coletada apenas o terço médio, aproximadamente 20 cm, sendo excluída a nervura central. A folha +1 é a primeira folha, a partir do topo da planta que apresenta visível o ponto separação entre o limbo e bainha foliar denominado de TVD (Top Visible Dewlap), também chamada de “colarinho”. Após coletadas, separadas as partes e lavadas, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até atingirem massa constante. Após, foram moídas em moinho tipo Wiley, onde foram determinadas as concentrações de macro e micronutrientes (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

#### **c) Alterações nas características químicas do solo**

Após a colheita da cana planta coletaram-se amostras de terra para avaliação do efeito das variedades e doses de N sobre as características químicas do solo. Amostras compostas por seis subamostras foram coletadas em cada parcela nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm. Para a coleta utilizou uma sonda amostradora de solo. Após a coleta as amostras foram secadas ao ar livre e passadas em peneira de 2 mm de diâmetro. Os parâmetros analisados foram: pH (água), C (Walkley e Black); N-total (Kjeldahl); P e K disponível (Mehlich 1); Al, Ca e Mg (KCl 1 mol l<sup>-1</sup>); H+Al (acetato de cálcio 1 mol l<sup>-1</sup>), além dos cálculos de soma de bases, saturação de bases e alumínio (SILVA et al., 2009).

#### **d) Quantificação da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN)**

Para a estimativa da fixação biológica de nitrogênio (FBN) foi utilizada a técnica da abundância natural de <sup>15</sup>N proposta por Shearer; Kohl (1986). Nesta técnica, as folhas foram amostradas retirando-se a primeira folha completamente desenvolvida, denominada folha bandeira ou folha +1 (sistema Kuijper). Esta folha é utilizada para determinação do estado nutricional e também por apresentar um valor médio de abundância natural de <sup>15</sup>N da planta inteira (BODDEY et al., 2001), e em cada parcela foram coletadas 10 folhas ao acaso.

Na área experimental foram amostradas plantas não leguminosas de ocorrência natural (plantas espontâneas), para serem utilizadas como plantas testemunhas. Estas plantas foram identificadas taxonomicamente ao nível de espécie, e o número de espécies amostradas variou em função da ocorrência das mesmas nos blocos. A amostragem foi realizada pela formação de uma amostra composta em cada bloco do experimento.

Para o cálculo da contribuição percentual da FBN para a nutrição nitrogenada das variedades de cana-de-açúcar se utilizou a técnica de abundância natural de <sup>15</sup>N, que foi realizada aplicando a fórmula (SHEARER; KOHL, 1986):

$$\% \text{ FBN} = (( \delta^{15}\text{N PTNF} - \delta^{15}\text{N PTF} ) \times 100) / (\delta^{15}\text{N PTNF} - \text{B})$$

Onde:

$\delta^{15}\text{N PTNF}$  – Valor de  $\delta^{15}\text{N}$  do solo obtido através de plantas testemunhas não fixadoras, utilizadas como referência.

$\delta^{15}\text{N}$  PTF - Valor de  $\delta^{15}\text{N}$  da planta teste considerada fixadora de  $\text{N}_2$  (cana-de-açúcar).  
B – Valor da discriminação isotópica de  $^{15}\text{N}$  feita pelas plantas durante o processo de FBN considerado igual a zero segundo Boddey et al. (2001).

#### **e) Eficiência de recuperação do N fertilizante em cana-de-açúcar**

No plantio, nos tratamentos com aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N foram instaladas microparcelsas de 2 metros de comprimento e com 1,5 metros de espaçamento entre linhas, totalizando três metros quadrados. Nas microparcelsas foi utilizada como fonte de N ureia enriquecida com 1,0 % átomos de  $^{15}\text{N}$ . Já na primeira soqueira as microparcelsas instaladas no plantio foram mantidas, mas sem a reaplicação do fertilizante marcado. Foram instaladas novas microparcelsas em todas as parcelas do experimento. A fonte de N foi o sulfato de amônio enriquecido com 1% de átomos de  $^{15}\text{N}$ , com a dose equivalente a  $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$ .

Na ocasião da colheita foram retiradas sub amostras de colmos, folhas secas (palha) e folhas verdes (ponteiros) que foram pesadas e secas em estufa de circulação forçada de ar a  $65^\circ\text{C}$  até atingirem massa constante. Após, foram moídas em moinho tipo Wiley para depois serem finamente moídas em um sistema similar ao de Arnold; Schepers (2004) e foram analisadas as abundâncias de  $^{15}\text{N}$  (% de átomos de  $^{15}\text{N}$ ) no espectrômetro de massas (Finnigan MAT, Bremen, Germany) do Laboratório de Isótopos Estáveis John M Day da Embrapa Agrobiologia (RAMOS et al., 2001).

Com estes resultados foram feitos os cálculos referente a quantidade de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (NPPF) e recuperação do N fertilizante (R), conforme Trivellin et al. (1994 e 1995).

$$\text{NPPF (\%)} = (a/b) \times 100$$

$$\text{NPPF ( Kg ha}^{-1}\text{)} = [ \text{NPPF (\%)} / 100 ] \times \text{NT (Kg ha}^{-1}\text{)}$$

$$\text{NOF (Kg ha}^{-1}\text{)} = (\text{NT} - \text{NPPF})$$

$$\text{R (\%)} = [ \text{NPPF (Kg ha}^{-1}\text{)} / \text{NF ( Kg ha}^{-1}\text{)} ] \times 100$$

Onde:

NPPF - Nitrogênio na planta proveniente do Fertilizante ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ).

a e b - Átomos  $^{15}\text{N}$  em excesso na planta e no fertilizante, respectivamente.

NT - Nitrogênio total acumulado ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ).

NOF - Nitrogênio proveniente de outras fontes ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ).

NF - Nitrogênio fertilizante aplicado ( $\text{Kg ha}^{-1}$ )

#### **f) Extração de nitrogênio**

Amostras da parte aérea foram retiradas com o objetivo de se quantificar a massa de material seco dos compartimentos da planta (colmos, folhas secas, ponteiros). As amostras foram pesadas e secas em estufa de circulação forçada de ar a  $65^\circ\text{C}$  (até massa constante). Após serem pesadas, moídas em moinho do tipo Wiley foram utilizadas para determinação das concentrações de N nos compartimentos da parte aérea. Após a determinação da massa seca dos compartimentos da cana-planta ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e das concentrações de N ( $\text{g kg}^{-1}$ ) foi obtida a extração de N pela parte aérea.

#### **g) Produtividade de massa fresca e seca da parte aérea**

A cana planta foi colhida dezessete meses após o plantio e a primeira soqueira doze meses após a reinstalação do experimento. A produtividade foi avaliada pela colheita das linhas úteis da parcela. Os compartimentos da parte aérea: colmos, folhas secas (palha) e folhas verdes (ponteiros) foram separados e pesados em balança digital. Os dados obtidos foram extrapolados para  $\text{Mg ha}^{-1}$  considerando o espaçamento de 1,50 m, obtendo dessa forma a produtividade de colmos (TCH) e da parte aérea. Para a estimativa de produção da

fitomassa seca da parte aérea, amostras de colmo, palha e ponteiro foram pesadas e determinadas as massas do material natural diretamente do campo. As amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até atingirem massa constante. Os resultados foram extrapolados para Mg ha<sup>-1</sup>.

#### **h) Produtividade de raiz**

A avaliação da massa seca de raízes foi realizada logo após a colheita da cana planta e da primeira soqueira. A metodologia utilizada assim como os cálculos para obtenção da densidade e massa de raízes foi de acordo com Otto et al. (2009). Foi utilizada uma sonda com 0,055 m de diâmetro interno (Sondaterra<sup>®</sup>), até a profundidade de 0,6 m, dividido em camadas de 0,2 m. Foram coletadas duas amostras sobre a linha de plantio, duas a 0,3 m da linha e duas a 0,6 m da linha, de modo que as seis amostras representassem o perfil do solo explorado pelo sistema radicular (OTTO et al., 2009).

O material coletado foi acondicionado em sacos plásticos e levado para o laboratório onde foi feita a separação das raízes do solo utilizando peneiras de malha de 1 e 2 mm. As raízes foram lavadas em água corrente e, em seguida, secas em estufa a 65°C até a obtenção de massa constante. No presente estudo não foi considerada a massa de rizomas. O cálculo da massa de matéria seca de raízes foi realizado separadamente para as camadas de 0–0,2, 0,2–0,4 e 0,4–0,6 m, e posteriormente também foram somadas, para extrapolar os valores para matéria seca de raízes por hectare até 0,6 m.

#### **i) Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar**

Previamente às colheitas foram separadas 10 colmos por parcela, seguidos na linha, destinados a avaliação dos parâmetros tecnológicos: Brix (sólidos solúveis totais), pureza, Pol da cana (sacarose aparente), fibra, açúcares redutores (AR), açúcar total recuperável (ATR em kg t<sup>-1</sup>) segundo Fernandes (2011). As amostras foram enviadas imediatamente para análise no laboratório de sacarose da Usina Paraíso em Campos dos Goytacazes, RJ.

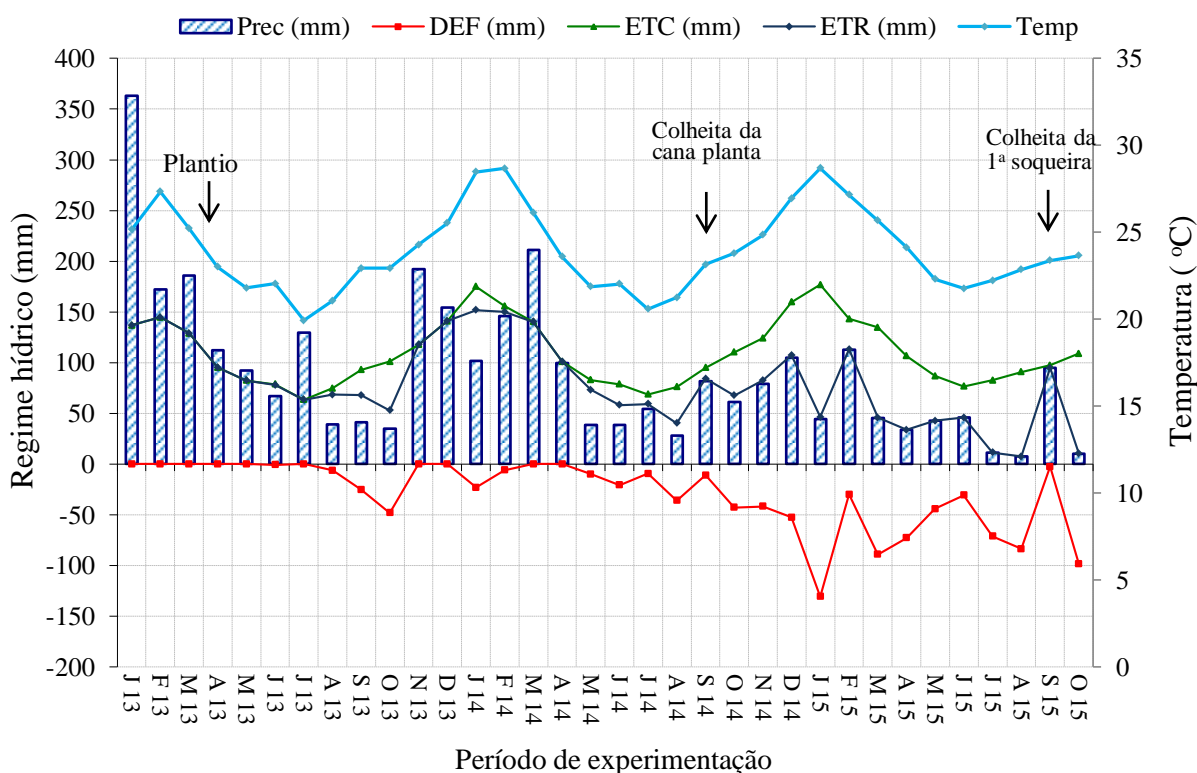
#### **j) Análise estatística**

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, por meio do teste de F ao nível de 95% de confiança. Para comparar o efeito de doses de N usou-se a análise de regressão polinomial. Quando o teste F apresentou significância na ANOVA foi aplicado o teste de Tukey a 95% de confiança para comparar as médias nas variáveis qualitativas.

## 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.5.1 Balanço hídrico climatológico

Durante o ciclo da cana planta a precipitação foi de 1.663 mm com um déficit hídrico de -195 mm (Figura 14). Após o plantio, a disponibilidade hídrica favoreceu o estabelecimento e desenvolvimento inicial da cultura. Os déficits ocorreram entre os meses de julho a novembro de 2013, em janeiro de 2014 e posteriormente nos meses que antecederam a colheita. O ciclo da primeira soqueira foi marcado pela baixa precipitação (766 mm) e intenso déficit hídrico durante todo o ciclo da cultura (-700 mm). Nos períodos iniciais mais críticos foram aplicadas lâminas de água que totalizaram 120 mm distribuídos nos quatro primeiros meses após a reinstalação do experimento.



**Figura 14.** Balanço climatológico do ciclo agrícola da cana planta (2013/2014) e primeira soqueira (2014/2015). Precipitação + irrigação (Prec), déficit hídrico (DEF), evapotranspiração potencial da cultura (ETC), evapotranspiração real da cultura (ETR) e temperatura (Temp). Plantio: 28/03/2013. Colheita da cana planta e 1ª soqueira: set/2014 e set/2015, respectivamente.

### 4.5.2 Parâmetros biométricos na cana planta

O início da brotação da cana planta ocorreu 14 dias após o plantio (DAP), sendo a primeira avaliação realizada aos 27 DAP. Após a estabilização da brotação observou-se um aumento expressivo no perfilhamento com a emissão dos perfilhos secundários e início da formação de touceiras (Tabela 12). O maior perfilhamento foi observado no quarto mês de condução do experimento decrescendo ao longo das avaliações e se mantendo estável até a



colheita. Esse comportamento é comum em variedades de cana-de-açúcar (BELL; GARSIDE, 2005). Após o crescimento e estabilização tem início uma redução no número de perfilhos em razão da competição por luz, água e nutrientes refletindo na redução do processo e morte dos perfilhos mais jovens (MACHADO et al., 1982; OLIVEIRA et al., 2004; BONNETT, 2013). Em média, a variedade com maior perfilhamento final foi a IACSP95-5000, seguido da CTC 15 e RB867515, com 11,8, 11,0 e 10,1 colmos por metro, respectivamente.

**Tabela 12.** Perfilhamento (perfilhos metro<sup>-1</sup>) de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N) ao longo do ciclo da cana planta.

Variedade	Dose de N	Dias após o plantio							
		27	46	85	114	169	230	301	526
	kg ha <sup>-1</sup>	-----perfilhos m <sup>-1</sup> -----							
RB867515	0	3,7	4,7	11,7	12,8	12,2	9,2	8,1	8,5
	50	4,4	6,4	13,8	14,0	12,0	10,7	9,6	10,8
	100	5,0	6,8	16,0	15,7	13,6	10,1	10,1	10,9
	Média	4,3	6,0	13,8	14,1	12,6	10,0	9,3	10,1
	Fd	*	***	***	ns	ns	ns	*	**
	FRL	***	***	***	*	ns	ns	**	***
CTC 15	0	4,5	5,3	11,7	14,2	15,7	13,0	9,2	10,6
	50	4,3	5,5	14,2	15,1	14,4	11,9	11,7	11,0
	100	3,9	5,7	14,9	15,9	14,1	11,9	11,1	11,3
	Média	4,2	5,5	13,6	15,1	14,7	12,3	10,7	11,0
	Fd	ns	ns	**	ns	ns	ns	**	ns
	FRL	ns	ns	**	*	*	ns	**	ns
IACSP95-5000	0	4,0	5,1	13,3	13,5	15,8	13,1	11,8	11,1
	50	4,2	6,1	14,3	15,0	15,1	13,0	12,1	12,2
	100	4,1	5,5	12,4	15,1	14,8	13,0	12,3	12,3
	Média	4,1	5,5	13,3	15,5	15,2	13,0	12,1	11,8
	Fd	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns

\*Fd: teste F para as doses; FRL: teste F para o modelo de regressão linear. \*\*\*, \*\*, \* Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, para cada data de avaliação. CV: 8%.

Em relação ao perfilhamento a variedade RB867515 foi altamente responsiva a adubação nitrogenada. Nas primeiras avaliações o N fertilizante proporcionou significativo aumento na brotação e perfilhamento, com este efeito se estendendo até as últimas avaliações. Na variedade CTC esse efeito não foi observado nas duas primeiras avaliações. Mas posteriormente houve resposta significativa neste parâmetro, não sendo no entanto, significativo na avaliação prévia a colheita. Pode-se destacar essa capacidade da variedade RB867515 na resposta a adubação nitrogenada nos estágios iniciais de desenvolvimento e formação do *stand*, o que refletiu de forma significativa na produtividade final, mesmo tendo como característica o baixo perfilhamento (OLIVEIRA et al., 2010). Uma ótima produtividade depende perfilhamento e de um suficiente estabelecimento de colmos (BONNETT, 2013). Terauchi; Muraoka (2000) ressaltam que as características ideais de

cultivares de cana-de-açúcar estariam relacionadas com o rápido crescimento e desenvolvimento na fase inicial, que corresponde ao perfilhamento. No entanto, um inadequado manejo, como aplicação em excesso de nitrogênio pode aumentar o perfilhamento tardio com conseqüente redução de açúcar com redução na lucratividade da lavoura (BERDING et al., 2005).

Durante o crescimento das plantas praticamente não houve grandes restrições com relação ao clima (Figura 1). O maior crescimento ao longo das avaliações foi da variedade RB867515, sendo superior as demais em todas as avaliações (Tabela 13). No entanto, diferente do aconteceu com o perfilhamento não houve nenhum efeito da adubação nitrogenada no crescimento da variedade RB867515, sendo este crescimento devido às características da variedade e não ao efeito do N. Já nas outras variedades a altura das plantas foi influenciada de forma significativa pela adubação nitrogenada de plantio.

**Tabela 13.** Altura (cm) de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N) ao longo do ciclo da cana planta.

Variedade	Dose de N kg ha <sup>-1</sup>	Dias após o plantio					
		114	169	230	301	396	526
RB867515		-----cm-----					
	0	50,2	94,2	175,8	301,8	398,0	444,9
	50	55,8	95,2	175,5	297,8	388,2	438,8
	100	55,7	99,7	180,9	302,9	402,6	445,2
	Média	53,9	96,4	177,4	300,8	396,3	443,0
	Fd	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CTC 15	0	26,6	41,7	102,4	212,7	348,1	392,3
	50	42,4	73,4	144,6	255,6	378,5	407,5
	100	39,9	73,6	154,9	275,6	366,2	418,8
	Média	36,3	62,9	134,0	248,0	364,2	406,2
	Fd	ns	***	***	***	**	*
	FRL	ns	***	***	***	ns	**
IACSP95-5000	0	27,6	41,2	100,2	195,6	298,6	322,3
	50	39,3	64,2	133,5	234,9	329,3	351,9
	100	40,3	62,7	131,6	240,8	326,7	350,5
	Média	35,7	56,0	121,8	223,8	318,2	341,5
	Fd	ns	ns	***	***	**	**
	FRL	ns	ns	***	***	**	**

\*Fd: teste F para as doses; FRL: teste F para o modelo de regressão linear. \*\*\*, \*\*, \* Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, para cada data de avaliação. CV: 8%.

De forma geral o crescimento em altura das variedades em função da adubação com N manteve o padrão de crescimento da cana-de-açúcar. Inicialmente observou-se um crescimento lento, entre o plantio e 200 dias após o plantio (março a outubro). Nessa fase a maior parcela da massa seca produzida destina-se a produção de folhas, sendo responsável por 70% da biomassa da planta (ROBERTSON et al., 1996). Posteriormente, entre 200 a 400 DAP (outubro-maio) houve acentuado crescimento das plantas com intensa emissão de

perfilhos (Tabela 12) e fase de maior área foliar (Tabela 15). Esta fase é caracterizada pelo surgimento dos colmos e intensa produção de biomassa, na qual cerca de 70% da massa seca é acumulada (ALVAREZ; CASTRO, 1999; LEITE et al., 2016). Entre 400 a 526 DAP (maio-agosto) o crescimento foi novamente lento pelas restrições climáticas, sendo os fotossintetizados destinados, principalmente, ao armazenamento de sacarose nos colmos (ROBERTSON et al., 1996).

O N-fertilizante contribuiu para o aumento do diâmetro da base do perfilho na primeira avaliação em todas as variedades (Tabela 14). Posteriormente, com o crescimento das plantas e formação dos colmos não foram observados efeitos na variedade RB867515. Já nas variedades CTC 15 e IACSP95-5000 o adubo nitrogenado proporcionou aumento neste parâmetro em algumas avaliações ao longo do crescimento da planta.

**Tabela 14.** Diâmetro (cm) de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N) ao longo do ciclo da cana planta.

Variedade	Dose de N kg ha <sup>-1</sup>	Dias após o plantio					
		114	169	230	301	396	526
RB867515		-----mm-----					
	0	21,1	29,2	31,4	33,7	33,4	33,1
	50	24,2	30,2	31,3	32,7	33,5	33,9
	100	24,3	30,1	30,8	32,2	34,1	31,7
	Média	23,2	29,8	31,2	32,9	33,7	32,9
	Fd	***	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	***	ns	ns			
CTC 15	0	17,2	25,0	28,1	29,7	30,7	30,1
	50	21,4	26,0	26,4	29,2	28,4	30,1
	100	20,5	26,6	26,3	27,9	30,3	29,7
	Média	19,7	25,9	26,9	28,9	29,8	30,0
	Fd	***	ns	ns	ns	**	ns
	FRL	***	ns	*	*	ns	ns
	IACSP95-5000	0	19,9	26,2	30,4	33,7	34,2
50		23,4	30,3	31,4	33,1	35,4	33,1
100		24,2	29,8	32,1	33,8	34,9	33,8
Média		22,5	28,7	31,3	33,6	34,9	33,6
Fd		***	***	ns	ns	ns	ns
FRL		***	***	*	ns	ns	ns

\*Fd: teste F para as doses; FRL: teste F para o modelo de regressão linear. \*\*\*, \*\*, \* Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, para cada data de avaliação. CV: 5%.

Houve aumento da área foliar ao longo do crescimento das plantas com decréscimo na última avaliação (Tabela 15). Houve resposta das variedades CTC 15 e IACSP95-5000 à adubação nitrogenada nas primeiras avaliações e na avaliação realizada previamente a colheita. Sendo que inicialmente houve aumento da área foliar e no final do ciclo os tratamentos que receberam N fertilizante tiveram uma menor área foliar que a testemunha sem N. Já na variedade RB867515 não houve efeito da adubação em nenhuma época de avaliação.

**Tabela 15.** Área foliar (cm<sup>2</sup>) de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N) ao longo do ciclo da cana planta.

Variedade	Dose de N kg ha <sup>-1</sup>	Dias após o plantio					
		114	169	230	301	396	526
RB867515	0	2247,3	4400,7	4687,9	5874,0	5284,4	3157,4
	50	2699,4	4292,6	4896,0	5904,9	5292,8	3502,2
	100	2753,4	4126,4	5255,2	5698,6	4870,3	3173,4
	Média	2566,7	4273,2	4946,4	5825,8	5149,1	3277,7
	Fd	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CTC 15	0	1615,7	2982,9	4675,0	5406,5	3895,7	3322,5
	50	2260,6	4125,5	4647,2	5419,4	4218,1	2749,5
	100	2245,0	3984,6	4574,6	5784,7	4262,3	2483,3
	Média	2040,4	3697,7	4632,3	5536,9	4125,3	2851,7
	Fd	ns	**	ns	ns	ns	**
	FRL	*	***	ns	ns	ns	**
IACSP95-5000	0	2035,9	3326,7	4554,7	4462,0	4456,9	3498,5
	50	2886,0	4468,4	5228,3	4805,0	4117,1	3298,9
	100	3122,0	4319,8	5378,0	4429,8	4179,9	2785,4
	Média	2681,3	4038,3	5053,7	4565,6	4251,3	3194,3
	Fd	***	***	**	ns	ns	ns
	FRL	***	***	**	ns	ns	*

\*Fd: teste F para as doses; FRL: teste F para o modelo de regressão linear. \*\*\*, \*\*, \* Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, para cada data de avaliação. CV: 12%.

Os índices de área foliar obtidos pelas variedades foram próximos aos obtidos por Oliveira et al. (2007), estando dentro da faixa 2 e 8. Houve efeito da adubação com N no índice de área foliar na primeira avaliação em todas as variedades. Na colheita também foram observados efeitos na variedade RB867515 e CTC 15 (Tabela 16). A população de colmos diminuiu no período em que o IAF aumentou, indicando que, possivelmente, o contínuo aumento do número de colmos nos estádios iniciais do desenvolvimento da cultura tenha sido reflexo da pequena área foliar/colmo no início das avaliações.

Os resultados mostraram diferentes respostas nas avaliações biométricas entre as variedades e o N fertilizante. Enquanto a adubação com N aumentou o perfilhamento na variedade RB867515, o adubo nitrogenado aumentou a altura e área foliar das variedades CTC 15 e IACSP95-5000. Componentes do crescimento, como o número de perfilhos, a altura dos colmos e densidade dos colmos possuem controle genético, mas também estão sujeitos a influências ambientais e ao manejo (BELL et al., 2004; SUGUITANI, 2006). A adubação nitrogenada influencia diretamente nestes componentes e as variedades de cana-de-açúcar respondem de forma diferente a adubação com N (BERDING et al., 2005).

**Tabela 16.** Índice de área foliar ( $\text{cm}^2 \text{m}^{-2}$ ) de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100  $\text{kg ha}^{-1}$  de N) ao longo do ciclo da cana planta.

Variedade	Dose de N $\text{kg ha}^{-1}$	Dias após o plantio					
		114	169	230	301	396 <sup>x</sup>	526
		----- $\text{cm}^2 \text{m}^{-2}$ -----					
<b>RB867515</b>	0	1,9	3,6	2,9	3,1	-	2,7
	50	2,6	3,4	3,5	3,8	-	3,8
	100	2,9	3,7	3,5	3,8	-	3,5
	Média	2,5	3,6	3,3	3,6	-	3,3
	Fd	*	ns	ns	ns	-	**
	FRL	**	ns	ns	*	-	**
<b>CTC 15</b>	0	1,6	3,1	4,0	3,3	-	3,5
	50	2,3	3,9	3,7	4,2	-	3,0
	100	2,4	3,7	3,6	4,3	-	2,8
	Média	2,1	3,6	3,8	3,9	-	3,1
	Fd	*	*	ns	**	-	ns
	FRL	**	ns	ns	**	-	*
<b>IACSP95-5000</b>	0	1,8	3,5	4,0	3,5	-	3,8
	50	2,9	4,5	4,5	3,9	-	4,0
	100	3,1	4,3	4,6	3,6	-	3,4
	Média	2,6	4,1	4,4	3,7	-	3,7
	Fd	***	**	ns	ns	-	ns
	FRL	***	**	*	ns	-	ns

<sup>x</sup> não avaliado; \*Fd: teste F para as doses; FRL: teste F para o modelo de regressão linear. \*\*\*, \*\*, \* Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, para cada data de avaliação. CV: 16%.

#### 4.5.3 Diagnose nutricional

As concentrações de macro e micronutrientes da folha +1 das plantas de cana-de-açúcar estiveram na faixa de suficiência para o Estado do Rio de Janeiro (REIS JUNIOR; MONERAT, 2002) e para o Estado de São Paulo (RAIJ; CANTARELLA, 1997) (Tabela 19). A exceção neste caso foi em relação ao N que ficou abaixo da faixa considerada adequada para as condições paulistas, que é de 18 a 25  $\text{g kg}^{-1}$ . Conforme menciona Faroni et al. (2009), a análise da folha-diagnóstico é realizada para avaliar se as plantas estão bem nutridas ou deficientes em algum elemento, não sendo possível fazer, com os teores nela determinados, uma estimativa da extração e acúmulo de nutrientes pela cultura. A adubação nitrogenada promoveu efeito linear significativo nos teores de N, K, Mg, S, Mn e B na média das três variedades (Tabela 17).

Quando a análise foi feita por variedade foram observadas diferentes respostas. Na variedade RB867515 não houve efeito da adubação nitrogenada para a maioria dos elementos avaliados. Já na variedade CTC 15 a adubação nitrogenada aumentou os teores de N, K, Mg, S, Fe, Zn e Mn. E na variedade IAC houve aumento nos teores de N e Mn, e com redução nos teores de P e Fe. Esses resultados evidenciam a diferença entre as variedades estudadas quanto a resposta ao N fertilizante.

**Tabela 17.** Teores foliares de macro e micronutrientes de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N) na cana planta.

Variedade	Dose N kg ha <sup>-1</sup>	-----g kg <sup>-1</sup> -----						-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
		N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
<b>RB867515</b>	0	14,7	1,88	10,9	3,1	1,69	2,3	6,0	71,0	29,5	71,5	9,3
	50	16,3	1,85	11,5	3,3	1,84	1,9	6,0	70,7	30,3	68,0	7,3
	100	15,6	1,96	11,7	3,3	1,86	2,5	6,5	76,0	31,0	89,0	6,3
	Fd	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>CTC 15</b>	0	15,2	1,78	10,4	2,9	1,80	1,8	6,0	66,7	22,3	56,0	9,0
	50	15,2	1,65	10,9	2,9	1,80	2,0	6,0	74,0	26,5	68,0	7,5
	100	17,5	1,71	11,2	3,2	2,03	2,8	6,5	93,0	27,0	94,7	5,8
	Fd	**	ns	ns	ns	*	*	ns	**	*	***	ns
	FRL	**	ns	*	ns	*	**	ns	***	**	***	ns
<b>IACSP 95-5000</b>	0	14,7	2,01	10,9	2,8	1,37	1,8	6,5	81,3	25,5	40,0	11,8
	50	15,2	1,86	11,0	3,3	1,57	2,1	6,0	66,7	27,0	41,3	7,5
	100	16,6	1,81	11,0	2,9	1,53	2,1	6,0	64,0	24,3	59,5	7,8
	Fd	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns
	FRL	*	***	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	**	ns
<b>Média</b>	0	14,9	1,89	10,7	2,9	1,62	1,9	6,2	73,0	25,7	55,8	10,0
	50	15,6	1,78	11,1	3,2	1,74	2,0	6,0	70,4	27,9	59,1	7,4
	100	16,6	1,83	11,3	3,1	1,81	2,5	6,3	77,7	27,4	81,1	6,6
	Média	15,7	1,83	11,0	3,1	1,72	2,1	6,2	73,7	27,0	65,3	8,0
	FD	**	**	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	***	ns
	FRL	***	ns	**	ns	***	*	ns	ns	ns	***	*
	CV%	9	5	6	11	9	29	9	16	11	18	52

FRL: F da regressão linear. \*\*\*, \*\*, \*Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. CV: coeficiente de variação.

Todas as variedades apresentaram aumento nos teores de Mn com as doses crescentes de N, mostrando uma interação positiva entre os dois elementos. O Mn é essencial para a planta, participando na redução do nitrato, fotossíntese, estrutura, funcionamento e multiplicação dos cloroplastos (VITTI et al., 2005). Resultado também observado por Faroni (2008) em dois experimentos em condições de cultivo comercial. O autor observou aumento dos teores de Mn nos tratamentos mais produtivos em resposta ao N fertilizante. Também houve aumento dos teores de Mg em resposta a adubação nitrogenada. O que pode estar relacionado com a participação do Mg na clorofila e na sua atividade como ativador enzimático (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Faroni et al. (2009) avaliaram o efeito de doses de N na nutrição da cana-de-açúcar através da diagnose foliar em três usinas de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Os autores observaram que adubação nitrogenada aumentou os teores dos nutrientes N, P, Ca, Mg e S nas folhas-diagnóstico (+1) da cana-de-açúcar (cana planta) na época de máximo desenvolvimento da cultura.

Na primeira soqueira os teores de P ficaram abaixo da faixa considerada adequada (1,91-2,12) (REIS JR; MONERAT, 2002), o que pode ter sido um fator limitante ao crescimento da cultura (Tabela 18). Na média das variedades a adubação nitrogenada de

plântio influenciou de forma significativa a nutrição da primeira soqueira. Houve aumento nos teores foliares de N, P, Ca, S, Mn e B. Quando as variedades foram avaliadas separadamente houve aumento nos teores de Fe e redução nos teores de Zn na variedade RB, aumento de P, Ca e Mn na variedade IAC e aumento de N, S e B na variedade CTC.

O aumento nos teores de N na média das variedades na primeira soqueira em resposta a adubação de plântio pode estar relacionado a maior nutrição nitrogenada da cana planta e possível maior estoque de N para utilização do ciclo sequente. Segundo Robinson et al. (2009) a cana-de-açúcar remobiliza N da parte aérea para os compartimentos subterrâneos e são disponibilizados no ciclo seguinte.

**Tabela 18.** Teores foliares de macro e micronutrientes de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) na primeira soqueira em função da adubação com 100 kg de N ha<sup>-1</sup> e em função da adubação nitrogenada de plântio.

Variedade	Dose N kg ha <sup>-1</sup>	-----g kg <sup>-1</sup> -----						-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
		N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
RB867515	0/100	14,3	1,03	11,5	2,9	1,8	1,5	8,7	53,3	50,7	73,3	12,3
	50/100	15,8	1,05	10,1	3,8	1,9	1,5	6,0	64,5	37,0	73,0	21,4
	100/100	15,3	1,06	10,5	3,4	1,9	1,5	6,9	64,5	36,7	75,5	15,9
	Fd	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	***	ns	ns
CTC 15	0/100	14,1	0,66	10,2	2,7	1,8	1,3	5,5	49,8	26,8	64,5	10,2
	50/100	14,9	0,83	9,1	2,8	1,6	1,3	7,0	49,5	26,5	67,5	16,6
	100/100	14,9	0,87	9,1	3,3	1,9	1,4	7,3	55,0	29,0	84,8	15,1
	Fd	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
IACSP 95-5000	0/100	13,7	0,93	9,1	2,9	1,8	1,2	7,6	55,8	33,3	50,0	10,0
	50/100	13,1	0,95	10,0	2,5	1,6	1,3	6,0	55,0	23,3	59,8	16,0
	100/100	15,0	0,97	9,9	3,0	1,6	1,6	7,5	54,0	33,3	63,0	16,8
	Fd	**	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	*	ns	*
	FRL	*	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	*
Média	0/100	14,0	0,87	10,3	2,8	1,77	1,3	7,3	53,0	36,9	62,6	10,8
	50/100	14,6	0,94	9,7	3,1	1,68	1,4	6,3	56,3	28,9	66,8	18,0
	100/100	15,0	0,97	9,8	3,3	1,78	1,5	7,2	57,8	33,0	74,4	16,0
	Média	14,6	0,93	9,9	3,1	1,75	1,4	6,9	55,7	32,9	67,9	14,9
	FD	**	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	**	ns	*
	FRL	***	*	ns	*	ns	**	ns	ns	ns	*	**
	CV%	6	13	9	17	17	13	32	16	20	21	37

Dose de N no plântio: 0, 50 e 100 kg de N ha<sup>-1</sup> (fonte de N: ureia); N na cana soca: 100 kg de N ha<sup>-1</sup> (fonte de N: sulfato de amônio). FRL: F da regressão linear. \*\*\*, \*\*, \*Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. CV: coeficiente de variação.

A diagnose foliar é uma ferramenta eficaz para diagnosticar o estado nutricional para a maioria das culturas, mas na cana-de-açúcar normalmente há pouca sensibilidade às variações nutricionais (ORLANDO FILHO et al., 1999). Mesmo em condições distintas de nutrição da cultura, constantemente são observadas diferenças na produção de colmos e atributos

tecnológicos, sem haver detecção das diferenças na análise foliar (FARONI et al., 2009; FRANCO et al., 2010).

#### 4.5.4 Características químicas do solo

A adubação nitrogenada influenciou de forma significativa os teores de alguns nutrientes no solo, tanto na camada de 0-20 quanto de 20-40 cm de profundidade, na média de todas as variedades (Tabela 19). Após o ciclo da cana planta houve maiores teores de P, Ca e S na camada superficial, e aumento de Ca e S, e redução de Al na camada subsuperficial. Além disso, houve aumento da saturação de bases na camada superficial e da saturação por alumínio na camada subsuperficial. Na análise por variedade, observou-se que na camada superficial, a variedade RB867515 não influenciou nos parâmetros estudados. Já nas variedades CTC 15 e IACSP95-5000 houve aumento nos teores de P a medida que aumentou a dose de N. Ainda na variedade CTC 15 houve teores de Ca e SB também maiores na maior dose de N.

**Tabela 19.** Alterações químicas da amostra de terra da área experimental após a colheita de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N) na cana planta na profundidade de 0-20 cm.

Variedade	Dose N kg ha <sup>-1</sup>	pH	C	N	P	K	Ca	Mg	Al	SB	T	V	m
		H <sub>2</sub> O	%	%	---mg dm <sup>-3</sup> ---	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----
RB867515	0	5,49	0,43	0,05	32,9	19,5	1,21	0,43	0,04	1,69	3,6	46,5	2,5
	50	5,60	0,44	0,04	37,4	22,0	1,27	0,42	0,04	1,74	3,6	48,0	2,3
	100	5,65	0,37	0,04	38,6	21,8	1,37	0,39	0,03	1,82	3,5	50,5	1,7
	FD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CTC 15	0	5,65	0,39	0,04	36,8	22,0	1,29	0,37	0,04	1,71	3,4	50,9	2,4
	50	5,75	0,46	0,05	37,5	22,0	1,49	0,51	0,05	2,06	3,8	53,4	2,5
	100	5,72	0,42	0,05	63,4	24,8	1,66	0,51	0,05	2,24	4,0	54,8	2,1
	FD	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	*	**	ns	ns	ns
IACSP 95-5000	0	5,46	0,45	0,05	33,9	29,3	1,32	0,46	0,04	1,85	3,9	46,9	2,2
	50	5,65	0,41	0,05	44,4	24,5	1,45	0,52	0,05	2,03	4,0	51,3	2,5
	100	5,57	0,42	0,05	54,6	24,0	1,52	0,46	0,06	2,04	3,8	52,7	3,1
	FD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Média	0	5,53	0,42	0,05	34,5	23,6	1,27	0,42	0,04	1,75	3,6	48,1	2,3
	50	5,66	0,43	0,05	39,8	22,8	1,40	0,48	0,05	1,94	3,8	50,9	2,4
	100	5,65	0,40	0,04	52,2	23,5	1,52	0,45	0,05	2,03	3,8	52,7	2,3
	FD	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	***	ns	**	ns	ns	**	ns	*	ns
CV%	4,0	15,3	19,3	33,4	19,1	16,5	25,3	32,0	16,1	13,1	11,4	31,5	

Valores médios de 4 repetições. FD e FRL: teste F para dose e regressão linear, respectivamente. \*\*\*, \*\* e \*, significativo a 1, 5 e a 10% de probabilidade, respectivamente.

Na camada subsuperficial a variedade RB867515 foi a que mais provocou alterações nas características químicas do solo (Tabela 20). Houve aumento do pH e de Ca, redução dos



teores de carbono, Mg e Al. A variedade CTC 15 influenciou no Ca, SB, valor T e na saturação por Al. Já na variedade IACSP95-5000 houve redução nos teores de P e K na camada subsuperficial.

**Tabela 20.** Alterações químicas da amostra de terra da área experimental após a colheita de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N) na cana planta na profundidade de 20-40 cm.

Variedade	Dose													
	N kg ha <sup>-1</sup>	pH H <sub>2</sub> O	C %	N	P	K	Ca	Mg	Al	SB	T	V	m	
					--mg dm <sup>-3</sup> --				-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				%	
<b>RB867515</b>	0	4,81	0,20	0,03	9,2	7,3	0,63	0,18	0,55	0,83	3,6	23,1	39,3	
	50	4,94	0,22	0,03	9,7	7,5	0,69	0,13	0,44	0,84	3,3	25,6	35,5	
	100	5,12	0,14	0,03	12,7	7,0	0,83	0,09	0,13	0,94	3,3	28,3	14,3	
	FD	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	***	
	FRL	**	**	ns	ns	ns	**	**	***	ns	ns	ns	***	
<b>CTC 15</b>	0	5,16	0,20	0,03	9,1	7,8	0,61	0,17	0,19	0,79	3,2	25,1	19,9	
	50	4,87	0,23	0,03	11,5	6,3	0,86	0,19	0,34	1,06	4,2	25,9	25,7	
	100	5,07	0,22	0,03	11,7	7,0	0,89	0,19	0,25	1,09	3,9	28,7	19,4	
	FD	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	*	**	ns	*	
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	***	*	ns	*	
<b>IACSP 95-5000</b>	0	4,85	0,25	0,04	12,8	10,0	0,74	0,21	0,33	0,97	3,7	26,9	26,1	
	50	4,97	0,22	0,03	9,2	8,5	0,70	0,21	0,37	0,93	3,9	25,0	28,7	
	100	4,95	0,22	0,03	6,7	7,8	0,88	0,24	0,26	1,14	3,7	30,3	18,4	
	FD	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
	FRL	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
<b>Média</b>	0	4,94	0,21	0,03	10,4	8,3	0,66	0,18	0,36	0,86	3,5	25,0	28,5	
	50	4,93	0,22	0,03	10,1	7,4	0,75	0,18	0,38	0,94	3,8	25,5	29,9	
	100	5,04	0,19	0,03	10,4	7,2	0,87	0,17	0,22	1,06	3,6	29,1	17,3	
	FD	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	**	**	ns	ns	***	
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	***	***	ns	ns	***	
	CV%	3,3	18,9	21,1	46,7	20,7	17,5	33,2	33,1	16,3	13, 7	21,2	23,9	

Valores médios de 4 repetições. FD e FRL: teste F para dose e regressão linear, respectivamente. \*\*\*, \*\* e \*, significativo a 1, 5 e a 10% de probabilidade, respectivamente.

Os efeitos da fertilização nitrogenada sobre as características químicas do solo já foram reportados por diversos autores. Muitos fatores estão envolvidos nas reações que ocorrem no solo após a fertilização nitrogenada, como a fonte de N aplicada, o modo de aplicação, as características químicas e físicas do solo, entre outros (VITTI et al., 2002b; LARA CABEZAS et al., 2005; SOARES et al., 2012).

Prado; Pancelli (2008) obtiveram o inverso dos resultados do presente trabalho com aplicação de doses crescentes de ureia em primeira soqueira. No trabalho citado foi observada significativa redução de pH, H<sup>+</sup>Al, Ca, Mg e saturação de bases, principalmente na maior dose (200 kg de N ha<sup>-1</sup>). Em alguns casos a acidificação causada pela adubação nitrogenada pode ser um fator limitante para a resposta da cana-de-açúcar ao N aplicado (DEBRECZENI; KISMÁNYOKY, 2005; CANTARELLA, 2007). Já Mello et al. (1980) mostraram que

aplicação de ureia aumentou o pH do solo, o inverso ocorrendo com a aplicação do sulfato de amônio. Segundo estes autores a elevação do pH do solo pela aplicação da ureia é decorrente da rápida hidrólise enzimática da ureia a carbonato de amônio que se decompõe, liberando  $\text{NH}_3$  e  $\text{CO}_2$ . A amônia reage com a água formando  $\text{NH}_4\text{OH}$  o que provoca uma brusca elevação do pH.

Joris (2015) observou que a aplicação de doses de N ocasionou aumentos quadráticos nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  na camada 10-20 cm e de  $\text{Mg}^{2+}$  na camada 0-10 da entrelinha. O teor de P na camada 10-20 cm na linha também foi alterado pelas doses de N com aumento linear em função da adubação nitrogenada. Aumentos nos teores de cátions trocáveis em maiores profundidades são normalmente benéficos para o desenvolvimento de raízes em camadas mais profundas e absorção desses nutrientes pelas plantas (MORELLI et al., 1992).

Contudo, ressalta-se que se o conhecimento sobre o sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar no Brasil são escassos (OHASHI et al., 2015) mais ainda são os efeitos dessas raízes nas características químicas e biológicas do solo. O crescimento e a distribuição diferenciada de cada variedade influencia diretamente na absorção dos nutrientes e consequentemente ocorrem alterações nas características químicas do solo (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

Estudos recentes mostraram que variedades de cana-de-açúcar podem causar alterações no solo, na rizosfera, na associação com fungos micorrízicos e na composição das comunidades bacterianas da rizosfera e do solo (ARRUDA, 2015; COSTA et al., 2014). Essas mudanças nas regiões da rizosfera e do rizoplano são significativas uma vez que essas regiões mais próximas das raízes da cana-de-açúcar são os locais preferenciais de colonização de microrganismos (MEDEIROS et al., 2006).

#### **4.5.5 Produtividade de raiz das variedades de cana-de-açúcar**

As alterações observadas nas características químicas do solo podem estar relacionadas com os efeitos da adubação nitrogenada na biomassa radicular. A fertilização nitrogenada influenciou de forma significativa na biomassa seca de raiz das variedades. Na profundidade total avaliada (0-60 cm) as doses de N reduziram a massa de raízes na média das variedades (Tabela 21). Houve efeito significativo de doses de N nas variedades RB867515 e CTC 15, sendo que nesta variedade o aumento da dose de N reduziu a biomassa radicular. Avaliando entre as variedades a maior massa de raízes na média das doses de N foi a RB867515 com uma biomassa total de  $2.588 \text{ kg ha}^{-1}$ . Houve também diferenças entre as variedades na ausência de adubação nitrogenada, na dose de  $50 \text{ kg de N ha}^{-1}$ . Já na dose de  $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$  não houve diferenças entre as variedades.

Houve um comportamento distinto entre as variedades em resposta a adubação nitrogenada em cada profundidade avaliada. As maiores diferenças foram observadas nas camadas superficiais. A variedade RB867515 teve uma maior concentração de raízes na profundidade de 0-20 cm, diferindo das demais variedades, mas sem efeito da adubação nitrogenada. Na média cerca de 65% das raízes da RB867515 se concentraram na camada superficial. Já a variedade CTC 15 teve uma maior distribuição da massa de raízes, com 47, 37 e 15% nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. A maior quantidade de raízes em profundidade é um fator positivo, pois, além de favorecer a absorção de água em épocas de déficit hídrico pode contribuir para a absorção de nutrientes que tenham se deslocado para camadas mais profundas (GREGORY et al., 1979). Essa característica da variedade CTC 15 pode ser um dos fatores que a torna indicada para ambientes mais restritivos.

**Tabela 21.** Produtividade da biomassa radicular ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100  $\text{kg ha}^{-1}$  de N) na cana planta.

Prof (cm)	Variedade	Dose de N ( $\text{kg ha}^{-1}$ )							
		0	50	100	Média	FD	FRL		
0-20	RB867515	2.027 a	1.992 a	1.818 a	1.946 a	ns	ns		
	CTC15	1.515 b	1.214 b	962 b	1.230 c	***	***		
	IAC95-5000	1.689 ab	1.472 b	1.401 b	1.521 b	ns	*		
	Média	1.744	1.559	1.394	1.566	ns	ns		
20-40	RB867515	536 b	739 ab	477 b	584 b	ns	ns		
	CTC15	1.127 a	907 a	888 a	974 a	ns	ns		
	IAC95-5000	335 b	495 b	530 ab	453 b	ns	ns		
	Média	666	713	632	670	ns	ns		
40-60	RB867515	472 a	598 a	262 a	444 a	*	ns		
	CTC15	389 a	465 a	346 a	400 ab	ns	ns		
	IAC95-5000	159 a	283 a	195 a	212 b	ns	ns		
	Média	340	449	268	352	ns	ns		
0-60	RB867515	3.035 a	3.329 a	2.557 a	2.974 a	*	ns		
	CTC15	3.030 a	2.586 ab	2.196 a	2.604 ab	*	**		
	IAC95-5000	2.184 b	2.250 b	2.126 a	2.187 b	ns	ns		
	Média	2.750	2.722	2.293	2.588	**	**		
	CV%	25							

FD: F da dose; FRL: F da regressão linear. \*\*\*, \*\* e \*, significativo a 1, 5 e a 10% de probabilidade, respectivamente. Letras diferentes na coluna dentro de cada profundidade indica que houve diferente significativa entre as variedades.

Na camada de 20-40 cm a produtividade da variedade CTC 15 foi significativamente superior a RB867515 e IACSP95-5000. Também foi a variedade com significativa redução da biomassa em função da adubação nitrogenada. Na camada de 40-60 cm não houve diferenças entre as variedades.

A adubação de nitrogenada de plantio não promoveu efeitos significativos na biomassa radicular da primeira soqueira na média das variedades, nem nas variedades RB867515 e IACSP95-5000 na profundidade de 0-60 cm (Tabela 22). Mas a aplicação do N no plantio proporcionou significativo aumento da biomassa radicular da soqueira da variedade IACSP95-5000, considerando a profundidade de 0-60 cm e na profundidade de 0-20 cm.

Na profundidade de 0-20 cm a variedade RB867515 teve maior massa de raiz que as demais variedades. Quando se analisa dentro de cada dose, a biomassa radicular da variedade RB867515 foi maior na ausência da adubação e na dose de 50  $\text{kg ha}^{-1}$ N. Já na maior dose de N a variedade IACSP95-5000 teve a maior massa na profundidade de 0-20 cm. Já na camada de 20-40 novamente a variedade com maior biomassa foi a CTC 15, diferindo das demais na média das doses. E na profundidade de 40-60 cm não houve diferenças entre as variedades.

Os tratamentos que receberam N fertilizante na cana planta tiveram redução da biomassa radicular em relação à testemunha sem adubação nitrogenada. Dependendo da disponibilidade de N no solo podem ocorrer alterações na morfologia das raízes. As mudanças mais comuns e estudadas referem-se a carência de N no solo. Na deficiência de N o crescimento da raiz é acelerado e as raízes laterais aumentam de tamanho e com mudanças da

morfologia, o que pode influenciar na captação e alocação de nutrientes e no crescimento da planta (LOPES-BUICO et al., 2003). Sendo a modulação da arquitetura do sistema radicular um dos efeitos mais marcantes em relação a disponibilidade de N (RICHARD-MOLARD et al., 2008).

**Tabela 22.** Produtividade da biomassa radicular ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) na primeira soqueira em função da adubação com  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N e em função da adubação nitrogenada de plantio.

Prof (cm)	Variedade	Dose de N (plantio/soqueira)									
		0/100		50/100		100/100		Média	FD	FRL	
0-20	RB867515	1.565	a	1.545	a	1.307	ab	1.472	a	ns	ns
	CTC15	1.181	ab	1.036	b	967	b	1.061	b	ns	ns
	IAC95-5000	1.078	b	1.082	b	1.489	a	1.217	b	**	**
	Média	1.275		1.221		1.255		1.250		ns	ns
20-40	RB867515	630	a	420	ab	554	ab	535	b	ns	ns
	CTC15	946	a	598	a	887	a	810	a	*	ns
	IAC95-5000	177	b	131	b	404	b	237	c	ns	ns
	Média	584		383		615		527		**	ns
40-60	RB867515	394	a	341	a	271	a	335	a	ns	ns
	CTC15	458	a	159	a	437	a	351	a	ns	ns
	IAC95-5000	87	a	144	a	248	a	160	a	ns	ns
	Média	313		215		319		282		ns	ns
0-60	RB867515	2.590	a	2.305	a	2.132	a	2.342	a	ns	ns
	CTC15	2.585	a	1.793	ab	2.291	a	2.223	a	*	ns
	IAC95-5000	1.342	b	1.357	b	2.141	a	1.613	b	**	**
	Média	2.172		1.819		2.188		2.060		ns	ns

Dose de N no plantio: 0, 50 e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (fonte de N: ureia); N na cana soca:  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (fonte de N: sulfato de amônio). FD: F da dose; FRL: F da regressão linear. \*\*\*, \*\* e \*, significativo a 1, 5 e a 10% de probabilidade, respectivamente. Letras diferentes na coluna dentro de cada profundidade indica que houve diferente significativa entre as variedades.

No entanto, o alto teor de N no solo também provoca modificações no sistema radicular causando inibição do desenvolvimento de raízes laterais (ZHANG; FORDE, 2000) sendo esta inibição reversível e induzida pelo teor de nitrato nos tecidos (ZHANG et al., 1999). Essas alterações podem estar relacionadas com o efeito estimulatório local que provoca o alongamento de raízes laterais, ou o efeito sistêmico inibitório de altas concentrações de N sobre a ativação de meristemas laterais de raiz. Também pode ocorrer a supressão da iniciação de raízes laterais por alta razão C:N da planta e a inibição do crescimento da raiz primária e estímulo a produção de raízes laterais por teores externos de L-glutamato (ZHANG et al., 2007).

A redução do sistema radicular nessas condições também pode estar relacionada com o desenvolvimento das raízes próximas aos grânulos do fertilizante com consequente obtenção do nutriente necessário para o crescimento da parte aérea com pequeno gasto energético para o crescimento das raízes. E na ausência do fertilizante nitrogenado o maior gasto energético para o crescimento das raízes em busca o nutriente que cria maior competição por fotoassimilados para o crescimento da parte aérea (OTTO et al., 2009b).

Otto et al. (2009b) estudando a distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada de plantio observaram que a adubação não promoveu maior biomassa radicular, mas causou mudanças na distribuição das raízes no solo. Todavia, diferente do que foi observado no presente estudo os dados obtidos por estes autores mostraram que a ausência da adubação nitrogenada promoveu melhor distribuição do sistema radicular no perfil do solo, com 50, 34 e 16 % nas camadas de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m de profundidade, respectivamente. Nos tratamentos fertilizados, em média, as raízes concentraram-se na camada superficial, com 70, 17 e 13 % para as mesmas camadas. Otto et al. (2014) desenvolveram um estudo com a hipótese de que a aplicação de altas doses de N aumentaria a biomassa e o acúmulo de N no sistema radicular. A hipótese não foi comprovada e a conclusão do estudo foi que o aumento das doses de N não incrementa a biomassa e o acúmulo de N do sistema radicular nas condições estudadas. Estes autores também não observaram efeitos residuais da adubação nitrogenada de plantio na biomassa do sistema radicular da primeira soqueira.

Mesmo com a importância do sistema radicular para o crescimento da cana-de-açúcar são poucos os trabalhos desenvolvidos em campo avaliando a interação entre variedades e a fertilização nitrogenada. O conhecimento sobre o que ocorre abaixo da superfície do solo é de grande importância uma vez que as raízes são as principais responsáveis pela eficiência no uso do N em alguns genótipos de cana-de-açúcar (KOLLN, 2016).

#### **4.5.6 Produtividade da parte aérea das variedades de cana-de-açúcar**

As variedades apresentaram alta produtividade na cana planta e o maior rendimento de colmos foi obtido pela RB867515 com TCH acima de 180 kg ha<sup>-1</sup> nos tratamentos com aplicação de N. Houve resposta linear significativa em relação a adubação nitrogenada de plantio nas três variedades, tanto na TCH quanto na produtividade da parte aérea (Tabela 23).

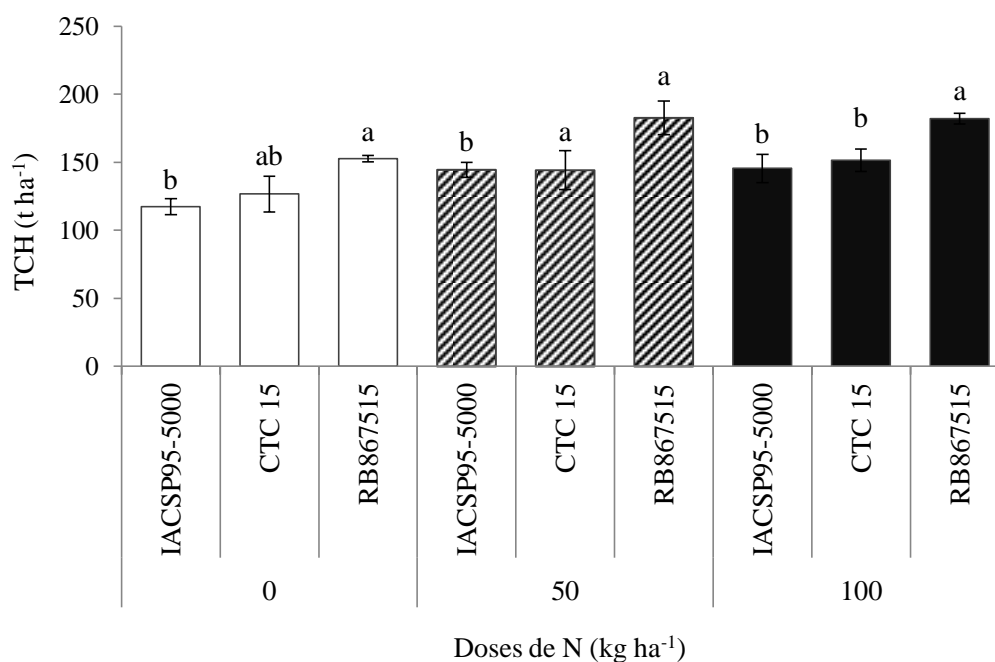
Quando se compara entre variedades dentro da mesma dose observa-se que a variedade RB867515 foi a mais produtiva, em todas as condições de suprimento de N estudadas (Figura 14). Na ausência da adubação nitrogenada as variedades RB867515 e a CTC 15 foram mais produtivas que a IACSP95-5000. A variedade IACSP95-5000 é posicionada para plantio em ambientes mais férteis, já a RB867515 e CTC 15 são indicadas para plantio em ambientes mais restritivos. Assim como relatado por KOLLN (2016) a variedade RB867515 é pouco eficiente no uso, mas responsiva ao N.

Mesmo sendo a resposta da cana-planta à adubação nitrogenada considerada baixa (CANTARELLA E RAIJ, 1985), há ganhos de produtividade com a aplicação do N fertilizante (FRANCO et al., 2010). No presente estudo com variedades contrastantes quanto a exigência em fertilidade de solos, as três variedades estudadas obtiveram ganhos em produtividade de colmos com a aplicação do N-fertilizante. Mesmo com a entrada de cerca de 20 kg ha<sup>-1</sup> de N, através da reserva de N presente no tolete plantado (Tabela 11) as condições do estudo também favoreceram a resposta positiva das variedades à adubação com N na cana planta. As condições mencionadas são: o solo de baixa fertilidade e baixa disponibilidade de N (Tabela 8), precipitação adequada, além de pouco material incorporado no preparo de solo e conseqüente menor liberação de N. Assim, esses fatores atribuídos à baixa resposta da cana-planta, como a mineralização da matéria orgânica do solo e dos restos culturais, às condições climáticas como pluviosidade e temperatura mais favoráveis na ocasião do plantio foram favoráveis a resposta da cana-de-açúcar ao fertilizante nitrogenado.

**Tabela 23.** Produtividade de massa fresca da parte aérea (colmo, palha e ponteiro) e peso de colmo de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N) na cana planta.

Variedade	Dose de N	Colmo	Palha	Ponteiro	Parte aérea	Peso/colmo
	kg ha <sup>-1</sup>	----- t ha <sup>-1</sup> -----				kg
<b>RB867515</b>	0	152,4	13,1	13,4	178,9	2,6
	50	182,6	17,1	15,7	215,5	2,6
	100	182,0	19,9	17,4	219,3	2,5
	Fd	**	**	***	***	ns
	FRL	**	**	***	***	ns
	r <sup>2</sup>	0,73	0,99	0,99	0,77	-
<b>CTC 15</b>	0	126,6	15,7	11,1	153,5	1,8
	50	144,2	13,9	13,4	171,5	2,0
	100	151,5	13,5	15,5	180,6	2,0
	Fd	*	ns	***	ns	ns
	FRL	**	ns	***	**	ns
	r <sup>2</sup>	0,95	-	0,99	0,90	-
<b>IACSP95-5000</b>	0	117,2	15,3	16,6	149,1	1,6
	50	144,5	17,7	15,8	178,0	1,9
	100	145,4	16,0	15,4	176,8	1,8
	Fd	**	ns	ns	ns	ns
	FRL	**	ns	ns	*	ns
	r <sup>2</sup>	0,77	-	-	0,71	-
<b>Média</b>	0	132,1	14,7	13,7	168,4	2,0
	50	157,1	16,2	15,0	200,1	2,1
	100	159,6	16,5	16,1	201,3	2,1
	Fd	***	ns	***	***	*
	FRL	***	*	***	***	**
	r <sup>2</sup>	0,82	0,85	0,99	0,79	0,85
	CV%	10,5	16,3	11,6	10,0	9,9

Valores médios de 4 repetições. \*, \*\*, \*\*\*, significativo pelo teste F a 10, 5 e 1% de probabilidade respectivamente. ns – não significativo. CV – coeficiente de variação.



**Figura 14.** Tonelada de colmos por hectare (TCH) de três variedades de cana-de-açúcar sob doses de N no ciclo da cana planta. Letras diferentes na coluna indicam que houve diferença estatística pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na primeira soqueira houve redução da produtividade em relação a cana planta, com média de 82 t ha<sup>-1</sup> na média das variedades (Tabela 24). Além da redução frequente da produtividade das soqueiras em relação a cana planta devido ao menor tempo de crescimento (FORTES et al., 2013) ressalta-se que o déficit hídrico foi acentuado durante o ciclo da primeira soqueira o que pode ter causado essa drástica redução na produtividade da cultura (Figura 1).

A adubação de plantio não influenciou na produtividade da primeira soqueira na média das três variedades. Mas analisando individualmente a produtividade da primeira soqueira da variedade RB867515 foi significativamente influenciada pelas doses de N no plantio com aumento do rendimento de colmos e da parte aérea. O mesmo efeito não foi observado nas demais variedades.

Este resultado evidencia que há diferenças na resposta à adubação nitrogenada nas diferentes variedades de cana-de-açúcar e que os efeitos da adubação nitrogenada de plantio, tem efeito na produtividade do ciclo posterior. Resultado que indica que um manejo diferenciado para determinada variedade pode resultar em aumento de produtividade, mesmo que isso possa ser operacionalmente mais complexo. No caso da variedade RB867515, devido a sua expressiva área plantada, um manejo diferenciado em relação à adubação nitrogenada poderia trazer retornos para o produtor. Também ressalta a importância da adubação nitrogenada de plantio, muitas vezes não avaliada no conjunto dos ciclos da cana-de-açúcar.

Os efeitos da adubação nitrogenada realizada no ciclo anterior pode se estender até o próximo ciclo, provavelmente pelo efeito residual da adubação anterior no vigor da soqueira subsequente (VITTI et al. (2007). Estes autores ressaltam que o N residual acumulado no solo, na parte subterrânea (raiz e rizoma) e na palha explica o ganho de produtividade obtido ciclo seguinte. Fortes et al. (2013) estudaram durante quatro ciclos a produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar após sucessivas adubações nitrogenadas de cana-planta e soqueiras, em sistema de preparo reduzido. As doses crescentes de N e as condições

meteorológicas proporcionam respostas significativas de produtividade de colmos e de açúcar cana-planta e soqueiras, na média e na produção acumulada dos ciclos agrícolas consecutivos.

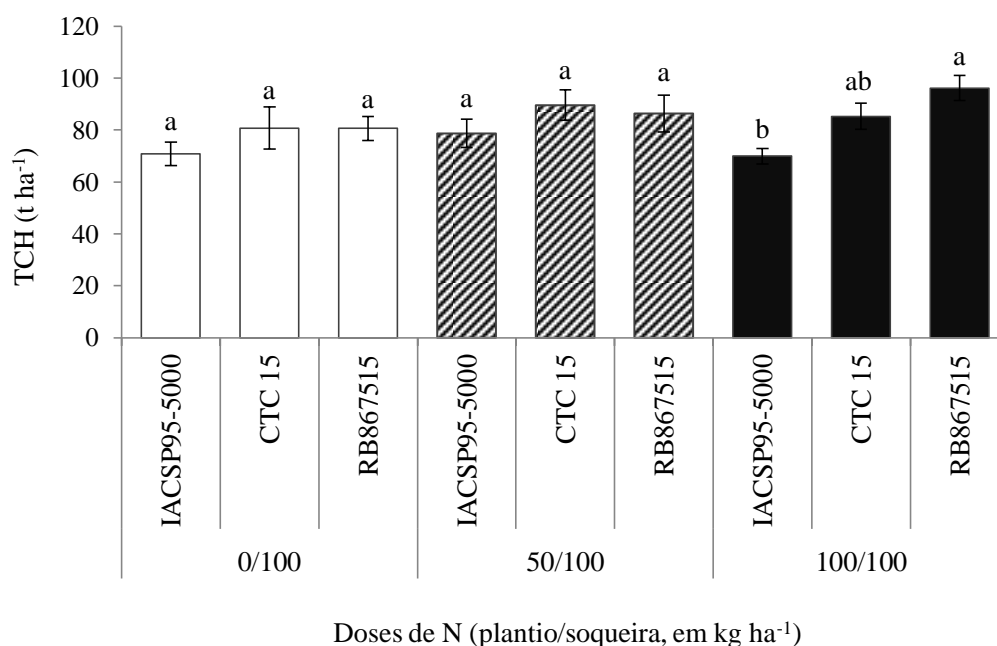
**Tabela 24.** Produtividade de massa fresca e peso de colmo de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) na primeira soqueira em função da adubação com 100 kg ha<sup>-1</sup> de N e em função da adubação nitrogenada de plantio.

Variedade	Dose de N	Colmo	Palha	Ponteiro	Parte aérea	Peso/colmo
	kg ha <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>				kg
RB867515	0/100	80,6	11,2	10,8	102,6	1,2
	50/100	86,4	11,6	10,3	108,2	1,4
	100/100	96,1	11,4	9,7	117,2	1,6
	Fd	*	ns	ns	ns	**
	FRL	**	ns	ns	*	***
	r <sup>2</sup>	0,97	-	-	0,98	0,99
CTC 15	0/100	80,7	12,8	13,5	106,9	0,9
	50/100	89,6	14,2	13,2	116,9	1,0
	100/100	85,3	14,6	12,6	112,4	1,1
	Fd	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns
	r <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
IACSP95-5000	0/100	70,8	12,7	13,5	96,9	0,8
	50/100	78,7	14,0	13,4	106,1	0,9
	100/100	69,9	12,4	11,3	93,6	0,8
	Fd	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns
	r <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
Média	0/100	77,4	12,2	12,6	102,1	1,0
	50/100	84,9	13,3	12,3	110,4	1,1
	100/100	83,8	12,8	11,2	107,7	1,2
	Fd	ns	ns	ns	ns	*
	FRL	ns	ns	ns	ns	**
	r <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
	CV%	10,5	16,3	11,6	10,0	9,9

Dose de N no plantio: 0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (fonte de N: ureia); N na cana soca: 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (fonte de N: sulfato de amônio). FD: F da dose; FRL: F da regressão linear. \*\*\*, \*\* e \*, significativo a 1, 5 e a 10% de probabilidade, respectivamente. Letras diferentes na coluna dentro de cada profundidade indica que houve diferença significativa entre as variedades.

Quando se compara dentro da mesma dose de N observa-se que houve diferença na produtividade de colmos entre variedades somente na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, com aumento significativo na variedade RB867515 (Figura 15).





**Figura 15.** Tonelada de colmos por hectare (TCH) de três variedades de cana-de-açúcar em função de doses de N do plantio e da adubação na primeira soqueira. Letras diferentes na coluna dentro de cada dose de N indicam que houve diferença estatística pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Já Franco et al. (2015) observaram efeitos positivos da adubação nitrogenada de plantio no ciclo da cana planta e soqueiras, porém em nenhum dos três locais estudados houve efeito residual de N aplicado no plantio sobre o rendimento dos ciclos seguintes, nem houve efeito no rendimento acumulado para as quatro colheitas avaliadas. Os autores ressaltaram que a baixa eficiência na recuperação do N na cana-de-açúcar aumenta o risco de que a fertilização nitrogenada excessiva pode reduzir a rentabilidade e ter um efeito adverso sobre o meio ambiente.

O aumento da produtividade e a viabilidade da adubação nitrogenada na cana planta sempre suscitaram discussões no Brasil. De fato, muitos trabalhos mostraram respostas variadas em relação ao assunto, e de certa forma há um consenso que os ganhos obtidos com a fertilização nitrogenada nas soqueiras são maiores e mais frequentes que na cana planta (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007). As discussões também mostraram que essa menor resposta na cana planta está relacionada com diferentes fatores. Entre eles, a mineralização da matéria orgânica do solo e dos restos culturais, às condições climáticas como pluviosidade e temperatura mais favoráveis na ocasião do plantio (cana de ano e meio, principalmente), à melhoria do solo após a reforma dos canaviais associada a calagem, à incorporação dos restos culturais da cultura anterior, à adubação feita na reforma do canavial, ao maior vigor do sistema radicular da cana-planta em relação ao da soqueira, às perdas de nitrogênio fertilizante seja por volatilização ou lixiviação, à contribuição do nitrogênio estocado no tolete e a fixação biológica de nitrogênio (AZEREDO et al., 1986; TRIVELIN et al., 1995; ORLANDO FILHO et al., 1999; URQUIAGA et al., 1992). A interação desses fatores resulta em uma resposta menor e/ou variável da cana planta à fertilização nitrogenada.

#### 4.5.7 Qualidade tecnológica das variedades de cana-de-açúcar

A adubação nitrogenada não influenciou a qualidade tecnológica das variedades de cana-de-açúcar estudadas tanto na cana planta quanto na primeira soqueira (Tabela 25 e 26).

De forma geral observou-se que os parâmetros avaliados estiveram dentro dos padrões para a cana já madura, ou seja, o experimento foi colhido no tempo adequado para manifestar possíveis efeitos das variedades x tratamentos. O acúmulo de açúcar na primeira soqueira foi superior a cana planta, resultado evidenciado principalmente em relação ao em relação ao açúcar total recuperável (ATR). As condições ambientais no segundo ano de estudo foram fundamentais para que as variedades obtivessem esse acúmulo de açúcar.

Somente alguns poucos parâmetros foram influenciados pelo N fertilizante. Na variedade RB867515 a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N aumentou os valores de Brix, Pol e ATR. Esse efeito não foi observado nas demais variedades.

**Tabela 25.** Atributos tecnológicos de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) sob doses de N (0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N) na cana planta.

Variedade	Dose de N	Brix	Fibra	AR	Pol	ATR
	kg ha <sup>-1</sup>	-----%-----				kg t <sup>-1</sup>
RB867515	0	19,6	11,4	1,3	16,1	128,5
	50	21,2	11,1	1,2	17,9	140,8
	100	20,0	10,2	1,2	16,4	132,6
	Fd	*	ns	ns	*	**
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns
	r <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
CTC 15	0	20,3	11,8	1,1	17,1	133,7
	50	19,4	11,8	1,3	16,0	126,2
	100	19,7	11,9	1,2	16,3	127,3
	Fd	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns
	r <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
IACSP95-5000	0	19,2	11,8	1,0	16,3	127,4
	50	19,7	11,4	1,1	16,8	131,3
	100	19,7	11,6	1,0	16,5	127,7
	Fd	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns
	r <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
	CV%	4,6	10,2	19,3	6,6	5,0

Valores médios de 4 repetições. \*\*\*, \*\*, \*, significativo pelo teste F a 1, 5 e 10% de probabilidade respectivamente. ns – não significativo. CV – coeficiente de variação.

O papel da adubação nitrogenada na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar é descrito por alguns autores, sendo que tanto o excesso como a falta de nitrogênio tem influência na qualidade tecnológica dos colmos (COSTA et al., 2003; THORBURN et al., 2011; YANG et al., 2013 FRANCO et al., 2015). Mesmo em casos onde há efeito negativo nos atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, o aumento na produtividade de colmos e produtividade de açúcar compensa esta redução (RESENDE et al., 2006).

**Tabela 26.** Atributos tecnológicos de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) na primeira soqueira em função da adubação com 100 kg ha<sup>-1</sup> de N e em função da adubação nitrogenada de plantio.

Variedade	Dose de N	Brix	Fibra	AR	Pol	ATR
	kg ha <sup>-1</sup>	----- % -----			-----	
<b>RB867515</b>	0/100	19,8	10,4	0,5	17,5	171,7
	50/100	19,4	10,9	0,5	17,3	169,1
	100/100	19,7	10,6	0,5	17,7	173,1
	Fd	ns	ns	ns	ns	ns
	FRL	ns	ns	ns	ns	ns
	r <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
	<b>CTC 15</b>	0/100	18,9	11,9	0,4	17,3
50/100		18,6	11,5	0,4	17,1	167,0
100/100		18,5	11,6	0,5	16,8	164,1
Fd		ns	ns	ns	ns	ns
FRL		ns	ns	ns	ns	ns
r <sup>2</sup>		-	-	-	-	-
<b>IACSP95-5000</b>		0/100	19,5	12,0	0,4	17,8
	50/100	19,8	11,0	0,5	18,0	175,4
	100/100	19,6	11,1	0,5	17,6	171,7
	Fd	ns	***	ns	ns	ns
	FRL	ns	**	ns	ns	ns
	r <sup>2</sup>	-	0,72	-	-	-
	CV%	2,8	4,0	12,3	2,9	2,4

Dose de N no plantio: 0, 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (fonte de N: ureia); N na cana soca: 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (fonte de N: sulfato de amônio). FD: F da dose; FRL: F da regressão linear. \*\*\*, \*\* e \*, significativo a 1, 5 e a 10% de probabilidade, respectivamente. Letras diferentes na coluna dentro de cada profundidade indica que houve diferente significativa entre as variedades.

Em condições de deficiência de N, decresce o teor de umidade da planta, com conseqüente diminuição na qualidade do caldo, aumento no teor de fibra, diminuição na concentração de sacarose no colmo, acúmulo de sacarose nas folhas e alta relação colmo/folha. Já em plantas com excesso de nitrogênio ocorre acúmulo desse nutriente no colmo, decréscimo na qualidade do caldo e atraso na maturação (CARNAÚBA, 1990; SILVEIRA; CROCOMO, 1990). Também em caso de excesso de N pode haver um crescimento vegetativo prolongado e uma redução na concentração de sacarose, principalmente devido ao aumento da umidade nos colmos (MUCHOW; ROBERTSON, 1994). Altas doses de N também aumentam as quantidades açúcares redutores (glucose e frutose) no caldo, principalmente no início da safra. Estes açúcares redutores podem reagir com o excesso de N armazenado nos colmos como aminoácidos tais como asparagina e podem produzir compostos fenólicos durante o processo de moagem que dificultam o processo de refino (KEATING et al., 1999).

#### 4.5.8 Acúmulo de N e eficiência de recuperação de <sup>15</sup>N-fertilizante em variedades de cana-de-açúcar

Na cana planta as microparcelsas com aplicação do <sup>15</sup>N foram instaladas apenas na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N e na primeira soqueira as microparcelsas foram instaladas em todas as parcelas (100 kg ha<sup>-1</sup> de N). Na cana planta, do total do N acumulado pelas variedades apenas uma pequena parte foi proveniente do N-fertilizante, ou seja, outras fontes foram responsáveis por grande parte da nutrição das plantas (Tabela 27). As variedades tiveram a mesma contribuição do N fertilizante na sua nutrição, não diferindo estatisticamente entre elas. Não evidenciando uma diferença na eficiência de recuperação do N fertilizante entre as variedades no ciclo da cana planta.

O maior acúmulo de N foi da variedade RB867515, tanto na parte aérea como na raiz, diferindo das outras variedades. Resultado que está diretamente relacionado com a maior produtividade da variedade na cana planta. Interessante ressaltar que do total acumulado pela variedade, apenas 7% foi proveniente do fertilizante. As outras fontes contribuíram de forma significativa na nutrição nitrogenada da RB867515 diferindo das demais variedades.

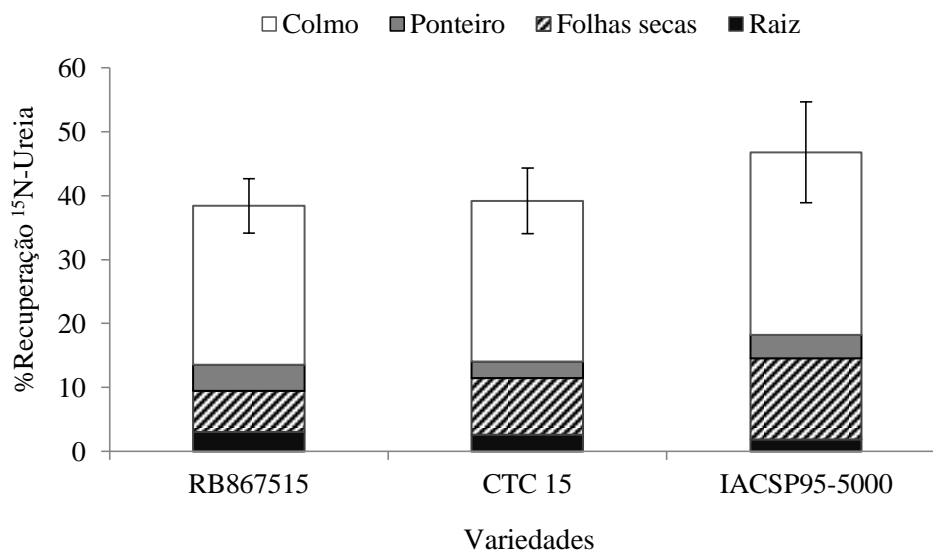
O N fertilizante tem uma significativa participação na nutrição da planta nos estágios iniciais de crescimento da cana-de-açúcar (FRANCO et al., 2011). Com o desenvolvimento da planta essa participação decresce e no final do ciclo o adubo nitrogenado participa apenas de uma pequena porcentagem do total do N acumulado na cana-de-açúcar (MEGDA et al., 2015). Isso ocorre por que ao longo do crescimento outras fontes aumentam a contribuição na nutrição da planta, como a mineralização da matéria orgânica (DOURADO-NETO et al., 2010; OTTO et al., 2013), a mineralização de resíduos culturais (MEIER et al., 2006; TRIVELIN et al., 2013) e a FBN (BAPTISTA et al., 2014). No final do ciclo a participação do N fertilizante cai para 5–10% na cana planta e 10–35% na cana soca (FRANCO et al., 2011), valores próximos ao observado no presente trabalho.

**Tabela 27.** N-total, N na planta proveniente do fertilizante (NPPF) e N na planta proveniente de outras fontes (NPOF) em três variedades de cana-de-açúcar no ciclo da cana planta adubada com 50 kg ha<sup>-1</sup> de N.

Variedade	Colmo	Ponteiro	Palha	Parte aérea	Raiz	-----N-total (kg ha <sup>-1</sup> )-----					
						RB867515	160,7	35,3 a	54,0	250,0 a	12,2 a
IACSP95-5000	138,5	22,5 ab	57,6	218,5 ab	8,0 b	CV%	11	31	21	10	11
						-----NPPF (kg ha <sup>-1</sup> )-----					
RB867515	12,4	2,0	3,2	17,7	1,5	CTC 15	12,6	1,7	4,5	18,3	1,3
IACSP95-5000	14,3	1,8	6,3	22,4	1,0	CV%	27	38	53	31	25
						-----NPOF (kg ha <sup>-1</sup> )-----					
RB867515	148,3	33,3 a	50,8	232,4 a	10,7 a	CTC 15	126,3	17,9 b	41,6	185,8 b	7,1 b
IACSP95-5000	124,2	20,6 ab	51,2	196,1 ab	7,0 b	CV%	11	31	19	10	12

N: fonte ureia aplicado no fundo do sulco de plantio. Valores são médias de quatro repetições. Letras diferentes na coluna indicam que houve diferença estatística entre as variedades pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A recuperação média do N-fertilizante pelas variedades no ciclo da cana planta foi de 41%. Individualmente, a recuperação foi de 38, 39 e 47%, nas variedades RB867515, CTC 15 e IACSP95-000, respectivamente. No entanto, não houve diferenças entre elas. Do total do N fertilizante a maior parte foi acumulada nos colmos (63%), seguido das folhas secas (22%), ponteiro (8%) e raízes (6%) (Figura 16).



**Figura 16.** Eficiência de recuperação (%) de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante (ureia) de três variedades de cana-de-açúcar (RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000) no ciclo da cana planta adubada com  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N.

A ausência de diferenças na eficiência de absorção do N fertilizante pela cana planta mostra que o aumento observado na produtividade da variedade RB867515 não está relacionado com uma maior eficiência na recuperação do  $^{15}\text{N}$  fertilizante. KOLLN (2016) em estudo de avaliação da eficiência no uso do N por variedades de cana-de-açúcar em condições controladas na fase inicial de desenvolvimento evidenciou que a variedade RB867515 é responsiva, porém pouco eficiente no uso do N.

Houve uma pequena recuperação do N de plantio pela primeira soqueira (Tabela 28). Na média das variedades 4,3% do adubo aplicado no plantio foi aproveitado pela soqueira seguinte, com as variedades obtendo a mesma eficiência.

O aproveitamento da adubação nitrogenada de plantio pela cana planta e pelas soqueiras seguintes foi reportado em alguns estudos no Brasil. Fortes et al. (2011) observaram que a recuperação do  $^{15}\text{N}$ -ureia aplicado no plantio foi de 31, 5 e 4% nos ciclos da cana planta, primeira e segunda soqueira, respectivamente. Já Basanta et al. (2003), do 1º ao 3º corte obtiveram, respectivamente, 63, 11, 4% de eficiência de recuperação do N-sulfato de amônio. Franco et al. (2010) concluíram que a fertilização nitrogenada de plantio pode ser usada pelas soqueiras seguintes e que quantidade recuperada dependerá do manejo da cultura. Após o primeiro ano o N proveniente do fertilizante pode ser incorporado na matéria orgânica do solo e/ou biomassa microbiana e ficar no solo como uma fonte recuperável pela soqueira seguinte (FORTES et al., 2011). Joris (2015) ressaltou que o aproveitamento de N proveniente do fertilizante pode atingir valores em torno de 45% em condições de baixo N residual no solo, ao passo que em solos adubados com N em ciclos anteriores, o aproveitamento do N-fertilizante não supera 30%.

**Tabela 28.** Nitrogênio proveniente do fertilizante (NPPF) aplicado no plantio na forma de ureia na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N e recuperado pela primeira soqueira.

Variedade	Colmo	Ponteiro	Palha	Parte aérea
	-----kg ha <sup>-1</sup> -----			
RB867515	1,3	0,4	0,5	2,1
CTC 15	1,3	0,4	0,6	2,3
IACSP95-5000	1,1	0,5	0,5	2,0
Média	1,2	0,4	0,5	2,2
	-----%-----			
RB867515	2,6	0,7	1,0	4,3
CTC 15	2,5	0,9	1,1	4,5
IACSP95-5000	2,1	0,9	1,0	4,1
Média	2,4	0,8	1,0	4,3
CV%	27	27	31	21

A ausência de letras diferentes na coluna indicam que não houve diferença estatística entre as variedades pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Franco et al. (2015) em um estudo abrangente em três locais e quatro colheitas observaram uma recuperação do <sup>15</sup>N fertilizante de plantio nas colheitas seguintes que totalizou de 30 a 40% ao longo de todo o estudo. Do total recuperado, 75% foi devido a cana de planta e 13, 7 e 5% foi recuperado pela primeira, segunda e terceira soqueira, respectivamente. Os autores ressaltaram que os baixos benefícios residuais limitam o valor da adubação nitrogenada no plantio e aumentam a necessidade de evitar excessivas doses de N que têm consequências negativas para a rentabilidade econômica e para o meio ambiente.

A diferença de abundância isotópica de <sup>15</sup>N entre as folhas das variedades de cana-de-açúcar e das plantas daninhas não leguminosas forneceu indícios de que houve pequena entrada de N<sub>2</sub> proveniente da atmosfera nas plantas de cana-de-açúcar na cana planta (Tabela 29), porém com contribuições abaixo de outros resultados (URQUIAGA et al., 2012; BAPTISTA et al., 2014). Na cana soca não foi possível a estimativa de contribuição da FBN já que todas as parcelas receberam N fertilizante.

**Tabela 29.** Estimativas de N derivado do ar por meio de técnica de abundância natural de <sup>15</sup>N ( $\delta^{15}\text{N}$ ) em amostras coletadas previamente a colheita da cana planta.

Variedade	%N	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	FBN(%)
RB867515	1,04	3,75	11,49
CTC 15	1,06	3,30	22,31
IACSP95-5000	0,93	3,71	10,40

A ausência de letras nas colunas indica que não houve diferenças entre as variedades pelo teste Tukey a 5%.

Estudos indicaram que a FBN pode contribuir em até 60% de todo o N acumulado pelas plantas em diversas áreas de produção de cana-de-açúcar no Brasil (BODDEY et al., 2001; POLIDORO, 2001; SCHULTZ, 2012). No entanto, a FBN em cana-de-açúcar sempre gerou certa polêmica. Estudos conduzidos na África do Sul e Austrália sugerem que a FBN não contribui significativamente para a nutrição nitrogenada da cultura nesses países (BIGGS et al., 2002; URQUIAGA; CRUZ; BODDEY, 1992; HOEFSLOOT et al., 2005). Herridge; Peoples; Boddey (2008) relataram que o valor mais realista de fornecimento de N para a cana-de-açúcar nas condições brasileiras via FBN é em torno de 40 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Na primeira soqueira o acúmulo de N foi menor que na cana planta, resultado diretamente relacionado com a menor produtividade obtida em relação ao ciclo anterior (Tabela 30). Na média das três variedades o acúmulo de N na planta (parte aérea e raiz) foi de 191 kg de N ha<sup>-1</sup>. Também se observou que a adubação nitrogenada de plantio influenciou no acúmulo de N na parte aérea na média das variedades, com maior conteúdo na dose de 50 kg de N ha<sup>-1</sup>.

Quando a comparação é feita na média das variedades, observa-se que o acúmulo de N no ponteiro e na parte aérea na variedade CTC 15 foi significativamente superior às demais variedades. Já em relação ao sistema radicular o maior acúmulo de N foi obtido pela variedade RB867515.

Quando a análise é feita por variedade, observa-se que o efeito da adubação nitrogenada de plantio no acúmulo de N do sistema radicular da variedade IACSP95-5000, onde houve significativo acúmulo na maior dose aplicada no plantio (100 kg de N ha<sup>-1</sup>). Resultado que evidencia que a esta variedade responde a adubação nitrogenada de plantio no acúmulo de biomassa radicular (Tabela 30) e no acúmulo de N.

**Tabela 30.** N-total acumulado na parte aérea e raiz da primeira soqueira de três variedades de cana-de-açúcar adubadas com 100 kg ha<sup>-1</sup> de N e em função da adubação nitrogenada de plantio.

Variedade	Tratamento		Colmo	Ponteiro	Palha	Parte aérea	Raiz
	NP	NS					
-----kg ha <sup>-1</sup> -----							
RB867515	0	100	93,8 a	33,7 a	40,8 a	168,3 a	11,6 a
	50	100	110,2 a	32,3 a	41,5 a	184,1 a	10,6 a
	100	100	103,6 a	30,3 a	41,0 a	174,9 a	10,4 a
		Média	102,6 A	32,1 B	41,1 A	175,8 B	10,9 A
CTC 15	0	100	100,9 a	41,7 a	46,9 a	189,5 a	9,2 a
	50	100	120,4 a	40,7 a	53,6 a	214,7 a	7,6 a
	100	100	98,9 a	36,8 a	50,7 a	186,4 a	9,5 a
		Média	106,7 A	39,7 A	50,4 A	196,9 A	8,8 AB
IACSP 95-5000	0	100	92,3 a	38,0 a	47,9 a	178,2 a	6,1 b
	50	100	97,3 a	41,2 a	44,1 a	182,5 a	7,6 ab
	100	100	92,4 a	30,1 a	41,5 a	164,0 a	11,3 a
		Média	94,0 A	36,4 AB	44,5 A	174,9 B	8,3 B
Média	0	100	95,7 a	37,8 a	45,2 a	178,7 ab	8,9 a
	50	100	109,3 a	38,1 a	46,4 a	193,8 a	8,6 a
	100	100	98,3 a	32,4 a	44,4 a	175,1 b	10,4 a
		Média	101,1	36,1	45,3	182,5	9,3
CV%			18,6	17,6	21,6	9,8	24,2

NP – N plantio (ureia). NS – N soqueira (sulfato de amônio). Letras minúsculas diferentes na coluna dentro de cada variedade e maiúsculas na média das variedades indicam que houve diferenças estatísticas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Oliveira (2011) estudou a extração de nitrogênio em uma variedade de cana-de-açúcar, sob doses de N, em três solos distintos, ao longo do ciclo da cana planta e soca. De forma geral, a adubação com N promoveu aumento e antecipação no acúmulo de N, com acúmulo inicial de 25 e 13 kg de N ha<sup>-1</sup>, para planta e soca, respectivamente. Os maiores acúmulos de

N ocorreram na segunda fase de crescimento, com um máximo de 184 kg ha<sup>-1</sup> na cana planta, entre 138 e 317 dias após o plantio e 93 kg ha<sup>-1</sup>, entre 60 e 306 dias após o plantio na soca. Na terceira fase, o acúmulo variou de 11 a 30 kg ha<sup>-1</sup> na cana planta, e na soqueira variou entre 9 a 14 kg ha<sup>-1</sup>. O autor observou também que em relação a distribuição do N acumulado na planta, o acúmulo de N na parte subterrânea representou em torno de 18 e 13% na média da cana planta e soca, respectivamente. Na parte aérea o maior acúmulo ocorreu nos colmos (49%) na cana planta, já em soqueiras o maior acúmulo ocorreu nas folhas secas e ponteiros (46%).

Em um estudo de acúmulo e alocação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar no ciclo da cana planta sob irrigação, Oliveira et al (2011) constataram que o maior acúmulo de N nas folhas ocorreu até os 120 dias após o plantio, com acúmulo de 80 kg ha<sup>-1</sup> de N. Nesse mesmo período, o acúmulo de N nos colmos foi de 40 kg ha<sup>-1</sup> de N. Após este período houve inversão com acúmulo de 140 e 70 kg ha<sup>-1</sup> de N, nos colmos e folhas, respectivamente. Esse acúmulo corresponde ao período do surgimento dos colmos com consequente intensa produção de biomassa (WOOD et al., 1996).

A recuperação do N fertilizante foi influenciada pela adubação nitrogenada de plantio e pelas variedades na primeira soqueira (Tabela 31). Na média das variedades houve maior recuperação de N (kg ha<sup>-1</sup>) na parte aérea nos tratamentos com aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N no plantio e menor recuperação na maior dose (100 kg ha<sup>-1</sup> de N). Este efeito não foi observado na recuperação de N na raiz.

**Tabela 31.** N proveniente do fertilizante acumulado na parte aérea e raiz da primeira soqueira de três variedades de cana-de-açúcar adubadas com 100 kg ha<sup>-1</sup> de N e em função da adubação nitrogenada de plantio.

Variedade	Tratamento		Colmo	Ponteiro	Palha	Parte aérea	Raiz
	NP	NS					
	-----kg ha <sup>-1</sup> -----						
RB867515	0	100	20,3 a	7,3 a	9,1 a	36,7 a	1,5 a
	50	100	24,1 a	7,0 a	9,1 a	40,3 a	1,3 a
	100	100	20,8 a	6,2 a	8,1 a	35,1 a	1,1 a
		Média	21,7 AB	6,8 B	8,8 A	37,4 B	1,3 A
CTC 15	0	100	24,5 b	10,1 ab	11,6 ab	46,2 b	1,0 a
	50	100	34,6 a	12,2 a	16,0 a	62,8 a	0,8 a
	100	100	17,1 b	6,6 b	8,5 b	32,2 c	1,1 a
		Média	25,4 A	9,7 A	12,0 A	47,0 A	1,0 AB
IACSP 95-5000	0	100	21,7 a	8,8 a	11,9 a	42,4 a	0,5 a
	50	100	19,7 a	8,5 a	8,9 a	37,2 a	0,8 a
	100	100	21,0 a	7,0 a	9,4 a	37,5 a	1,2 a
		Média	20,8 B	8,1 AB	10,1 A	39,0 B	0,8 B
Méd. Geral	0	100	22,2 ab	8,8 ab	10,9 a	41,8 ab	1,0 a
	50	100	26,2 a	9,3 a	11,3 a	46,7 a	1,0 a
	100	100	19,6 b	6,6 b	8,7 a	34,9 b	1,1 a
			22,6	8,2	10,3	41,1	1,0
CV%		19,4	27,7	32,3	17,5	43,5	

NP – N plantio (ureia). NS – N soqueira (sulfato de amônio). Letras minúsculas diferentes na coluna dentro de cada variedade e maiúsculas na média das variedades indicam que houve diferenças estatísticas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



A variedade CTC 15 foi mais eficiente que as demais na recuperação do N fertilizante na parte aérea, com 47% de eficiência na recuperação do adubo nitrogenado, com este efeito diretamente relacionado coma adubação nitrogenada de plantio. No tratamento com aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N no plantio, a eficiência na recuperação do N foi de 62,8%. Isto evidencia uma relação entre a eficiência no uso do N com o N aplicado no plantio na variedade CTC 15.

Assim como na cana planta, outras fontes tiveram maior contribuição na nutrição nitrogenada da primeira soqueira (Tabela 32). Do total de N acumulado na planta (média geral) apenas 22% foi proveniente do fertilizante. No entanto, esse valor superior a contribuição do N fertilizante no total de N da cana planta que foi apenas de 7%. Valores que corroboram com os dados obtidos por Franco et al. (2011).

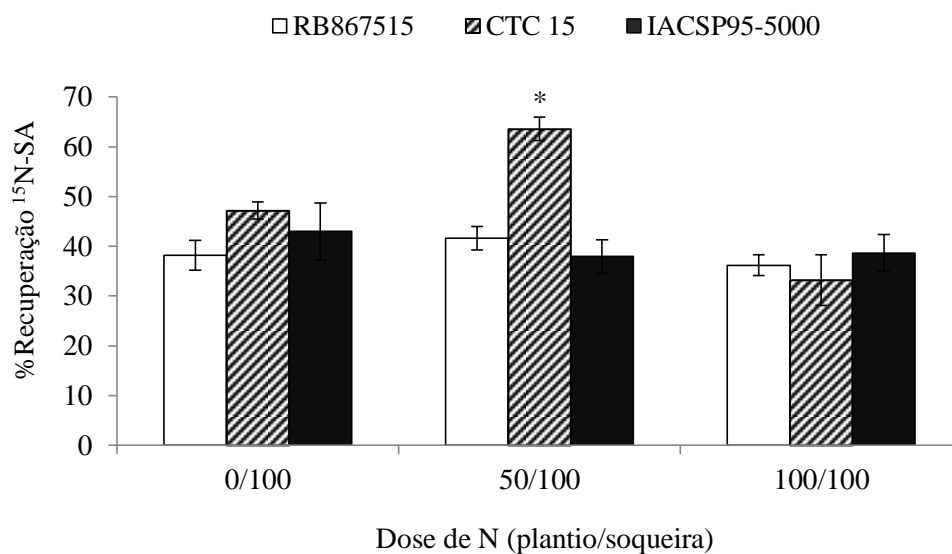
Não houve diferenças entre as variedades e efeito da adubação com N de plantio no acúmulo de N na parte aérea proveniente de outras fontes. Já em relação ao acúmulo de NPOF na raiz houve significativo efeito entre variedades com maior acúmulo na variedade RB867515. Também houve maior acúmulo de NPOF no sistema radicular da variedade IAC em resposta às doses de N aplicadas no plantio.

**Tabela 32.** N proveniente de outras fontes (NPOF) acumulado pela primeira soqueira adubada com 100 kg ha<sup>-1</sup> de N em função da adubação nitrogenada de plantio.

Variedade	Tratamento		Colmo	Ponteiro	Palha	Parte aérea	Raiz
	NP	NS					
-----kg ha <sup>-1</sup> -----							
RB867515	0	100	73,5 a	26,4 a	31,7 a	131,6 a	10,1 a
	50	100	86,1 a	25,3 a	32,4 a	143,8 a	9,2 a
	100	100	82,8 a	24,1 a	32,9 a	139,8 a	9,3 a
		Média	80,8 A	25,3 A	32,3 A	138,4 A	9,6 A
CTC 15	0	100	76,5 a	31,5 a	35,3 a	143,3 a	8,2 a
	50	100	85,8 a	28,5 a	37,6 a	151,9 a	6,8 a
	100	100	81,9 a	30,2 a	42,2 a	154,3 a	8,4 a
		Média	81,4 A	30,1 A	38,4 A	149,8 A	7,8 AB
IACSP 95-5000	0	100	70,6 a	29,2 a	36,0 a	135,8 a	5,5 b
	50	100	77,6 a	32,7 a	35,2 a	145,4 a	6,8 ab
	100	100	71,4 a	23,1 a	32,1 a	126,5 a	10,1 a
		Média	73,2 A	28,3 A	34,4 A	135,9 A	7,5 B
Méd. Geral	0	100	73,5 a	29,0 a	34,3 a	136,9 a	7,9 a
	50	100	83,2 a	28,8 a	35,1 a	147,0 a	7,6 a
	100	100	78,7 a	25,8 a	35,7 a	140,2 a	9,3 a
			78,5	27,9	35,0	141,4	8,3
CV%			21,4	17,6	21,3	12,3	23,7

NP – N plantio (ureia). NS – N soqueira (sulfato de amônio). Letras minúsculas diferentes na coluna dentro de cada variedade e maiúsculas na média das variedades indicam que houve diferenças estatísticas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A eficiência média de recuperação do N-fertilizante pelas variedades no ciclo da primeira soqueira foi de 42%, semelhante a cana planta. Individualmente, a recuperação foi de 39, 48 e 40%, nas variedades RB867515, CTC 15 e IACSP95-5000, respectivamente. Houve significativa diferença entre a variedade CTC 15 em relação as demais no tratamento com aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N no plantio (Figura 17).



**Figura 17.** Eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$ -sulfato de amônio (%) nos compartimentos da parte aérea (colmo, palha e ponteiro) e da raiz de três variedades de cana-de-açúcar na primeira soqueira em função da adubação nitrogenada de plantio. \*diferença estatística entre as variedades pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores observados de recuperação de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante tanto na cana planta como na primeira soqueira estão próximos aos valores encontrados em estudos realizados com a cultura em condições brasileiras (BASANTA et al., 2003; VITTI et al., 2011; FORTES et al., 2013; FRANCO et al., 2015; JORIS, 2015). Na Austrália, trabalhos utilizando fertilizantes marcados com  $^{15}\text{N}$  indicaram que o máximo de recuperação foi de 60% do N aplicado e os valores mais comumente encontrados estiveram em torno de 20-40% de recuperação (CHAPMAN et al. 1994; VALLIS; KEATING 1994; VALLIS et al. 1996, PRASERTSAK et al. 2002).

Esses valores são considerados baixos quando comparados com outras culturas, principalmente em relação aquelas de ciclo curto (GAJU et al., 2011; HASHIN et al., 2015). Um ponto a ser considerado em relação a baixa eficiência no uso do N-fertilizante é a desincronização entre a maior disponibilidade de N e a demanda da cana-de-açúcar (ROBINSON et al., 2011). Após a adubação nitrogenada de plantio há maior disponibilidade de N, no entanto, essa é a fase onde a planta tem a menor demanda pelo N, o que pode ocasionar perdas de N, como pela lixiviação e emissão de óxido nitroso (GHIBERTO et al., 2011; ROBINSON et al., 2011; LISBOA et al., 2011). Podendo ocorrer significativas perdas de N dependendo da fonte e do manejo adotado (TRIVELIN et al., 2002; MARIANO et al., 2015, 2016).

Um dos principais fatores apontados para a baixa eficiência de recuperação do N-fertilizante em cana-de-açúcar é o efeito residual do fertilizante nitrogenado no solo e a elevada imobilização de N decorrentes da entrada de material alta relação C:N no solo, como a palha proveniente da colheita mecanizada (COURTAILLAC et al., 1998). Bell et al. (2015) ainda ressaltam que em um curto prazo, uma grande proporção do N do fertilizante ou da palha adicionada ao solo é imobilizada e pode não contribuir para a absorção de N pela cultura até que o N se mineralize e seja disponibilizado para o ciclo subsequente.

JORIS (2015) estudou o aproveitamento do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante em uma 4ª soqueira de cana-de-açúcar em função de doses de fertilizante nitrogenado aplicado durante os três ciclos

anteriores. O autor observou que nas condições em que não houve aporte de N, a quantidade de N no solo, resíduos e no sistema radicular foi inferior aos demais tratamentos, fazendo com que as plantas apresentassem melhor aproveitamento do N-fertilizante aplicado. O autor concluiu que o aproveitamento do N proveniente do fertilizante pode atingir maiores valores de aproveitamento do N fertilizante em condições de baixo N residual no solo, ao passo que em solos adubados com N em ciclos anteriores, o aproveitamento do N-fertilizante não supera 30%. No entanto, o autor ressalta que as produtividades mais elevadas em cana-soca foram obtidas em condições de alto suprimento de N pelo solo.

Este efeito também foi observado no presente estudo, onde não houve efeito da adubação de plantio na eficiência de recuperação do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante na variedade RB867515, mas houve significativo aumento na produtividade de colmos da soqueira desta variedade. Já na variedade CTC ocorreu o inverso, não houve resposta da adubação de plantio na produtividade da soqueira, mas nas condições de cultivo deste ciclo, com déficit hídrico, e adubação, a variedade CTC 15 foi mais eficiente na recuperação do N fertilizante, nas doses médias aplicadas nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil (50 kg ha<sup>-1</sup> de N no plantio e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N na soqueira) (VITTI et al., 2008).

A maior eficiência na absorção do N está relacionada com mecanismos desenvolvidos para modular sua eficiência de aquisição de N em resposta a disponibilidade e forma do N externo, assim como sua demanda de N durante seu ciclo de vida (ROBINSON et al., 2014). Dentre esses mecanismos, o desenvolvimento de um sistema radicular eficiente na exploração do solo (KOLLN, 2016), associação com microrganismos promotores de crescimento vegetal (SUMAN et al., 2005) e os sistemas de transportadores que mediam a absorção de N nas diferentes concentrações (SOUZA, 2015).

Estudos em condições controladas já evidenciaram que existem diferenças entre as variedades em relação a eficiência de absorção do N, utilização do N para produção de biomassa e na capacidade de armazenar N nos estágios iniciais de desenvolvimento (DONATO et al., 2003; ROBINSON et al., 2007, 2008; WHAN et al., 2010; KOLLN, 2016). Genótipos mais adaptados às condições de baixa disponibilidade de N são capazes de absorver este nutriente mesmo em baixas concentrações, no entanto, esses genótipos são poucos responsivos a condições onde há fornecimento de nitrogênio (SANTOS et al., 2011). Essas informações são importantes para um planejamento adequado e um manejo eficiente, explorando o potencial das variedades com utilização racional do fertilizante nitrogenado. A busca pelo aumento da eficiência no uso de fertilizantes, em especial os fertilizantes nitrogenados é relevante e estratégica para a sustentabilidade da produção da cana-de-açúcar no Brasil.

## 4.6 CONCLUSÕES

- A adubação nitrogenada de plantio reduziu a produtividade da biomassa radicular das variedades, no entanto essa redução não influenciou negativamente a produtividade da parte aérea; Houve efeito positivo da adubação nitrogenada de plantio na produtividade de colmos das variedades na cana planta e aumento de produtividade da variedade RB867515 na primeira soqueira em resposta ao N do plantio;
- A eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$  fertilizante foi de 41% na cana planta e não houve diferenças entre as variedades. Já na primeira soqueira a variedade CTC 15 foi significativamente mais eficiente e o manejo da adubação nitrogenada de plantio foi determinante para esse resultado.

## 5 CONCLUSÕES GERAIS

A inoculação com BPCV influenciou na nutrição nitrogenada ao longo do crescimento da variedade RB92579, mas este efeito não foi em função da maior eficiência de recuperação do N-fertilizante, na cana planta e soqueiras. O N-fertilizante desempenha um papel importante nos estágios iniciais do desenvolvimento da cana-de-açúcar, mas a maior parte do N acumulado no final do ciclo é proveniente de outras fontes, sendo a FBN de ocorrência natural umas dessas fontes. A inoculação com BPCV não aumentou a eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$  na variedade RB92579 na cana planta, primeira e segunda soqueira, assim como não influenciou na produtividade da biomassa aérea nos três ciclos estudados.

As variedades de cana-de-açúcar apresentaram características diferenciadas de crescimento, produtividade de raiz e da parte aérea em função da adubação nitrogenada de plantio. No entanto, estes efeitos não estiveram diretamente relacionados com uma maior eficiência de recuperação do N-fertilizante. A eficiência de recuperação de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante foi de 41% na cana planta e não houve diferenças entre as variedades. Já na primeira soqueira a variedade CTC 15 foi mais eficiente e o manejo da adubação nitrogenada de plantio foi determinante para esse resultado, no entanto esse aumento não influenciou no aumento de produtividade da variedade. A adubação nitrogenada de plantio aumentou a produtividade de colmos das variedades na cana planta e esse efeito se estendeu até a primeira soqueira da variedade RB867515, evidenciando que um manejo diferenciado da adubação nitrogenada na variedade pode resultar em ganhos de produtividade.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a relevância da cana-de-açúcar na história e na economia do Brasil, os estudos que visam a melhor utilização dos recursos são essenciais para a sustentabilidade deste sistema de produção. A adubação nitrogenada da cana-de-açúcar no Brasil é menor quando comparada a outros países, contudo, apresenta baixa eficiência no uso do N fertilizante. E nesse sentido, poucos trabalhos foram desenvolvidos no Brasil em relação a eficiência na absorção e utilização do N em diferentes genótipos da cana-de-açúcar e sob aplicação de tecnologias que aumentem a eficiência deste insumo tão caro energeticamente. É possível que as diferentes variedades plantadas nos canaviais brasileiros sejam contrastantes quanto a capacidade de absorver e utilizar o N e estas podem ter uma manejo diferenciado buscando uma maior produção por unidade de N aplicado.

No presente trabalho a inoculação com BPCV não contribuiu efetivamente com o aumento da eficiência na recuperação do N fertilizante, no entanto foi possível observar que esses microrganismos contribuem com a nutrição nitrogenada da planta. Diversos trabalhos desenvolvidos no Brasil e em outros países evidenciaram ganhos na produtividade de diferentes culturas agrícolas através da aplicação de microrganismos selecionados. Contudo, a influência dos fatores edafoclimáticos nos genótipos é muito variável, tornando assim difícil fazer afirmações sobre quais são os fatores mais ou menos importantes. O aumento da contribuição da FBN na cana-de-açúcar e/ou ganhos na promoção do crescimento do sistema radicular, com conseqüente maior absorção de água e nutrientes pode contribuir para a obtenção de maior produtividade, aumento do balanço energético e redução nas emissões de gases de efeitos estufa no sistema cana-de-açúcar. Esses ganhos podem ser alcançados através da obtenção de genótipos com maior associação com microrganismos e/ou seleção e inoculação de bactérias promotoras de crescimento vegetal que apresentam potencial para promoção de crescimento da cana-de-açúcar.

Em relações a eficiência de recuperação do N-fertilizante pelas variedades pôde se observar que não houve diferenças na absorção do N pelas variedades na cana planta, mas na soca a variedade CTC 15 foi mais eficiente quando associado com a dose média de N fertilizante no plantio. Já a variedade RB867515 além de responder a adubação com N de plantio na cana planta, o efeito da adubação de plantio aumentou a produtividade da primeira soqueira subsequente. Indicando que a as variedades apresentam respostas diferenciadas em relação ao manejo. Além disso, a caracterização das variedades de cana-de-açúcar plantadas no Brasil quanto a resposta ao N fertilizante é importante para um planejamento adequado e um manejo eficiente, explorando o potencial das variedades com utilização racional do fertilizante nitrogenado. A busca pelo aumento da eficiência no uso de fertilizantes, em especial os fertilizantes nitrogenados é relevante e estratégica. Um insumo responsável pelo alto consumo de energia fóssil e significativa emissão de gases de efeito estufa na produção de cana-de-açúcar deve receber atenção especial.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C. Crescimento da parte aérea de cana crua e queimada. **Scientia Agricola**, v.56, p.1069-1079, 1999.
- 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**, v.62, p.534-542, 2005.
- AMBROSANO, E.J.; AZCON, R.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMASS, E.A.; MURAOKA, T.; TRIVELIN, P.C.O.; ROSSI, F.; GUIRADO, N.; UNGARO, M.R.G.; TERAMOTO, J.R.S. Crop Rotation Biomass and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Effects on Sugarcane Yield. **Scientia Agricola**, v.67, p.692-701, 2010.
- ARNOLD, S. L.; SCHEPERS, J. S. A simple roller-mill grinding procedure for plant and 495 soil samples. **Commucation Soil Science Plant Anal**, v.35, p.537-545, 2004.
- ARRUDA, B. **Phosphorus dynamics in the rhizosphere of sugarcane under phosphate sources and filter cake**. 75 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2015.
- AZEREDO D.F.; BOLSANELLO J.; WEBER, H.; VIEIRA J.R. Nitrogênio em cana-planta - doses e fracionamento. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 6, n. 5, p. 26-32, 1986.
- BACCHI, O.O.S. Botânica da cana-de-açúcar. In: **Nutrição e Adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Ed. ORLANDO FILHO, J., IAA/Planalsucar, 1983. 369p.
- BALDANI, J. I.; REIS, V. M.; BALDANI, V. L. D.; DOBEREINER, J. A brief story of nitrogen fixation in sugarcane - reasons for success in Brazil. **Functional Plant Biology**, v. 29, n. 4, p.417-423, 2002.
- BAPTISTA, R.B.; MORAIS, R.F.; LEITE, J.M.; SCHULTZ, N.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Variations in the <sup>15</sup>N natural abundance of plant-available N with soil depth: Their influence on estimates of contributions of biological N<sub>2</sub> fixation to sugar cane. **Applied Soil Ecology**, v.73, p.124– 129, 2014.
- BARBOSA, G.V.S.; SOUSA, A.J.R.; ROCHA, A.M.C.; SANTOS, A.V.P.; RIBEIRO, C.A.G., BARRETO, E.J.S.; MOURA FILHO, G.; SOUZA, J.L.; FERREIRA, J.L.C.; SOARES, L.; CRUZ, M.M.; FERREIRA, P.V.; SILVA, W.C.M. **Três novas variedades RB de cana-de-açúcar**. Boletim técnico PMGCA, n2. 2003. 18p.
- BASANTA M.V.; DOURADO-NETO, D.; REICHART, K.; BACCHI, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; TRIVELIN, P.C.O.; TIMM, L.C.; TOMINAGA, T.T.; CORRECHEL, V.; CASSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; MACEDO, J.R. Management effects of nitrogen recovery in a sugarcane crop grown in Brazil. **Geoderma**, v.116, p.235–248, 2003.

BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L.E.; PRABHU, S. R.; HERNANDEZ, J.P. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). **Plant Soil**, v.378, p.1–33, 2014.

BELL, M.J.; GARSIDE, A.L.; HALPIN, N.V.; BERTHELSEN, J.E. Interactions between stalk number and stalk weight and the implications for cane yield. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology**, v.26, 2004.

BELL, M.J.; GARSIDE, A.L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. **Field Crops Research**, v. 92, p.231–248, 2005.

BELL, M.J.; BIGGS, J.; MCKELLAR, L.B.; CONNELLAN, J.; DI BELLA, L.; DWYER, R.; EMPSON, M.; GARSIDE, A.J.; HARVEY, T.; KRAAK, J.; LAKSHMANAN, P.; LAMB, D.W.; MEIER, E.; MOODY, P.; MUSTER, T.; PALMER, J.; ROBINSON, N.; ROBSON, A.; SALTER, B.; SCHROEDER, B.; SILBURN, M.; SCHMIDT, S.; SKOCAJ, D.M.; STACEY, S.; STANLEY, J.; THORBURN, P.; VERBURG, K.; WALKER, C.; WANG, W.; WOOD, A. **A review of nitrogen use efficiency in sugarcane**. Austrália: Sugar Research Australia limited, 2015, 343p.

BENEDUZI, A.; MOREIRA, F.; COSTA, P.B.; VARGAS, L.K.; LISBOA, B.B.; FAVRETO, R.; BALDANI, J.I.; PASSAGLIA, L.M. Diversity and plant growth promoting evaluation abilities of bacteria isolated from sugarcane cultivated in the South of Brazil. **Applied Soil Ecology**, v.63, p.94– 104, 2013.

BERDING, N.; HURNEY, A.P.; SALTER, B.; BONNETT, G.D. Agronomic impact of sucker development in sugarcane under different environmental conditions. **Field Crops Research**, v.92, p.203–217, 2005.

BIGGS, I. M.; WILSON, J. R.; KEATING, B. A.; CRITCHLEY, C. Does biological N<sub>2</sub>-fixation contribute to nitrogen requirements in Australian sugarcane? **The Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v. 22, p. 133-138, 2000.

BODDEY, R. M.; POLIDORO, J. C.; RESENDE A. S.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Use of the <sup>15</sup>N natural abundance technique for the quantification of the contribution of N<sub>2</sub> fixation to grasses and cereals. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.28, n.9, p.889-895, 2001.

BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; REIS, V. M. Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. **Plant and Soil**, v.252, p.139-149, 2003.

BONNETT, G.D. Developmental Stages (Phenology). In: MOORE, P.H.; BOTHA, F.C. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013. cap.3, p.35-53.

BRACKIN, R; NÄSHOLM, T.; ROBINSON, N.; GUILLOU, S.; VINALL, K.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S.; INSELSBACHER, E. Nitrogen fluxes at the root-soil



interface show a mismatch of nitrogen fertilizer supply and sugarcane root uptake capacity. **Scientific Reports**, v.5, n.15727, 2015.

BRASIL (2015a). **Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2015** – Ano base 2014: Relatório Síntese, Rio de Janeiro, RJ, 2015, 68 p.

BRASIL (2016a). **Ministério da Agricultura. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v. 1 – Brasília : Conab, 2016. 66 p. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 05 de abril de 2016.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 375-470.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, v.65, p.397-401, 2008.

CANTARELLA, H. RAIJ, V. Adubação nitrogenada no Estado de São Paulo. In: SANTA, M. B. M. (Ed.) **Adubação nitrogenada no Brasil**. Ilhéus: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1985. p. 47-79.

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. (Eds.). **Nitrogênio e Enxofre na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 349-412.

CARNAÚBA, B.A.A., 1989. **Eficiência de utilização e efeito residual de uréia-15N em cana-de-açúcar (Saccharum spp.), em condições de campo**. 1989. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1989. 130p.

CARNAÚBA, B.A.A. O nitrogênio e a cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, v. 8, p. 24-41, 1990.

CARNEIRO, A.E.V.; TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L. Utilização da reserva orgânica e de nitrogênio do tolete de plantio (colmo-semente) no desenvolvimento da cana planta. **Scientia Agricola**, v.53, p.199-209, 1995.

CARVALHO, J.L.N.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J; TRIVELIN, P.C.O. Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. **Scientia Agricola**, v.70, p.336-344, 2013.

CARVALHO, T.L.G.; BALSEMÃO-PIRES, E.; SARAIVA, R.M.; FERREIRA, P.C.G.; HEMERLY, A.S. Nitrogen signalling in plant interactions with associative and endophytic diazotrophic bacteria. **Journal of Experimental Botany**, v.x, p.x-x, 2014.

CHAPMAN, L.S.; HAYSOM, M.B.C.; SAFFIGNA, P.G. The recovery of <sup>15</sup>N from labeled urea fertilizer in crop components of sugarcane and in soil profiles. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.45, p.1577-1585, 1994.

CHARDON, F.; NÖE, V.; MASCLAUX-DAUBRESSE, C. Exploring NUE in crops and in Arabidopsis ideotypes to improve yield and seed quality. **Journal of Experimental Botany**, v.63, p.3401–3412, 2012.

CHAVES, V.A.; GOMES, S.G.; SCHULTZ, N.; PEREIRA, W.; SOUSA, J.S.; MONTEIRO, R.C.; REIS, V.M. Desenvolvimento inicial de duas variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1595-1602, 2015.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; DE ABREU, H.M., ARRUDA, P.; BESPALHOK FILHO, J.C.; BURNQUIST, W.L.; CRESTE, S.; DI CIERO, L.; FERRO, J.A.; FIGUEIRA, A.V.O.; FIGUEIRAS, T.S.; GROSSI-DE-SÁ, M.F.; GUZZO, E.C.; HOFFMANN, H.P.; LANDELL, M.G.A.; MACEDO, N.; MATSUOKA, S.; REINACH, E.R.; SILVA, W.J.; SILVA FILHO, M.C.; ULIAN, E.C. Sugarcane (*Saccharum officinarum*): a reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, v.4, p. 62-89, 2011.

CHEN, Y.; XIAO, C.; WU, D.; XIA, T.; CHEN, Q.; CHEN, F.; YUAN, L.; MI, G. Effects of nitrogen application rate on grain yield and grain nitrogen concentration in two maize hybrids with contrasting nitrogen remobilization efficiency. **European Journal Agronomy**, v.62, p.79–89, 2015.

CHIEN, S.H.; PROCHNOW, L.I.; CANTARELLA, H. Recent Developments of Fertilizer Production and Use to Improve Nutrient Efficiency and Minimize Environmental Impacts. *Advances in Agronomy*, From: In Sparks, editor: **Advances in Agronomy**, vol. 102, p.267-322, 2009.

COSTA, M. C. G.; VITTI, G. C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH<sub>3</sub> de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.631-637, 2003.

COSTA, D. P.; DIAS, A. C. F.; DURRER, A.; ANDRADE, P. A. M.; GUMIERE, T.; Andreote, F.D. Composição diferencial das comunidades bacterianas na rizosfera de variedades de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1694-1702, 2014.

COURTAILLAC, N.; BARAN, R.; OLIVER, R.; CASABIANCA, H.; GANRY, F. Efficiency of nitrogen fertilizer in sugarcane-vertical system in Guadeloupe according to growth and ratoon age of the cane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 52, p. 9–17, 1998.

CHRISTOFOLETTI, C.A.; ESCHER, J.P.; CORREIA, J.E.; MARINHO, J.F.U.; FONTANETTI, C.S. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v.33, p.2752–2761, 2013.

de LA CRUZ, C.P.P.; BIRD, C.O.; ISULAT, M.D. Sprouting, Survival and Growth of Young Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) Treated with Diazotrophic Bacteria (*Gluconacetobacter diazotrophicus*). **The Philippine Agricultural Scientist**, v.95, n.1, 2012.

DECHORGNAT, J., NGUYEN, C.T., ARMENGAUD, P. From the soil to the seeds: the long journey of nitrate in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.62, p.1349–1359, 2011.

DEBRECZENI, K.; KISMÁNYOKY, T. Acidification of Soils in Long-Term Field Experiments. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 36, p.321–329, 2005.

DILLEWIJN, C.V. **Botany of sugarcane**. Wageningen, Veenan; Zonen, 1952, 371p.

DOBERMANN, A. **Nutrient use efficiency - measurement and management**. Proc. of International Fertilizer Industry Association (IFA) Workshop on Fertilizer Best Management Practices. Brussels, Belgium. March 7-9, 2007, 22 p.

DOBEREINER, J. *Azotobacter* em solos ácidos. **Biological Institute Ecology Experimentnal Agriculture**, v.11, p.1-36, 1953.

DÖBEREINER J.; RUSCHEL, A. P. Uma nova espécie de *Beijerinckia*. **Research Biology**, v.1, p. 261-272, 1958.

DOBEREINER, J. *Azotobacter paspali* sp. Nov., uma bactéria fixadora de nitrogênio na rizosfera de Paspalum. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.1, p.357-365, 1966.

DOBERMANN, A. **Nutrient use efficiency - measurement and management**. Proc. of International Fertilizer Industry Association (IFA) Workshop on Fertilizer Best Management Practices. Brussels, Belgium. March 7-9, 2007, 22 p.

DONATO, V.M.T.S.; ANDRADE, A.G.; SOUZA, E.S.; FRANÇA, J.G.E. Metabolismo de plantas de cana-de-açúcar cultivadas in vitro sob diferentes concentrações de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p.1373-1379, 2003.

DOURADO-NETO, D.; POWLSON, D.; ABU BAKAR, R.; BACCHI, O.O.S.; BASANTA, M.V.; THI CONG, P.; KEERTHISINGHE, G.; ISMAILI, M.; RAHMAN, S.M.; REICHARDT, K.; SAFWAT, M.S.A.; SANGAKKARA, R.; TIMM, L.C.; WANG, J.Y.; ZAGAL, E.; VAN KESSEL, C. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.74, p.139–152, 2010.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2023.pdf>. Acesso em: abril de 2016.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas**. 2.ed. Londrina, Planta, 2006. 403p.

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

ETANOL RFA – Renewable Fuels Association. **Ethanol industry outlook**, Washington, DC, 2016, 40 p.

FAGERIA, N.K; BALIGAR, V.C. Enhancing Nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**. v.88, p.267-322, 2005.

FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. **FAOSTAT** - Disponível em: <<http://faostat3.fao.org>>. Acesso em: 12/12/2016.

FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; CANTARELLA, H. Estado nutricional da cultura de cana-de-açúcar (cana-planta) em experimentos com <sup>15</sup>N. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1919-1927, 2009.

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

FARRAR, K.; BRYANT, D.; COPE-SELBY, N. Understanding and engineering beneficial plant–microbe interactions: plant growth promotion in energy crops. **Plant Biotechnology Journal**, v.12, p.1193–1206, 2014.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**. 3 ed. Piracicaba: STAB, 2011, 416 p.

FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; FERREIRA, D.A.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R. Recovery of nitrogen (<sup>15</sup>N) by sugarcane from previous crop residues and urea fertilisation under minimum tillage system. **Sugar Tech**, v.13, p.42-46, 2011.

FORTES, C.; TRIVELIN, P.O.; VITTI, A.C. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. **Biomass and bioenergy**, v.42, p.189-198, 2012.

FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, p.88-96, 2013.

FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 5, p. 579-590, 2010.

FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, v.121, p. 29–41, 2011.

FRANCO, H. C. J.; OTTO, VITTI, A. C.; R.; FARONI, C. E.; OLIVEIRA, E.C.A.; FORTES, C.; FERREIRA, D.A.; KOLLN, O.T.; GARSIDES, A.L.; TRIVELIN, P. C. O. Residual recovery and yield performance of nitrogen fertilizer applied at sugarcane. **Scientia Agricola**, v.72, n.6, p.528-534, 2015.

GAJU, O.; ALLARD, V.; MARTRE, P.; SNAPE, J.W.; HEUMEZ, E.; LEGOUIS, J.; MOREAU, D.; BOGARD, M.; GRIFFITHS, S.; ORFORD, S.; HUBBART, S.; FOULKES, M.J. Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes. **Field Crops Research**, v.123, p.139–152, 2011.

GHIBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen fertilizer leaching in a oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agrícola**, v.68, p.86-93, 2011.

GÍRIO, L.A.S.; DIAS, F.L.F.; REIS, V.M.; URQUIAGA, S.; SCHULTZ, N.; BOLONHEZI, D.; MUTTON, M.A. Bactérias promotoras de crescimento e adubação nitrogenada no crescimento inicial de cana-de-açúcar proveniente de mudas pré-brotadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.1, p.33-43, 2015.

GLÓRIA, N.A.; ORLANDO-FILHO, J. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussão sobre o que foi pesquisado. **Álcool e Açúcar**, v.4, p.22-31, 1984.

GOOD, A.G.; SHRAWAT, A.K.; MUENCH, D.G. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? **Trends in Plant Science**, v.9, p.597-605, 2004.

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

GUOHUA, M.I.; FANJUN CHEN, W.U.; QIUPING, L.A.I.; NINGWEI, YUAN, L.; ZHANG, F. Ideotype root architecture for efficient nitrogen acquisition by maize in intensive cropping systems. **Science China**, v.53, p.1369–1373, 2010.

HARTMANN, T.E.; YUE, S.; SCHULZ, R.; HE, X.; CHEN, X.; ZHANG, F.; MÜLLER, T. Yield and N use efficiency of a maize–wheat cropping system as affected by different fertilizer management strategies in a farmer’s field of the North China Plain. **Field Crops Research**, v.174, p.30–39, 2015.

HASHIM, M.M.; YUSOP, M.K.; OTHMAN, R.; WAHID, S.A. Characterization of Nitrogen Uptake Pattern in Malaysian Rice MR219 at Different Growth Stages Using <sup>15</sup>N Isotope. **Rice Science**, v.22, p.250–254, 2015.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; MOLLER, I.S.; WHITE, P. Functions of Macronutrients. In: **Marschner’s Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2012. 482p.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Revista STAB**. Piracicaba, v.17, n.5, p.32-34, 1999.

HERMANS, C.; HAMMOND, J.P.; WHITE, P.J.; VERBRUGGEN, N. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? **Trends in Plant Science**, v.11, p.1360-1385, 2006.

HERRIDGE, D. F.; PEOPLES, M. B.; BODDEY, R. M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. **Plant and Soil**, v. 31, p. 1–18, 2008.

HOEFSLOOT, G. TERMORDHUIZEN, A. J. L.; WATT, D. A.; CRAMER, M. D. Biological nitrogen fixation is not a major contributor to the nitrogen demand of a commercially grown South African sugarcane cultivar. **Plant and Soil**, v. 277, n.1-2, p. 85-96, 2005.

HOLST, J.; BRACKIN, R.; ROBINSON, N.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Soluble inorganic and organic nitrogen in two Australian soils under sugarcane cultivation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.155, p.16– 26, 2012.

IBGE-SIDRA - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

**INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva. 2007. 104 p.**

IFA, 2013a. **Assessment of Fertilizer Use by Crop at the Global Level 2010-2010/11** - International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris, France, 10p.

IFA, 2013b. **Fertilizer Outlook 2013-2017** - International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris, France, 8p.

IRVINE, J.E.; BENDA, G.T.A. Sugar cane spacing II. Effects of spacing on the plant. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 17., Manila, 1980. Proceedings. Manila: ISSCT, 1980. p.357-367.

ISA, D.W.; HOFMAN, G.; VAN CLEEMPUT, O. Uptake and balance of fertilizer nitrogen applied to sugarcane. **Field Crops Research**, v.95, p.348–354, 2006.

JAMAL, S.F., CADET, P., RUTHERFORD, R.S. Effect of mycorrhiza on the nutrient uptake of sugarcane. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association**, v.78, p.343–347, 2004.

JAMTGARD, S.; NASHOLM, T.; HUSS-DANELLE, K. Nitrogen compounds in soil solutions of agricultural land. **Soil Biology and Biochemistry**. V.42, p.2325–2330, 2010.

JORIS, H.A.W. **Nitrogênio na produção de cana-de-açúcar: aspectos agrônômicos e ambientais**. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical). – Instituto Agrônômico de Campinas, 2015, 135p.

JU, C.; BURESH, R.J.; WANG, Z. ZHANG, H.; LIU, L.; YANG, J.; ZHANG, J. Root and shoot traits for rice varieties with higher grain yield and higher nitrogen use efficiency at lower nitrogen rates application. **Field Crops Research**, v.175, p.47–55, 2015.

KEATING, B.A.; KINGSTON, G.; WOOD, A.W.; BERDING, N.; MUCHOW, R.C. Monitoring nitrogen at the mill to guide N fertilising practice on the farm. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v.21, p.10-19, 1999.

KIERS, E.T., DUHAMEL, M., BEESETTY, Y. Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis. **Science**, v.333, p.880–882, 2011.

KOMAROVA, N.Y.; THOR, K.; GUBLER, A. AtPTR1 and AtPTR5 transport dipeptides in planta. **Plant Physiology**, v.148, p.856–869, 2008.

KUMARA, A.D.S.; BANDARA, D.C. Influence of Nitrogen Application and Varietal Differences on Selected Physiological Parameters of Sugarcane. **Tropical Agricultural Research**, v.13, p.220-230, 2001.

LADHA, J.K.; PATHAK, H.; KRUPNIK, T.J.; SIX, J.; VAN KESSEL, C. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, v.87, p.86-156, 2005.

LARA CABEZAS, W.A.R.; ARRUDA, M.R.; CANTARELLA, H.; PAULETTI, V.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.215-226, 2005.

LEA, P.J.; AZEVEDO, R.A. Nitrogen use efficiency. Uptake of nitrogen from the soil. **Annals of Applied Biology**, v.149, p.243–247, 2006.

LEITE, J.M.; CIAMPITTI, I.A.; MARIANO, E.; VIEIRA-MEGDA, M.X.; TRIVELIN, P.C.O. Nutrient Partitioning and Stoichiometry in Unburnt Sugarcane Ratoon at Varying Yield Levels. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.1-14, 2016.

LIMA, E.; BODDEY, R. M.; DOBEREINER, J. Quantification of biological nitrogen fixation associated with sugar cane using <sup>15</sup>N aided nitrogen balance. **Soil Biology Biochemistry**, v. 19, p. 165-170, 1987.

LIMA, J.E.; ALVES, M.K.; VITTI, M.; DAMASCENO, L.H.; VICENTINI, R.; BENDASSOLLI, J.A.; FIGUEIRA, A. Nitrate transporters regulate nitrogen homeostasis in sugarcane (*Saccharum* spp.). In: 58<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Genética, 2012. **Anais...** Foz do Iguaçu, Sociedade Brasileira de Genética, 2012.

LISBOA, C.C.; BACH-BAHL; K.B.; MAUDER, M.; KIESE, R. Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases – known and unknowns. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 3, p.277–292, 2011.

LÓPEZ-BUICO, J. The role of nutrient availability in regulating root architecture. **Curr. Opinion Plant Biology**. v.6, p.280–287, 2003.

ROOTSLOGESHWARAN, P.; THANGARAJU, M.; RAJASUNDARI, K. Hydroxamate siderophores of endophytic bacteria *Gluconacetobacter diazotrophicus* isolated from sugarcane. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v.3, p.3564-3567, 2009.

- MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A. ; SILVA, J. E. A. R.; Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugar cane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, p. 582 – 595, 2008.
- MACHADO, A.; FERNANDES, M. S. Participatory maize breeding for low nitrogen tolerance. **Euphytica**, v.122, p.567-573, 2001.
- MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; FAHL, J.I.; ARRUDA, H.V.; CIONE, E. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.17, p.1323-1329, 1982.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional de plantas. 2 ed. **Piracicaba: Potafos**, 1997. 319 p.
- MALAVOLTA, E.; PIMENTEL-GOMES, F.; ALCARDE, J.C. **Adubos e adubações**. Piracicaba: FEALQ, 2011, 200p.
- MANTELIN, S.; TOURAINÉ, B. Plant growth-promoting bacteria and nitrate availability: impacts on root development and nitrate uptake. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, p. 27-34, 2004.
- MANZATTO, C.V.; ASSAD, E.D.; BACCA, J.F.M.; ZARONI, M.J. PEREIRA, S.E.M. **Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar. Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro**. Rio de Janeiro : Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 2009, 55 p.
- MARIANO, E.; LEITE, J.M.; MEGDA, M.X.V.; TORRES-DORANTE, L.; TRIVELIN, P.C.O. Influence of nitrogen form supply on soil mineral nitrogen dynamics, nitrogen uptake, and productivity of sugarcane. **Agronomy Journal**, v.107, p.641-650, 2015.
- MARIANO, E.; LEITE, J.M.; VIEIRA-MEGDA, M.X.; CIAMPITTI, I.A.; VITTI, A.C.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O. Biomass and Nutrient Content by Sugarcane as Affected by Fertilizer Nitrogen Sources. **Crop Science**, v.56, p.1234-1244, 2016.
- MEDEIROS, A.F.A.; POLIDORO, J.C.; REIS, V.M. Nitrogen source effect on *Gluconacetobacter diazotrophicus* colonization of sugarcane (*Saccharum* spp.). **Plant Soil**, V. 279, P.141-152, 2006.
- MEGDA, M.X.V.; 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**, v.10, p.241–257, 2015.
- 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. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** v.75, p.101–114, 2006.



MELLO, F.A.F.; DE POSSÍDIO, E.L.; PEREIRA, J.R.; DE ARAÚJO, J.P.; ABRAMOF, L.; COSTA, O.A. Efeito da adição de uréia e sulfato de amônio sobre o pH e nitrificação em um solo ácido. **Anais da E.S.A. Luiz de Quieroz**, v. 37, p.1:10, 1980.

MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**. v.74, p.562–564, 1982.

MORAES, M.A.F.D.; ZILBERMAN, D. **Production of Ethanol from Sugarcane in Brazil**. New York, 2014, 225p.

MORELLI, J.L.; DALBEN, A.E.; ALMEIDA, J.O.C.; DEMATTÊ, J.L.I. Calcário e gesso na produtividade da cana-de-açúcar e nas características químicas de um latossolo de textura média álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.187–194, 1992.

MUCHOW, R.C; ROBERTSON, M.J. Relating crop nitrogen uptake to sugarcane yield. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v.16, p.122-130, 1994.

MUNOZ-ROJAS, J.; CABALLERO-MELLADO, J. Population dynamics of *Gluconacetobacter diazotrophicus* in sugarcane and its effect on plant growth. **Microbial Ecology**, v.46, p.454-464, 2003.

MUTHUKUMARASAMY, R.; REVATHI, G.; LAKSMINARASIMHAN, C. Influence of fertilization on the isolation of *Acetobacter diazotrophicus* and *Herbaspirillum* spp. from Indian sugarcane varieties. **Biology and Fertility Soils**, v. 2, p. 7-14, 2006.

NASHOLM, T.; KIELLAND, K.; GANETEG, U. Uptake of organic nitrogen by plants. **New Phytologist**, v.182, p.31–48, 2009.

NEVES, M.F.; TROMBIN, V.G. **A Dimensão do Setor Sucoenergético - Mapeamento e Quantificação da Safra 2013/14**. Ribeirão Preto: Markestrat, Fundace, 2014, 45 p.

NOGUEIRA, A. R. A; SOUZA, G. B. **Manual de laboratório: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos**. São Carlos-SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 313p.

NOVOA, R.; LOOMIS, R.S. Nitrogen and plant production. **Plant and Soil**, v.58, p.177–204, 1981.

OECD-FAO - **Agricultural Outlook 2015-2024**. Paris, 2015, 148p. Disponível em: < [www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm](http://www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm) > Acesso em: março de 2016.

OHASHI, A.Y.P.; PIRES, R.C. de M.; RIBEIRO, R.V.; SILVA, A.L.B. de O. Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertirrigated by a subsurface drip system. **Bragantia**, v.74, p.131-138, 2015.

OITA, A.; MALIK, A.; KANEMOTO, K.; GESCHKE, A.,; NISHIJIMA, S.; LENZEN, M. Substantial nitrogen pollution embedded in international trade. **Nature Geoscience**, v.9, p.111–115, 2016.

OLIVARES, F.L.; BALDANI, V.L.D.; REIS, V.M.; BALDANI, J.I.; DÖBEREINER, J.; Occurrence of the endophytic diazotrophs *Herbaspirillum* spp. in roots, stems, and leaves, predominantly of Gramineae. **Biology and Fertility of Soils**, v. 21, p.197–200, 1996.

OLIVARES, J.E.; BEDMAR, J.; SANJUÁN, J. Biological Nitrogen Fixation in the Context of Global Change. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v.26, p.486–494, 2013.

OLIVEIRA, A. L. M.; URQUIAGA, S.; DOBEREINER, J.; BALDANI, J. I. The effect of inoculating endophytic N<sub>2</sub> – fixing bacteria on micropropagated sugarcane plants. **Plant and soil**, v. 242, p. 205-215, 2002.

OLIVEIRA, A. L. M., CANUTO, E. L., URQUIAGA, S., REIS, V.M.; BALDANI, J. I. Yield of micropropagated sugarcane varieties in different soil types following inoculation with diazotrophic bacteria. **Plant and Soil**, v. 284, p. 23-32, 2006.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, R.I., FREIRE, M.B.G.S.; NETO, D.E.S.; DA SILVA, S.A.M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1343-1352, 2010a.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, R.I., OLIVEIRA, A.C.; FREIRE, M.B.G.S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, p. 579-588, 2011.

OLIVEIRA, E.C.A. **Balço nutricional da cana-de-açúcar relacionado com a adubação nitrogenada**. 2011. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2011. 213p.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.I.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; KOERLER, H.S.; SILVA, D.K.T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, cana planta, no Estado do Paraná. **Scientia Agrária**, v.5, p.87-94, 2004.

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

ORLANDO-FILHO, J.; RODELLA, A. A.; BELTRAME, J. A.; LAVORENTI, N. A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 17, n. 4, p. 39-41, 1999.

ORLANDO FILHO, J.; SILVA, G.M.A.; LEME, E.J.A. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: **Nutrição e Adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Ed Orlando Filho, J, IAA/Planalsucar, 1983. 369p.

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**, v.44, p.398-405, 2009a.

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

OTTO R.; MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; TRIVELIN, P.C.O. Quantifying soil nitrogen mineralization to improve fertilizer nitrogen management of sugarcane. **Biol Fert Soils**, v.1:1–2, 2013.

OTTO R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, E.C.A.; SERMARINI, R.A.; TRIVELIN, P. C. O. The Role of Nitrogen Fertilizers in Sugarcane Root Biomass under Field Conditions. **Agricultural Sciences**, v.5, p.1527-1538, 2014.

OTTO, R.; CASTRO, S. A. Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next? **Bioenergy Research**, v.9, p.1272–1289, 2016.

PANKIEVICZ, V.C.S.; DO AMARAL, F.P.; SANTOS, K.F.D.N.; AGTUCA, B.; XU, Y.; SCHUELLER, M.J.; ARISI, A.C.M.; STEFFENS, M.B.R.; DE SOUZA, E.M.; PEDROSA, F.O.; STACEY, G.; FERRIERI, R.A. Robust biological nitrogen fixation in a model grass-bacterial association. **Plant Journal**, v.81, p.907-919, 2015.

PARNISKE, M. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. **Nat. Rev. Microbiol**, v.6, p.763–775, 2008.

PEDULA, R.O. **Análise de crescimento de cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas e com adubação nitrogenada**. 2013. 53 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Ciência do solo), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2013.

PEDULA, R.O.; SCHULTZ, N.; MONTEIRO, R.C.; PEREIRA, W.; ARAÚJO, A.; URQUIAGA, S.; REIS, V.M. Growth analysis of sugarcane inoculated with diazotrophic bacteria and nitrogen fertilization. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, p.2786-2795, 2016.

PEREIRA, W.; LEITE, J.M.; HIPÓLITO, G.S.; SANTOS, C.L.R.; REIS, V.M. Acúmulo de biomassa em variedades de cana-de-açúcar inoculadas com diferentes estirpes de bactérias diazotróficas. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, p. 363-370, 2013.

PLETT, D., TOUBIA, J., GARNETT, T. Dichotomy in the NRT gene families of dicots and grass species. **Plos One**, 5, e15289, 2010.

POLIDORO, J.C. **O molibdênio na nutrição nitrogenada e na contribuição da fixação biológica do nitrogênio associada à cultura da cana-de-açúcar**. 2001. 185 f. Tese (Doutorado em Agronomia-Ciência do solo), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2001.

PRADO, R.M.; PANCELLI, M.A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.) **Cana-de-açúcar**. Campinas, SP: Instituto Agronômico de Campinas, 2008. p. 179-204.

PRADO, H.; PÁDUA JÚNIOR, A.L.; GÁRCIA, J.C.; MOARES, J.L.F, CARVALHO, J.P.; DONZELI, P.L. Solos e ambientes de produção. v.67, n.4, p.951-959, 2008.

ROSSETO, R.;DIAS, F.L.:F.; VITTI, A.C. Fertilidade do solo, nutrição e adubação. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.) **Cana-de-açúcar**. Campinas, SP: Instituto Agronômico de Campinas, 2008. p. 221-238

PRASERTSAK, P.; FRENEY, J.R.; DENMEAD, O.T.; SAFFIGNA, P.G.; PROVE, B.G.; REGHENZANI, J.R. Effect of fertilizer placement on nitrogen loss from sugarcane in tropical Queensland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.62, p.229–239, 2002.

RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.;FURLANI, A.M.C. (Ed.) **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Fundação IAC. 1997. P. 233-243. (IAC. Boletim, 100).

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

RAMÍREZ, C.A.; WORRELL, E. Feeding fossil fuels to the soil: An analysis of energy embedded and technological learning in the fertilizer industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v.46, p.75–93, 2006.

RAMOS, M. G.; VILLATORO, M. A. A.; URQUIAGA, S; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Quantification of the contribution of biological nitrogen fixation to tropical green manure crops and the residual benefit to a subsequent maize crop using <sup>15</sup>N-isotope techniques. **Journal Biotechnology**, v.91, p.105-115, 2001.

RAUN, W.; JOHNSON, G. V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**. v.91, p.357–363, 1999.

REIS JUNIOR, F.B.; REIS, V.M.; URQUIAGA, S.; DÖBEREINER, J. Influence of nitrogen fertilisation on the population of diazotrophic bacteria *Herbaspirillum* spp. and *Acetobacter diazotrophicus* in sugar cane (*Saccharum* spp.). **Plant and Soil**, v.219, p.153–159, 2000.

REIS JUNIOR, R.A.; MONNERAT, P.H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26; p.367-372, 2002.

REIS, V.M.; DE PAULA, M.A.; DOBEREINER, J. Ocorrência de Micorrizas Arbusculares e da Bactéria Diazotrófica *Acetobacter diazotrophicus* em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p. 1933-1941, 1999.

REIS, V.M.; BALDANI, J.I. & URQUIAGA, S. **Recomendação de uma mistura de estirpes de cinco bactérias fixadoras de nitrogênio para inoculação de cana de açúcar.** Seropédica, Embrapa Agrobiologia, 2009. 4p. (Circular Técnica 30).

RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; OLIVEIRAA, O. C. D; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco. **Plant and Soil**, v.281, p.337-349, 2006.

RESENDE, A.S.; SANTOS, A.; XAVIER, R.P.; COELHO, C. H.; GONDIM, A.; OLIVEIRA, O.C.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 937-941, 2006.

RICHARD-MOLARD, C.; KRAPP, A.; BRUN, F.; NEY, B.; DANIEL-VEDELE, F.; CHAILLOU, S.; Plant response to nitrate starvation is determined by N storage capacity matched by nitrate uptake capacity in two Arabidopsis genotypes. **Journal of Experimental Botany**, v.59, p.779-791, 2008.

RIDESA – Rede Interinstitucional de Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. **Censo Varietal Brasil 2014**. Disponível em: <<http://pmgca.dbv.cca.ufscar.br/variedades>>. Acesso em: abril de 2016.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio da cana-de-açúcar: Estado da arte**. 2007. 2ed Esalq: Piracicaba, 2007, 1198p.

ROBERTSON, F.A.; THORBURN, P.J. Trash management—consequences for soil carbon and nitrogen. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v.22, p.225–229, 2000.

ROBERTSON, G.P.; VITOUSEK, P.M. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource. **Annual Review of Environment and Resources**, v.34, p.97–125, 2009.

ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W.; MUCHOW, R.C. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia: I. radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, v.48, p.11-25, 1996.

ROBINSON, N.; FLETCHER, A.; WHAN, A.; CRITCHLEY, C.; WIRÉN, N.; VON LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Sugarcane genotypes differ in internal nitrogen use efficiency. **Funct Plant Biology**, v.34, p.1122–1129, 2007.

ROBINSON, N., GAMAGE, H., WHAN, A., VINALL, K.; BRACKIN, R.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Evidence of differences in nitrogen use efficiency in sugarcane genotypes. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v.31, p.256–264, 2009.

ROBINSON, N.; BRACKIN, R.; VINALL, K.; SOPER, F.; HOLST, J.; GAMAGE, H.; PAUNGFUO-LONHIENNE, C.; RENNENBERG, H.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. **Plos One**, v.6, e19045, 2011.

ROBINSON, N.; VOGT, J.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Nitrogen Physiology of Sugarcane. In: MOORE, P.H.; BOTHA, F.C. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013. cap.8, p.169-195.

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

ROONEY, D., KILLHAM, K., BENDING, G.D. Mycorrhizas and biomass crops: opportunities for future sustainable development. **Trends in Plant Science**, v.14, p.542– 549, 2009.

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

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; BETTAMY, J. Eficiência de utilização de uréia-<sup>15</sup>N em aplicação única ou parcelada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 8, p. 943-949, 1984.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, L.H.; VICTORIA, R.L.; TRIVELIN, P.C.O. Redistribution of the reserves of <sup>15</sup>N-enriched stem cuttings and dinitrogen fixed by 90-day-old sugarcane plants. **Plant and Soil**, v.108, p.275-279, 1988.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. (Eds). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353p.

SANTOS, L.A.; SANTOS, W.A.; SPERANDIO, M.V.L.; BUCHER, C.A.; SOUZA, S.R.; FERNANDES, M.S. Nitrate uptake kinetics and metabolic parameters in two rice varieties grown in high and low nitrate. **Journal of Plant Nutrition**, v.34, p.988–1002, 2011.

SARAVANAN, V. S.; MADHAIYAN, M.; THANGARAJU, M. Solubilization of zinc compounds by the diazotrophic, plant growth promoting bacterium *Gluconacetobacter diazotrophicus*. **Chemosphere**, v. 66, p.1794–1798, 2007.

SCHROEDER, B.L.; SALTER, B.; MOODY, P.W.; SKOCAJ, D.M.; THORBURN, P.J. Evolving nature of nitrogen management in the Australian sugar industry. In: BELL, M.J. **A review of nitrogen use efficiency in sugarcane**. 2015. cap.2, p.15-87.

SCHULTZ, N.; LIMA, E.; PEREIRA, M.G.; ZONTA, E. Efeito residual da adubação na cana-planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 811-820, 2010.

SCHULTZ, N. **Fixação Biológica de Nitrogênio Associada à Cultura de Cana de Açúcar: Eficiência e Contribuição da Inoculação com Bactérias Diazotróficas**. 2012. 126 f. Tese

(Doutorado em Agronomia-Ciência do solo), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2012.

SCHULTZ, N.; MORAIS, R.F.; SILVA, J.A.; BAPTISTA, R.B.; OLIVEIRA, R.P.; LEITE, J.M.; PEREIRA, W.; CARNEIRO JÚNIOR, J.B.; ALVES, B.J.R.; BALDANI, J.I.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; REIS, V.M. Avaliação agronômica de duas variedades de cana de açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas e adubadas com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.261-268, 2012.

SCHULTZ, N.; SILVA, J.A.; SOUSA, J.S.; MONTEIRO, R.C.; OLIVEIRA, R.P.; CHAVES, V.A.; PEREIRA, W.; SILVA, M.F.; REIS, V.M.; URQUIAGA, S. Inoculation of sugarcane with diazotrophic bacteria. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.359-371, 2014.

SCHUMANN, A.W.; MEYER, J.H.; NAIR, S. Evidence for different nitrogen use efficiencies of selected sugarcane varieties. **Proc S Afr Sug Technol Ass**, v.72, p.77-80, 1998.

SCORTECCI, K.C.; CRESTE, S.; CALSA JR., T.; XAVIER, M.A.; LANDELL, M.G.A.; FIGUEIRA, A.; BENEDITO, V. 2012. **Challenges, Opportunities and Recent Advances in Sugarcane Breeding, Plant Breeding**, Dr. Ibrokhim Abdurakhmonov (Ed.), ISBN: 978-953-307-932-5, InTech, Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/plant-breeding/challenges-opportunities-and-recent-advances-insugarcane-breeding> ISBN 978-953-307-932-5, 352 p.

SHEARER, G.; KOHL, D.H. N<sub>2</sub> fixation in field settings: estimations based on natural <sup>15</sup>N abundance. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.13, p.699-756, 1986.

SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009, 627p.

SILVA, M.F.; OLIVEIRA, P.J.; XAVIER, G.R.; RUMJANEK, N.G.; REIS, V.M. Inoculantes formulados com polímeros e bactérias endofíticas para a cultura da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 11, p. 1437-1443, 2009.

SILVA, M.F.; ANTÔNIO, C.S.; OLIVEIRA, P.J.; XAVIER, G.R.; RUMJANEK, N.G.; SOARES, L.H.B.; REIS, V.M. Survival of endophytic bacteria in polymer-based inoculants and efficiency of their application to sugarcane. **Plant and Soil**, v.356, p.231-243, 2012.

SILVEIRA, J.A.G.; CROCOMO, O.J. Assimilação de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em presença de elevado nível de N e de vinhaça no solo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.2, p.7-15, 1990.

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

SPAEPEN, S.; VANDERLEYDEN, J. Auxin and Plant-Microbe Interactions. **Cold Spring Harbor Perspectives in Biology**. v.3, a001438, 2011.

SNYDER, C.S. BRUULSEMA; T.W.; T.L. JENSEN C, P.E. FIXEN. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v.133, p. 247–266, 2009.

SOARES, J.R.; CANTARELLA, H.; MENEGALE, M.L.C. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 52, p. 82-89, 2012.

SOUZA, S. R.; FERNANDES, M. S. **Nitrogênio**. In: Fernandes, M. S. Nutrição Mineral de Plantas. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 215-252, 2006.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana-de-açúcar: avaliação do modelo mosicas**. 2006. 62 p. Tese (Doutorado em Agronomia. Área de concentração: fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.

SUMAN, A.; GAUR, A.; SHRIVASTAVA, A.K.; YADAV, R.L. Improving sugarcane growth and nutrient uptake by inoculating *Gluconacetobacter diazotrophicus*. **Plant Growth Regulation**, v. 47, p. 155–162, 2005.

SUMAN, A.; GAUR, A.; SHRIVASTAVA, A.K.; GAUR, A.; SINGH, P.; YADAV, R.L. Nitrogen use efficiency of sugarcane in relation to its BNF potential and population of endophytic diazotrophs at different N levels. **Plant Growth Regulation**, v.54, p.1–11, 2008.

SUNDARA, B.; NATARAJAN, V.; HARI, K. Influence of phosphorus solubilizing bacteria on the changes in soil available phosphorus and sugarcane and sugar yields. **Field Crops Research**, v. 77, p. 43 – 49, 2002.

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

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**, v.339, p.51-67. 2011.

TRANBARGER, T.J. Transcription factor genes with expression correlated to nitrate-related root plasticity of *Arabidopsis thaliana*. **Plant Cell Environ**. v.26, p.459–469, 2003.

TRIVELIN, P.C.O.; LARA, C.W.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K. Evaluation of a <sup>15</sup>N plot design for estimating plant recovery of fertilizer nitrogen applied to sugar cane. **Scientia Agricola**, v.51, p.226–234, 1994.

TRIVELIN, P. C. O.; VICTORIA, R. L; RODRIGUES, J. C. S. Aproveitamento por soqueira de cana de açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-<sup>15</sup>N e uréia-<sup>15</sup>N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.12, p.1375-1385, 1995.

TRIVELIN, P.C.O; RODRIGUES, J.C.S.; VICTORIA, R.L. Utilização por soqueiras de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia-<sup>15</sup>N e ureia-<sup>15</sup>N aplicado ao solo em complementação à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, p.89-99, 1996.



TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIÉS, 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**, v.37, p.193–201, 2002.

TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FERREIRA, D.F.; VITTI, A.C.; FORTES, C.; FARONI, C.E.; OLIVEIRA, E.C.; CANTARELLA, H. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. **Scientia Agricola**, v.70, p.345-352, 2013.

TSAY, Y.F.; CHIU, C.C.; TSAI, C.B. Nitrate transporters and peptide transporters. **FEBS Letters**, v.581, p.2290–2300, 2007.

UNICA (2016a). União das Indústrias de Cana de Açúcar. UNICADATA. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br>>. Acesso em: 08 fev. 2016.

UNKOVICH, M.; HERRIDGE, D.; PEOPLES, M.; CADISCH, G.; BODDEY, R.; GILLER, K.; ALVES, B. AND CHALK, P. **Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems**. ACIAR Monograph no. 136, 2008. 258p.

URQUIAGA, S.; CRUZ, K.H.S.; BODDEY, R. M. Contribution of nitrogen-fixation to sugarcane: nitrogen 15 and nitrogen balance estimate. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p.105-114, 1992.

URQUIAGA, S. XAVIER, R.; MORAIS, R. F.; BATISTA, R.; SCHULTZ, N.; LEITE, J. M.; RESENDE, A.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Evidence from field nitrogen balance and <sup>15</sup>N natural abundance data of the contribution of biological N<sub>2</sub> fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant and Soil**, v.356, p.5–21. 2012.

VALLIS, I.; KEATING, B.A. Uptake and loss of fertilizer and soil nitrogen in sugar cane crops. **Proceedings Society of Sugar Cane Technologists**, p.105-113, 1994.

VALLIS, I; CATCHPOOLE, V.R.; HUGHES, R.M.; MYERS, R.J.K.; RIDGE, D.R.; WEIER, K.L. Recovery in plants and soils of <sup>15</sup>N applied as subsurface bands of urea to sugarcane. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.47, p.355-370, 1996.

VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A. Fisiologia do sistema radicular. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. 882p.

VITTI, A.C. **Adubação nitrogenada da cana-de-açúcar (soqueira) colhida mecanicamente sem a queima prévia: Manejo e efeito na produtividade**. 2003. Tese (Doutorado), Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2003. 114p.

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

VITTI, A.C.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; ROSSETO, R. Nitrogênio. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.) **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2008. Parte 5, cap. 10, p. 239-270.

VITTI, A.C.; FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FERREIRA, D.A.; OTTO, R.; FORTES, C.; FARONI, C.E. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.287-293, 2011.

VITTI, G.C.; MAZZA, J. **Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: POTAFOS. Informações agronômicas, n.97, 2002a. 16 p.

VITTI, G. C.; TAVARES, Jr.; LUZ, P. H. C.; FAVARIN, J. L.; COSTA, M. C. G. Influência da mistura de sulfato de amônio com uréia sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.663-671, 2002b.

VITTI, G.C.; OLIVEIRA, J.H; QUINTINO, T.A. Micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar. In; SEGATO, A S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. (Ed). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba:ESALQ. 2006. cap.9. p. 121-138.

VITTI, M.; ALVES, M.K.; VICENTINI, R.; BENDASSOLLI, J.A.; FIGUEIRA, A.; LIMA, J.E. Differential regulation of ammonium transporter genes in sugarcane (*Saccharum* spp.). In: 58º Congresso Brasileiro de Genética, 2012. **Anais...** Foz do Iguaçu, Sociedade Brasileira de Genética, 2012.

WEIGEL, A.; MEYER, J.H.; MOODLEY, S. Nitrogen responses and nitrogen use efficiency of four sugarcane varieties in Mpumalanga. **Proceedings South African Sugar Technologists' Association**. v.83, p.216-220, 2010.

WHAN, A.; ROBINSON, N.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S.; AITKEN, K. A quantitative genetics approach to nitrogen use efficiency in sugarcane. **Functional Plant Biology**, v.37, p.448-454, 2010.

WOOD, A.W., MUCHOW, R.C., ROBERTSON, M.J. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. III. Accumulation, partitioning and use of nitrogen. **Field Crops Research**, v.48, p.223-233, 1996.

WUTKE, E.B.; ARÉVALO, A.R. **Adubação verde com leguminosas no rendimento da cana-de-açúcar e no manejo de plantas infestantes**. Campinas: Instituto Agronômico, 2006. Série Tecnologia APTA. 28p. (Boletim Técnico IAC , 198).

XU, G.; FAN, X.; MILLER, A.J. Plant Nitrogen Assimilation and Use Efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, v.63, p.1-30, 2012.

YADAV, R.L.; SUMAN, A.; PRASAD, S.R.; PRAKASH, O. Effect of *Gluconacetobacter diazotrophicus* and *Trichoderma viride* on soil health, yield and N-economy of sugarcane cultivation under subtropical climatic conditions of India. **European Journal Agronomy**, v.30, n.4, p.296-303, 2009.

YANG, W.; LIA, Z.; WANG, J.; WU, P.; ZHANG, Y. Crop yield, nitrogen acquisition and sugarcane quality as affected by interspecific competition and nitrogen application. **Field Crops Research**, v.146, p.44-50, 2013.

YEOH, Y.K.; PAUNGFUO-LONHIENNE, C.; DENNIS, P.G.; ROBINSON, N.; RAGAN, M.A.; SCHMIDT, S.; HUGENHOLTZ, P. The core root microbiome of sugarcane cultivated under varying nitrogen fertilizer application. **Environmental Microbiology**, v.18, p.1338–1351, 2016.

ZHANG, H.M.; FORDE, B.G. Regulation of arabidopsis root development by nitrate availability. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, p. 51-59, 2000.

ZHANG, H.; JENNINGS, A.; BARLOW, P.W.; FORDE, B.G. Dual pathways for regulation of root branching by nitrate. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.96, p.6529-6534, 1999.

ZHANG, H.; RONG, H.; PILBEAM, D. Signalling mechanisms underlying the morphological responses of the root system to nitrogen in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, v.58, p.2329-2338, 2007.