

Emissões de óxido nitroso em solo com cultivo de cana-de-açúcar sobre palhada

Mirya Grazielle Torres Portela¹, Luiz Fernando Carvalho Leite²,
Diana Signor³, Bruno José Rodrigues Alves⁴, Andreia Loviane Silva⁴

¹ Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI, Brasil. E-mail: mirya_grazy@hotmail.com (ORCID: 0000-0001-5605-7151)

² Embrapa Meio Norte, Teresina, PI, Brasil. E-mail: luiz.f.leite@embrapa.br (ORCID: 0000-0001-9648-705X)

³ Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, Brasil. E-mail: diana.signor@embrapa.br (ORCID: 0000-0003-1627-3890)

⁴ Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ, Brasil. E-mail: bruno.alves@embrapa.br (ORCID: 0000-0002-5356-4032); andreia.loviane@embrapa.br (ORCID: 0000-0003-4467-5969)

RESUMO: A queima a cana-de-açúcar na colheita tem contribuído com as emissões de gases do efeito estufa (GEEs), o que instigou a busca por novas formas de manejo menos impactantes ao ambiente, como colheita de cana-de-açúcar sem queima. A pesquisa objetivou avaliar as emissões de óxido nitroso (N_2O) do solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes níveis de palhada e comparar as emissões medidas no campo com as emissões estimadas pelo modelo “DeNitrification – DeComposition” (DNDC). O experimento foi realizado em um Plintossolo Flúvico, utilizando delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, sendo os tratamentos correspondentes aos níveis de palhada (0; 4,19; 9,54; 13,04 e 18,38 $Mg\ ha^{-1}$). As simulações de emissões (modelo DNDC) foram comparadas com as emissões medidas. Os fluxos de N_2O não sofreram efeitos dos níveis de palhada, indicando que as emissões independem da quantidade de palhada acumulada sobre o solo na colheita. Nas simulações, observou-se que as maiores emissões foram relacionadas aos tratamentos com maiores níveis de palhada. De modo geral, os índices estatísticos indicaram uma boa precisão nas estimativas de fluxos diários e acumulados, permitindo, dessa forma, a possibilidade de utilização desse modelo para estimar emissões de N_2O do solo sob essas condições.

Palavras-chave: DNDC; GEEs; resíduo vegetal; *Saccharum officinarum* L.

Emissions of nitrous oxide in soil with sugarcane on straw

ABSTRACT: The burning of sugarcane in the harvest has contributed to greenhouse gas (GHGs) emissions, which instigated the search for new forms of management less impacting to environment, such as harvesting sugarcane without burning. The objective of this research was to evaluate the nitrous oxide (N_2O) emissions of the soil under sugarcane in different levels of straw and compare field emissions with emissions estimated by the “DeNitrification - DeComposition” (DNDC) model. The experiment was carry out in a Fluvic Plinthosol, using randomized block design, with four replications, with treatments corresponding to straw levels (0; 4.19; 9.54; 13.04 and 18.38 $Mg\ ha^{-1}$). The emissions simulations (DNDC model) were compare with measured emissions. N_2O fluxes were not affect by straw levels, indicating that the emissions were independent of the amount of straw accumulated on the soil at harvest. In the simulations, it was observed that the higher emissions were relate to the treatments with higher levels of straw. In general, the statistical indices indicated a good precision in the estimates of daily and accumulated flows, thus allowing the possibility of using this model to estimate soil N_2O emissions under these conditions.

Key words: DNDC; GHGs; plant residue; *Saccharum officinarum* L.

Introdução

A agricultura exerce um papel fundamental na economia e nas mudanças climáticas, ao passo que as práticas de manejo e os tipos de colheita exercem grande influência na emissão e na absorção dos gases de efeito estufa (GEEs) (Palatnik & Roson, 2012). Segundo estimativas de emissões de GEEs, no Brasil, os solos agrícolas representaram mais de 95% das emissões de N_2O entre os anos 2000-2005 (Figueiredo & La Scala Junior, 2011; Cerri et al., 2007), sendo os principais emissores desse gás a utilização de fertilizantes nitrogenados e resíduos vegetais deixados sobre o solo.

Nos cultivos de cana-de-açúcar, a prática da queima ainda é utilizada em larga escala e contribui para impactos ambientais negativos. Para mitigar os efeitos dessa prática, tem sido adotado nos últimos anos a colheita da cana-de-açúcar sem a utilização do fogo, que deixa uma espessa camada de palhada depositada sobre o solo, contribuindo para a redução das emissões de GEE (Chaer et al., 2009; Martins Filho et al., 2009; Fernandes et al., 2011; Leal et al., 2013).

Ao se adotar a colheita de cana-de-açúcar sem queima como alternativa para a redução das emissões, há necessidade de identificar a quantidade de palhada que poderá ser retirada para produção de energia ou mantida sobre o solo assegurando a sustentabilidade do sistema produtivo e levando-se em consideração que a decomposição de parte da palhada de cana-de-açúcar ao longo do ciclo da cultura também emite GEEs (Rosseto et al., 2013).

Embora a palhada da cana-de-açúcar tenha potencial para utilização na produção de bioenergia, os efeitos do seu manejo sobre as emissões de GEE do solo ainda são desconhecidos. Na literatura, os estudos realizados com a dinâmica das emissões de gases do solo sob palhada não são conclusivos em relação ao aumento ou redução dessas emissões (Signor et al., 2014; Vasconcelos et al., 2018). Outros estudos (Pitombo et al., 2016; Anjos et al., 2017; Satiro et al., 2017; Cherubin et al., 2018), no entanto, indicaram que as mudanças nas emissões de GEE podem estar ligadas às condições do solo modificadas pela quantidade de palha deixada na superfície, que favorece a atividade da biota do solo e, conseqüentemente, altera os fluxos de GEE.

Entre as abordagens para se estimar as emissões de GEEs, existem aquelas feitas em campo e laboratório e as simulações por meio de modelagem que têm se mostrado eficientes, pois permitem um estudo de cenários históricos e futuros por meio de dados das condições atuais (Oliveira, 2014). As observações das emissões em campo a longo prazo tornam-se complexas devido as diferenças nas práticas de manejo, fatores ambientais, limitações de tempo e despesas (Cha-un et al., 2017). Dessa forma, as simulações por meio de modelagem tornam-se uma ferramenta relativamente rápida e barata, além de permitir superar alguns problemas na execução de experimentos.

Portanto, levanta-se as seguintes premissas: a manutenção da palhada no solo pode reduzir as emissões de N_2O do solo e as estimativas de fluxos desse gás, realizadas

pelo modelo DNDC, não diferem dos fluxos medidos em campo, porém dependem da quantidade de palhada no solo.

Considerando a falta de informações relacionadas às emissões N_2O em cultivos de cana-de-açúcar e a necessidade de estudos no nordeste brasileiro, onde a cana-de-açúcar começou a ser colhida sem queima, esse trabalho teve como objetivo avaliar as emissões de N_2O sob diferentes níveis de palhada depositada sobre o solo, em área cultivada com cana-de-açúcar, e comparar os fluxos de N_2O medidos no campo com fluxos estimados pelo modelo DNDC

Material e Métodos

O experimento foi instalado em área pertencente à Usina de Álcool e Açúcar da Companhia do Vale do Parnaíba (COMVAP), empresa pertencente ao grupo Olho D'água, situada no município de União (04°51'09" S e 42°53'10" W, altitude 52 m), na região da Grande Teresina, norte do estado do Piauí.

O clima da região corresponde ao tipo Aw (tropical chuvoso), segundo a classificação de Köppen, com invernos secos e verões chuvosos. Durante a condução do experimento a precipitação se concentrou entre os meses de dezembro a junho e a temperatura média anual é de 28,4°C (Figura 1). Entretanto, entre os meses de setembro a dezembro, registrou-se um período mais quente, com temperatura média entre 29,5 e 31°C.

O solo da área experimental é um Plintossolo Flúvico de textura arenosa, cujas características granulométricas e químicas foram obtidas segundo a metodologia proposta por Embrapa (1997) e Silva et al. (1999), respectivamente (Tabela 1).

O experimento foi instalado em 2009, porém esse trabalho ocorreu de julho de 2013 a julho de 2014, em área de cana-de-açúcar em terceira soca, cultivada com a variedade SP 81-3250, manejada sob o sistema de colheita sem queima.

O preparo de solo foi realizado por meio de aração e gradagem, utilizando-se arado de disco e grade niveladora.

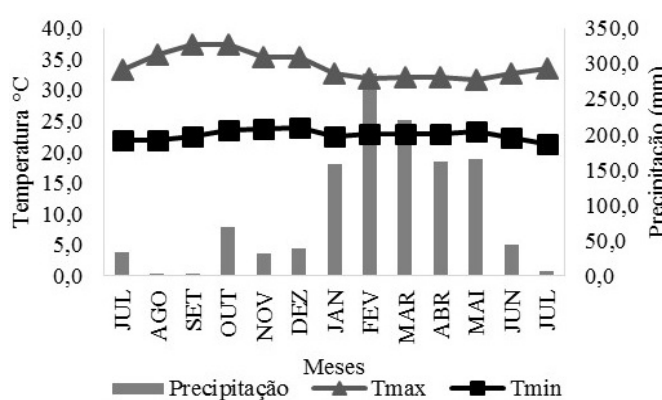


Figura 1. Precipitação pluvial e temperatura máxima e mínima correspondente aos meses de julho de 2013 a julho de 2014. Dados obtidos da Estação Meteorológica da Embrapa Meio-Norte, instalada na Usina Comvap.

Tabela 1. Características granulométricas e químicas da área experimental.

Prof. (cm)	Areia grossa	Areia fina (g kg ⁻¹)	Silte	Argila	MO (g kg ⁻¹)	P (mg dm ⁻³)	pH (CaCl ₂)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H+Al
0-5	438	354	133	75	9,9	83,1	6,2	0,67	2,05	1,15	0,07	0,05	2,61
5-10	439	351	128	82	7,93	58,72	6,2	0,46	2,04	0,99	0,07	0,05	2,87
10-20	407	373	132	88	5,13	48,2	6,2	0,37	1,42	0,85	0,06	0,05	2,58
20-40	399	352	137	112	3,35	28,07	5,8	0,29	0,9	0,57	0,06	0,06	2,3

Para correção do solo, aplicaram-se 500 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico. Na adubação de plantio foi utilizada 25, 150 e 75 kg ha⁻¹ de N (ureia), P₂O₅ (superfosfato simples) e K₂O (cloreto de potássio), respectivamente e uma adubação de cobertura, com aplicação de 40 kg ha⁻¹ de N, com ureia. Na terceira soca foi realizada apenas adubação de cobertura, com aplicação de 40 kg ha⁻¹ de N, com ureia.

O ensaio foi desenvolvido em delineamento experimental em blocos casualizados, com 5 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos avaliados constaram de cinco níveis de palhada (0, 25, 50, 75 e 100% da quantidade total presente na área) (Tabela 2). Após a colheita sem a queima, toda palhada remanescente dentro das parcelas experimentais foi pesada e posteriormente colocada em cada parcela, obedecendo às quantidades determinadas para cada tratamento.

Na avaliação do fluxo de N₂O no campo foram considerados apenas três tratamentos (0, 50 e 100%). Para a coleta de gases, um dispositivo, composto por uma base metálica retangular com 38 cm x 58 cm e uma câmara de PVC com as mesmas dimensões da base e 9 cm de altura, foi instalado na área útil do experimento. A base foi inserida no solo até uma profundidade de 5 cm, perpendicular à linha de plantio da cana-de-açúcar e permaneceu fixa no local durante o período de avaliação. Na parte superior das bases havia uma canaleta onde foi encaixada a câmara e adicionada água no momento da coleta das amostras, para garantir a vedação entre a câmara e a base metálica.

As câmaras tinham válvulas com registros para acoplar as seringas plásticas de 60 mL utilizadas na coleta de gases. Em cada coleta foram observadas a temperatura média do ar e a temperatura dentro da câmara por meio de termômetros.

As avaliações iniciaram-se 30 dias após a colheita e estenderam-se até 283^o dia após a colheita, distribuídas em 27 coletas. Em cada dia de avaliação foram coletadas, por câmara, três amostras dos gases: imediatamente após o fechamento da câmara (tempo zero); aos 15 min após o fechamento da câmara (tempo 10) e aos 30 min após o fechamento da câmara (tempo 30). As amostras foram coletadas no início da manhã (entre 7 e 10 h) e transferidas

das seringas para vials de 20 mL, onde foram armazenadas até o momento da análise.

As concentrações de N₂O nas amostras foram determinadas por meio de cromatógrafo gasoso equipado com coluna empacotada de Porapak Q e detector de captura de elétrons, com injeção manual. A partir da variação das concentrações desse gás no interior da câmara ao longo do tempo de coleta, do volume e da área de cada câmara, da temperatura do solo no momento da coleta e da pressão atmosférica foram calculados, para cada dia de avaliação, os fluxos de N₂O em cada câmara pela equação descrita por Barton et al. (2008):

$$FN_{2O} = \delta C / \delta t (V / A) M / V_m$$

em que:

FN₂O - fluxo de N₂O, expresso em µg N-N₂O m⁻² h⁻¹;

δC/δt - variação de concentração de N₂O na câmara no intervalo de medição;

V - volume da câmara, m³;

A - área do solo coberto com a câmara, m²;

M - peso molecular do N₂O;

V_m - o volume molar nas condições normais de temperatura e pressão.

Os fluxos diários foram tabulados e, para cada parcela, as quantidades totais de N₂O emitidas durante o período de avaliação (fluxo acumulado) foram estimadas por meio de integração matemática das curvas dos fluxos diários. Baseado nos fluxos diários de N₂O nas câmaras alocadas no ensaio experimental, foram calculados os fluxos médios para cada dia de avaliação (considerando a média das quatro câmaras correspondentes às repetições). Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Encontrada a distribuição normal dos dados, estes foram submetidos à análise de variância.

A estimativa das emissões de N₂O utilizando modelagem matemática foi realizada para os cinco tratamentos, com o modelo DNDC, desenvolvido por Li (2000). O cálculo e a

Tabela 2. Quantidade de palha depositada no solo, conforme as proporções do ensaio.

Tratamento	Quantidade de Palha produzida (Mg ha ⁻¹)	Quantidade de palha conforme proporção (Mg ha ⁻¹)	Quantidade de palha colocada no solo (kg)
Tratamento 1 (T-0%)	16,15	0,0	0,0
Tratamento 2 (T-25%)	16,75	4,19	62,81
Tratamento 3 (T-50%)	19,09	9,54	143,14
Tratamento 4 (T-75%)	17,39	13,04	195,58
Tratamento 5 (T-100%)	18,38	18,38	275,7

Tabela 3. Carbono orgânico total e densidade do solo coletado durante o ciclo.

Tratamento	Carbono orgânico total (g kg ⁻¹)	Densidade (g cm ⁻³)
Tratamento 1 (T-0%)	8,791	1,409
Tratamento 2 (T-25%)	9,527	1,517
Tratamento 3 (T-50%)	10,098	1,560
Tratamento 4 (T-75%)	10,947	1,503
Tratamento 5 (T-100%)	10,140	1,524

entrada de dados basearam-se em trabalhos publicados, que propuseram valores mais adequados para as simulações: 40% para o teor de carbono na massa seca, 0,26 para a relação entre massa seca e massa fresca dos colmos da cana-de-açúcar e relação C/N da palhada de cana-de-açúcar igual a 100 (Oliveira, 2014; Figueiredo & La Scala Junior, 2011). Além disso, utilizaram-se dados de teor de carbono orgânico total no solo, densidade de solo coletados durante o ciclo (Tabela 3), e o manejo da cultura (preparo do solo, adubação, aplicação de defensivos, irrigação). Os dados climáticos foram obtidos de estação meteorológica localizada na região do ensaio.

As simulações de cenários foram realizadas para a mesma safra das análises de campo, com as estimativas diárias e acumuladas feitas pelo modelo, para cada tratamento, baseadas na camada de 0-10 cm. Para verificar a exatidão entre os valores medidos a campo e os simulados para a última safra, determinou-se o índice de Willmott. Este índice, proposto por Willmott et al. (1985), está relacionado ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados, variando de zero (significando nenhuma concordância) a 1 (significando concordância perfeita), sendo determinado por:

$$d_r = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right]$$

em que:

- d_r - índice de Willmott;
- P_i - valores simulados, kg ha⁻¹;
- O_i - valores observados, kg ha⁻¹;
- O - média dos valores observados, kg ha⁻¹.

Foram calculados também outros índices estatísticos propostos por Sentelhas et al. (1997), como o erro absoluto médio (EAM), raiz do erro quadrático médio (RMSE), Coeficiente de determinação (CD), coeficiente de massa residual (CRM) e Eficiência.

a) Erro absoluto médio (EAM):

$$EAM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \right]$$

b) Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE):

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5}$$

c) Coeficiente de determinação (CD):

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$$

d) Coeficiente de massa residual (CRM):

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

e) Eficiência:

$$EF = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) - \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \right]}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})}$$

Resultados e Discussão

Emissões no campo

Os fluxos médios de N₂O seguiram comportamentos semelhantes para os três níveis de palhada (0% - 0 Mg ha⁻¹; 50% - 9,54 Mg ha⁻¹ e 100% - 18,38 Mg ha⁻¹), no decorrer da safra e não apresentaram diferenças (p<0,05). No tratamento 0 Mg ha⁻¹ observou-se fluxos que variaram entre -3,55 e 55,41 μg m⁻² h⁻¹ N-N₂O (Figura 2 - A), no tratamento 9,54 Mg ha⁻¹ variaram entre -3,33 e 58,03 μg m⁻² h⁻¹ N-N₂O (Figura 2 - B) e no tratamento 18,38 Mg ha⁻¹ a variação ficou entre -4,57 e 73,68 μg m⁻² h⁻¹ N-N₂O (Figura 2 - C).

Em área cultivada com cana-de-açúcar colhida sem queima, na região de Piracicaba-SP, Signor et al. (2014) observaram fluxos de N₂O, em solo coberto com 0 Mg ha⁻¹ de palhada, que variaram de 0,1 a 130 μg m⁻² h⁻¹ N-N₂O, enquanto em solo coberto com 8,97 ha⁻¹ os fluxos variaram de 10 a 75 μg m⁻² h⁻¹ N-N₂O e em solo coberto com 17,95 Mg ha⁻¹ de palha os fluxos observados foram de 10 a 55 μg m⁻² h⁻¹ N-N₂O, aproximadamente. Os autores observaram ausência de efeito dos níveis de palhada sobre os fluxos de N₂O aos 12 meses após a colheita, demonstrando ao final da safra que o fluxo médio no tratamento com 100% de palhada sobre a superfície do solo (17,95 Mg ha⁻¹) não superou o tratamento controle, assim como o ocorrido neste experimento.

Os fluxos diários de N₂O de cada tratamento aumentaram após a adubação da área, que ocorreu aproximadamente 27 dias após a colheita da safra anterior. No tratamento controle, os fluxos passaram de 24,3 para 55,41 μg m⁻² h⁻¹ N-N₂O; no tratamento 9,54 Mg ha⁻¹ de palhada, os fluxos aumentaram de 27,0 para 58,63 μg m⁻² h⁻¹ N-N₂O; enquanto no tratamento com 18,38 Mg ha⁻¹ de palha, os fluxos diários passaram de 55,3 para 73,68 μg m⁻² h⁻¹ N-N₂O. Schils et al. (2008) também

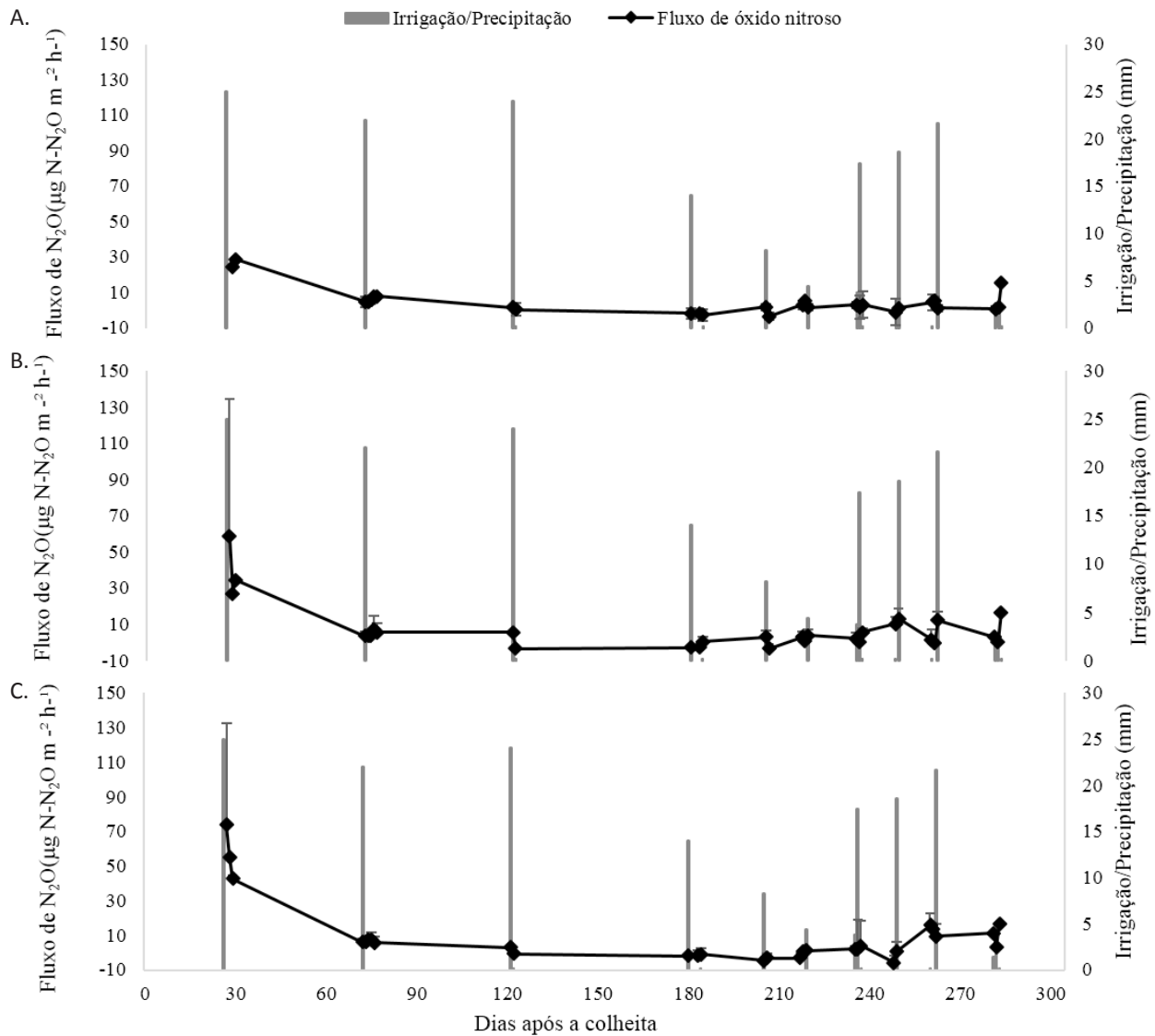


Figura 2. Fluxos de N₂O (µg N-N₂O m⁻² h⁻¹) em área cultivada com cana-de-açúcar, em função de níveis de palhada sobre o solo (A - 0, B - 50 e C - 100% da quantidade produzida na safra anterior, correspondendo a 0, 9,54 e 18,38 Mg ha⁻¹, respectivamente) e precipitação pluvial (mm) na área experimental durante o período de avaliação. Barras verticais correspondem ao erro padrão da média (n=4).

observaram elevados valores de emissões de N₂O na linha de cultivo da cana-de-açúcar na primeira semana após a adubação nitrogenada tanto em tratamentos com palhada, quanto nos tratamentos sem palhada sobre a superfície do solo.

Esse aumento nos fluxos de N₂O pode estar associado também à irrigação que ocorreu após a adubação e ao aumento do teor de N no solo devido a adubação nitrogenada. Condição de solo úmido, por conta da irrigação ou pela ocorrência de chuvas, favorece maior fluxo de N₂O. Quando associada à adubação, a irrigação pode favorecer o transporte do adubo nitrogenado para o interior do solo. Levando-se em consideração que o adubo utilizado foi ureia, isso provavelmente reduziu a perda de N por volatilização, permitindo uma maior quantidade de N disponível para os processos de nitrificação e desnitrificação.

Embora tenham ocorrido precipitações a partir do 200º dia após a colheita, não foi possível observar um aumento expressivo nas emissões de N₂O em relação às emissões que

ocorreram aos 30 dias. Nesse período, não houve adubação ou qualquer outro manejo que possa ter influenciado nas emissões quando relacionados ao aumento da umidade do solo. Nos três tratamentos, a partir do 120º dia após a colheita, observou-se valores de emissões diárias negativos (de -5,94 a -0,58 µg m⁻²h⁻¹ N-N₂O), indicando consumo de N₂O.

Para Kogel-Knabner et al. (2010) a umidade pode ocasionar um consumo de óxido nitroso, nessas condições, pode ter ocorrido desnitrificação completa do N₂O com emissão de N₂. Chapuis-Lardy et al. (2007), reportam que quanto mais tempo o óxido nitroso permanece no solo, por ser produzido em camadas profundas ou devido à redução na difusividade, mas ele é consumido.

Em função da ausência de efeito dos níveis de palhada sobre as emissões do óxido nitroso, não foi realizada uma análise de regressão para as emissões desse gás. A partir dos fluxos diários de N₂O em cada tratamento, obtiveram-se as emissões totais ao longo do período experimental (Figura 3).

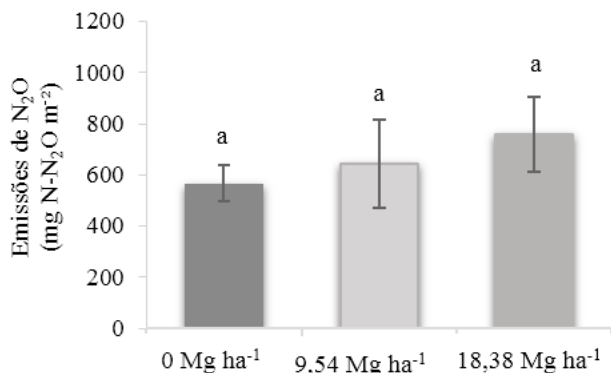


Figura 3. Emissão de N-N₂O em função dos níveis de palhada de cana-de-açúcar mantida sobre o solo (0%, 50% e 100% das quantidades originais presentes na área experimental). As letras indicam as diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre os grupos de médias para cada tratamento. Barras verticais indicam o erro padrão da média ($n=4$).

A permanência da palhada de cana-de-açúcar sobre a superfície do solo é um fator que pode contribuir para maiores emissões de N₂O do solo. A palhada de cana contribui com o carbono orgânico disponível, o qual possui estreita relação com as emissões de N₂O pelo solo, pois estimula o crescimento e a atividade microbiana, além de fornecer carbono orgânico aos microrganismos, influenciando as reações de nitrificação e desnitrificação (Cameron et al., 2013), processos responsáveis pela produção de N₂O no solo.

As emissões de N-N₂O nos tratamentos com 0, 9,54 e 18,38 Mg ha⁻¹ de palhada no solo tiveram padrões semelhantes aos observados por Carmo et al. (2013) em Piracicaba, que observaram emissões de aproximadamente 300, 600, 700 e 750 mg de N-N₂O m⁻² em solo com 0, 7, 14 e 21 Mg ha⁻¹ de palhada, respectivamente. Os autores atribuem essas emissões à aplicação de vinhaça ao solo, o que não ocorreu neste experimento. As emissões totais neste caso, podem estar relacionadas à umidade do solo associada a altas temperaturas e a adubação nitrogenada. A adição de resíduos vegetais à superfície do solo conserva a umidade, garantindo maior atividade microbiológica. Dessa forma, provavelmente ocorreu um aumento da atividade biológica, consumindo o O₂ disponível, criando sítios de anaerobiose, onde ocorre produção de N₂O por desnitrificação bacteriana.

A magnitude das emissões de N₂O do solo observada nesse ensaio está dentro da escala estipulada para outros

sistemas de manejo do Brasil. Tais valores variam entre 10 e 800 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para tratamentos com manutenção de palhada e com aplicação de adubação nitrogenada (Cerri et al., 2009; Carmo et al., 2013; Signor et al., 2014).

Levando-se em consideração que a presença de restos culturais sobre o solo, aliado ao pequeno número ou nenhum revolvimento do solo na área e à reforma do canal que ocorre a cada 5 a 8 anos, as áreas com cultivos de cana-de-açúcar sobre a palhada têm uma semelhança com áreas de lavouras manejadas com sistema de plantio direto (Signor et al., 2014).

Emissões simuladas no DNDC

As aplicações do modelo DNDC quanto às emissões de GEEs em cultivos de cana-de-açúcar ainda são escassas na literatura (Deng et al., 2011; Chen, et al., 2013; Oliveira, 2014). Porém, de forma ampla, o modelo considera a umidade do solo um fator chave no fluxo de N₂O. Desse modo, a análise dos eventos pluviiais, conjuntamente com a dinâmica de gases, além do manejo do solo relacionado à adubação, aplicação de herbicida e eventos de irrigação são de suma importância para compreender os processos de emissão nesse ensaio.

As simulações de emissões diárias e totais de N₂O simuladas pelo DNDC, considerando a safra em questão, resultaram em um comportamento semelhante das emissões para todos os tratamentos (Figura 4).

A partir dessas simulações diárias, observou-se que em alguns dias durante o ciclo da cultura, os tratamentos 13,04 e 18,38 Mg ha⁻¹ superaram os demais tratamentos, com picos de emissões ultrapassando aos 0,3 kg ha⁻¹ de N-N₂O, enquanto os tratamentos 0, 4,19 e 9,54 Mg ha⁻¹ tiveram picos que variaram de 0,2 a 0,25 kg ha⁻¹ de N-N₂O, confirmando o proposto por Carmo et al. (2013) ao afirmarem que à medida em que se aumenta a quantidade de palhada na superfície do solo, aumenta-se também as emissões de N₂O. Vargas et al. (2013), também afirmam que as emissões de N₂O do solo aumentam em função da presença de palha na superfície.

A comparação entre os valores totais das emissões obtidos no experimento em campo para os tratamentos 0%, 50% e 100% de palha sobre a superfície e os valores simulados no DNDC para os mesmos tratamentos, na safra 2013-2014, ao longo do período medido, indicam uma diferença de aproximadamente 9%, 18% e 13% respectivamente, entre

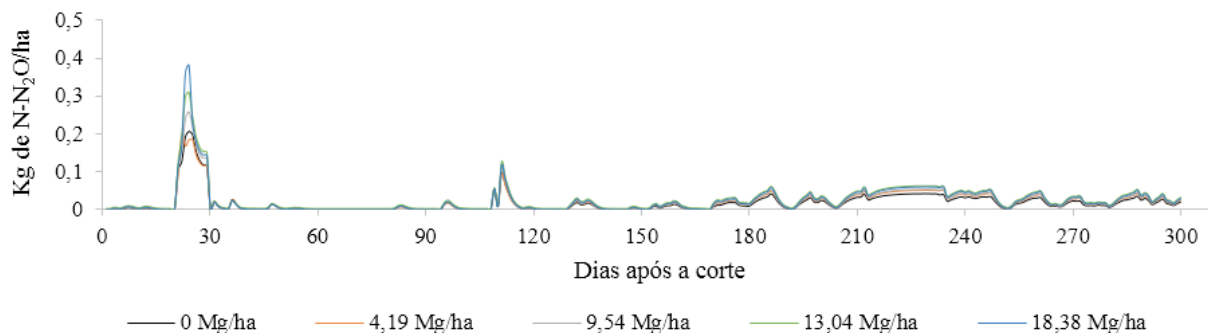


Figura 4. Emissões diárias de N-N₂O simuladas no DNDC durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar na safra 2013/2014.

eles (Figura 5). Assim, esses valores médios estão dentro da margem de erro de 52% do II Inventário Brasileiro de Emissões de N_2O de solos agrícolas (Brasil, 2004).

Simulações semelhantes, utilizando modelos computacionais, feitas com a cultura da cana-de-açúcar e culturas de cobertura tiveram diferenças entre as emissões simuladas e de campo entre 20% e 46% (Oliveira, 2014).

As curvas de emissões simuladas diariamente, nos três tratamentos avaliados, apresentaram comportamentos diferentes das curvas de emissões medidas, apresentando nos primeiros 180 dias do ciclo diferença média de 40% a 200% entre valores, onde as emissões simuladas subestimam as emissões observadas. A partir do 180º após o corte até o final do ciclo, essa diferença foi reduzida para 12% a 36% em média.

Oliveira (2014), comparando as emissões do N_2O simuladas pelo DNDC e emissões observadas no campo, constatou que a partir do 60º dia após o início das medições as emissões simuladas e as de campo se aproximaram e permaneceram com esse comportamento até o fim das avaliações, situação parecida com a ocorrida neste trabalho. O autor explica que as maiores emissões se concentram nos primeiros 60 dias do ciclo, devido principalmente à adubação, havendo uma diminuição após esse período, situação que pode ser atribuída também para este estudo.

Durante o período de condução do experimento em campo, o valor acumulado das emissões medidas foi de 5,67

$kg\ ha^{-1}$ de $N-N_2O$ (0%), 6,44 $kg\ ha^{-1}$ de $N-N_2O$ (50%) e 7,5 $kg\ ha^{-1}$ de $N-N_2O$ (100%), correspondendo respectivamente a 8,90 $kg\ ha^{-1}$ de N_2O , 10,11 $kg\ ha^{-1}$ de N_2O e 11,78 $kg\ ha^{-1}$ de N_2O .

Os valores resultantes da simulação no DNDC para os mesmos tratamentos indicaram emissões acumuladas de 6,23 $kg\ ha^{-1}$ de $N-N_2O$ (0%), 7,58 $kg\ ha^{-1}$ de $N-N_2O$ (50%) e 8,48 $kg\ ha^{-1}$ de $N-N_2O$ (100%), correspondendo respectivamente a 7,78 $kg\ ha^{-1}$ N_2O , 11,90 $kg\ ha^{-1}$ N_2O e 13,32 $kg\ ha^{-1}$ N_2O . Nos três tratamentos os valores observados são maiores que os valores simulados, em quase todo o ciclo, sendo reduzidos ao final do ciclo em comparação às emissões simuladas, que foram superiores, tornando as emissões totais simuladas maiores que as emissões totais observadas. Esses resultados, opõem-se aos reportados por Oliveira (2014), que ao simular emissões no DNDC, observou emissões totais menores que os constatados em campos de cana-de-açúcar na Austrália.

Na avaliação pelos índices estatísticos, observou-se que os índices de concordância de Willmott, para os tratamentos avaliados indicam que as emissões simuladas pelo DNDC possuem concordância de valores com as emissões observadas (Tabela 4). Os valores para o erro absoluto médio se aproximam de zero, indicando os resultados modelados mais próximos da precisão.

O coeficiente de determinação de Willmott indicou que para os fluxos diários houve uma precisão dos fluxos preditos em relação aos fluxos observados, havendo uma

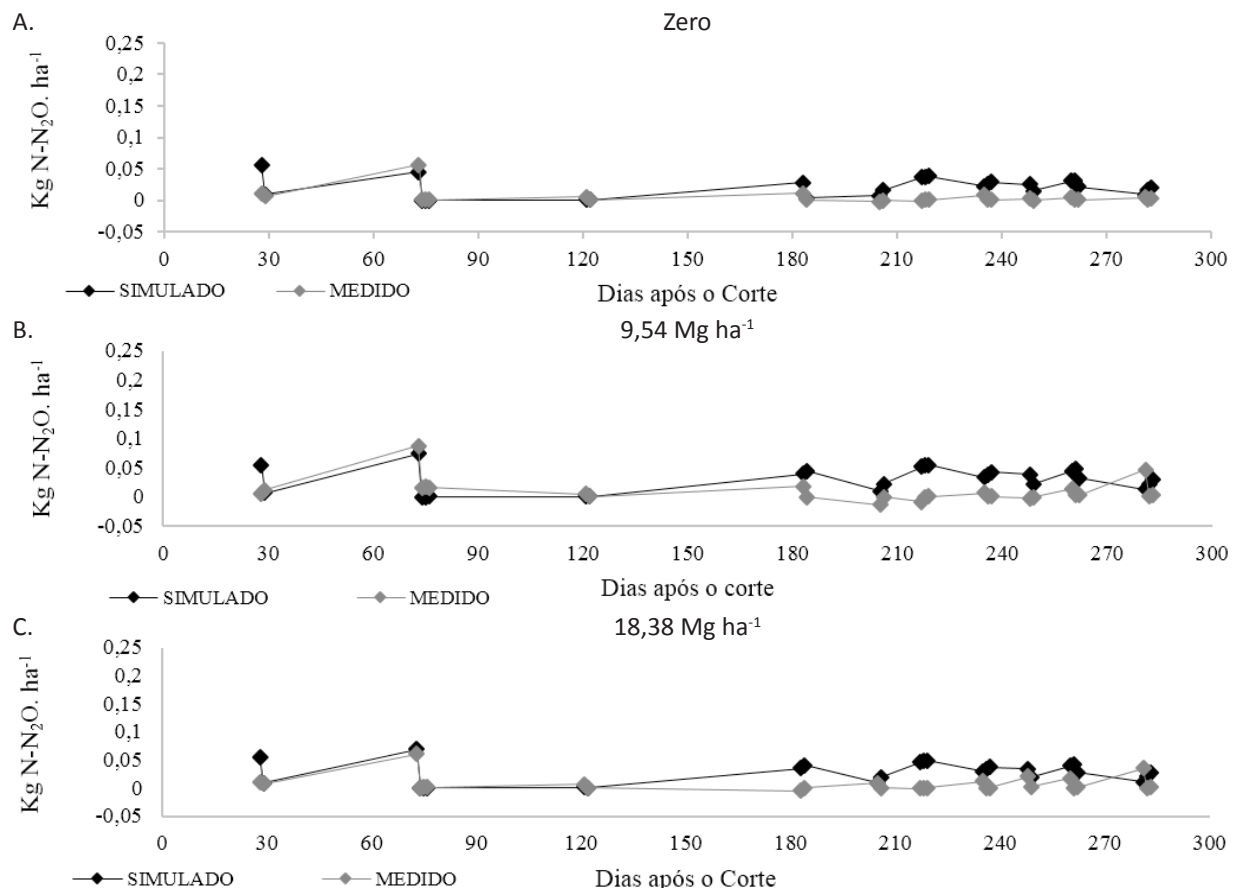


Figura 5. Emissões diárias de $N-N_2O$ simuladas no DNDC e observadas em campo durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar na safra 2013/2014 de acordo com a proporção de palhada no solo (0%, 50% e 100%).

Tabela 4. Índices estatísticos de comparação entre emissões de N-N₂O simuladas e medidas em campo na safra de cana-de-açúcar 2013-2014.

	Fluxos diários (%)			Fluxos acumulados (%)		
	0	50	100	0	50	100
d _r	0,687	0,604	0,6966	0,910	0,7995	0,8308
EAM (kg ha ⁻¹)	-0,0094	0,0079	0,025	-0,016	-0,015	0,0218
RMSE (kg ha ⁻¹)	0,0427	0,1479	0,2054	0,138	0,219	0,284
CD	3,936	1,064	1,052	0,153	0,400	0,495
CRM	-0,946	-0,861	-0,886	-0,074	-0,139	-0,057
Eficiência	0,9152	0,9117	0,9099	0,7881	0,9234	0,9053

* d_r: Índice revisado de concordância de Willmott, EAM Erro médio absoluto, RMSE: Raiz quadrada do erro médio, CD: Coeficiente de determinação e CRM: Coeficiente de massa residual.

boa concordância. O mesmo comportamento foi observado para os fluxos acumulados, onde a soma dos valores das diferenças entre valores observados e preditos equivalem entre 80 a 91% da soma dos valores dos desvios do modelo, ou seja, ótima concordância, segundo Willmott et al. (1985). Os valores encontrados para o coeficiente de massa residual indicam que em todos os tratamentos, tanto para fluxos diários assim como para fluxos acumulados, as emissões totais estimadas pelo DNDC foram superestimadas em relação às emissões observadas, porém essa superestimativa não exerceu influência nos demais índices. Para a eficiência, houve um adequado ajuste entre os valores simulados e os valores medidos, acima de 90%.

As emissões simuladas apresentaram variação nos resultados devido às condições climáticas abrangidas. Dessa forma, tais resultados, apoiados por dados obtidos na literatura, dão uma sugestão de que a correta estimativa de emissões de GEEs por modelos computacionais é consideravelmente complexa, porém apresenta a possibilidade de mostrar dados consistentes.

Conclusões

As emissões de N₂O do solo não foram afetadas pela proporção de palhada remanescente deixada sobre a superfície após colheita sem queima,

Os fluxos de N₂O nas simulações do DNDC indicaram que maiores proporções de palhada no solo, contribuem para maiores emissões de N₂O.

As emissões de N₂O do solo sob palhada de cana-de-açúcar podem ser simuladas com eficiência acima de 90% pelo modelo DNDC.

Literatura Citada

- Anjos, J.C.R.; Andrade Júnior, A.S.; Bastos, E.A.; Noleto, D.H.; Melo, F.B.; Brito, R.R. Water storage in a Plinthtaqualf cultivated with sugarcane under straw levels, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.52, n.6, p.464–473, 2017. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000600010>.
- Barton, L.; Kiese, R.; Gatter, D.; Butterback-Bahl, K.; Buck, R.; Hinz, C.; Murphy, D.V. Nitrous oxide emissions from a cropped soil in a semi-arid climate. *Global Change Biology*, v.14, n. 1, p.177-192, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01474.x>.
- Brasil. Inventário de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controladas pelo protocolo de Montreal. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia; 2004. 86p. <http://livroaberto.ibict.br/handle/1/729>. 29 Dez. 2016.
- Cameron, K.C.; Di, H.J.; Moir, J.L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*, v.162, n. 2, p.145-173, 2013. <https://doi.org/10.1111/aab.12014>.
- Carmo, J. B. S.; Filoso, L.C.; Zotarelli, E.; Sousa Neto, L.M.; Pitombo, P.J.; Duarte Neto, V.P.; Vargas, C.A.; Andrade, G.J.C.; Cava, R.; Rosseto, H.; Cantarela, A.; Elias Neto, A.; Martinelli, L.A. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *Global Change Biology Bioenergy*. v.5, n. 3, p. 267-280, 2013. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x>.
- Cerri, C. C.; Maia, S. M. F.; Galdos, M. V.; Cerri, C. E. P.; Feil, B. J.; Bernoux, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. *Scientia Agricola*. v. 66, n.6, p. 831-843, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000600017>.
- Cerri, C. E. P.; Sparovek, G.; Bernoux, M.; Easterling, W. E.; Melillo, J. M.; Cerri, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigations options. *Scientia Agricola*, v.64, p.83-99, 2007 <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162007000100013>
- Chaer, G. M.; Fernandes, M. F.; Myrold, D.; Bottomley, P. Shifts in microbial community composition and physiological profiles across a gradient of induced soil degradation. *Soil Science Society of America Journal*, v. 73, n. 4, p. 1327-1334, 2009. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0276>.
- Chapuis-Lardy, L.; Wrage, N.; Metay, A.; Chotte, J. L.; Bernoux, M. Soil, a sink for N₂O?: a review. *Global Change Biology*, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01280.x>.
- Cha-un, N.; Chidthaisong, A.; Towprayoon, S. Using the DNDC model to predict methane emissions from crop-rice rotation systems. *Research Journal of Chemistry and Environment*, v.21, n. 3, p. 36-46, 2017. <https://www.researchgate.net/publication/314082003>. 28 Jul. 2017.
- Chen, C.; Chen, D.; Dan, J.; Lam, S.K. Application of the denitrification – decomposition model to predict carbon dioxide emissions under alternative straw retention methods. *Scient World Journal*, v.2013, article ID 851901, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/851901>.

- Cherubin, M.R.; Oliveira, D.M.S.; Feigl, B.J.; Pimentel, L.G.; Lisboa, I.P.; Gmach, M.R.; Varanda, L.L.; Moraes, M.C.; Satiro, L.S.; Popin, G.V.; Paiva, S.R.; Santos, A.K.B.; Vasconcelos, A.L.S.; Melo, P.L.A.; Cerri, C.E.P.; Cerri, C.C. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: a review, *Scientia Agricola*, v.75, n.3, p.255–272, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0459>.
- Deng, J.; Zhu, B.; Zhou, Z.; Zheng, X.; Li, C.; Wang, T.; Tang, J. Modeling nitrogen loadings from agricultural soil in southwest China with modified DNDC. *Journal Geophysics Research*. v.116, n. G2, p. 1-13, 2011 <https://doi.org/10.1029/2010JG001609>.
- Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p. https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf. 12 Jan. 2014.
- Fernandes, M. F.; Barreto, A. C.; Mendes, I. C.; Dick, R. P. Short-term response of physical and chemical aspects of soil quality of a kaolinitic Kandiuudalfs to agricultural practices and its association with microbiological variables. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 142, n. 3-4, p. 419-427, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.002>.
- Figueiredo, E.; La Scala Junior, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.141, n. 1-2, p. 77-85, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.014>.
- Kögel-Knabner, I.; Amelung, W.; Cao, Z. H.; Fiedler, S.; Frenzel, P.; Jahn, R.; Kalbitz, K.; Kolbl, A.; Schloter, M. Biogeochemistry of paddy soils. *Geoderma*, v. 157, n. 1-2, p. 1-14, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.03.009>.
- Leal, M.R.L.; Galdos, M.V.; Scarpore, F.V.; Seabra, J.E.A.; Walter, A.; Oliveira, C.O.F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review. *Biomass and Bioenergy*, v.53, p.11-19, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.007>.
- Li, C. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v.58, n. 1-3, p. 259-276, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1009859006242>.
- Martins Filho, M. V.; Liccioti, T. T.; Pereira, G. T.; Marques Júnior, J.; Sanchez, R. B. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v.29, n.1, p.8-18, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000100002>.
- Oliveira, M.E.D. Estimativas de Emissões de N₂O e CH₄ na cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Piracicaba: USP; Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014. 112p. Tese Doutorado. <https://doi.org/10.11606/T.11.2014.tde-17042014-165930>.
- Palatnik, R. R.; Roson, R. Climate change and agriculture in computable general equilibrium models: alternative modeling strategies and data needs. *Climatic Change*, Dordrecht, v. 112, n. 3-4, p. 1085-1100, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0356-6>.
- Pitombo, L.M. Pitombo; do Carmo, J.B.; de Hollander, M.; Rossetto, R.; López, M.V.; Cantarella, H.; Kuramae, E.E. Exploring soil microbial 16S rRNA sequence data to increase carbon yield and nitrogen efficiency of a bioenergy crop, *Global Change Biology Bioenergy*, v. 8, n. 5, p.867–879, 2016. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12284>
- Rossetto, R.; Vitti, A.C.; Gava, G.J.C.; Mellis, E.V.; Vargas, V.P.; Cantarella, H.; Prado, H.; Dias, F.L.F.; Landell, M.G.A.; Brancalão, S.R.; Garcia, J.C. Cana-de-açúcar: cultivo com sustentabilidade. *Informações Agronômicas*, n. 142, p.1-13, 2013. [http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/A892E76E206AB60A83257B9D00671954/\\$FILE/Page1-13-142.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/A892E76E206AB60A83257B9D00671954/$FILE/Page1-13-142.pdf). 25 Set. 2017.
- Satiro, L.S.; Cherubin, M.R.; Safanelli, J.L.; Lisboa, I.P.; Junior, I.P.P.R.R.; Cerri, C.E.P.; Cerri, C.C. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil, *Geoderma Regional*, v.11, p.86–95, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.10.005>.
- Schils, R.L.M.; Groenigen, J.W.V.; Velthof, G.L.; Kuikman, P.J. Nitrous oxide emissions from multiple combined applications of fertilizer and cattle slurry to grassland. *Plant Soil*. v.310, n. 1-2, p. 89-101, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9632-2>.
- Sentelhas, P.C.; Moraes, S.O.; Piedade, S.M.S.; Pereira, A.R.; Angelocci, L.R.; Marin, F.R. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. v. 5, n. 2, p.215-221, 1997. <http://www.sbagro.org.br/bibliotecavirtual/arquivos/142.pdf>. 12 Jul. 2017.
- Signor, D.; Pissioni, L.L.M.; Cerri, C.E.P. Emissões de gases de efeito estufa pela deposição de palhada de cana-de-açúcar sobre o solo. *Bragantia*, v.73, n. 2, p.113-122, 2014. <https://doi.org/10.1590/brag.2014.019>.
- Silva, F.C.; Eira, P.A. da; Raij, B. V.; Silva, C.A.; Abreu, C.A.; Gianello, C.; Pérez, D.V.; Quaggio, J.A.; Tedesco, M.J.; Abreu, M.F.; Barreto, W. de O. Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo. In: Silva, F.C. da. (Org.). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa, 1999. p.75-169.
- Vargas, V.P.; Cantarella, H.; Martins, A.A.; Soares, J.R.; Carmo, J.B.; Andrade, C.A Sugarcane crop residue increases N₂O and CO₂ emissions under high soil moisture conditions. *Sugar Tech*, v.16, n. 2, p.174-179, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12355-013-0271-4>.
- Vasconcelos, A. L. S.; Cherubin, M. R.; Feigl, B. J.; Cerri, C. E. P.; Gmach, M. R.; Siqueira-Neto, M. Greenhouse gas emission responses to sugarcane straw removal. *Biomass and Bioenergy*, v. 113, p. 15-21, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.03.002>.
- Willmott, C.T.; Ackleson, S.G.; Davis, R.E.; Feddema, J.J.; Klink, K.M.; Legates, D.R.; O'Donnell, J.; Rowe, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. C5, p. 8.995-9.005, 1985. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>.