

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA
CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E DOSES DE
NITROGÊNIO**

DISSERTAÇÃO

Vagner João Moro

**Santa Maria, RS, Brasil
2012**

PPGCS/UFSM, RS

MORO, Vagner João

Mestre 2012

**EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA CULTURA DA
CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES SISTEMAS DE
PREPARO DO SOLO E DOSES DE NITROGÊNIO**

Vagner João Moro

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Microbiologia do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Dr. Sandro José Giacomini

Santa Maria, RS, Brasil

2012

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Moro, Vagner João

Emissão de gases de efeito estufa na cultura da cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de preparo do solo e doses de nitrogênio / Vagner João Moro.-2012.

64 p.; 30cm

Orientador: Sandro José Giacomini

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2012

1. Gases de efeito estufa 2. Sistemas de preparo do solo 3. Fertilizantes nitrogenados 4. cana-de-açúcar I. Giacomini, Sandro José II. Título.

© 2012

Todos os direitos autorais reservados a Vagner João Moro. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: vagnermoro@yahoo.com.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA CULTURA
DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO
DO SOLO E DOSES DE NITROGÊNIO**

elaborada por
Vagner João Moro

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

Comissão Examinadora:

Dr. Sandro José Giacomoni
(Presidente/Orientador)

Dr. Celso Aita (UFSM)
(Avaliador)

Dr. Frederico Costa Beber Vieira (UNIPAMPA)
(Avaliador)

Santa Maria, 14 de dezembro de 2012.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e familiares, pela educação, apoio, incentivo compreensão e por todas as oportunidades, principalmente as de estudo e formação.

À Universidade Federal de Santa Maria por oferecer instalações e condições adequadas de ensino e pesquisa que possibilitou a realização do curso.

Ao meu orientador Prof^o. Sandro José Giacomini, pelo incentivo, amizade, confiança, apoio, sugestões e conselhos em todos os momentos decisivos e importantes do trabalho.

Agradeço aos colegas, Eduardo Lorensi, Marciel Redin, Douglas Adams, Marta Doumer, Majid Tahir, Maiara Ramires, Luana Liberalesso de Freitas, Alex Caitan Skolaude, Guilherme Dietrich, Ricardo Leão, Vaner Brondani Vendruscolo, Leonardo Mendes Bastos, Willian Hytalo Ludke, Raquel Schmatz, Isaias Binotto, Getúlio Elias Pilecco, Maurício (Gago), Ailson Padoin, Ismael, Bruno Chaves, José Saldanha, Pedro Rosalino, Ismaél Pfeifer, Fred Hickmann, Cledir Garlet pela ajuda e empenho na condução do experimento.

Às instituições de fomento à pesquisa, FAPERGS, CNPq e CAPES, pelo auxílio financeiro e a concessão das bolsas de iniciação científica aos alunos de graduação e pós-graduação.

Aos demais professores do Departamento de Solos da UFSM pelos ensinamentos, discussões, críticas e amizade.

Aos colegas do LABCEN do PPGCS e demais Laboratórios, pelos momentos de discussão e descontração.

Aos funcionários do Departamento de Solos, amigos e demais pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização desse trabalho.

A todos muito obrigado!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E DOSES DE NITROGÊNIO

AUTOR: VAGNER JOÃO MORO

ORIENTADOR: Dr. SANDRO JOSÉ GIACOMINI

Santa Maria, 14 de dezembro de 2012.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. No entanto, poucos estudos têm sido realizado para avaliar o efeito de sistemas de preparo e manejo da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar sobre as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Com o objetivo de avaliar a emissão de GEE durante o ciclo da cana-de-açúcar foram realizados dois experimentos, o primeiro constituído por quatro sistemas de preparo do solo (solo em preparo convencional - PC; solo escarificado - ESC; solo em plantio direto - PD; e solo em plantio direto compactado - PDC) e o segundo por quatro doses de N aplicadas (0, 40, 80 e 120 kg N ha⁻¹). Nos dois experimentos foram avaliadas a produtividade de colmos e as emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Em diferentes datas de avaliação dos GEE foram realizadas coletas de solo para quantificar os teores de N mineral e umidade do solo. Com base nos dados de C no solo no início e ao final do experimento e das emissões de N₂O e CH₄ foi calculado o poder de aquecimento global (PAG) em cada sistema de preparo. A produtividade de colmos e a emissão de CH₄ (média de -1,25 kg C-CH₄ ha⁻¹) não foram afetadas pelos diferentes sistemas de preparo do solo. A quantidade acumulada de CO₂ variou na seguinte ordem: PC > PD > ESC > PDC. Quando o solo na entrelinha da cultura foi mantido em PD ocorreram os menores fluxos de N₂O. No PDC a média dos maiores fluxos de N₂O após os eventos pluviométricos foi aproximadamente 2 vezes maior do que no PC e ESC (517 vs 254 µg m⁻²h⁻¹) e 7,5 vezes maior do que no PD. O sistema de preparo do solo PC apresentou maior valor de PAG, seguido pelo ESC e PDC indicando que o uso de plantio direto é uma estratégia com potencial para mitigar as emissões de GEE na implantação de lavouras de cana-de-açúcar na região sul do Brasil. A emissão de N₂O aumentou linearmente com as doses de N aplicadas na cultura. Na média dos ciclos de cana planta e soca para cada 20 kg N ha⁻¹ aplicados, são emitidos 0,28 kg N-N₂O ha⁻¹. Os valores dos fatores de emissão de N₂O calculados com base na metodologia do IPCC para as condições do presente estudo indicam que para doses menores que 40 kg N ha⁻¹ os valores obtidos estão abaixo do valor padrão de 1,25%. Para doses acima de 60 kg N ha⁻¹ os valores dos fatores obtidos são semelhantes ao indicado pelo IPCC. Fatores de emissão baseados na relação entre a emissão de N₂O e a produtividade de colmos, indicam que incrementos de produtividades de colmos obtidas com doses acima de 40-60 kg N ha⁻¹ irão apresentar elevada quantidade de N₂O emitida por Mg de colmo produzida.

Palavras chaves: GEE, sistemas de preparo do solo, fertilizantes nitrogenados, cana-de-açúcar.

ABSTRACT

Master Dissertation
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

GREENHOUSE GASES EMISSIONS FROM SUGARCANE CROP UNDER DIFFERENT SOIL MANAGEMENT SYSTEMS AND NITROGEN DOSES

AUTHOR: VAGNER JOÃO MORO
ADVISOR: SANDRO JOSÉ GIACOMINI
Santa Maria, 14-12-2012.

Brazil is the world's largest producer of sugarcane. However, few studies have been conducted to evaluate the effect soil management systems and fertilization practices on emissions of greenhouse gases (GHG). Therefore, the present study was aimed to assess the GHG emissions during the life cycle of sugarcane under different soil management systems and nitrogen (N) fertilization. The study was comprised of two experiments. In the first experiment, four tillage systems (conventional tillage - CT; chisel plough - CP, No tillage - NT, and compacted No tillage - CNT) while in the second experiment different doses of N (0, 40, 80 and 120 kg N ha⁻¹) were evaluated for their effect on GHG and productivity. GHG emissions were assessed on different dates and soil samples were also taken to measure the levels of mineral N and soil moisture. The global warming potential (GWP) in each management system was calculated by using initial and final C content of the soils plus the emissions of N₂O and CH₄ during the experiments. The sugarcane yield and CH₄ emission (mean -1.25 kg CH₄-C ha⁻¹) were not affected by different tillage systems. The cumulative amount of CO₂ varied in the following order: CT > NT > CP > CNT. In the CNT, greater flows of N₂O after rainfall events was occurred which were approximately two times greater than the CT and CP (517 vs 254 μg m⁻²h⁻¹) and 7.5 times higher than in NT. The CT tillage system showed higher value of GWP, followed by the CP and CNT indicating that the use of conservation tillage is a strategy with the potential to mitigate GHG emissions from sugarcane crop in southern Brazil. The N₂O emission increased linearly with the doses of N applied. On an average, 0.28 kg N₂O-N ha⁻¹ was emitted from 20 kg N ha⁻¹. The values of N₂O emission factors were calculated based on IPCC methodology for the conditions of this study indicate that for doses less than 40 kg N ha⁻¹ values obtained are below the default value of 1.25%. For doses above 60 kg N ha⁻¹ values obtained are similar to the factors indicated by the IPCC. Emission factors based on the relationship between the N₂O emission and productivity indicated that productivity was increased with doses above 40-60 kg N ha⁻¹ with high amount of N₂O emission per Mg produced.

Keywords: GHG, tillage systems, Nitrogen doses, sugarcanes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ARTIGO 1

Figura 1. EPSA (A), Temperatura do solo (B), NH_4^+ (C), NO_3^- (D) para diferentes sistemas de preparo do solo durante o cultivo da cana-de-açúcar. As linhas pontilhadas indicam o momento da aplicação de N durante a época de cultivo da cana-de-açúcar.....24

Figura 2. Fluxos de C- CO_2 (A), C- CH_4 (B) e N- N_2O (C) para diferentes sistemas de preparo do solo nos 294 dias após o plantio da cana-de-açúcar. As linhas pontilhadas indicam o momento da aplicação de N durante a época de cultivo da cana-de-açúcar.....28

ARTIGO 2

Figura 1. Relação entre produtividade (A), quantidade de N acumulado na matéria seca (B) e doses de N aplicadas em solo arenoso em dois anos de cultivo com cana-de-açúcar (1) cana planta, (2) cana soca.45

Figura 2. EPSA (A), NH_4^+ (B) e NO_3^- (C) para diferentes doses de N aplicados em cobertura em solo arenoso em dois anos de cultivo com da cana-de-açúcar. As linhas pontilhadas indicam o momento da aplicação de N durante a época de cultivo da cana-de-açúcar.....47

Figura 3. Fluxo de N- N_2O (A) e C- CH_4 (B) para diferentes doses de N aplicados em cobertura em solo arenoso em dois anos de cultivo com da cana-de-açúcar. As linhas pontilhadas indicam o momento da aplicação de N durante a época de cultivo da cana-de-açúcar.....49

Figura 4. Emissão acumulada de N- N_2O e C- CH_4 para diferentes doses de N aplicados em cobertura em solo arenoso em dois anos de cultivo com da cana-de-açúcar.50

Figura 5. Relação entre emissão acumulada de N- N_2O e doses de N (A), produtividade de colmos (B) e N acumulado na matéria seca (C) em solo arenoso em dois anos de cultivo com cana-de-açúcar.52

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

- Tabela 1. Teor de C total (COT) e densidade aparente do solo (Ds) na camada de 0-0,1 m aos 20 e 294 dias após o plantio (DAP) e produtividade de colmos da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo.23
- Tabela 2. Emissão acumulada de GEE, para quatro sistemas de preparo do solo em cana-de-açúcar.....27
- Tabela 3. Poder de aquecimento global (kg CO₂ eq ha⁻¹) para quatro sistemas de preparo do solo em cana-de-açúcar.27

ARTIGO 2

- Tabela 1. Fator de emissão (FE) de N-N₂O em função da quantidade de N aplicada (N aplicado) e da quantidade de N absorvida (N absorvido) e da produtividade de colmos (colmos) de cana-de-açúcar sob quatro doses de N.....53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 ARTIGO 1 – EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO	15
2.1 Resumo	15
2.2 Abstract	15
2.3 Introdução	16
2.4 Material e métodos	18
2.4.1 Descrição do local	18
2.4.2 Tratamentos	19
2.4.3 Coleta dos gases	19
2.4.4 Avaliações complementares	20
2.4.5 Potencial de aquecimento global	21
2.4.6 Análise estatística dos dados	21
2.5 Resultados	22
2.5.1 Densidade aparente, carbono orgânico total do solo e produtividade de cana-de-açúcar	22
2.5.2 Nitrogênio mineral e espaço poroso do solo saturado por água	23
2.5.3 Emissão de CO ₂	25
2.5.4 Emissão de CH ₄	25
2.5.5 Emissão de N ₂ O	26
2.5.6 Poder de aquecimento global	27
2.6 Discussão	29
2.6.1 Efeito do tipo de preparo do solo	29
2.6.2 PAG a partir de diferentes sistemas de preparo do solo	33
2.7 Conclusões	33
2.8 Literatura citada	34
3 ARTIGO 2 - EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO AFETADA POR DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA EM CANA-DE-AÇÚCAR	38
3.1 Resumo	38
3.2 Abstract	38
3.3 Introdução	39
3.4 Material e métodos	40
3.4.1 Descrição do local e delineamento experimental	41
3.4.2 Cultura da cana-de-açúcar	42

3.4.3 Amostragem dos gases (N ₂ O e CH ₄) e análises.....	42
3.4.4 Amostragem e análise de solo	43
3.4.5 Análise estatística dos dados.....	43
3.5 Resultados	44
3.5.1 Produtividade de colmos de cana-de-açúcar.....	44
3.5.2 Nitrogênio mineral e espaço poroso do solo saturado por água	45
3.5.3 Fluxos de N ₂ O e CH ₄	48
3.5.4 Fluxos cumulativos de N ₂ O e CH ₄	49
3.5.4 Fatores de emissão	53
3.6 Discussão	53
3.6.1 Efeito da adubação nitrogenada sobre a produtividade da cana-de-açúcar	53
3.6.2 Efeito da adubação nitrogenada sobre a emissão de CH ₄ e N ₂ O	54
3.6.3 Efeito da fertilização nitrogenada sobre os fatores de emissão de N ₂ O	57
3.7 Conclusões	58
3.8 Literatura citada	59
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno que ocorre naturalmente, sendo indispensável para a vida no planeta. No entanto, aumentos recentes na concentração de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) na atmosfera, devido à atividade antrópica, têm levado a um impacto no balanço de entrada e saída de radiação solar do planeta, tendendo ao aquecimento da superfície da terra. Em termos globais, CO₂, CH₄ e N₂O, contribuem em cerca de 60%, 15% e 5%, respectivamente, dos gases de efeito estufa (GEE) antropogênico (RODHE, 1990). Entre as atividades antrópicas, a agricultura é considerada uma importante fonte desses gases para a atmosfera. As mudanças no uso do solo e a fertilização nitrogenada estão entre as práticas agrícolas com maior impacto sobre a emissão dos GEE.

A concentração de CO₂ na atmosfera tem aumentado gradualmente passando de 280 μmol mol⁻¹ antes da revolução industrial para 370 μmol mol⁻¹ até agora, e terá um aumento de 0,5% ao ano (YI et al., 2006). Os solos agrícolas são considerados como uma fonte importante de CO₂ na atmosfera, onde eles respondem por cerca de um quarto das emissões de CO₂ pelas atividades humanas (FANG et al., 2003). A comparação nas emissões de CO₂ entre os sistemas plantio direto e convencional foi feita por Bal et al. (1999) e indicou que as diferenças nas quantidades de CO₂ emitidas entre estes dois sistemas foram pequenas e significativamente maiores no sistema convencional no período logo após o preparo do solo. Balesdent et al. (2000) demonstraram que o preparo do solo contribuiu para desproteção da matéria orgânica presente nos macroagregados e, alguns casos, nos microagregados favorecendo a decomposição do C presente no solo.

O CH₄ é um importante gás de efeito estufa, com grande longevidade na atmosfera, apresentando um poder de aquecimento global cerca de 25 vezes maior que o CO₂ (IPCC, 2007). O aumento na concentração de CH₄ na atmosfera durante as últimas décadas tem despertado uma preocupação crescente em todo o mundo. Em áreas agrícolas sua produção ocorre principalmente devido à criação de animais e o cultivo do arroz com alagamento do solo. A produção de CH₄ no solo é dependente de condições anóxicas, já que as bactérias metanogênicas produtoras deste gás são anaeróbicas obrigatórias. Em solos de sequeiro o CH₄ pode ser oxidado na camada superficial do solo por bactérias aeróbicas metanotróficas. Uma vez que estas bactérias são sensíveis a perturbações, o sistema de plantio direto pode ser benéfico para aumentar a capacidade dos solos em oxidar CH₄ (HÜTSCH, 2001). Além disso,

a estrutura do solo não-mobilizado pode melhorar o fluxo de CH_4 e de oxigênio da atmosfera para o solo (BALL et al., 1997). A maioria dos estudos relata um aumento no consumo de CH_4 em solos com sistema de plantio direto (VENTEREA et al., 2005; USSIRI et al., 2009), mas um efeito inverso foi observado por Omonode et al. (2007) e Venterea et al. (2005) em conjunto com o uso de fertilizante amoniacal. A produção e emissão de CH_4 no solo também são influenciados pelas condições do solo como o teor de matéria orgânica, densidade, porosidade, preparo do solo e temperatura (MITRA et al., 2002; ELDER e LAL, 2008).

O N_2O é outro potente GEE com um tempo de residência na atmosfera de 150 anos e um potencial de aquecimento global 298 vezes maior do que o CO_2 (IPCC, 2007). É responsável por 5% do efeito estufa (HOUGHTON et al., 1990), sendo a agricultura responsável por aproximadamente 60% das emissões de N_2O (OECD, 2000). O N_2O é produzido no solo principalemtn e através dos propcessos microbianos de nitrificação e desnitrificação. A adubação nitrogenada, por aumentar a disponibilidade de N aos processos de nitrificação e desnitrificação geralmente aumenta o fluxo de N_2O para a atmosfera (MOSIER et al., 2004; MCSWINEY e ROBERTSON, 2005). Uma maior proporção de emissão de N_2O por unidade de fertilizante aplicado é decorrente de taxas de N excedentes à demanda de N pela planta (ZEBARTH et al., 2008). A emissão de N_2O provinda de solos agrícolas é preocupante, pois significa um decréscimo na disponibilidade de N para as culturas, ao mesmo passo que contribui para o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio (CRUTZEN, 1981). O tipo de preparo do solo pode afetar as emissões de N_2O , pois altera as condições físicas do meio com implicações na disponibilidade de oxigênio e carbono no solo. Mudanças no conteúdo de água no solo pode causar impacto direto nas taxas de nitrificação e desnitrificação, e assim afetar a produção de N_2O . Estudos não tem relatado diferenças entre sistema de plantio direto e convencional (CHOUDHARY et al., 2002) nem maiores emissões de N_2O em solos cultivados convencionalmente (PASSIANOTO et al., 2003; ELDER e LAL, 2008) mas o plantio direto pode aumentar as emissões de N_2O , porque os resíduos da colheita propiciam maior atividade microbiana na superfície do solo através de nitrificação e desnitrificação (GRANLI e BOCKMAN, 1994), e a fixação de carbono pode diminuir as emissões de CO_2 (ANGERS et al., 1997). No entanto, medidas de campo têm mostrado tanto diminuição quanto aumento nas emissões de N_2O em sistema de plantio direto (GREGORICH et al., 2008; USSIRI et al., 2009).

A compactação do solo é uma forma comum de degradação da estrutura do solo ocasionadas por máquinas cada vez maiores utilizadas no cultivo de áreas com cana-de-
açúcar no Brasil. A compactação do solo reduz a porosidade total do solo aumentando a

distribuição do tamanho dos poros para poros menores. Estas alterações na porosidade podem reduzir a mineralização de C e N (HASSINK, 1992; BRELAND e HANSEN, 1996) por proteger fisicamente a matéria orgânica do ataque microbiano (VAN VEEN e KUIKMAN, 1990). Vários estudos anteriores têm demonstrado que a desnitrificação do solo e a produção de N₂O são fortemente afetados pelo ambiente físico do solo, incluindo o espaço poroso ocupado por água e efeitos associados a permeabilidade e difusividade do gás (DAVIDSON, 1992; BALL et al., 2008) que podem aumentar a frequência de microsítios anaeróbicos no solo. Esses fatores têm sido utilizados para explicar maiores emissões de N₂O em solos mal aerados no plantio direto (ROCHETTE, 2008) compactados pelo pisoteio do gado (THOMAS et al., 2004) e tráfego de máquinas (RUSER et al., 2006).

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância, tanto social como econômica para o Brasil. O país colhe 743 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em aproximadamente 9,69 milhões de hectares, com produtividade média de 78,1 ton ha⁻¹ (IBGE, 2012) sendo que a lavoura de cana-de-açúcar continua em expansão no Brasil (CONAB, 2012). O estado do Rio Grande do Sul responde por menos de 1% da produção nacional (CONAB, 2012), com baixos níveis de produtividade, em torno de 56 ton ha⁻¹. No entanto nos últimos anos o estado tem recebido incentivos por parte do governo para mudar esse cenário. Segundo a portaria 54 do MAPA, que trata do zoneamento agrícola para a cultura no RS, o estado apresenta 1,5 milhões de hectares em 216 municípios aptos ao cultivo de cana-de-açúcar e a partir dessa publicação, os produtores dos municípios indicados podem contar com políticas públicas oficiais e com isso ampliar a capacidade produtiva do Estado, beneficiando toda a cadeia produtiva sulcroalcooleira. O cultivo da cana-de-açúcar nessas áreas do RS pode ser realizado utilizando diferentes tipos de preparo do solo e tratos culturais, com destaque para a adubação nitrogenada. Em função do manejo dessa cultura há uma série de implicações econômicas, produtivas e ambientais. Um manejo inadequado do solo pode causar erosão de partículas e lixiviação dos nutrientes, doses inadequadas de adubação podem trazer prejuízos tanto econômicos quanto ambientais. Poucos estudos têm abordado este problema (MUMMERY et al., 1998; SIX et al., 2002) e quantificado o impacto na qualidade do ar devido ao uso da terra (GOLDEMBERG et al., 2008). Nesse contexto, o trabalho tem por objetivo avaliar as emissões de GEE na cultura da cana-de-açúcar cultivada no RS sob diferentes tipos de preparo do solo e doses de nitrogênio.

2 ARTIGO 1 – EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO

2.1 Resumo

O sistema de preparo do solo adotado em novos cultivos de cana-de-açúcar em áreas conduzidas em plantio direto e, ou, pastagens deve influenciar as emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) para a atmosfera. Com o objetivo de testar essa hipótese foi realizado um experimento de campo no ano agrícola 2010/11. Em área sob plantio direto consolidado foi avaliado os seguintes sistemas de preparo do solo: solo em preparo convencional (PC); solo escarificado (ESC); solo mantido em plantio direto (PD); e solo em plantio direto com compactação adicional (PDC). As avaliações do CO₂, N₂O e CH₄ tiveram início logo após o preparo do solo para o plantio da cana-de-açúcar até a avaliação da produtividade da cultura. Para a avaliação desses gases foi utilizado o método da câmara estática fechada. A partir dos valores cumulativos de N₂O e CH₄ e dos valores da variação nos estoques de C no solo dos quatro tratamentos foi calculado o potencial de aquecimento global (PAG) de cada sistema. A produtividade de colmos de cana-de-açúcar não foi afetada pelos sistemas de preparo do solo e apresentou um valor médio de 102,4 Mg ha⁻¹. A emissão acumulada de CO₂ variou na seguinte ordem decrescente: PC > PD > ESC > PDC. Os preparos do solo para a implantação da cana-de-açúcar não tiveram efeito marcante sobre os fluxos de CH₄. Na média dos quatro sistemas avaliados a quantidade de CH₄ emitido foi de -1,25kg C-CH₄ ha⁻¹. A manutenção do solo em PD na entrelinha da cultura resultou nos menores fluxos de N₂O. Independente do sistema de preparo, os maiores fluxos de N₂O estiveram relacionados à ocorrência de eventos pluviométricos. A média dos maiores fluxos de N₂O após os eventos pluviométricos em cada tratamento foi aproximadamente 2 vezes maior no PDC do que no PC e ESC (517 vs 254 µg m⁻² h⁻¹) e 7,5 vezes maior do que no PD. O sistema de preparo do solo PC apresentou maior valor de PAG, seguido pelo ESC e PDC indicando que o uso de plantio direto é uma estratégia potencial para mitigar as emissões de GEE na implantação de lavouras de cana-de-açúcar na região sul do Brasil.

Palavras-Chave: GEE; cana-de-açúcar; plantio convencional; solo escarificado; plantio direto; solo compactado.

2.2 Abstract

The soil tillage systems influence the emissions of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) to atmosphere. To validate this hypothesis we conducted a field experiment during the year 2010/11 when sugarcane was cultivated under different tillage

systems. The tillage systems were: conventional tillage (CT); chisel Plough (CP), No tillage (NT) and compacted no tillage (CNT). The CO₂, N₂O and CH₄ evaluations were begun soon after the soil preparation for planting sugarcane and were lasted until crop harvest by using a static chamber method. The global warming potential (GWP) was calculated from cumulative values of N₂O and CH₄ and the values of soil C stocks under four tillage systems. The sugarcane yield was not affected by tillage systems and had a mean value of 102.4 Mg ha⁻¹. The cumulative emission of CO₂ varied in the following order: CT > NT > CP > CNT. The soil preparation for sugarcane cultivation had no marked effect on the flow of CH₄. On the average of four systems, amount of CH₄ emitted was -1.25 kg ha⁻¹ C-CH₄. Maintaining soil in NT in the rows resulted in lower N₂O fluxes. Regardless of tillage, the highest N₂O fluxes were related to the occurrence of rainfall events. The average highest N₂O flow after rainfall events in each treatment was approximately two times higher than in the CNT, CT and CP (517 vs 254 mg m⁻²h⁻¹) and 7.5 times higher than in NT. The CT showed higher GWP, followed by the CP and CNT indicated that the use of conservation tillage is a potential strategy to mitigate GHG emissions from sugarcane cultivation in southern Brazil.

Keywords: GHG; sugarcane; conventional tillage, chiseling; no tillage; compacted soil.

2.3 Introdução

As concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) aumentaram consideravelmente desde a revolução industrial, e continuam a aumentar anualmente em 0,5%, 1,1% e 0,3% respectivamente (IPCC, 2001). Se as emissões desses gases de efeito estufa (GEE) continuarem a aumentar no ritmo atual, a média global da temperatura é projetada para subir em cerca de 1,8 °C até o ano 2025 e de 3,8 °C até o final do século (IPCC, 2001). Entre as atividades humanas que contribuem para a emissão de GEE destaca-se as atividades agrícolas que contribuem com uma grande porcentagem dessas emissões: cerca de 60% de N₂O, 39% de CH₄ e 1% de CO₂ nas emissões globais (OECD, 2000).

Em solos agrícolas a produção e emissão dos GEE ocorre devido a atividade dos microrganismos. O CO₂ é produzido, principalmente, através da oxidação de compostos orgânicos pelos microrganismos heterotróficos aeróbicos. A atividade destes microrganismos normalmente é limitada por diversos fatores abióticos como: a umidade, a temperatura, a estrutura, a disponibilidade de nutrientes, a textura, a relação C/N, a presença de resíduos orgânicos, entre outros (Silva et al., 2010).

O N₂O é um intermediário do processo de desnitrificação, bem como um subproduto da oxidação da amônia no processo de nitrificação e um produto das nitrificadoras-

denitrificadas. A desnitrificação depende da presença de condições de anaerobiose onde bactérias anaeróbicas facultativas utilizam o NO_3^- como receptor dos elétrons oriundos da oxidação de compostos orgânicos no solo, reduzindo-o até N_2O . Já a nitrificação ocorre em condições aeróbicas e depende da disponibilidade de NH_4^+ . O CH_4 é produzido pela atividade de bactérias Archeas metanogênicas, sendo que o CH_4 é o principal subproduto do metabolismo destas bactérias em ambientes anóxicos como solos alagados de lavouras de arroz irrigado. Em solos de áreas de sequeiro é comum o solo funcionar como um dreno de CH_4 através da ação de bactérias metanotróficas que oxidam o CH_4 a CO_2 .

Sistemas de preparo do solo como o preparo convencional, escarificação e plantio direto podem afetar as emissões de GEE por alterarem as condições que favorecem os processos relacionados à produção destes gases no solo. Sistemas de preparo que utilizam o revolvimento do solo são conhecidos por acelerar a decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) e conseqüentemente por contribuírem significativamente para a emissão de CO_2 para a atmosfera. A redução ou eliminação do revolvimento do solo em sistemas de preparo como o plantio direto é considerada uma prática eficiente para diminuir a perda de C do solo para a atmosfera. Contudo a ausência do revolvimento do solo leva a compactação do mesmo, reduz a porosidade total e muda a distribuição do tamanho dos poros para os poros mais pequenos (Beare et al., 2009) e conseqüentemente a disponibilidade de O_2 no solo. Nessas condições a produção de N_2O é potencializada tanto via a nitrificação como a desnitrificação (Guimarães e Mello, 2008) e são os principais processos microbianos responsáveis pela produção de N_2O (Firestone e Davidson, 1989).

Em função disso, os benefícios do sequestro de C no solo sob plantio direto podem ser parcialmente reduzidos pela maior emissão de N_2O , já que o poder de aquecimento deste gás é elevado em relação ao do CO_2 . No entanto, estudos de campo têm mostrado tanto diminuição quanto aumento nas emissões de N_2O em sistema de plantio direto (Chatskikh e Olesen, 2007; Gregorich et al., 2008; Ussiri et al., 2009). Já o CH_4 é oxidado por bactérias aeróbicas na camada superficial do solo. Uma vez que estas bactérias são sensíveis a perturbações, o sistema de plantio direto pode ser benéfico para aumentar a capacidade dos solos em oxidar CH_4 (Hütsch, 2001). Além disso, a estrutura do solo não-mobilizado pode melhorar o fluxo de CH_4 e de oxigênio da atmosfera para o solo (Ball et al., 1997). A maioria dos estudos relata um aumento no consumo de CH_4 em solos com sistema de plantio direto (Venterea et al, 2005;. Ussiri et al., 2009).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma área cultivada de 9,69 milhões de hectares e produção de 743 milhões de Mg de colmos (IBGE, 2012).

Considerando que existe uma demanda mundial crescente por biocombustíveis, projeta-se um aumento na área cultivada com cana-de-açúcar. No Brasil, novas áreas de cultivo com cana devem avançar em regiões dedicadas à produção de grãos sob sistema de plantio direto e também em áreas de pastagens. Muitas destas áreas deverão apresentar características de áreas degradadas como, por exemplo, elevados níveis de compactação. Assim, torna-se importante o conhecimento do efeito do tipo de preparo a ser aplicado nessas áreas para o plantio da cana sobre a emissão dos GEE. O conceito de potencial de aquecimento global (PAG), foi desenvolvido para comparar a capacidade dos gases em reter o calor na atmosfera em relação à quantidade de CO₂. O coeficiente de PAG de um gás determina a quantidade de calor que um GEE pode interceptar em relação a uma unidade de massa de CO₂ (Shine et al., 1995). Desta forma, a verdadeira redução do impacto global só é possível se a adoção do sistema de preparo do solo reduzir o PAG apurado pelos fluxos de GEE (Six et al., 2002). Poucos estudos têm abordado este problema (Mummery et al., 1998; Six et al., 2002) e quantificado o impacto na qualidade do ar devido ao uso da terra (Goldemberg et al., 2008). Nesse contexto, o trabalho tem por objetivo avaliar o efeito do preparo do solo no plantio da cana-de-açúcar na região sul do Brasil sobre as emissões dos GEE e do PAG.

2.4 Material e métodos

2.4.1 Descrição do local

O experimento foi realizado a campo, no período de outubro de 2010 a agosto de 2011 na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (29°45'S, 53°42'W; cerca de 95 m de altitude), Rio Grande do Sul, Brasil. O clima da região se enquadra como "Cfa" de Köppen caracterizado por apresentar clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e temperatura do mês mais frio variando entre -3 a 18 °C (Moreno,1961) com precipitação pluvial normal de 1.616 mm ao ano. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (Embrapa, 2006) ou Paleudalf (Soil Taxonomy, 2010) de textura franco arenosa. A área onde foi instalado o experimento vinha sendo conduzida sob sistema plantio direto durante 10 anos. No início do experimento o solo da camada de 0-0,1m apresentou as

seguintes características químicas: pH em H₂O = 4,8; 0,85 g kg⁻¹ de N total; 8,23 g kg⁻¹ de C orgânico; 23,2 mg dm⁻³ de P; 41,3 mg dm⁻³ K; e densidade do solo = 1,65 g cm⁻³.

2.4.2 Tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com três repetições. O experimento foi constituído pelos seguintes tratamentos: solo em preparo convencional, com revolvimento do solo até 0,30 m de profundidade (PC); solo escarificado até 0,30 m de profundidade (ESC); solo em plantio direto (PD); e solo em plantio direto compactado (PDC). O preparo convencional do solo foi realizado com arado de disco e gradagem superficial. A escarificação foi realizada com subsolador com 3 hastes espaçadas a 0,3 m entre si. A compactação adicional do solo no PDC foi induzida pelo tráfego de quatro passadas paralelas e sobrepostas do trator pá carregadeira (CASE W18) com 8,5 Mg de massa apresentando uma pressão sobre o solo de 146 kPa.

Em dois de outubro foi realizado o plantio da cana-de-açúcar (*Saccharum* ssp) genótipo SP 813250. A densidade de plantio foi de 18 gemas por metro linear, em sulcos de aproximadamente 0,3 m de profundidade e espaçamento de 1,4 m entre linhas. As parcelas foram constituídas de 4 linhas com 10 metros de comprimento (56 m²). A adubação foi estabelecida com base na análise química do solo e nas recomendações de adubação conforme a CQFS-RS/SC (2004). No plantio foi aplicado nos sulcos o equivalente a 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹, 70 kg de K₂O ha⁻¹ e 20 kg de N ha⁻¹. O restante do N (60 kg ha⁻¹) foi dividido em duas aplicações em cobertura de 30 kg de N ha⁻¹, efetuadas manualmente a lanço, junto à linha de plantio, aos 61 e 92 dias após o plantio.

A colheita da cana-de-açúcar foi realizada no dia 09 setembro de 2011, colhendo-se as plantas da área útil de cada parcela. Após o corte, os colmos foram separados da parte aérea das plantas e pesados separadamente no campo.

2.4.3 Coleta dos gases

A coleta dos gases foi realizada através de um dispositivo composto por uma base e uma câmara (câmaras estáticas) ambos confeccionados em aço galvanizado. A base com dimensões de 0,4 m x 0,7 m x 0,1 m (L x C x A) foi inserida no solo até uma profundidade de 0,05 m, perpendicular a linha de plantio da cana. A base permaneceu fixa no local durante o período de avaliação. Na parte superior das bases existia uma canaleta onde era encaixada a câmara e adicionado água para garantir a vedação entre a câmara e o suporte no momento da coleta das amostras de gás. As câmaras com dimensões de 0,4 m x 0,7 m x 0,2 m (L x C x A) apresentavam válvulas com registros para acoplar as seringas plásticas utilizadas na coleta e armazenagem das amostras de gás. Os tempos de coleta dos gases para cada repetição dos tratamentos foram de: 0, 15 e 30 minutos após a instalação da câmara sobre a base. A determinação da concentração de N_2O , CO_2 , CH_4 foi realizada em cromatografo gasoso (Shimadzu GC – 2014 modelo *Greenhouse*) em um período máximo de 24h após a coleta das amostras de gás. As avaliações da emissão dos gases iniciaram um dia após o plantio da cana-de-açúcar e terminaram com a colheita da cana, totalizando 39 coletas. A frequência de coleta foi mais intensa nos primeiros meses de instalação da cultura, sendo intensificadas principalmente nos períodos após a aplicação do N e em períodos com ocorrência de eventos pluviométricos.

2.4.4 Avaliações complementares

A avaliação da densidade do solo foi realizada 20 dias após o preparo do solo e no final do ciclo da cultura da cana-de-açúcar (294 DAP). Para tal, foram coletadas três amostras indeformadas de solo na camada de 0-0,1m por parcela de cada tratamento com auxílio de anéis metálicos com 0,057 m de diâmetro e 0,04 m de altura. A densidade do solo foi determinada após a secagem da amostra em estufa a 105°C por 48 h. Em cada data e na mesma camada de solo foi determinado os teores de C total por combustão seca utilizando um analisador elementar (Nelson e Sommers, 1996).

Em algumas datas de avaliação dos GEE, foram coletadas amostras de solo da camada de 0-01 m em 9 pontos de cada parcela e em cada tratamento. Nas amostras de solo úmido foi determinado os teores de nitrogênio mineral (NH_4^+ e NO_3^-), após extração com KCl 1 M e destilação conforme metodologia descrita em Keeney e Nelson (1982). A umidade gravimétrica foi obtida através da secagem das amostras a 105°C por 24 horas. O espaço

poroso saturado por água (% EPSA) foi calculado com base nos resultados do conteúdo gravimétrico de água e os valores de densidade do solo conforme descrito em Allen et al. (2010).

2.4.5 Potencial de aquecimento global

O potencial de aquecimento global (PAG) foi calculado através da conversão dos gases (N_2O e CH_4) e dos valores de C acumulado ou perdidos (ΔC) no solo para CO_2 equivalente, conforme a equação:

$$PAG = (\Delta C \times 44/12) + (CH_4 \times 25) + (N_2O \times 298)$$

sendo: CH_4 e N_2O correspondem as emissões acumuladas de cada gás durante a condução do experimento em, $kg\ ha^{-1}$; 44/12 é o fator de conversão da quantidade de C para CO_2 em, $kg\ ha^{-1}$; 25 e 298 são valores de PAG para o CH_4 e o N_2O , respectivamente, considerando-se um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (Forster et al., 2007).

2.4.6 Análise estatística dos dados

Os dados obtidos da emissão acumulada de cada gás nas 39 coletas foram submetidos à análise de variância de acordo com o modelo matemático do delineamento inteiramente casualizado dado por: $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$, no qual Y_{ij} é o valor observado do gás na parcela ij , μ é a média geral, τ_i é o efeito do tratamento i ($i = PC, ESC, PD$ e PDC) na repetição j ($j = 1, 2, 3$) e ε_{ij} é o efeito do erro experimental suposto normal e independentemente distribuído com média zero e variância comum σ^2 (Storck et al., 2006). Posteriormente, as médias foram comparadas por meio do teste de Scott-Knott. A emissão acumulada dos gases foi calculada da seguinte forma: $((E_{ca} + E_{cp}) / 2) \times T_c + E_{acc}$, sendo que E_{ca} é a emissão dos gases da coleta anterior, E_{cp} é a emissão dos gases da coleta posterior, T_c é o intervalo entre as duas coletas (dias), E_{acc} é a emissão acumulada do período anterior. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software SISVAR e do aplicativo Office Excel.

2.5 Resultados

2.5.1 Densidade aparente, carbono orgânico total do solo e produtividade de cana-de-açúcar

Anteriormente à instalação do experimento, o solo da área apresentou Ds de $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$. O preparo do solo e a compactação aplicada nos tratamentos PC e PDC resultaram, respectivamente, em decréscimo (12%) e aumento (8,5%) nos valores de Ds medidos após 20 dias da implantação desses tratamentos (Tabela 1). Nesse mesmo período, os valores de Ds dos tratamentos ESC e PD não diferiram entre si e apresentaram um valor médio de $1,64 \text{ Mg m}^{-3}$. Na avaliação realizada ao final do experimento a Ds no tratamento PC aumentou para $1,59 \text{ Mg m}^{-3}$ situando-se próxima à Ds dos tratamentos ESC e PD. Os valores de Ds do tratamento PDC se mantiveram elevados até o final do experimento. Aos 294 dias, a Ds no PDC superou em 10% o valor médio de Ds dos demais tratamentos avaliados.

A concentração de 0,823% de COT na camada de 0-0,1 m de solo do tratamento PD representa a concentração deste elemento no solo anteriormente à instalação do experimento (Tabela 1). Na primeira avaliação de COT realizada aos 20 dias após o início do experimento os valores de COT não diferiram entre os tratamentos. Ao final do experimento, 294 DAP, menores valores de COT foram observados no PC e no ESC. Na média destes tratamentos, os valores de COT foram inferiores em 33% ao valor médio observado nos tratamentos PD e PDC (0,754%). Ainda, observa-se que os valores de COT nos tratamentos PC e ESC, reduziram em 38 e 28% respectivamente em relação aos valores de COT medidos na primeira avaliação realizada no início do experimento.

A produtividade de colmos de cana-de-açúcar não foi afetada pelos sistemas de preparo do solo e apresentou um valor médio de $102,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Tabela 1).

Tabela 1. Teor de C total (COT) e densidade aparente do solo (Ds) na camada de 0-0,1 m aos 20 e 294 dias após o plantio (DAP) e produtividade de colmos da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo.

Tratamento	COT (%)*		Ds (Mg m ⁻³)*		Produtividade de colmos (Mg ha ⁻¹)*
	20 DAP	294 DAP	20 DAP	294 DAP	
PC	0,763 ± 0.07 a	0,475 ± 0.04 a	1.45 ± 0.06 a	1.59 ± 0.07 a	94.44 ± 17.26 a
ESC	0,783 ± 0.09 a	0,564 ± 0.06 a	1.63 ± 0.06 b	1.66 ± 0.09 a	102.38 ± 6.70 a
PD	0,823 ± 0.06 a	0,763 ± 0.05 b	1.65 ± 0.05 b	1.67 ± 0.09 a	112.68 ± 22.10 a
PDC	0,801 ± 0.06 a	0,745 ± 0.06 b	1.79 ± 0.01 c	1.81 ± 0.06 b	100.18 ± 19.29 a

*Médias ± desvio padrão. Letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de erro. PC = solo em preparo convencional; ESC = solo escarificado; PD = solo em plantio direto; PDC = solo em plantio direto compactado.

2.5.2 Nitrogênio mineral e espaço poroso do solo saturado por água

Os valores de espaço poroso do solo saturado por água (EPSA) apresentaram uma dinâmica semelhante entre os tratamentos avaliados, sendo influenciados pela ocorrência de precipitações durante o período de avaliação (Figura 1A). De maneira geral, os valores de EPSA medidos durante os 294 dias de estudo podem ser agrupados em dois grupos distintos. O primeiro formado pelos valores de EPSA obtidos nos tratamentos PC e ESC que variaram de 44 a 68% (média de 55%) e o segundo formado pelos tratamentos PD e PDC com valores variando de 49 a 81% (média de 67%). Enquanto no primeiro grupo apenas seis das 20 avaliações apresentaram valores de EPSA acima de 60%, no segundo grupo essa condição foi observada em no mínimo 16 avaliações.

Os teores de N mineral do solo (NH₄⁺ e NO₃⁻) nos quatro tratamentos apresentaram um comportamento semelhante no decorrer das avaliações (Figura 1C e 1D). Os maiores teores de N mineral foram observados após a aplicação do N-uréia, aos 61 e 92 dias após o plantio da cana-de-açúcar. Na média dos quatro tratamentos, os teores de NO₃⁻ no solo foram de 17,46 e 18,90 mg N kg⁻¹ solo após a primeira e a segunda aplicação de N. Após 55 dias da segunda aplicação de N em todos os tratamentos observou-se o declínio dos teores de N mineral no solo, os quais atingiram ao final do experimento valores próximos aos observados no início do experimento.

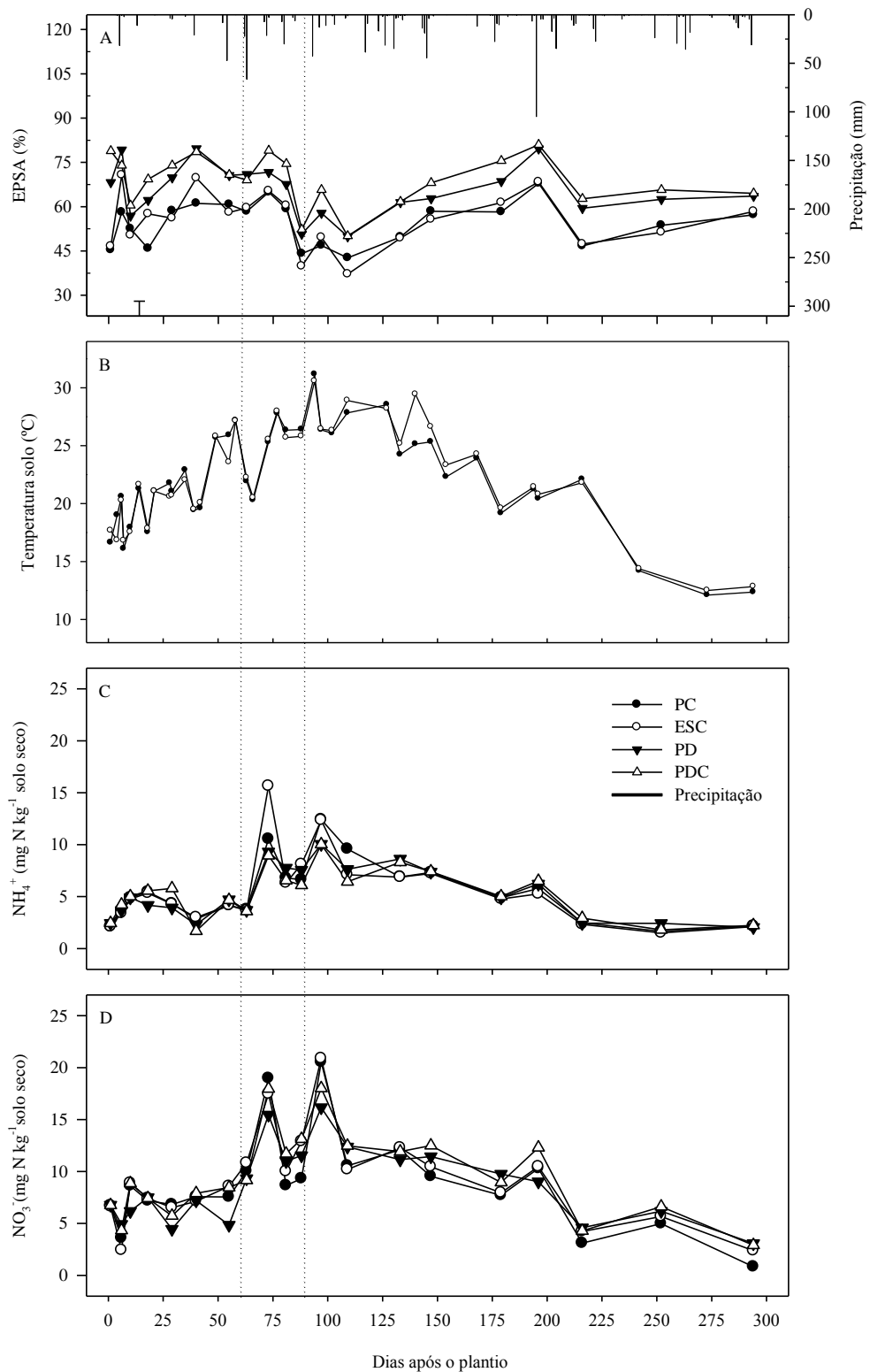


Figura 1. EPSA (A), Temperatura do solo (B), NH_4^+ (C), NO_3^- (D) para diferentes sistemas de preparo do solo durante o cultivo da cana-de-açúcar. As linhas pontilhadas indicam o momento da aplicação de N durante a época de cultivo da cana-de-açúcar.

2.5.3 Emissão de CO₂

Os fluxos de CO₂ não apresentaram diferenças evidentes entre as parcelas de PC, ESC, PD e PDC (Figura 2A), exceto no período entre 88 e 168 dias após o início do experimento. Nos primeiros 81 dias o fluxo médio de CO₂ nos quatro tratamentos foi de 143 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹. A seguir e até os 168 dias, os maiores fluxos de CO₂ foram observados no PC e ESC com valores médios de 210 e 181 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹, respectivamente. Nesse mesmo período, a média do fluxo de CO₂ no PD foi de 167 mg m⁻² h⁻¹ e no PDC de 151 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹. No último período entre 179 a 294 dias, observa-se uma redução nos fluxos de CO₂ com um valor médio nos quatro tratamentos de 72 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹ (Figura 2A).

A quantidade acumulada de CO₂ variou na seguinte ordem decrescente: PC > PD > ESC > PDC (Tabela 2). O preparo do solo no tratamento PC aumentou a emissão de CO₂ em 9,5% em relação ao tratamento PD. Resultado inverso foi obtido com o PDC em que a compactação do solo resultou em um decréscimo de 9% na quantidade de CO₂ emitida para a atmosfera. A escarificação também resultou na diminuição na emissão de CO₂ em relação ao tratamento PD.

2.5.4 Emissão de CH₄

Os preparos do solo para a implantação da cana-de-açúcar não tiveram efeito marcante sobre os fluxos de CH₄ (Figura 2B). Em todas as avaliações realizadas os valores dos fluxos de CH₄ foram negativos, indicando que os solos dos tratamentos atuaram como sumidouros de CH₄. Observa-se na figura 2B que independente do tratamento os fluxos de CH₄ podem ser separados em dois grupos quanto a sua intensidade. O primeiro, formado pelos fluxos ocorridos até 196 dias após o início do experimento em que o fluxo médio foi de -13,1 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹. O segundo, formado pelos fluxos de CH₄ ocorridos após 216 dias do início do experimento em que o fluxo médio foi 2,4 vezes menor (-31,8 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹) do que aquele observado no primeiro grupo. Os sistemas de preparo não afetaram a emissão acumulada de CH₄ (Tabela 2). Na média dos quatro sistemas avaliados a quantidade de CH₄ emitida foi de -1,25 kg C-CH₄ ha⁻¹.

2.5.5 Emissão de N₂O

Os fluxos de N₂O foram influenciados pelos sistemas de preparo utilizados no plantio da cana-de-açúcar (Figura 2C). A manutenção do solo em PD na entrelinha da cultura resultou nos menores fluxos de N₂O. Já quando o solo foi compactado (PDC) foram observados os maiores fluxos de N₂O. Fluxos intermediários a esses dois sistemas foram observados nas parcelas dos tratamentos ESC e PC. Independente do sistema de preparo os maiores fluxos de N₂O estiveram relacionados à ocorrência de eventos pluviométricos. O efeito dos eventos pluviométricos foram significativamente mais pronunciados no PDC do que nos demais tratamentos. A média dos maiores fluxos de N₂O após os eventos pluviométricos em cada tratamento foi aproximadamente 2 vezes maior no PDC do que no PC e ESC (517 vs 254 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e 7,5 vezes maior do que no PD.

O efeito da chuva sobre a emissão de N₂O foi efêmero (Figura 2C). Por exemplo, no PDC aos 35 dias, após um período seco, o fluxo de N₂O foi de 13,4 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, elevando-se para 956 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ aos 39 dias após a ocorrência de uma chuva de 21 mm, sendo que três dias após a esse elevado fluxo a emissão de N₂O reduziu para apenas 54 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$. A maioria dos fluxos medidos nos quatro tratamentos apresentou valores inferiores 70 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$. A maior ocorrência de elevados fluxos de N₂O foi observada nos primeiros 100 dias após o plantio da cana-de-açúcar, o qual foi realizado conjuntamente com a implantação dos sistemas de preparo.

A emissão acumulada de N₂O no PDC foi significativamente superior aos demais tratamentos (Tabela 2). O solo em PDC emitiu 6,0 vezes mais N₂O do que o solo em PD (8,87 vs 1,47 kg de N ha⁻¹) e 1,8 vezes mais do que o solo em PC e ESC (Tabela 2).

Tabela 2. Emissão acumulada de GEE, para quatro sistemas de preparo do solo em cana-de-açúcar.

Tratamento	C-CO ₂ (Mg ha ⁻¹)*	C-CH ₄ (kg ha ⁻¹)*	N-N ₂ O (kg ha ⁻¹)*
PC	9.57 ± 0.96 c	-1.15 ± 0.12 a	5.10 ± 0.51 b
ESC	8.19 ± 0.98 a	-1.31 ± 0.16 a	4.86 ± 0.58 b
PD	8.74 ± 1.14 b	-1.17 ± 0.15 a	1.47 ± 0.19 a
PDC	7.91 ± 0.71 a	-1.49 ± 0.13 a	8.87 ± 0.80 c

*Médias ± desvio padrão. Letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de erro. PC = solo em preparo convencional; ESC = solo escarificado; PD = solo em plantio direto; PDC = solo em plantio direto compactado.

2.5.6 Poder de aquecimento global

O PC e ESC apresentaram os maiores valores de PAG (Tabela 3). A contribuição dos GEE no PAG diminuiu na seguinte ordem: CO₂>N₂O>CH₄. Nos sistemas com PC e ESC, o CO₂ contribui com 88% do valor de PAG. No PD o CO₂ também foi o principal componente do PAG, no entanto esse sistema apresentou um PAG aproximadamente 5 vezes menor do que o PC. Já no PDC a contribuição do CO₂ para o PAG descreceu para 52 %, sendo expressivo o aumento do N₂O para esse índice.

Tabela 3. Poder de aquecimento global (kg CO₂ eq ha⁻¹) para quatro sistemas de preparo do solo em cana-de-açúcar.

Tratamento	Delta C no solo (CO ₂)*	CH ₄ *	N ₂ O*	PAG*
PC	20288 ± 1217 c	-38 ± 2,3 a	2388 ± 143 b	22638 ± 1358 d
ESC	15100 ± 1057 b	-44 ± 3,1 a	2276 ± 159 b	17332 ± 1213 c
PD	3498 ± 314 a	-39 ± 3,5 a	688 ± 62 a	4147 ± 373 a
PDC	4547 ± 364 a	-50 ± 4,0 a	4154 ± 332 c	8651 ± 692 b

*Médias ± desvio padrão. Letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de erro. PAG, poder de aquecimento global = (ΔC) + (CH₄ x 25) + (N₂O x 298); PC = solo em preparo convencional; ESC = solo escarificado; PD = solo em plantio direto; PDC = solo em plantio direto compactado.

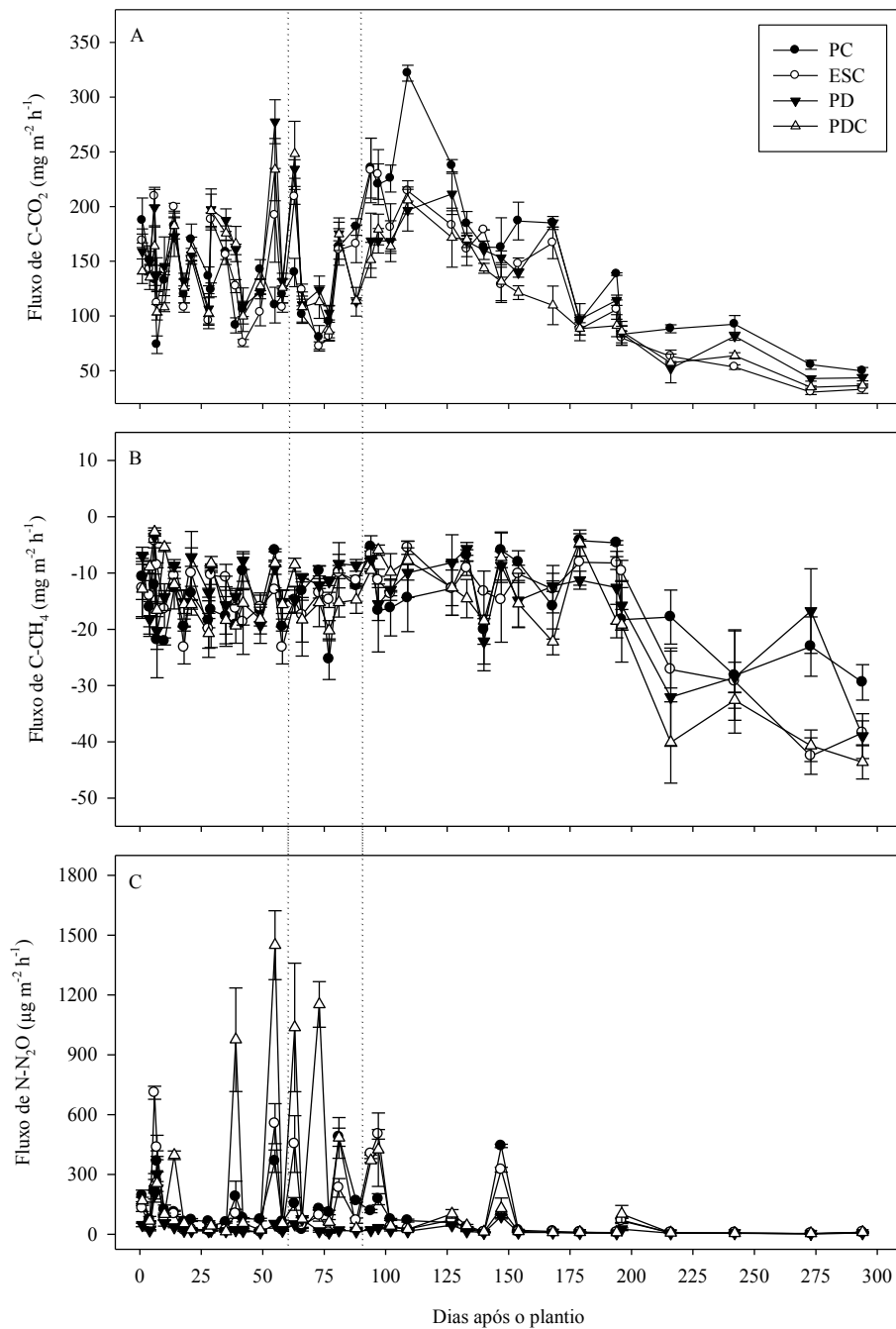


Figura 2. Fluxos de C-CO₂ (A), C-CH₄ (B) e N-N₂O (C) para diferentes sistemas de preparo do solo nos 294 dias após o plantio da cana-de-açúcar. As linhas pontilhadas indicam o momento da aplicação de N durante a época de cultivo da cana-de-açúcar.

2.6 Discussão

2.6.1 Efeito do tipo de preparo do solo

No presente estudo foi avaliada as emissões de GEE durante o cultivo da cana-de-açúcar implantada sob diferentes preparos do solo aplicados em área sob plantio direto consolidado. Na literatura são escassos os resultados sobre esse tema na cultura da cana-de-açúcar, sendo mais frequentemente encontrados resultados sobre o efeito da fertilização nitrogenada em cana na emissão de N_2O (Allen et al., 2010). Nossos resultados mostram que os diferentes tipos de preparo não afetam a produtividade da cana planta, mas influenciam significativamente a emissão de GEE. O uso de PC e ESC no plantio da cana aumenta, respectivamente, as emissões de CO_2 e N_2O em relação à manutenção do solo em PD. No entanto, quando a cana foi cultivada em PDC ocorreu um aumento expressivo na emissão de N_2O . Por fim, os diferentes sistemas de preparos avaliados não se diferenciam quanto a emissão de CH_4 para a atmosfera.

Em todos os sistemas de preparo o CO_2 liberado do solo tem origem principalmente da atividade microbiana, a qual oxida parte do C presente em resíduos culturais e na matéria orgânica do solo (MOS) e da respiração das raízes. Pode-se considerar que neste estudo essas foram as principais fontes do CO_2 medido, sendo que na fase inicial do experimento o CO_2 teve origem principalmente da atividade microbiana e com o passar do tempo, com o crescimento da cana-de-açúcar, aumentou a contribuição do sistema radicular para o CO_2 medido. A maior emissão de CO_2 observada no sistema de preparo do solo PC ocorreu devido o revolvimento do solo proporcionar condições para que a biomassa microbiana degrade mais intensamente os materiais orgânicos no solo. Isso porque, o revolvimento do solo resulta em maior aeração do solo e expõem a MOS ao ataque dos microrganismos. A maior liberação de CO_2 no PC está de acordo com a redução do estoque de C no solo observada após 294 dias do preparo do solo. Balesdent et al. (2000) demonstraram que o trabalho no solo contribuiu para desproteção da matéria orgânica presente nos macoagregados e, alguns casos, nos microagregados favorecendo a decomposição do C presente no solo. A adequada aeração do solo favorece a oxidação dos materiais orgânicos e aumenta a sua taxa de decomposição. No solo ESC a liberação de CO_2 foi menor do que no PC possivelmente pela redução na intensidade do revolvimento.

O PDC apresentou juntamente com ESC a menor quantidade de CO₂ emitida (Tabela 3). A maior densidade do solo e EPSA do sistema de preparo do solo PDC, provavelmente reduziu a aeração e restringiu a difusão do gás criando sítios de anaerobiose que limitaram a respiração aeróbica, diminuindo assim a produção de CO₂. Estes resultados concordam com os estudos de campo e laboratório que mostram que solos compactados apresentam menor carbono na biomassa microbiana (Dick et al., 1988; Kaiser et al., 1991) e reduzidas taxas de respiração (Van der Linden et al., 1989; Yoo e Wander, 2006).

Em áreas de cultivo sob condições de sequeiro, os solos apresentam baixo potencial para emissão de CH₄, sendo normalmente relatados como importantes na oxidação deste gás (Striegl, 1993; Ball et al., 1997). A taxa de oxidação do CH₄ pode ser reduzida pelo preparo do solo devido às perturbações aos microrganismos oxidantes de CH₄ e também pela difusibilidade gasosa que afeta a taxa de emissão para a atmosfera. Em nosso estudo, não houve diferenças claras no fluxo de CH₄ entre os tratamentos. No entanto, Hansen et al. (1993) observaram que a compactação do solo provocada pelo tráfego do trator aumentou a densidade do solo de 1,21 a 1,3 Mg m⁻³ e reduziu a taxa de oxidação do CH₄ para 52%. Ruser et al. (1998) indicaram também que a compactação pode tornar o solo uma fonte líquida de CH₄, já o preparo pode aumentar a absorção de CH₄. Se a densidade do solo aumenta com as práticas de plantio direto, isso possibilita que o solo funcione principalmente com uma fonte de CH₄ (Omonode et al., 2007). No entanto, a maioria dos estudos indicam um aumento na absorção de CH₄ em solos com plantio direto, devido à diminuição das perturbações na superfície do solo (Venterea et al., 2005; Ussiri et al., 2009). A redução no consumo de CH₄ em solo compactado pode ser explicado pela difusão reduzida do CH₄ atmosférico para o interior do solo. Vários estudos sobre a absorção de CH₄ em solos bem aerados sugerem que a difusão de CH₄ para o interior do solo é o principal fator limitante nas taxas de consumo de CH₄ (Striegl, 1993; Ball et al., 1997). Os nossos dados indicam que o EPSA não foi o fator-chave para uma menor absorção de CH₄ dos solos compactados e descompactados. Nós não encontramos relação significativa entre as taxas de emissão de C-CH₄ e EPSA, o que pode ser devido ao conteúdo de umidade do solo relativamente baixo durante o período das avaliações (Figura 1A). Como salientado por Castro et al. (1995), o conteúdo de umidade do solo exerce um forte efeito restritivo sobre o consumo de CH₄ quando o EPSA ultrapassa 60%. Os fluxos de CH₄ em nosso estudo foram da mesma ordem de grandeza que os fluxos em solos aráveis relatados por Hansen et al. (1993), Flessa e Beese (1995) e Flessa et al. (2002).

O solo em PDC apresentou os maiores valores de emissão de N₂O (Figura 2C e Tabela 2). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato da redução da porosidade total do solo e

a mudança na distribuição e no tamanho dos poros, resultando em uma maior microporosidade. Isso pode ter aumentado os micro-sítios de anaerobiose no solo favorecendo maior produção de N_2O pelos microrganismos desnitrificadores. A menor aeração do solo no PDC quando comparado com o PD, parece ser o fator regulador mais importante na emissão de N_2O , pois ambos os tratamentos não apresentavam diferenças nos teores de C no solo (Tabela 1). Emissões crescentes de N_2O (aproximadamente 35%) devido à compactação do solo foram relatados por Hansen et al. (1993), que compararam a emissão de um solo compactado e um não compactado. Também Van Groenigen et al. (2005) observaram um aumento de 5 vezes na produção de N_2O com um aumento de 15% na densidade de um solo arenoso. A maior produção de N_2O em solo compactado é coerente com outros estudos em que a produção N_2O foi maior em solos mal drenados e mal arejados (Ball et al., 1999; Rochette, 2008), compactado por pisoteio de gado (Oenema et al., 1997; Thomas et al., 2004) ou tráfego de máquinas (Hansen et al., 1993; Ruser et al., 2006).

Em situação intermediária de emissão de N- N_2O , encontram-se os sistemas de preparo do solo ESC e PC. A similaridade na emissão de N- N_2O desses dois tratamentos pode ser devido à similaridade do preparo do solo, em que a escarificação profunda (até 0,3m) propiciou condições do solo semelhantes ao plantio convencional. As menores emissões de N_2O dos tratamentos ESC e PC quando comparado ao tratamento PDC (Tabela 2) pode ser devido ao revolvimento do solo que diminuiu a densidade do solo, propiciando maior oxigenação no solo. Isso aumentou a concentração de O_2 no solo desfavorecendo a atividade dos microrganismos desnitrificadores que utilizam o N na forma de nitrato como acceptor final de elétrons sob condições anaeróbicas. Já as menores emissões de N- N_2O foram verificadas no sistema de preparo do solo PD (Figura 1C e Tabela 2). Esse fato pode estar associado a menor mineralização do C e N do solo quando comparado com o tratamento ESC e PC e principalmente a maior porosidade total do solo do quando comparado ao tratamento PDC.

Independente do sistema de preparo as emissões de GEE, com destaque para aquelas do CO_2 e N_2O , foram influenciadas pelas precipitações ocorridas durante o ciclo da cana-de-açúcar. Nos períodos de baixa precipitação, a deficiência de umidade reduziu a atividade microbiana e, conseqüentemente, a emissão de CO_2 . Esse efeito ocorreu primeiramente no sistema em que não houve a incorporação dos resíduos ao solo (PD e PDC) e deve estar ligado ao fato de que, nesse sistema, a população decompositora se localiza na camada superficial do solo onde concentra-se os compostos orgânicos. Com a ocorrência de precipitações, ocorre um aumento na disponibilidade de água no solo proporcionando condições favoráveis à atividade dos microrganismos heterotróficos, os quais irão oxidar mais

intensamente os compostos orgânicos labéis no solo. No entanto, dependendo da intensidade das precipitações, a água da chuva pode provocar a saturação do solo, onde os macroporos do solo ficam ocupados pela água a qual expulsa os gases do seu interior conduzindo a uma redução na disponibilidade de O_2 no meio. Durante o estabelecimento dessas condições é favorecida a produção de N_2O via os processos de nitrificação e desnitrificação sendo que a produção de N_2O via nitrificação pode ocorrer em condições em que o espaço poroso ocupado por água (EPSA) encontra-se entre 30 e 60%. Já a produção de N_2O via desnitrificação ocorre em valores de EPSA acima de 60% (Aulakh et al., 1992). No presente estudo a maior frequência de valores de EPSA acima de 60% foi observada nos tratamentos PDC e PD, indicando que nesses sistemas possivelmente a desnitrificação tenha sido o principal processo que contribuiu para a emissão de N_2O . Nos sistemas PC e ESC pelos menores valores de EPSA apresentados possivelmente a contribuição da nitrificação para a emissão de N_2O nesses sistemas tenha aumentado sensivelmente.

Nos primeiros 180 dias após a implantação dos sistemas de preparo do solo foram observados os fluxos mais intensos de CO_2 e N_2O e os maiores influxos de CH_4 . Tais resultados podem estar ligados a dois aspectos principais. O primeiro aspecto diz respeito à disponibilidade de C e N no solo para os microrganismos. Possivelmente na fase inicial tenha ocorrido maior disponibilidade de compostos orgânicos lábeis no solo (Robertson et al., 2000), os quais são substratos para os microrganismos heterotróficos aeróbicos e anaeróbicos facultativos. Aliado à disponibilidade de C, nesse período existe também uma maior disponibilidade de N no solo devido à mineralização do N orgânico da MOS e as aplicações de N-uréia em cobertura. Estudos mostram que o aumento da disponibilidade de N no solo é fator importante para a elevação dos fluxos de N_2O para a atmosfera (Mosier et al., 2004; Mcswiney e Robertson, 2005). Provavelmente com o desenvolvimento e crescimento da cultura da cana-de-açúcar os teores de N mineral no solo foram reduzidos, limitando com isso a produção de N_2O no solo mesmo em período com elevados valores de EPSA. Rice e Smith (1982) relataram que o aumento da umidade e teores de N no solo, independente do sistema de preparo, foram os principais fatores responsáveis na atividade dos microrganismos desnitrificadores do solo. O segundo aspecto pode estar relacionado aos maiores valores de temperatura do solo, os quais influenciam a intensidade dos processos relacionados à oxidação dos compostos orgânicos e a produção de N_2O no solo.

2.6.2 PAG a partir de diferentes sistemas de preparo do solo

Os sistemas de preparo que utilizaram o revolvimento do solo apresentaram maior PAG. Esse resultado ocorreu devido ao revolvimento do solo que pode ter aumentado a degradação da MOS pelos microrganismos, sendo que parte do C retido no solo foi transformado até CO_2 . O CO_2 contribuiu com mais de 80% no valor do PAG dos sistemas de preparo PC, ESC e PD. No PDC o PAG foi superior ao do PD, principalmente pela maior emissão de N_2O . Esse gás contribuiu com aproximadamente 50% no valor do PAG no PDC. Esses resultados indicam que em áreas manejadas em plantio direto que serão utilizadas para o cultivo da cana não é necessário o revolvimento do solo, com a exceção da linha de plantio. Grace et al. (2003) estimou PAG de 12805-16142 $\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ com sistema de arroz irrigado e trigo no IGP dependendo das práticas de manejo das culturas. No entanto, eles incluíram apenas o CH_4 e N_2O , na emissão em suas estimativas. Mas nosso estudo mostrou relativamente maiores contribuições da quantidade de CO_2 no PAG, principalmente no sistema de preparo do solo PC.

2.7 Conclusões

1. O uso do sistema de preparo do solo PC em área com plantio direto resulta em elevada emissão de CO_2 para a atmosfera.
2. Os quatro sistemas de preparo do solo PC, ESC, PD e PDC contribuíram igualmente na oxidação de CH_4 .
3. O cultivo da cana-de-açúcar em solo compactado com o uso de plantio direto resulta em uma emissão de N_2O seis vezes maior do que o uso de plantio direto em solo sem compactação adicional.
4. O CO_2 foi o principal gás que contribui para os valores do PAG nos sistemas de preparo PC, ESC e PD. No PDC o N_2O .
5. O sistema de preparo do solo PC teve a maior contribuição no PAG, seguido pelo ESC e PDC indicando que o uso de plantio direto é uma estratégia eficaz para mitigar as emissões de GEE na implantação de lavouras de cana-de-açúcar na região sul do Brasil.

2.8 Literatura citada

- Allen, D.E., Kingston, G., Rennenberg, H., Dalal, R.C., Schmidt, S., 2010. Effect of nitrogen fertilizer management and waterlogging on nitrous oxide emission from subtropical sugarcane soils. *Agriculture Ecosystems & Environment* 136, 209-217.
- Aulakh, M.S., Doran, J.W.E., Mosier, A.R., 1992. Soil denitrification – significance, measurement, and effects of management. *Advanced Soil Science* 18, 1-57.
- Balesdent, J., Chenu, C., Baladane, M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research*. 53, 215-230.
- Ball B.C., Campbell D.J., Douglas J.T., Henshall J.K., Osullivan M.F., 1997. Soil structural quality, compaction and land management. *European Journal of Soil Science* 48, 593-601.
- Ball, B.C, Scott, A., Parker, J.P., 1999. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil & Tillage Research* 53, 29-39.
- Ball, B.C., Dobbie, K.E., Parker, J.P., Smith, K.A., 1997. The influence of gas transport and porosity on methane oxidation in soils. *Journal of Geophysical Research* 102, 23301-23308.
- Ball, B.C., Scott, A., Parker, J.P., 1999. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil & Tillage Research* 53, 29-39.
- Beare, M.H., Gregorich, E.G., St-Georges, P., 2009. Compaction effects on CO₂ and N₂O production during drying and rewetting of soil. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 611-621.
- Castro, M.S., Steudler, P.A., Melillo, J.M., 1995. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Global Biogeochemical Cycles* 9, 1-10.
- Chatskikh, D., Olesen, J.E., 2007. Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley. *Soil & Tillage Research* 97, 5-8.
- CQFS-RS/SC. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre: SBCS-NRS, 2004, 400 p.
- Dick, R.P., Myrold, D.D., Kerle, E.A., 1988. Microbial biomass and soil enzyme activities in compacted and rehabilitated skid trail soils. *Soil Science Society of America Journal* 52, 512-516.
- EMBRAPA/CNPQ. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2.ed. Brasília: Embrapa, 2006, 306 p.

- Firestone, M.K., Davidson, E.A., 1989. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soils. In: Andreae, M.O., Schimel, D.S., eds. Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. New York, Wiley, 7-21.
- Flessa, H., Beese, F., 1995. Effect of sugarbeet residues on soil redox potential and nitrous oxide emission. *Soil Science Society of America Journal* 59, 1044-1051.
- Flessa, H., Ruser, R., Schilling, R., Loftfield, N., Munch, J.C., Kaiser, E.A., Beese, F., 2002. N₂O and CH₄ fluxes in potato fields: automated measurement, management effects and temporal variation. *Geoderma* 105, 307-325.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schutz, M., Van Dorland, R., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, USA, pp. 129–234.
- Goldemberg, J., Coelho, S.T., Guardabassi, P., 2008. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy* 2008, 36:2086-2097.
- Grace, P.R., Harrington, L., Jain, M.C., Robertson, G.P., 2003. Longterm sustainability of tropical and subtropical rice–wheat system: an environmental perspective. In: Ladha, J.K. (Ed.), *Improving the Productivity and Sustainability of Rice–wheat Systems: Issues and Impacts*. CSSA and SSSA, Madison, WI, ASA Special Publication 65, 27-41.
- Gregorich, E.G., Rochette, P., St-Georges, P., McKim, U.F., Chan, C., 2008. Tillage effects of N₂O emission from soils under corn and soybeans in Eastern Canada. *Can. Journal of Soil Science* 88, 153-161.
- Guimarães, G.P., Mello, W.Z. de, 2008. Fluxos de óxido nitroso na interface ar-mar na Baía de Guanabara. *Química Nova* 31, 1613-1620.
- Hansen, S., Maehlum, J.E., Bakken, L.R., 1993. N₂O and CH₄ fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic. *Soil Biology & Biochemistry* 25, 621-630.
- Hütsch, B.W., 2001. Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop production—invited paper. *European Journal of Agricultural* 14, 237-260.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2012. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Rio de Janeiro 25, 1-88.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001. In: Houghton, J.T., et al. (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge Univ. Press, UK, p. 881.
- Kaiser, E.-A., Walenzik, G., Heinemeier, O., 1991. The influence of soil compaction on the decomposition of plant residues and on microbial biomass. In: Wilson, W.S. (Ed.), *Advances in Soil Organic Matter Research: the Impact on Agriculture and the Environment*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, pp. 207-216.

- Keeney, D.R., Nelson, D.W., 1982. Nitrogen-inorganic forms. In: Page, A.L., et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monographs 9*, second ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, 643-693.
- Mcsweeney, C.P., Robertson, G.P., 2005. Nonlinear response of N₂O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system. *Global Change Biology* 11, 1712-1719.
- Moreno, J.A. *Clima do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura. Diretoria de Terras e Colonização. Secção de Geografia, 1961. 46p.
- Mosier, A., Wassmann, R., Verchot, L., King, J., Palm, C., 2004. Methane and nitrogen oxide fluxes in tropical agricultural soils: sources, sinks and mechanisms. *Environment, Development and Sustainability* 6, 11-49.
- Mummery, D.L., Smith, L.J., Blum, G., 1998. Assessment of alternative soil management practices on N₂O emissions from US agriculture. *Agriculture Ecosystems & Environment* 70, 79-87.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Black, C.A., ed. *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. Madison, Soil Science of America and American Society of Agronomy, 961-1010.
- OECD, 2000. *Environmental indicators for agriculture methods and results*. Executive summary. Paris.
- Oenema, O., Velthof, G.L., Yamulki, S., Jarvis, S.C., 1997. Nitrous oxide emissions from grazed grassland. *Soil Use and Management* 13, 288-295.
- Omonode, R.A., Vyn, T.J., Smith, D.R., Hegymegi, P., Gá, A., 2007. Soil carbon dioxide and methane fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn-soybean rotations. *Soil & Tillage Research* 95, 182-1995.
- Rice, C.W., Smith, M.S., 1982. Denitrification in no-till and plowed soils. *Soil Science Society of America Journal* 46, 1168-1173.
- Robertson, G.P., Paul, E.A., Harwood, R.R., 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289, 1922-1925.
- Rochette, P., 2008. No-till only increases N₂O emissions in poorly aerated soils. *Soil & Tillage Research* 101, 97-100.
- Ruser R., Flessa H., Schilling R., Steindl H., Beese F., 1998. Soil compaction and fertilization effects on nitrous oxide and methane fluxes in potato fields. *Soil Science Society of America Journal* 62, 1587-1595.
- Ruser, R., Flessa, H., Russow, R., Schmidt, G., Buegger, F., Munch, J.C., 2006. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 263-274.

- Shine, K.P., Derwent, R.G., Wuebbles, D.J., Morcrette, J.J., 1995. Radiative forcing of climate. In: Houghton, J.T. (Ed.), *Climate change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 47-68.
- Silva, R.R. da, Silva, M.L.N., Cardoso, E.L., Moreira, F.M.S., Curi, N., Alovise, A.M.T., 2010. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes-MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 1585-1592.
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S.M., Sa, J.C.M., Albrecht, A., 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effect of no-tillage. *Agronomie* 22, 755-775.
- Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 338p.
- Storck, L.; Garcia, D.C.; Lopes, S.J.; Estefanel, V. *Experimentação vegetal*. Santa Maria: UFSM, 198p. 2006.
- Striegl, R., 1993. Diffusional limits to the consumption of atmospheric methane by soils. *Chemosphere* 26, 715-720.
- Thomas, S.M., Francis, G.S., Barlow, H.E., Beare, M.H., Trimmer, L.A., Gillespie, R.N., Tabley, F.J., 2004. Winter grazing of forages – soil moisture and tillage methods impact nitrous oxide emissions and dry matter production. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 66, 135-140.
- Ussiri, D.A.N., Lal, R., Jarecki, M.K., 2009. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. *Soil & Tillage Research* 104, 247-253.
- Van der Linden, A.M.A., Jeurissen, L.J.J., van Veen, J.A., Schippers, B., 1989. Turnover of the soil microbial biomass as influenced by soil compaction. In: Hansen, J.A., Hendriksen, K. (Eds.), *Nitrogen in Organic Wastes Applied to Soils*. Academic Press, London, pp. 25-46.
- Van Groenigen, J.W., Kuikman, P.J., de Groot, W.J.M., Velthof, G.L., 2005. Nitrous oxide emission from urine-treated soil as influenced by urine composition and soil physical conditions. *Soil Biology & Biochemistry* 37, 268-274.
- Venterea, R.T., Burger, M., Spokas, K.A., 2005. Nitrogen oxide and methane emissions under varying tillage and fertilizer management. *Journal of Environmental Quality* 34, 1467-1477.
- Yoo, G., Wander, M.W., 2006. Influence of tillage practices on soil structural controls over carbon mineralization. *Soil Science Society of America Journal* 70, 651-659.

3 ARTIGO 2 - EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO AFETADA POR DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA EM CANA-DE-AÇÚCAR

3.1 Resumo

Resultados de pesquisa indicam que a cana-de-açúcar no Brasil apresenta baixa resposta à adubação nitrogenada. No entanto, mesmo não demandando quantidades expressivas de N é de conhecimento o uso de elevadas doses de N nessa cultura. O presente trabalho teve como objetivo avaliar as emissões de CH₄ e N₂O na cana-de-açúcar nos ciclos de cana planta e soca, fertilizadas com diferentes doses de N. As doses de N testadas foram: 0, 40, 80 e 120 kg N ha⁻¹. A coleta dos gases foi realizada utilizando o método da câmara estática fechada. A produtividade e a quantidade de N acumulada nos colmos foram avaliadas ao final do ciclo da cultura. Durante o cultivo da cana-planta e soca o solo promoveu a oxidação de CH₄ funcionando como um dreno deste gás, sem ter sido influenciado pela adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar. A emissão de N₂O aumentou linearmente com as doses de N aplicadas na cultura. Na média dos ciclos de cana planta e soca para cada 20 kg N ha⁻¹ aplicados, são emitidos 0,28 kg N-N₂O ha⁻¹. Os valores dos fatores de emissão de N₂O calculados com base na metodologia do IPCC para as condições do presente estudo indicam que para doses menores que 40 kg N ha⁻¹ os valores obtidos estão abaixo do valor padrão de 1,25%. Para doses acima de 60 kg N ha⁻¹ os valores dos fatores obtidos são semelhantes ao indicado pelo IPCC. Fatores de emissão baseados na relação entre a emissão de N₂O e a produtividade de colmos indicam que incrementos de produtividades de colmos obtidas com doses acima de 40-60 kg N ha⁻¹ irão apresentar elevada quantidade de N₂O emitida por Mg de colmo produzida.

Palavras-Chave: GEE; cana de açúcar; fertilizante nitrogenado; aquecimento global.

3.2 Abstract

Earlier research findings indicated that the sugarcane in Brazil has low response to nitrogen fertilization. However, beside this low response large quantities of N are used for sugarcane production. Therefore, the present study was aimed to evaluate the CH₄ and N₂O emissions of from sugarcane soils fertilized with different doses of N. The N rates tested were: 0, 40, 80 and 120 kg N ha⁻¹. The gases were collection by using closed static chamber method the productivity and the amount of N accumulated in stems were evaluated at the end of the crop cycle. During the cultivation of sugarcane soil promoted the oxidation of CH₄ functioning as a drain of this gas, without being influenced by nitrogen fertilization in the culture of sugar cane. The N₂O emission increased linearly with the doses of N applied. On an average, 0.28

kg N₂O-N ha⁻¹ was emitted from 20 kg N ha⁻¹. The N₂O emission factors calculated based on IPCC methodology for the conditions of this study indicated that N doses less than 40 kg ha⁻¹ values obtained are below the default value of 1.25%. For doses above 60 kg N ha⁻¹ values obtained are similar to the factors indicated by the IPCC. Emission factors based on the relationship between the N₂O emission and productivity indicated that productivity was increased with doses above 40-60 kg N ha⁻¹ with high amount of N₂O emission per Mg produced.

Keywords: GHG; sugarcane; nitrogen fertilizer; global warming potential.

3.3 Introdução

O metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) são dois principais gases de efeito estufa (GEE), contribuindo, respectivamente, com aproximadamente 15 e 5% da forçante radiativa total na atmosfera da terra (Rodhe, 1990). O potencial de aquecimento global do CH₄ é de 25 e do N₂O de 298 vezes maior que o CO₂ num período de tempo de 100 anos (IPCC, 2007). O N₂O é gerado nos processos de nitrificação e desnitrificação. Ambos os processos são influenciados pela temperatura do solo, umidade e pH (Bouwman, 1990). Especificamente, a nitrificação é favorecida em condições aeróbicas e de alta disponibilidade de NH₄⁺ no solo, sendo que em condições de espaço poroso ocupado por água (EPSA) na faixa de 30 a 60%, o N pode ser perdido via nitrificação tanto na forma de NO como de N₂O. Já a desnitrificação é favorecida por condições anaeróbicas e presença de C e NO₃⁻ disponível no solo. O CH₄ no solo é produzido por bactérias anaeróbicas obrigatórias denominadas de metanogênicas que tornam-se ativas em potenciais de redução altamente negativos. Em condições de sequeiro o CH₄ pode ser oxidado por bactérias metanotróficas.

A adubação nitrogenada, por aumentar a disponibilidade de N aos processos de nitrificação e desnitrificação geralmente aumenta o fluxo de N₂O para a atmosfera (Mosier et al., 2004; McSwiney e Robertson, 2005). Uma maior proporção de emissão de N₂O por unidade de fertilizante aplicado é decorrente de taxas de N excedentes à demanda de N pela planta (Zebarth et al., 2008). A emissão de N₂O provinda de solos agrícolas é preocupante, pois significa um decréscimo na disponibilidade de N para as culturas, além de contribuir para o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio (Crutzen, 1981). Alguns estudos também indicam que a adubação nitrogenada pode provocar uma redução no potencial do solo em oxidar CH₄. Isso porque as bactérias metanotróficas possuem a capacidade de oxidar CH₄ por apresentar a enzima monoxigenase a qual reconhece também o NH₃. Em uma situação de

alta disponibilidade de N as metanotróficas podem ser estimuladas a oxidar a amônia em detrimento do CH₄.

Enquanto que as emissões de gases de efeito estufa são de preocupação geral em função de seu impacto no aquecimento global, elas são de particular preocupação para o cultivo da cana-de-açúcar, em função do grande interesse nessa cultura para a produção de biocombustível, pois, o Brasil é o maior produtor mundial de cana de açúcar (Faostat, 2008). A cultura representa grande importância econômica no país, chegando a 9,69 milhões de hectares cultivados com uma produtividade média de 78,1 Mg ha⁻¹ na safra 2012 (IBGE, 2012). Desde 2009, conforme a portaria 54 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o Rio Grande do Sul foi contemplado no zoneamento agrícola da cultura com 1,5 milhão de hectares em 216 municípios aptos ao cultivo. Desta forma, se faz necessário a realização de estudos a fim de gerar informações sobre sistemas de cultivo e manejo da cultura da cana-de-açúcar na região sul do Brasil.

No Brasil, a cultura da cana pode apresentar alta produtividade de colmos, mesmo com o uso de doses de nitrogênio inferior à recomendada em outros países produtores da gramínea (Denmead et al., 2010). As quantidades médias anuais de N utilizadas na cultura são de 30 kg ha⁻¹ na cana planta e de 80 kg ha⁻¹ na cana soca (Urquiaga et al., 2003). Na Austrália, por exemplo, a recomendação varia de 120-160 kg N ha⁻¹, em média, para a cultura da cana (Allen et al., 2010). Mesmo não demandando quantidades expressivas de N, é de conhecimento o uso de elevadas doses de N nessa cultura (Franco et al., 2010). Assim, é importante que sejam geradas informações no Brasil sobre a emissão de CH₄ e N₂O em cultivos de cana de açúcar sob diferentes doses de N. O conhecimento do padrão de emissões de N₂O em uma escala local se faz necessário para identificar práticas de manejo que reduzam as emissões segundo as condições regionais de ambiente e manejo. Com isso, uma prática que promova a redução na emissão de N₂O durante o cultivo da cana-de-açúcar deverá contribuir para melhorar ainda mais o balanço energético dessa cultura. Nesse sentido o objetivo deste trabalho foi avaliar as emissões de CH₄ e N₂O sob diferentes doses de fertilizante nitrogenado aplicados na cultura da cana-de-açúcar.

3.4 Material e métodos

3.4.1 Descrição do local e delineamento experimental

O experimento foi realizado a campo, no período de setembro de 2010 a julho de 2012 na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (latitude 29° 41' S; longitude 53° 48' L; altitude de 95 m), RS, Brasil. O clima da região se enquadra como “Cfa” de Köppen caracterizado por apresentar clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e temperatura do mês mais frio variando entre -3 a 18 °C e precipitação média anual de 1.616 mm (Moreno, 1961). O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (Embrapa, 2006) ou Paleudalf (Soil Taxonomy, 2010) de textura franco arenosa. As principais características do solo na camada de 0-0,1 m são as seguintes: pH, 5.3; N total, 0.90 g kg⁻¹; C orgânico, 9.28 g kg⁻¹; P, 26.9 mg dm⁻³; K, 52.0 mg dm⁻³; densidade do solo, 1.47 g cm⁻³. O experimento foi instalado em área que foi conduzida nos últimos 10 anos em plantio direto com as culturas da soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*) e aveia (*Avena sativa*) em rotação.

Os tratamentos avaliados foram compostos por quatro doses de N aplicadas na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): 0 kg de N ha⁻¹ (0N); 40 kg de N ha⁻¹ (40N); 80 kg de N ha⁻¹ (80N); e 120 kg de N ha⁻¹ (120N). O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições. Os mesmos tratamentos foram avaliados no ciclo de cana-planta (2010/11) e cana-soca (2011/12). No entanto as avaliações no ciclo de cana-planta iniciaram poucos dias antes da primeira aplicação de N em cobertura, por isso, as emissões de GEE no ciclo de cana-planta serão reportadas em função da quantidade de N aplicada em cobertura (0N, 20N, 60N e 100N). No ciclo de cana-planta a quantidade de N utilizada em cada tratamento foi dividida em três aplicações; a primeira de 20 kg de N ha⁻¹ aplicada no momento do plantio no interior do sulco; a segunda e a terceira realizada em cobertura 65 e 92 dias após o plantio, sendo que em cada aplicação foi utilizada 50% do restante do N de cada tratamento. No ciclo de cana-soca a dose de N foi dividida em duas aplicações apenas, realizadas 34 e 99 dias após a colheita, sendo que em cada data foi aplicado 50% da dose. Com exceção do N aplicado no plantio que foi incorporado ao solo, aqueles aplicados em cobertura foram deixados na superfície do solo próximo a linha de plantio. A fonte de N utilizada nos dois cultivos da cana-de-açúcar foi a ureia.

3.4.2 Cultura da cana-de-açúcar

O plantio da cana-de-açúcar (genótipo RB 956911) foi realizado em 20 de setembro de 2010. A densidade de plantio foi de 18 gemas por metro linear, em sulcos de aproximadamente 0,3 m de profundidade e espaçamento de 1,4 m entre linhas. Anteriormente ao plantio a área recebeu o preparo convencional do solo com arado de discos e gradagem superficial. A adubação de P e K foi estabelecida com base na análise química do solo e nas recomendações de adubação conforme a CQFS-RS/SC (2004). No plantio foi aplicado nos sulcos o equivalente a 80 kg de P_2O_5 ha^{-1} e 70 kg de K_2O ha^{-1} . Quantidades semelhantes de P e K foram utilizadas no ciclo de cana-soca, porém os nutrientes foram aplicados e mantidos na superfície do solo junto a linha de plantio.

A colheita da cana-de-açúcar no ciclo da cana-planta foi realizada no dia 17 de julho de 2011 e no ciclo de cana-soca no dia 18 de junho de 2012. Em cada ciclo foram colhidas as plantas da área útil de cada parcela. Após o corte, os colmos foram separados da parte aérea das plantas e pesados separadamente no campo. Em seguida foi retirada uma subamostra de cada componente da planta que foram pesadas e colocadas em estufa regulada a 65°C para a obtenção de matéria seca (MS). As demais plantas presentes nas parcelas foram cortadas e despalhadas e a palha mantida na superfície do solo simulando uma condição de colheita mecânica. A quantidade média de palha na superfície do solo após a colheita da cana-planta nas quatro doses de N (0N, 40N, 80N e 120N) foi de 15,8 Mg ha^{-1} .

3.4.3 Amostragem dos gases (N_2O e CH_4) e análises

Os fluxos de N_2O e CH_4 foram medidos usando o método da câmara estática descrito por Allen et al. (2010). O dispositivo foi composto por uma base e uma câmara, ambos confeccionados em aço galvanizado. A base com dimensões de 0,4 m largura x 0,7 m comprimento x 0,1 m altura (0,28 m^2) foi inserida no solo até uma profundidade de 0,05 m, perpendicular a linha de plantio da cana. A base permaneceu fixa no local durante todo o período de avaliação. Sobre a base foi colocada, no momento das avaliações, uma câmara com dimensões semelhantes a da base e altura de 0,2 m. Nas câmaras foram instaladas

válvulas com registros para acoplar seringas plásticas utilizadas na coleta e armazenagem das amostras de gás.

As avaliações dos fluxos de N_2O e CH_4 no ciclo de cana-planta iniciaram aos 57 dias após o plantio da cana-de-açúcar e no ciclo de cana-soca aos 42 dias após a colheita da cana. A frequência de coletas foi mais intensa nos períodos com a aplicação de N e com a ocorrência de eventos pluviométricos. As amostras de ar foram coletadas entre 9 e 11h da manhã. Em cada avaliação foram coletadas três amostras de ar por câmara, aos 0, 15 e 30 minutos após a instalação da câmara sobre a base. A determinação das concentrações de N_2O e CH_4 foi realizada por cromatografia gasosa (Shimadzu GC – 2014 modelo *Greenhouse*) em um período máximo de 24h após a coleta das amostras de gás. O volume molar do gás foi corrigido para temperatura no interior da câmara no momento de cada amostragem, e os fluxos foram calculados levando-se em conta a variação na concentração de N_2O na câmara no tempo que ela permaneceu fechada, o volume da câmara, a área do solo ocupada pela câmara e o peso molecular do N_2O (Jantalia et al., 2008).

3.4.4 Amostragem e análise de solo

Anteriormente ao início das avaliações de N_2O e CH_4 , nos dois ciclos da cana-de-açúcar, foi determinada a densidade do solo em cada tratamento (dados não apresentados). Durante o monitoramento das emissões de N_2O , amostras de solo foram coletadas em 9 pontos da parcela em cada evento de coleta, na profundidade de 0-0,1 m. Nas amostras de solo úmido foi determinado os teores de nitrogênio mineral (NH_4^+ e NO_3^-), após extração com KCl 1 M e destilação conforme metodologia descrita em Keeney e Nelson (1982). A umidade gravimétrica foi obtida através da secagem das amostras a 105°C por 24 horas. O espaço poroso saturado por água (% EPSA) foi calculado com base nos resultados do conteúdo gravimétrico de água e os valores de densidade do solo conforme descrito em Allen et al. (2010).

3.4.5 Análise estatística dos dados

Os dados obtidos da emissão acumulada de N₂O nas 27 coletas no primeiro ano e 35 coletas no segundo ano foram submetidos à análise de variância de acordo com o modelo matemático do delineamento inteiramente casualizado dado por: $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$, no qual Y_{ij} é o valor observado do gás na parcela ij , μ é a média geral, τ_i é o efeito do tratamento i ($i = 0$ N, 40 N, 80 N e 120 N) na repetição j ($j = 1, 2, 3$) e ε_{ij} é o efeito do erro experimental suposto normal e independentemente distribuído com média zero e variância comum σ^2 (Storck et al., 2006). Posteriormente, as médias foram comparadas por meio do teste de análise de regressão. A emissão acumulada dos gases foi calculada da seguinte forma: $((E_{ca} + E_{cp}) / 2) \times T_c + E_{acc}$, sendo que E_{ca} é a emissão dos gases da coleta anterior, E_{cp} é a emissão dos gases da coleta posterior, T_c é o intervalo entre as duas coletas (dias), E_{acc} é a emissão acumulada do período anterior. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software SISVAR e do aplicativo Office Excel.

3.5 Resultados

3.5.1 Produtividade de colmos de cana-de-açúcar

A produtividade de colmos de cana-de-açúcar nos ciclos de cana-planta e cana-soca aumentou com o incremento das doses de N (Figura 1A) (Figura 2A). No entanto, o aumento na produtividade de colmos nos dois ciclos decresceu com o aumento da dose de N utilizada. Na média dos dois ciclos os incrementos na produtividade de colmos a cada incremento de 40 kg de N ha⁻¹ na dose aplicada foi de 22, 9 e 2,6 Mg ha⁻¹, respectivamente, nos tratamentos 40N, 80N e 120N.

O acúmulo de N nos colmos diferiu entre os ciclos de cana planta e soca (Figura 1B) (Figura 2B). Enquanto no ciclo de cana planta a resposta à adubação nitrogenada foi quadrática no ciclo de cana-soca ela foi linear. Observa-se que a quantidade de N acumulada nos colmos na dose 0N foi de 115 kg ha⁻¹ na cana-planta e 150 kg ha⁻¹ na cana-soca, aumentando, por exemplo, para 253 e 254 kg ha⁻¹ na dose 80N, respectivamente. Subtraindo da quantidade de N acumulada da dose de 80N o N acumulado na dose 0N, constata-se que a quantidade de N nos colmos superou aquela aplicada com a dose de 80N. Na figura (Figura 1,

2B), o coeficiente da reta ($1,2693X$) indica que para cada 10 kg de N aplicado foram acumulados aproximadamente 12,6 kg de N nos colmos.

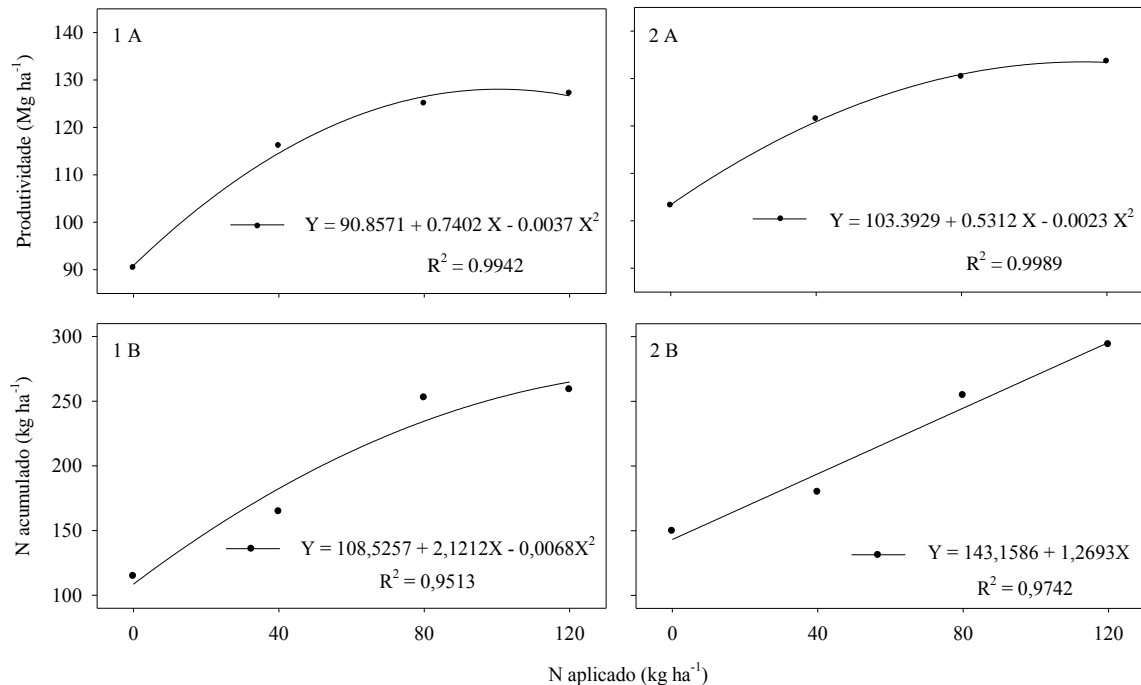


Figura 1. Relação entre produtividade (A), quantidade de N acumulado na matéria seca (B) e doses de N aplicadas em solo arenoso em dois anos de cultivo com cana-de-açúcar (1) cana planta, (2) cana soca.

3.5.2 Nitrogênio mineral e espaço poroso do solo saturado por água

Os tratamentos não influenciaram os valores de EPSA os quais variaram de 42,9 a 67,1% durante as avaliações no ciclo de cana-planta e de 41,9 a 73,3% no ciclo de cana-soca (Figura 2A). Os valores de EPSA foram dependentes das precipitações ocorridas no período (Figura 2A). Maiores valores de EPSA foram observados após os eventos pluviométricos de maior intensidade.

A concentração de NH_4^+ e NO_3^- no início das avaliações foram semelhantes entre os tratamentos (Figura 2B) (Figura 2C). Em todas as avaliações realizadas as concentrações de NH_4^+ e NO_3^- no tratamento 0N foram $<5,9$ e $<9,3$ mg kg⁻¹, respectivamente, com pouca variação durante o períodos de avaliações. Nos tratamentos com N, os maiores valores de NH_4^+ e NO_3^- foram observados no período após a aplicação da ureia, quando foi observado

diferenças entre os tratamentos. De maneira geral e principalmente no ciclo de cana-soca o aumento de N mineral ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) no solo tendeu ser proporcional às doses de N aplicadas.

Nos dois anos a concentração de NH_4^+ no solo dos tratamentos 40N, 80N e 120N decresceu rapidamente após a aplicação do N-ureia (Fiura 2B). Paralelamente ao decréscimo dos teores de NH_4^+ observou-se um aumento na concentração de NO_3^- no solo. A dinâmica da concentração de NO_3^- no solo foi distinta entre os ciclos cana-planta e cana-soca. No primeiro ciclo, os valores de NO_3^- no solo reduziram rapidamente após a primeira aplicação de N em cobertura e se mantiveram elevados por maior período de tempo após a segunda aplicação de N. Já no segundo ciclo (cana-soca), ocorreu o inverso em que os valores de NO_3^- no solo se mantiveram mais elevados após a primeira aplicação de N-ureia.

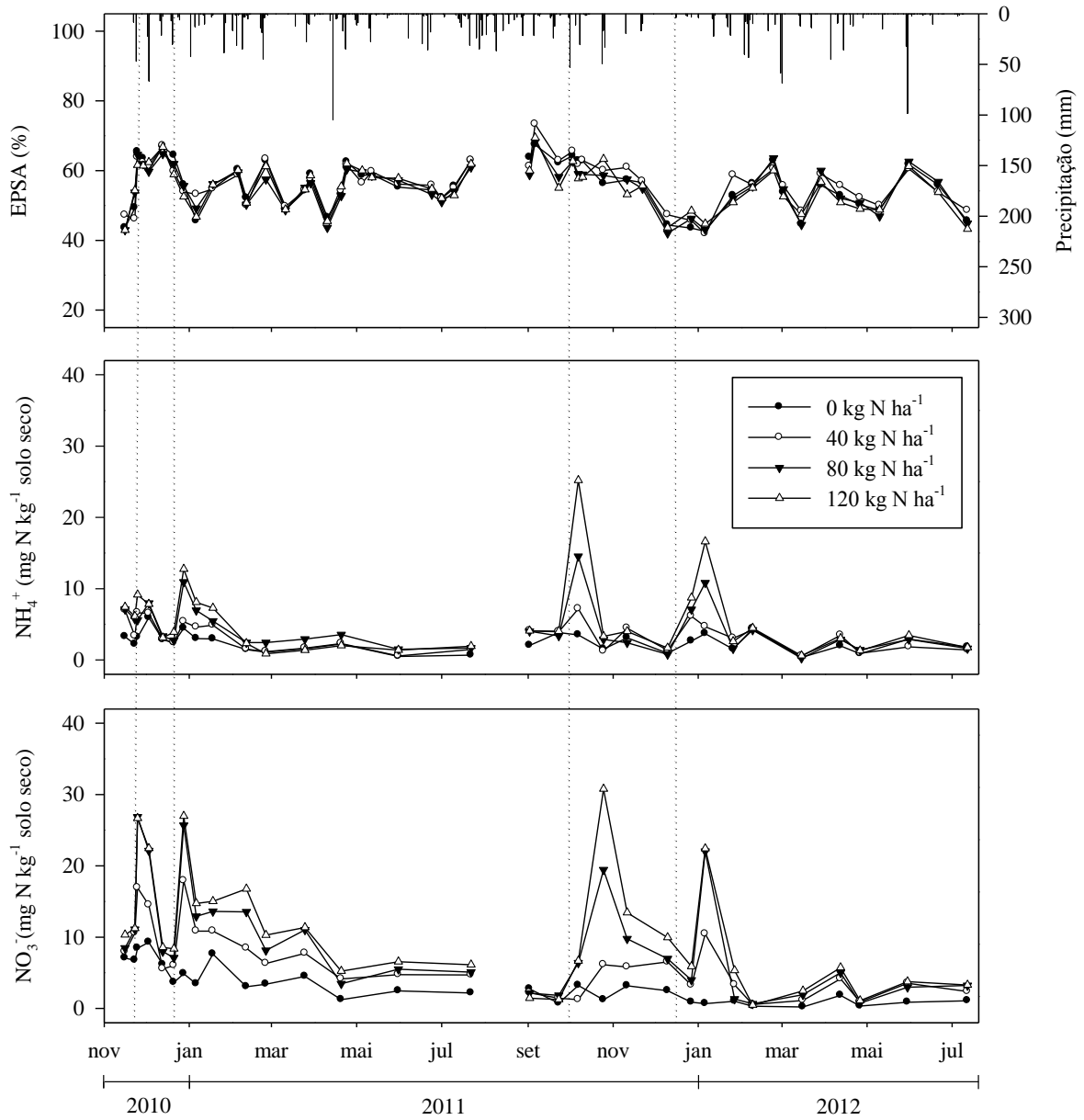


Figura 2. EPSA (A), NH_4^+ (B) e NO_3^- (C) para diferentes doses de N aplicados em cobertura em solo arenoso em dois anos de cultivo com cana-de-açúcar. As linhas pontilhadas indicam o momento da aplicação de N durante a época de cultivo da cana-de-açúcar.

3.5.3 Fluxos de N₂O e CH₄

Os fluxos de N₂O no tratamento 0N nos dois ciclos variaram entre 1,5 a 73,6 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Figura 3A) com média de 17,8 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ no ciclo de cana-planta e de 13,2 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ no ciclo de cana-soca. Os maiores fluxos no 0N foram observados após a ocorrência de precipitações e elevados valores de EPSA (Figura 3A).

Os fluxos de N₂O aumentaram dentro de poucos dias após a aplicação de N (Figura 3A), sendo que nos dois ciclos de cultivo da cana o efeito da primeira aplicação de N foi maior do que o da segunda aplicação. Enquanto na menor dose de N (40N) o efeito sobre as emissões foi mais pronunciado nos primeiros 15 dias após a aplicação de N nas demais doses esse efeito se manteve por aproximadamente 30 dias. Considerando apenas os tratamentos 80N e 120N os quais apresentaram as maiores diferenças em relação ao tratamento 0N obteve-se nos primeiros 30 dias após a aplicação de N no ciclo de cana-planta um fluxo médio de N₂O de 80 e 116 mg de N-N₂O $\text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$, respectivamente. Já na segunda aplicação e mesmo período de tempo os valores foram menores e atingiram 36 e 52 mg de N-N₂O $\text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Comportamento semelhante foi obtido no ciclo de cana-soca. Nesses períodos os maiores fluxos de N₂O estiveram relacionados com a ocorrência de precipitações que provocaram a elevação dos valores de EPSA (Figura 2A).

O fluxo médio de cada tratamento em cada ciclo de cultivo da cana foi proporcional à dose de N aplicada (Figura 4A). O incremento no fluxo médio devido à aplicação de N no ciclo cana-planta foi maior do que no ciclo de cana-soca. Enquanto no primeiro ciclo a cada 10 kg de N ha^{-1} aplicados ocorreu um aumento de 3,70 mg de N-N₂O $\text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ no fluxo médio de N₂O no segundo ciclo esse aumento foi de apenas 1,71 mg de N-N₂O $\text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$.

Os fluxos de CH₄ não foram afetados pelas doses de N utilizadas nos dois ciclos de cana (Figura 3B). Em todas as avaliações realizadas observou-se oxidação (influxo/absorção) de CH₄. O fluxo médio de absorção de CH₄ no ciclo de cana-planta foi aproximadamente duas vezes menor do que no ciclo de cana-soca (-17 vs -30 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

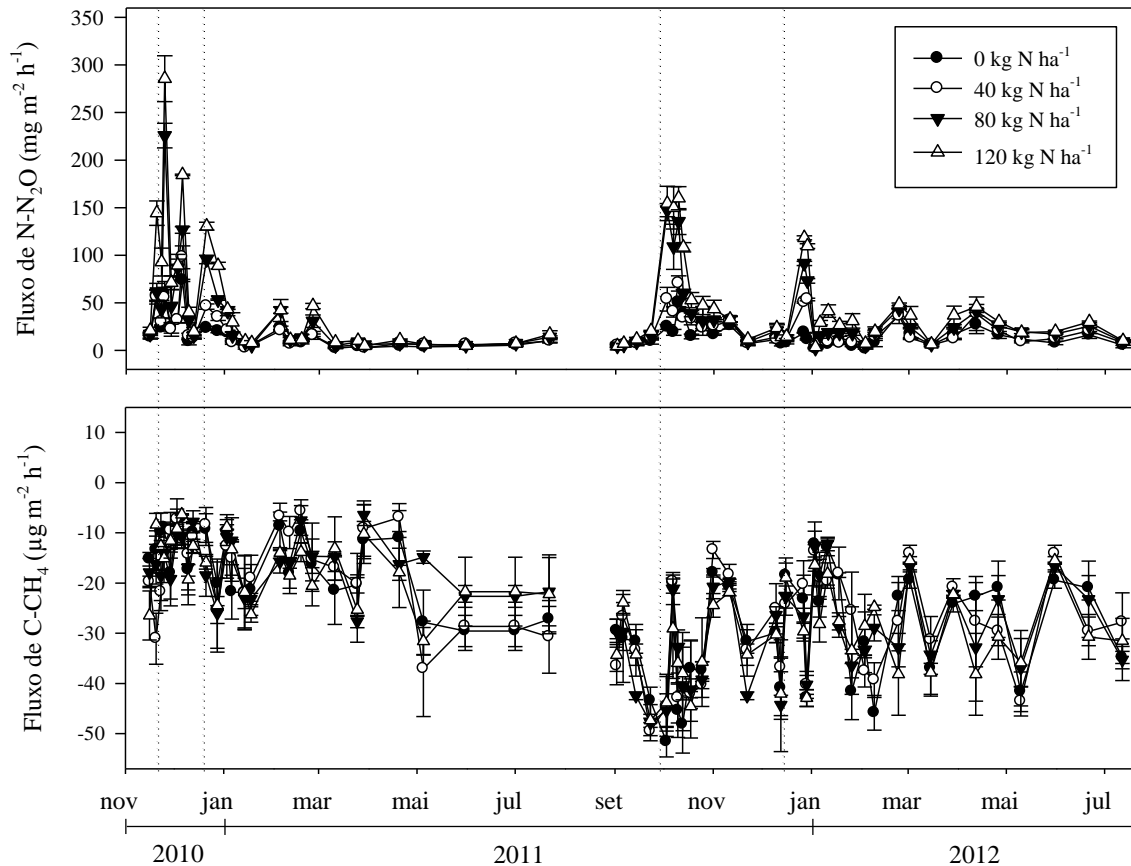


Figura 3. Fluxo de N-N₂O (A) e C-CH₄ (B) para diferentes doses de N aplicados em cobertura em solo arenoso em dois anos de cultivo com da cana-de-açúcar. As linhas pontilhadas indicam o momento da aplicação de N durante a época de cultivo da cana-de-açúcar.

3.5.4 Fluxos cumulativos de N₂O e CH₄

As doses de N aplicadas nos dois ciclos de cultivo da cana aumentaram a quantidade de N₂O emitida até a colheita da cultura (Figura 4A.). Enquanto no ciclo de cana-planta apenas os tratamentos 80N e 120N superaram o tratamento 0N, no ciclo de cana-soca todos os três tratamentos com N superaram a testemunha sem N.

No ciclo cana-planta a emissão cumulativa após a primeira aplicação de N apresentou um comportamento linear seguido de um comportamento curvilíneo tendendo a estabilização

após a segunda aplicação de N. Já no ciclo cana-soca após as duas aplicações de N a dinâmica foi curvilínea, porém sem tender a estabilização após a segunda aplicação de N.

A quantidade de N emitida como N_2O no primeiro ciclo variou de $0,67 \text{ kg ha}^{-1}$ no 0N a $1,78 \text{ kg ha}^{-1}$ no 120N e no segundo ciclo de $1,09 \text{ kg ha}^{-1}$ de 0N a $2,67 \text{ kg ha}^{-1}$ 120N. Após um mês da segunda aplicação de N foram perdidos, na média dos três tratamentos com N, 63% e 55% da quantidade total de N_2O emitida até o final das avaliações no ciclo de cana-planta e cana-soca, respectivamente.

A quantidade de CH_4 oxidada não foi afetada pelas doses de N aplicadas nos dois ciclos de cultivo de cana (Figura 4B). Na média dos quatro tratamentos (0N, 40N, 80N e 120N) a quantidade de CH_4 oxidada foi de $1,14$ e $1,82 \text{ kg de C-CH}_4 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente, no ciclo de cana-planta e cana-soca.

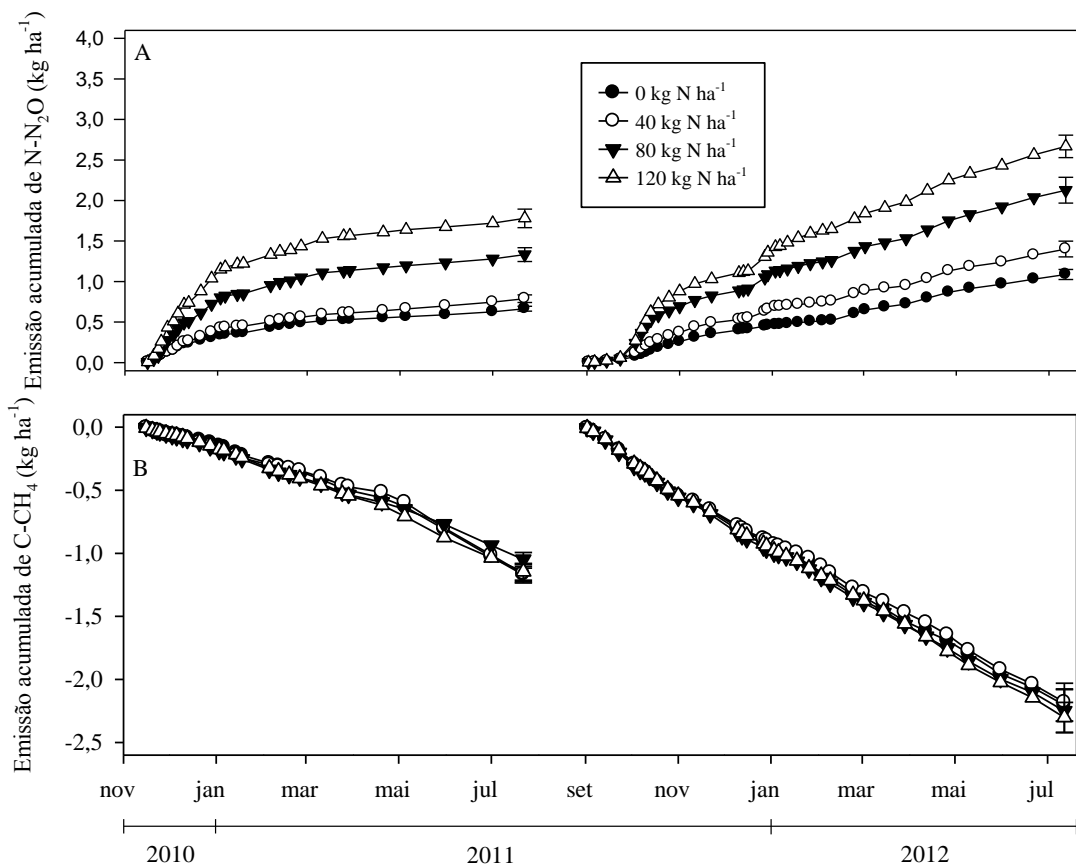


Figura 4. Emissão acumulada de $N-N_2O$ e $C-CH_4$ para diferentes doses de N aplicados em cobertura em solo arenoso em dois anos de cultivo com da cana-de-açúcar.

A relação entre a quantidade total emitida de N_2O e doses de N, nos dois ciclos de cultivo, apresentou um comportamento linear, sendo proporcionais as doses aplicadas (Figura 5A). Na média dos ciclos, para cada 20 kg de N aplicados ocorreu um aumento de 0,28 kg de $N-N_2O$ ha^{-1} na quantidade de N_2O emitida. A relação entre N_2O emitido e N acumulado nos colmos da cana nas diferentes doses de N também foi ajustada através de um modelo linear. Quando a emissão de N_2O foi relacionada com a produtividade de colmos, observa-se que o modelo não-linear foi o que melhor ajustou aos dados observados.

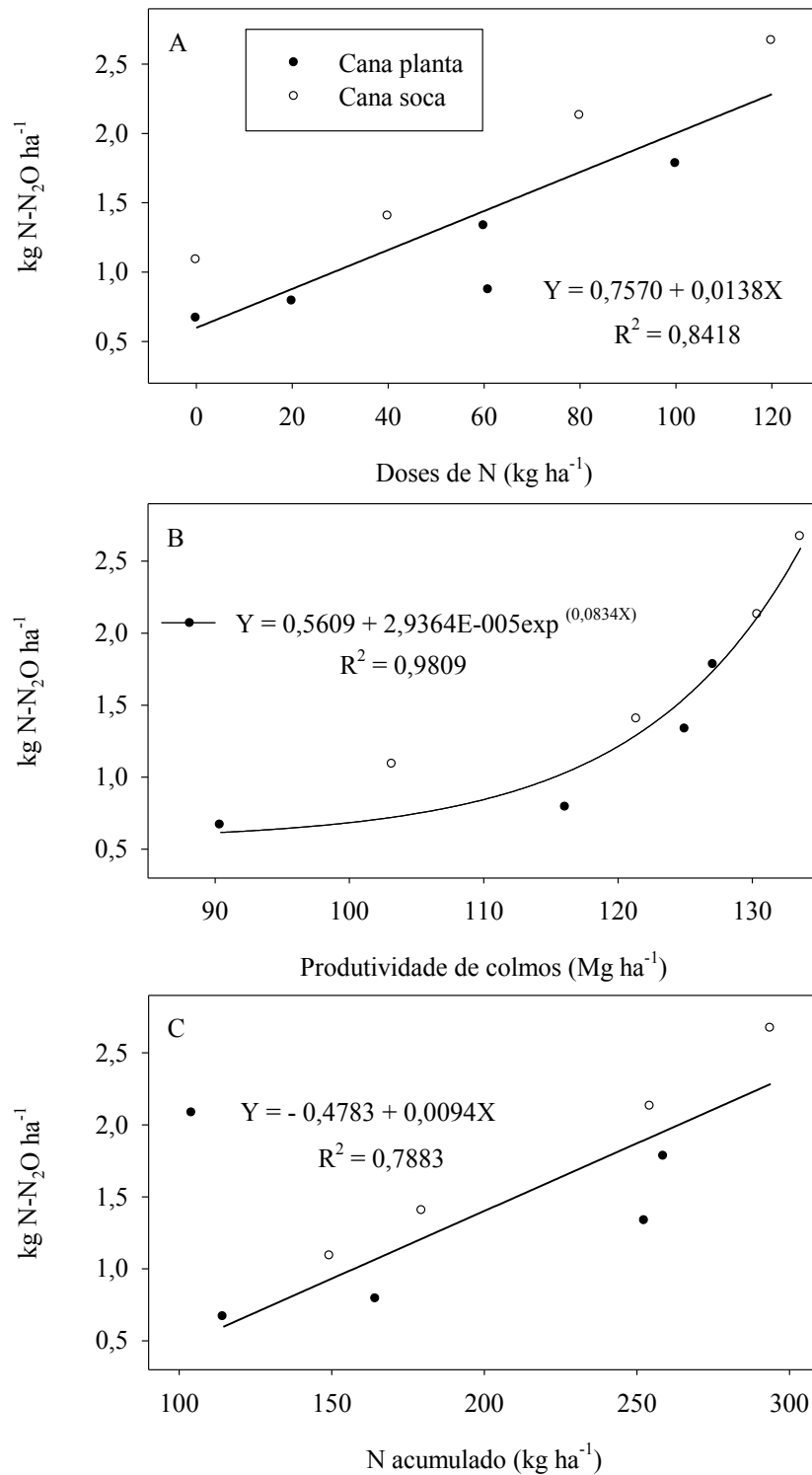


Figura 5. Relação entre emissão acumulada de N-N₂O e doses de N (A), produtividade de colmos (B) e N acumulado na matéria seca (C) em solo arenoso em dois anos de cultivo com cana-de-açúcar.

3.5.4 Fatores de emissão

A partir dos valores de emissão acumulada de N_2O medidos no tratamento testemunha e naqueles que receberam as doses de N foi possível calcular a percentagem do N aplicado em cada dose que foi perdido na forma de N_2O (Tabela 1). Nos dois anos de cultivo da cana a proporção do N aplicado em cada dose foi significativamente inferior no tratamento 40N e não diferiu entre os tratamentos 80N e 120N. No cultivo de cana-planta a percentagem de N perdida no tratamento 40N foi de 0,62% e no cultivo de cana-soca e na mesma dose foi de 0,79%. Já os valores médios de percentagem de N perdido na forma de N_2O nos tratamentos 80N e 120N foram de 1,11% e 1,31%, respectivamente, na cana-planta e cana-soca. Quando considerada a emissão de N_2O por unidade de N absorvida e colmos produzida observa-se valores próximos para essa relação entre as doses 0N e 40N, porém nas doses 80N e 120N a emissão aumenta significativamente.

Tabela 1. Fator de emissão (FE) de N- N_2O em função da quantidade de N aplicada (N aplicado) e da quantidade de N absorvida (N absorvido) e da produtividade de colmos (colmos) de cana-de-açúcar sob quatro doses de N.

Tratamento	Cana-planta*			Cana-soca		
	FE N aplicado	FE N absorvido	FE Colmos	FE N aplicado	FE N absorvido	FE Colmos
	%	g N kg ⁻¹ N	g N Mg ⁻¹	%	g N kg ⁻¹ N	g N Mg ⁻¹
0 N		5,81	7,4		7,27	10,6
40 N	0,62	4,80	6,8	0,79	7,80	11,5
80 N	1,11	5,27	10,6	1,30	8,36	16,3
120 N	1,11	6,88	14,0	1,32	9,08	20,0

*no ciclo de cana-planta o FE N aplicado (%) foi calculado considerando apenas a quantidade de N aplicada em cobertura (0, 20N, 60N e 100N).

3.6 Discussão

3.6.1 Efeito da adubação nitrogenada sobre a produtividade da cana-de-açúcar

Ao contrário do observado em outros países produtores de cana-de-açúcar, no Brasil os resultados demonstram que a cultura apresenta baixa resposta a adubação nitrogenada. Enquanto doses de 150 kg N ha^{-1} são recomendadas em cana na Austrália (Denmead et al., 2010), no Brasil Franco et al. (2010) verificaram que doses de 40 e $60 \text{ kg de N ha}^{-1}$ aplicadas na cana-planta e cana-soca, respectivamente, são mais rentáveis. Comportamento similar foi observado no presente estudo, em que maiores incrementos de produtividade foram obtidos até a dose de 80 kg N ha^{-1} . No entanto, a baixa resposta da produtividade de cana ao N aplicado está em desacordo com a quantidade de N acumulado na biomassa desta cultura. Verificamos que a quantidade de N acumulada nos colmos das parcelas que receberam N superou a quantidade de N aplicada via ureia em cada dose. Através do método da diferença, que considera a recuperação aparente do N aplicado, verifica-se que para as três doses de N a recuperação do N foi acima de 100%. É importante destacar que possivelmente parte do N aplicado com a ureia tenha sido perdida e com isso menor é a quantidade de N disponibilizada via o fertilizante nitrogenado. Tal constatação indica que outras fontes de N contribuem para a quantidade de N acumulada na biomassa da cana e que isso contribui para a menor resposta da produtividade da cana à adubação nitrogenada. Nos últimos anos existe consenso de que alguns genótipos de cana cultivados no Brasil possuem importante contribuição da fixação assimbiótica de N (Boddey et al., 2001) para a quantidade total de N acumulada na biomassa. Estudo realizado por Boddey et al. (2001) verificou que a fixação de N pode contribuir com até 60% do N para a cultura.

3.6.2 Efeito da adubação nitrogenada sobre a emissão de CH_4 e N_2O

Nossos resultados demonstram que durante o cultivo da cana-planta e soca o solo funcionou sempre como um dreno de CH_4 , não sendo observado nenhum efeito das diferentes doses de N sobre a produção desse gás. A oxidação de CH_4 é comumente relatada em condições de solos de sequeiro (Wang & Zheng, 2012), como a do presente estudo. Nessas condições bactérias aeróbicas metanotróficas utilizam o CH_4 como fonte de C e energia, conduzindo a oxidação do CH_4 até CO_2 . Resultados de pesquisa apontam que a aplicação de N no solo tem inibido (Wang & Ineson 2003), estimulado (Weier, 1999) ou não tem nenhum efeito (Wang & Zheng, 2012) sobre a oxidação de CH_4 . Em função das similaridades fisiológicas, bioquímicas e ecológicas entre bactérias oxidadoras de CH_4 e NH_3 é postulado a

existência de uma competição entre essas bactérias, o que poderia afetar as taxas de oxidação de CH_4 . Essa competição ocorre devido tais bactérias possuírem a mesma enzima, mono monooxigenase, a qual oxida o NH_3 nas oxidantes de amônia e o CH_4 nas metanotróficas. Assim, com um aumento da disponibilidade de N amoniacal no solo as bactérias metanotróficas poderiam ser estimuladas a oxidar o NH_3 ao invés do CH_4 . Tal situação poderia resultar em menores taxas de oxidação de CH_4 para a atmosfera. No entanto o efeito do N sobre a oxidação de CH_4 em solos não é claro e principalmente em regiões com o cultivo de cana-de-açúcar.

A aplicação de N na cana-de-açúcar provocou um aumento na emissão de N_2O nos ciclos de cana-planta e soca da cultura. Os fluxos de N_2O variaram entre os tratamentos nos dois ciclos e em geral a variação dos fluxos foi maior nos primeiros meses após a aplicação de N em cobertura (Figura 3A). Nesses períodos os maiores fluxos de N_2O ocorreram logo após as precipitações mais intensas. O aumento da umidade do solo pelas precipitações elevou os valores de EPSA para acima de 60% que de acordo com Aulakh et al. (1992), essa condição favorece o aparecimento dos maiores picos de emissão de N_2O . Também no início do desenvolvimento e crescimento da cultura, tanto a cana planta quanto a cana soca, os teores de carbono do solo provavelmente estavam em níveis mais elevados. Rice e Smith (1982) relataram que o aumento da umidade e teores de N do solo ao invés do preparo do solo, foram os principais fatores responsáveis na atividade desnitrificadora por microrganismos do solo. A alternância entre dias secos e chuvosos deve ter potencializado as perdas de N na forma de N_2O porque nos períodos sem chuva as condições aeróbias favorecem o processo de nitrificação do N aplicado, formando nitrato, o qual pode ser utilizado posteriormente, em condições de baixa disponibilidade de O_2 , como receptor de elétrons pelas bactérias anaeróbicas facultativas responsáveis pelo processo de desnitrificação.

Efeitos da adição de fertilizantes sobre o fluxo de N_2O têm sido estudados em solos agrícolas subtropicais, incluindo a cultura da cana de açúcar (Matson et al., 1996; Weier et al., 1998; Weier, 1998, 1999; McSwiney e Robertson, 2005; Pattey et al., 2007; Denmead et al., 2009). Embora uma vasta gama de manejo de fertilizantes nitrogenados (tipo, quantidade, método de aplicação) são utilizados na cultura da cana de açúcar no Brasil, poucos estudos analisaram as emissões de N_2O a partir desses fertilizantes. Atualmente não está claro como os fertilizantes nitrogenados afetam as emissões de N_2O na cultura da cana de açúcar. Nossos resultados mostraram variações nos fluxos de N_2O em todos tratamentos, com maiores emissões de N_2O registrado nos 2 primeiros meses após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Do mesmo modo, Weitz et al. (2001) verificaram que as emissões de N_2O são

comumente elevadas durante as primeiras semanas após a aplicação de fertilizantes nitrogenados e são seguidas por declínio após esse período. No entanto, Matson et al. (1996) verificaram elevados fluxos de N_2O mesmo após longos períodos da aplicação de fertilizantes nitrogenados. No presente estudo, após 40 dias da primeira aplicação de N no primeiro ano e 87 dias após a primeira aplicação de N no segundo ano, os fluxos de N_2O reduziram em todos os tratamentos, sendo observadas baixas emissões de N_2O mesmo após eventos de chuva. Tal resultado ocorreu possivelmente devido à redução na disponibilidade de N mineral e carbono no solo nesse período que diminuiu a fonte de energia aos microrganismos e sua atividade no solo e conseqüentemente a emissão de N_2O .

O estudo mostrou que os fluxos no tratamento 100N e 120N sempre superaram aqueles medidos nos tratamentos com menores doses de N aplicados em cobertura. A emissão acumulada de N_2O no tratamento 0N, 20N e 60N foi 24, 21 e 10% inferior àquela apresentada pelo tratamento 100 N no primeiro ano. Já no segundo ano a emissão acumulada de N_2O no tratamento 0N, 40N e 80N foi 22, 18 e 7% inferior àquela apresentada pelo tratamento 120N. Este resultado pode ser atribuído ao aumento da disponibilidade de N no solo devido à realização da adubação nitrogenada de cobertura na cana de açúcar. As altas doses de N provavelmente superaram a demanda em N da cultura e o excedente do N deve ter ficado disponível aos microrganismos que dependendo das condições do meio, esse N pode ser transformado a formas gasosas como N_2O .

O tipo de regressão que melhor expressou a relação entre emissão acumulada de N_2O e as doses de N aplicadas em cobertura na cana-planta e soca foi a linear, indicando que a emissão acumulada de N_2O aumenta conforme o aumento da dose de N utilizada (Fig. 2A). Da mesma forma, Halvorson et al. (2008) encontraram um aumento linear das emissões de N_2O em resposta a três doses de N aplicadas no milho sob irrigação, no Colorado. Hoben et al. (2011) relatam que a resposta das emissões de N_2O à seis doses de N (0 a 225 kg N ha⁻¹) aplicadas no milho variaram em função do local e do ano em que o estudo foi realizado, mas que a análise conjunta dos resultados indicou que a resposta das emissões a aplicação de N foi melhor descrita com equações não-lineares. Respostas não-lineares das emissões de N_2O à doses de N normalmente são observados em estudos que avaliam um maior número de doses de N (>3) e que avaliem doses de N acima da demanda em N pela cultura (Mcsweeney e Robertson, 2005; Hoben et al., 2011).

Quando a quantidade de N_2O emitida foi relacionada com a quantidade de N acumulada nos colmos essa relação também foi descrita através de um modelo linear. No entanto, quando a quantidade de N_2O emitida foi relacionada com a produtividade de colmos

foi observado que essa relação foi descrita através de uma equação não-linear. Tal resultado indica que o aumento da produtividade não é proporcional à emissão de N_2O e que acima de um nível de produtividade incrementos na produção de colmos de cana-de-açúcar serão obtidos somente com elevada emissão de N_2O . Mcswiney e Robertson (2005) também observou relação não-linear entre a emissão de N_2O e a produtividade de milho sob diferentes doses de N. Na literatura consultada não foram encontrados trabalhos que relacionam a produtividade de colmos de cana e a emissão de N_2O . Essa condição deve estar relacionada à baixa resposta de produtividade de cana-de-açúcar à adubação nitrogenada conforme discutido inicialmente. Com isso, por exemplo, doses de N acima de 80 kg ha^{-1} aplicadas na cana-de-açúcar contribuirão pouco para o incremento na produção de colmos, no entanto terão elevado impacto na quantidade de N_2O emitida para a atmosfera.

3.6.3 Efeito da fertilização nitrogenada sobre os fatores de emissão de N_2O

As estimativas do relatório IPCC (IPCC, 2006) assumem um fator de emissão de 1,25% sobre adubação nitrogenada em relação a emissão de N_2O . Comparando esse valor aos obtidos no presente estudo pode-se dizer que o mesmo está superestimado para doses de N $<40 \text{ kg ha}^{-1}$ e está próximos aos valores medidos nas doses de N $>60 \text{ kg ha}^{-1}$. Por isso, dadas as diferenças existentes entre condições de clima, tipos de resíduos e condições de manejo, ainda existe um grande grau de incerteza para os fatores de emissão de N_2O propostos (Lesschen et al., 2011) e isso faz com que as emissões de N_2O necessitem de quantificações em nível regional. Os nossos resultados com doses acima de 60 kg N ha^{-1} está no limite inferior da faixa relatada em estudos realizados na Austrália na cultura da cana de açúcar, que observaram fatores de emissão entre 1,31% e 21% (Weier, 1999; Denmead et al., 2007, 2008, 2009; Wang et al., 2008; Macdonald et al., 2009).

Nos últimos anos é crescente o uso de fatores de emissão baseados em dados de produtividade das culturas, como por exemplo, g de N- $N_2O \text{ kg}^{-1}$ de N acumulado ou g de N- $N_2O \text{ Mg}^{-1}$ de grãos (Mcswiney e Robertson, 2005; Hoben et al., 2011). Na literatura não foram encontradas informações sobre esse tipo de análise na cultura da cana-de-açúcar. Nossos resultados demonstram que a quantidade de N emitida por kg de N acumulado nos colmos varia pouco entre as doses de N testadas. Possivelmente, esse resultado deva estar relacionado ao fato de que a cana-de-açúcar acumula quantidade de N superior aplicada com

o fertilizante conforme demonstrado em nosso estudo. Já o fator de emissão baseado na produtividade da cana, indica que para produtividades de colmos obtidas até a dose de 40 kg N ha⁻¹ o valor de N₂O emitido por Mg de colmos se mantém estável e para produtividades acima desta dose ocorre um incremento significativo nessa relação. Tal resultado deve-se possivelmente à baixa resposta da produtividade de colmos à adubação nitrogenada. Nessa situação o incremento da dose de N não resulta em aumentos significativos de produtividade. No entanto, um incremento na quantidade de N aplicado tem forte reflexo sobre a emissão de N₂O.

No Brasil, mesmo as pesquisas indicarem uma baixa resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada é comum o uso de elevadas doses de N nessa cultura. Nosso trabalho demonstrou que elevadas doses de N aplicados na cultura da cana-de-açúcar, resultam em incrementos na produtividade, porém aumentam enormemente a quantidade de N₂O emitida. Desta forma a redução da dose de N aplicada na cana, deve contribuir para tornar o balanço energético ainda mais positivo na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.

3.7 Conclusões

1. Durante o cultivo da cana-planta e soca, o solo promoveu a oxidação de CH₄ funcionando como um dreno deste gás, sem ter sido influenciado pela adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar;
2. A emissão de N₂O aumenta linearmente com as doses de N aplicadas na cultura. Na média dos ciclos de cana planta e soca para cada 20 kg N ha⁻¹ aplicados, são emitidos 0,28 kg N-N₂O ha⁻¹.
3. Os valores dos fatores de emissão de N₂O calculados com base na metodologia do IPCC para as condições do presente estudo indicam que para doses menores que 40 kg N ha⁻¹ os valores obtidos estão abaixo do valor padrão de 1,25%. Para doses acima de 60 kg N ha⁻¹ os valores dos fatores obtidos são semelhantes ao indicado pelo IPCC.
4. Fatores de emissão baseado na relação entre a emissão de N₂O e a produtividade de colmos, indicam que incrementos de produtividades de colmos obtidas com doses acima de 40-60 kg N ha⁻¹ irão apresentar elevada quantidade de N₂O emitida por Mg de colmo produzida.

3.8 Literatura citada

- Allen, D.E., Kingston, G., Rennenberg, H., Dalal, R.C., Schmidt, S., 2010. Effect of nitrogen fertilizer management and waterlogging on nitrous oxide emission from subtropical sugarcane soils. *Agriculture Ecosystems & Environment* 136, 209-217.
- Aulakh, M.S., Doran, J.W.E., Mosier, A.R., 1992. Soil denitrification-significance, measurement, and effects of management. *Advanced Soil Science*, 18, 1-57.
- Bouwman, A.F., 1990. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. In: Bouwman AF (ed) *Soils and the greenhouse effect*. Wiley, England, 61-127.
- Boddey, R.M.; Polidoro, J.C.; Resende, A.S.; Alves, B.J.R. & Urquiaga, S. Use of ¹⁵N natural abundance technique for the quantification of the contribution of N₂ fixation to sugar cane and others grasses. *Australian Journal of Agricultural Research*, v.28, p.889-895, 2001.
- CQFS-RS/SC. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre: SBCS-NRS, 2004, 400 p.
- Crutzen, P.J., 1981 Atmospheric chemistry processes of the oxides of N, including N₂O. In: Delwiche CC (ed) *Denitrification, nitrification and atmospheric nitrous oxide*. 17-44.
- Denmead, O.T., Macdonald, B.C.T., Bryant, G., Taylor, T., Wilson, S., Griffith, D.W.T., Wang, W.J., Salter, D., White, I., Moody, P.W., 2009. Emissions of methane and nitrous oxide from Australian sugarcane soils. *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 748-756.
- Denmead, O.T., Macdonald, B.C.T., Bryant, G., Wang, W., White, I., Moody, P., 2007. Greenhouse gas emissions from sugarcane soils and nitrogen fertiliser management: II. In: *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 29, 97-105.
- Denmead, O.T., Macdonald, B.C.T., Naylor, T., Wang, W., Salter, B., White, I., Wilson, S., Griffith, D.W.T., Moody, P., 2008. Whole-of-season greenhouse gas emissions from Australian sugarcane soils. In: *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 30, 105-113.
- Denmead O.T., Macdonald, B.C.T., Bryant G. et al., 2010. Emissions of methane and nitrous oxide from Australian sugarcane soils. *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 748-756.
- EMBRAPA/CNPS. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2.ed. Brasília: Embrapa, 2006, 306 p.

- Faostat. 2008. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>> Acesso em 18 maio 2011.
- Franco, H.C.J., Trivelin, P.C.O., Faroni, C.E., Vitti, A.C., Otto, R., 2010. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. *Scientia Agricola* 67, 579-590.
- Halvorson, A.D., del Grosso, S.J., Reule, C.A., 2008. Nitrogen, tillage, and crop rotation effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems. *Journal of Environmental Quality* 37, 1337-1344.
- Hoben, J.P., Gehl, R.J., Millar, N., Graces, P.R., Robertson, G.P., 2011. Nonlinear nitrous oxide (N₂O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest. *Global Change Biology* 17, 1140-1152.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012. IBGE Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Rio de Janeiro 25, 1-88.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Uses. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Kanagawa, Japan.
- IPCC, 2007. Climate change 2007: the physical science basis. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Milier, H.L. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA.
- Jantalia, C.P., Santos, H.P. dos, Urquiaga, S.B., Robert M.A., Bruno J.R., 2008. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 82, 161-173.
- Keeney, D.R., Nelson, D.W., 1982. Nitrogen-inorganic forms. In: Page, A.L., et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monographs* 9, second ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, 643-693.
- Lesschen, J. P., et al., 2011. Differentiation of nitrous oxide emission factor for agricultural soils. *Environmental Pollution* 159, 3215-3222.
- Macdonald, B.C.T., Denmead, O.T., White, I., Naylor, T., Salter, B., Wilson, S.R., Griffith, D.W.T., 2009. Emissions of nitrogen gases from sugarcane soils. In: *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 31, 85-92.
- Matson, P.A., Billow, C., Hall, S., 1996. Fertilization practices and soil variations control nitrogen oxide emissions from tropical sugar cane. *Journal of Geophysical Research* 101, 18533-18545.
- McSwiney, C.P., Robertson, G.P., 2005. Nonlinear response of N₂O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system. *Global Change Biology* 11, 1712-1719.
- Moreno, J.A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura. Diretoria de Terras e Colonização. Secção de Geografia, 1961. 46p.

- Mosier, A., Wassmann, R., Verchot, L., King, J., Palm, C., 2004. Methane and nitrogen oxide fluxes in tropical agricultural soils: sources, sinks and mechanisms. *Environment, Development and Sustainability* 6, 11-49.
- Pattey, E., Edwards, G.C., Desjardins, R.L., Pennock, D.J., Smith, W., Grant, B., MacPherson, J.I., 2007. Tools for quantifying N₂O emissions from agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 142, 103-119.
- Rice, C.W., Smith, M.S., 1982. Denitrification in no-till and plowed soils. *Soil Science Society of America Journal* 46, 1168-1173.
- Rodhe, H., 1990. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse. *Science* 248, 1217-1219.
- Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 338p.
- Storck, L.; Garcia, D.C.; Lopes, S.J.; Estefanel, V. *Experimentação vegetal*. Santa Maria: UFSM, 198p. 2006.
- Urquiaga, S et al., 2003. Avaliação da eficiência do processo de FBN em diferentes variedades de cana-de-açúcar. *Agronomia* 37, 55-58.
- Wang, C.L.K., Zheng, X., 2012. Responses of N₂O and CH₄ fluxes to fertilizer nitrogen addition rates in an irrigated wheat-maize cropping system in northern China. *Biogeosciences*, 9, 839-850.
- Wang, Z.P., Ineson, P., 2003. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. *Soil Biology & Biochemistry* 35, 427-433.
- Wang, W.J., Moody, P.W., Reeves, S.H., Salter, B., Dalal, R.C., 2008. Nitrous oxide emissions from sugarcane soils: effects of urea forms and application rate. In: *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 30, 87-94.
- Weier, K.L., 1998. Sugarcane fields: sources or sinks for greenhouse gas emissions? *Australian Journal of Agricultural and Research*. 49, 1-9.
- Weier, K.L., 1999. N₂O and CH₄ emission and CH₄ consumption in a sugarcane soil after variation in nitrogen and water application. *Soil Biology & Biochemistry* 31, 1931-1941.
- Weier, K.L., Rolston, D.E., Thorburn, P.J., 1998. The potential for N losses via denitrification beneath a green cane trash blanket. In: *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 20, 169-175.
- Weitz, A.M., Linder, E., Frohling, S., Crill, P.M., Keller, M., 2001. N₂O emissions from humid tropical agricultural soils: effects of soil moisture, texture and nitrogen availability. *Soil Biology and Biochemistry* 33, 1077-1093.
- Zebarth, B. J., Rochette, P., Burton, D. L., 2008. N₂O emissions from spring barley production as influenced by fertilizer nitrogen rate. *Canadian Journal of Soil Science*. 88, 197-205.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGERS, D.A., et al. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen in cool, humid soils of eastern Canada. **Soil and Tillage Research** 41, 191-200. 1997.

BALESDENT, J., CHENU, C., BALADANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research** 53, 215-230. 2000.

BALL, B., CRICHTON, I., HORGAN, G. Dynamics of upward and downward N₂O and CO₂ fluxes in ploughed or no-tilled soils in relation to water-filled pore space, compaction and crop presence. **Soil and Tillage Research** 101, 20-30. 2008.

BALL, B.C. et al. The influence of gas transport and porosity on methane oxidation in soils. **Journal of Geophysical Research** 102, 23301-23308. 1997.

BALL, B.C., SCOTT, A., PARKER, J.P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. **Soil & Tillage Research** 53, 29-39. 1999.

BRELAND, T.A., HANSEN, S. Nitrogen mineralisation and microbial biomass as affected by soil compaction. **Soil Biology and Biochemistry** 28, 655-663. 1996.

CHOUDHARY, H.A. et al. Nitrous oxide emissions from New Zealand cropped soil; tillage effects, spatial and seasonal variability. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 93, 33-43, 2002.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira : cana-de açúcar, segundo levantamento, agosto/2012** - Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: Conab 2012.

CRUTZEN, P.J. Atmospheric chemistry processes of the oxides of N, including N₂O. In: Delwiche CC (ed) Denitrification, nitrification and atmospheric nitrous oxide. 17-44, 1981.

DAVIDSON, E.A. Sources of nitric oxide and nitrous oxide following wetting of dry soil. **Soil Science Society of America Journal** 56, 95-102. 1992.

ELDER, J.W., LAL, R. Tillage effects on gaseous emissions from an intensively farmed organic soil in North Central Ohio. **Soil and Tillage Research** 98, 45-55. 2008.

FANG, H.J., YANG, X.M., ZHANG, X.P. The progress of study on soil organic carbon dynamics in cropland. **Chinese Journal of Soil Science** 34, 562-568. 2003.

GOLDEMBERG, J., COELHO, S.T., GUARDABASSI P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy** 2008 36, 2086-2097, 2008.

GRANLI, L., BOCKMAN, O.C., Nitrous oxide from agriculture. **Norwegian Journal of Agricultural Sciences Suppl.** 12, 1-128. 1994.

GREGORICH, E.G., et al. Tillage effects of N₂O emission from soils under corn and soybeans in Eastern Canada. **Can. Journal of Soil Science** 88, 153-161. 2008.

HASSINK, J. Effects of soil texture and structure on carbon and nitrogen mineralization in grassland soils. **Biology and Fertility of Soils** 14, 126-134. 1992.

HOUGHTON, J.T., JENKINS, G.J., EPHRAUMS, J.J. Climate change: the IPCC Assessment. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. 1990.

HÜTSCH, B.W. Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop production-invited paper. **European Journal of Ageing** 14, 237-260. 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro 25, 1-88. 2012.

IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Milier, H.L. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA. 2007.

MCSWINEY, C.P., ROBERTSON, G.P. Nonlinear response of N₂O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system. **Global Change Biology** 11, 1712-1719. 2005.

MITRA, S., et al. Properties of rice soils affecting methane production potentials: 1. Temporal patterns and diagnostic procedures. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 64, 169-182. 2002.

MOSIER, A., et al. Methane and nitrogen oxide fluxes in tropical agricultural soils: sources, sinks and mechanisms. **Environment, Development and Sustainability** 6, 11-49. 2004.

MUMMERY, D.L., SMITH, L.J., BLUM, G. Assessment of alternative soil management practices on N₂O emissions from US agriculture. **Agriculture Ecosystems and Environment** 70, 79-87. 1998.

OECD. Environmental indicators for agriculture methods and results. Executive summary. Paris. 2000.

OMONODE, R.A., et al. Soil carbon dioxide and methane fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn-soybean rotations. **Soil and Tillage Research** 95, 182-195. 2007.

PASSIANOTO, C.C., et al. Emissions of CO₂, N₂O, and NO in conventional and no-till management practices in Rondônia, Brazil. **Biology and Fertility of Soils** 38, 200-205. 2003.

ROCHETTE, P. No-till only increases N₂O emissions in poorly aerated soils. **Soil and Tillage Research** 101, 97-100. 2008.

RODHE, H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse. **Science** 248, 1217-1219. 1990.

RUSER, R., et al. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. **Soil Biology and Biochemistry** 38, 263-274. 2006.

SIX, J., et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effect of no-tillage. **Agronomie** 22, 755-775. 2002.

THOMAS, S.M., et al. Winter grazing of forages-soil moisture and tillage methods impact nitrous oxide emissions and dry matter production. **Proceedings of the New Zealand Grassland Association** 66, 135-140. 2004.

USSIRI, D.A.N., LAL, R., JARECKI, M.K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. **Soil and Tillage Research** 104, 247-253. 2009.

VAN VEEN, J.A., KUIKMAN, P.J. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by microorganisms. **Biogeochemistry** 11, 213-233. 1990.

VENTEREA, R.T., BURGER, M., SPOKAS, K.A. Nitrogen oxide and methane emissions under varying tillage and fertilizer management. **Journal of Environmental Quality** 34, 1467-1477. 2005.

YI, C., YAN, W.C., GUO, S.J., YU, W.J. Emission and fixation of CO₂ from soil system as influenced by long-term application of organic manure in paddy soils. **Agricultural Sciences in China** 5, 456-461. 2006.

ZEBARTH, B. J., ROCHETTE, P., BURTON, D. L. N₂O emissions from spring barley production as influenced by fertilizer nitrogen rate. **Canadian Journal of Soil Science** 88, 197-205. 2008.