

Fluxos de óxido nitroso e suas relações com atributos físicos e químicos do solo

Rubia Santos Corrêa⁽¹⁾, Beáta Emöke Madari⁽²⁾, Glaucilene Duarte Carvalho⁽³⁾, Adriana Rodolfo da Costa⁽⁴⁾, Ana Cláudia de Castro Pereira⁽¹⁾ e João Carlos Medeiros⁽⁵⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia, Caixa Postal 131, CEP 74001-970 Goiânia, GO, Brasil. E-mail: rubiascorreagyn@gmail.com, anaclaudia_castro2@hotmail.com ⁽²⁾Embrapa Arroz e Feijão, Rodovia GO-462, Km12, Caixa Postal 179, CEP 75375-000 Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. E-mail: beata.madari@embrapa.br ⁽³⁾Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 11ª Avenida, nº 1.272, Setor Leste Universitário, CEP 74605-060 Goiânia, GO, Brasil. E-mail: glaucilene_agro@yahoo.com.br ⁽⁴⁾Universidade Estadual de Goiás, Campus Santa Helena de Goiás, Via Protestato Joaquim Bueno, nº 945, Vila Santa Helena, CEP 75920-000 Santa Helena, GO, Brasil. E-mail: adriana.costa@ueg.br ⁽⁵⁾Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, Estrada Municipal Bom Jesus-Viana, Planalto Horizonte, CEP 64900-000 Bom Jesus, PI, Brasil. E-mail: medeiros.jc@gmail.com

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica dos fluxos de óxido nitroso (N₂O) em solo sob pastagem, em sistema de integração lavoura-pecuária, e sob cerrado nativo usado como referência, bem como identificar os atributos físicos e químicos do solo que influenciam esses fluxos. O estudo foi realizado na Fazenda Capivara, da Embrapa Arroz e Feijão, de 5 de fevereiro a 30 de setembro de 2013. As amostragens de gás foram realizadas com uso de câmaras estáticas manuais. O solo sob pastagem apresentou os maiores fluxos de N₂O, com média de 14,12 ng m⁻² s⁻¹. Essa área também apresentou maior espaço poroso preenchido por água (EPPA), que, associado à temperatura e ao teor de nitrato no solo, influenciou a produção de N₂O. Na época chuvosa, os fluxos apresentaram correlação positiva com o EPPA do solo e, na época seca, com seu teor de amônio e nitrato. A emissão total de N₂O na área da pastagem foi de 1.644,19 g ha⁻¹. No cerrado nativo, não houve emissão de N₂O do solo para a atmosfera.

Termos para indexação: *Urochloa*, desnitrificação, espaço poroso preenchido por água, gás de efeito estufa, nitrificação.

Nitrous oxide fluxes and their correlations with physical and chemical soil properties

Abstract – The objective of this work was to evaluate the dynamics of nitrous oxide (N₂O) fluxes in a soil under pasture, in an integrated crop-livestock system, and in native cerrado as a reference, besides identifying the physical and chemical soil properties that affect the fluxes. The study was conducted at Fazenda Capivara of Embrapa Arroz e Feijão, in the state of Goiás, Brazil, between February 5 and September 30, 2013. Gas sampling was performed using manual static chambers. The soil under pasture showed the highest N₂O fluxes with average of 14.12 ng m⁻² s⁻¹. This area also showed greater water-filled pore space (WFPS), which, associated with soil temperature and nitrate content in the soil affected the production of N₂O. In the rainy season, fluxes showed positive correlation with soil WFPS, and, in the dry season, they were correlated with soil contents of ammonium and nitrate. The total N₂O emission in the pasture area was 1,644.19 g ha⁻¹. In native cerrado, there was no soil-N₂O emission to the atmosphere.

Index terms: *Urochloa*, denitrification, water-filled pore space, greenhouse gas, nitrification.

Introdução

O clima da Terra é regulado pela energia solar que atravessa a atmosfera na forma de luz visível. Parte dessa energia é absorvida pela superfície terrestre, e parte é refletida de volta ao espaço na forma de radiação infravermelha. Determinados gases que compõem a atmosfera terrestre – dentre os quais se destacam o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido

nitroso (N₂O) e o vapor d'água – absorvem parte das radiações infravermelhas emitidas pela superfície da Terra e pela atmosfera, dificultando sua dissipação para o espaço. Estes gases, conhecidos como gases de efeito estufa (GEE), fazem com que a temperatura média do planeta se situe ao redor de 14°C, o que é importante para o surgimento e a manutenção de vida, pois, sem eles, a temperatura à superfície da Terra seria 33°C mais fria (Machado, 2005).

Entretanto, aumentos recentes das concentrações dos GEE na atmosfera, em parte associados a atividades antrópicas, têm causado impacto sobre o balanço de radiação do planeta e sobre a temperatura da superfície da Terra. Entre os gases que absorvem a radiação infravermelha, o N_2O é um importante GEE pois, apesar de sua baixa concentração na atmosfera, ele se destaca pelo longo tempo de permanência e pelo alto potencial de aquecimento global (PAG). O PAG da molécula de N_2O é 290 vezes superior ao da de CO_2 , para um período de 20 anos, e 330 vezes superior, para um período de 100 anos (Brasseur et al., 1999).

No Brasil, em 2010, 35% das emissões nacionais de GEE foram provenientes da agropecuária, e 95,44% das emissões de N_2O oriundas desse setor são provenientes dos solos agrícolas; ou seja, do esterco dos animais em pastagem, do uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados, da aplicação de adubos orgânicos, da incorporação de resíduos agrícolas ao solo, das áreas de cultivo de solos orgânicos e de emissões indiretas. Os animais em pastagem destacam-se quanto às emissões, com 44% das emissões diretas (Estimativas..., 2013).

As atividades agrícolas que influenciam a emissão de N_2O do solo para a atmosfera é mediada por microrganismos, e os processos de nitrificação e desnitrificação são os mais importantes. Entre os fatores que influenciam esses processos, destacam-se a umidade, as temperaturas do ar e do solo, o pH, a textura, o manejo do solo e a rotação de culturas (Snyder et al., 2009).

O uso e o manejo conservacionista do solo pela adoção de sistemas integrados associados a práticas que empregam o revolvimento mínimo do solo, a cobertura da superfície do solo e a rotação de culturas podem favorecer a alta produção de resíduos vegetais e o acúmulo de nutrientes na superfície do solo e, portanto, aumentar os estoques de C do solo contribuindo para mitigar a emissão de GEE (Lal et al., 2007). No Brasil, em regiões como no Cerrado, a adoção de práticas de manejo conservacionista, a exemplo do sistema de plantio direto, contribui para o sequestro de 9 megatonelada de C por ano (Cerri & Cerri, 2007).

No Cerrado, a integração lavoura-pecuária (ILP) vem-se expandindo com maior velocidade. O sistema ILP é uma alternativa para reverter a degradação das pastagens e melhorar a qualidade do solo e seu teor de matéria orgânica (Vilela et al., 2012). No potencial de sinergismo entre os componentes pastagem e lavoura

encontra-se grande parte dos efeitos benéficos da ILP (Alvarenga & Noce, 2005), entre os quais podem ser citados: a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo; o potencial de redução de riscos econômicos, pela diversificação de atividades; a redução do custo na recuperação/renovação de pastagens em processo de degradação; o aumento da matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, menor perda por escorrimento superficial; o sequestro de carbono; e a mitigação das emissões de GEE (Vilela et al., 2012).

O objetivo do presente estudo foi avaliar a dinâmica dos fluxos de óxido nitroso (N_2O) em solo sob pastagem, em sistema de integração lavoura-pecuária, e em um fragmento de cerrado nativo usado como referência, bem como identificar os atributos físicos e químicos do solo que influenciam esses fluxos.

Material e Métodos

O presente estudo foi desenvolvido na área experimental da Embrapa Arroz e Feijão, na Fazenda Capivara, no Município de Santo Antônio de Goiás (16°29'59"S, 49°17'35"W), GO, na região Centro-Oeste do Brasil. A altitude média da área é de 801 m, e a declividade é de aproximadamente 0,3%. O solo é um Latossolo Vermelho acriférico típico, de textura argilosa, com 530 g kg^{-1} de argila (Santos et al., 2010). O cerrado nativo, fase cerradão, de aproximadamente 216 ha, cujo fragmento foi adotado como área de referência, apresenta vegetação subcaducifólia. O clima regional é o tropical de savana megatérmico, tipo Aw segundo a classificação de Köppen-Geiger, marcado por duas estações – chuvosa, de outubro a abril, e seca, de maio a setembro. A precipitação pluvial média anual dos últimos 30 anos, na área, foi de aproximadamente 1.503 mm (Silva et al., 2014).

O sistema de manejo avaliado é o ILP tipo Santa Fé, consolidado a partir do ano 2000. A pastagem estudada de *Urochloa* spp., conduzida em uma área de aproximadamente 7 ha, estava no terceiro ano de formação e foi implantada na época chuvosa, após dois anos e meio de rotação das culturas anuais. A área sob pastagem foi utilizada na recria de bovinos de corte da raça zebuína Nelore BRGN, desenvolvida e melhorada para a região do Cerrado. Os animais pastejavam em curto período de tempo, pois se fazia o rodízio deles nas diferentes áreas do sistema ILP, para aumentar a

taxa de lotação animal. Os animais foram manejados na área da pastagem, nos seguintes períodos e com as respectivas taxa de lotação animal (UA – unidade animal): 24/1/2013 a 5/2/2013, 15,88 UA ha⁻¹; 18/2/2013 a 6/3/2013, 15,88 UA ha⁻¹; 26/3/2013 a 2/4/2013, 15,88 UA ha⁻¹; 15/4/2013 a 17/4/2013, 15,88 UA ha⁻¹; 24/5/2013 a 20/7/2013, 7,58 UA ha⁻¹; 8/8/2013 a 14/8/2013, 14,02 UA ha⁻¹; 14/9/2013 a 20/9/2013, 14,02 UA ha⁻¹.

O estudo foi realizado de 5 de fevereiro a 30 de setembro de 2013 e englobou parte da época chuvosa e da seca. Realizaram-se duas adubações nitrogenadas: uma em 11 de março de 2013, com a aplicação de 100 kg de ureia ha⁻¹ (45 kg ha⁻¹ de N); e outra em 8 de julho de 2013, com aplicação de 222,22 kg de ureia ha⁻¹ (100 kg ha⁻¹ de N). A ureia foi aplicada a lanço e distribuída em toda a área da pastagem. A última correção do solo com calcário foi realizada no verão de 2002/2003, com a aplicação de 2.000 kg ha⁻¹; nessa ocasião, na área da pastagem, se iniciou o cultivo de milho sob plantio direto, em associação com *Urochloa* spp. cultivada como planta de cobertura.

As coletas foram realizadas semanalmente, com exceção dos períodos de adubação e precipitação pluvial, em que foram frequentes até a estabilização desses eventos. No caso da adubação, os fluxos foram amostrados por sete dias consecutivos, após a aplicação da ureia ao solo.

Na quantificação dos fluxos de N₂O, utilizou-se o método da câmara estática manual. Foram marcados 25 pontos de amostragem na área da pastagem, equidistantes entre si em 25 m, que formaram uma rede de 5x5 câmaras. As câmaras foram dispostas em uma área de 10.000 m² dentro da pastagem. Na área do cerrado nativo, as câmaras estáticas foram instaladas a no mínimo 50 m da borda da vegetação. Foram utilizadas cinco câmaras, equidistantes entre si em 5 m. A câmara estática utilizada foi do tipo base-tampa, confeccionada a partir de aço galvanizado (40x60x15 cm de largura, comprimento e altura, respectivamente). A base da câmara foi inserida no solo a 0,10 m de profundidade, e nivelada conforme a declividade do terreno. As amostragens se concentraram no período da manhã, entre 9 e 10 h, e os tempos de coleta foram de 0, 15 e 30 min, após o fechamento das câmaras. Simultaneamente às coletas, as temperaturas do ar e do solo foram monitoradas com termômetro digital portátil. A concentração de N₂O foi determinada por

cromatografia gasosa (Perkin Elmer Auto System XL, PerkinElmer, Norwalk, CT, USA). O cromatógrafo foi equipado com coluna empacotada, que continha Porapak Q e funcionava a 65°C, e detector de captura de elétrons 63Ni (ECD) a 375°C. Para a calibração do cromatógrafo, utilizaram-se padrões primários de N₂O à concentração de 350 e 1.000 ppbv (parte por bilhão, na base de volume).

As concentrações de N₂O foram calculadas por meio de regressões lineares. Quando os fluxos eram subestimados na regressão linear, a função de Hutchinson & Mosier (1981) era utilizada [função HM], da seguinte forma: $F = (C1 - C0)^2 / [t1 \times (2 \times C1 - C2 - C0)] \times \ln[(C1 - C0)/(C2 - C1)]$, em que: F é o fluxo (μL gás L⁻¹ h⁻¹); C0, C1, e C2 são as concentrações (ppmb - parte por bilhão, na base de volume) do gás na câmara de medição, nos tempos 0, 1 e 2, respectivamente; e t1 é o intervalo entre os tempos de amostragem (h).

As avaliações físicas e químicas do solo foram feitas em amostras deformadas e indeformadas, coletadas da camada de 0–0,10 m, no total de 25 e 5 repetições, nas áreas da pastagem e no cerrado nativo, respectivamente. As amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos de Kopeck, com 5x5 cm de altura e diâmetro, respectivamente, e as amostras deformadas foram coletadas com o uso do trado calador.

Nas amostras indeformadas, foram determinados: densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), microporos (MiPs) e macroporos (MaPs). Os MiPs e MaPs foram determinados por meio de mesa de tensão, à 0,06 atm. (Claessen, 1997). Nas amostras deformadas, foram determinados: o teor de nitrato (NO₃⁻) e de amônio (NH₄⁺), a umidade gravimétrica (θg), o pH, a matéria orgânica do solo (MOS) e C e N total (C_t e N_t) do solo. Por meio da θg e da Ds, foi possível calcular a percentagem do EPPA, por meio da equação descrita por Paul & Clark (1996).

Na realização das análises químicas de pH, MOS, C_t e N_t, as amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas em peneira de malha de 2 mm (terra fina seca ao ar, TFSA). O pH foi determinado pelo método potenciométrico, em que o potencial eletrônico é apurado por meio de eletrodo imerso em suspensão aquosa, à proporção sólido: líquido de 1:2,5 (Claessen, 1997). A MOS foi determinada pelo método de Walkley-Black modificado (Claessen, 1997). Os teores de NO₃⁻ e NH₄⁺ foram determinados em análises

quantitativas, por espectrometria UV-Vis acoplada a um sistema FIA (Flow Injection Analysis, FIALAB 2500, Fialab Inc., Seattle, Washington, USA). Os resultados da análise foram corrigidos de acordo com θ_g do solo do momento da coleta, para a obtenção em base de massa de solo seco.

O C_t e N_t do solo foram determinados pelo método de combustão via seca, a 925°C , com o auxílio de um analisador elementar (Perkin Elmer CHNS/O 2400 Série II, PerkinElmer, Shelton, CT, USA). As amostras analisadas foram previamente moídas e passadas em peneira de 60 mesh. Foram pesadas de 10 a 12 mg de solo em cápsulas de estanho.

Análises descritivas (média e erro padrão) dos valores dos fluxos de N_2O e das variáveis físicas e químicas do solo foram realizadas, e a normalidade dos dados foi testada por meio do teste de Shapiro-Wilk. Com a finalidade de comparar as variáveis físicas e químicas do solo obtidas em cada sistema – pastagem e cerrado nativo –, aplicaram-se os seguintes testes: t , aos dados que apresentaram distribuição normal; e o teste de Wilcoxon para amostras independentes, aos dados que apresentaram distribuição não normal. A correlação de Spearman foi aplicada aos valores de fluxos de N_2O e das variáveis físicas e químicas do solo. As análises estatísticas foram realizadas por meio dos programas estatísticos Assistat 7.7, Action e SigmaPlot versão 12.0.

Resultados e Discussão

Nos dados de fluxos de N_2O da área sob pastagem e cerrado nativo, verificaram-se valores médios que variaram de negativos, como $-5,86 \pm 0,84$ e $-8,36 \pm 2,34$ $\text{ng m}^{-2} \text{s}^{-1}$ – que indicam consumo de N_2O atmosférico, conforme Nogueira et al. (2015) –; baixos, como $0,44 \pm 1,67$ e $0,26 \pm 1,28$ $\text{ng m}^{-2} \text{s}^{-1}$, na área sob pastagem e cerrado nativo, respectivamente; e muito elevados, na ordem de $290,34 \pm 43,23$ $\text{ng m}^{-2} \text{s}^{-1}$, na área sob pastagem.

Entre os fatores que influenciaram os fluxos de N_2O , podem ser citados os seguintes: os edáficos, a exemplo da quantidade de MiPs que influenciou o EPPA do solo; a microporosidade que, aliada ao alto teor de água, pode gerar condições redutoras e, assim, ocasionar maior disponibilidade de N com consequente aumento das emissões de N_2O dos solos (Drury et al., 2004); o uso de fertilizante nitrogenado e de dejetos animais

(Lima, 2000); o retorno de N por meio da deposição de urina e esterco, em áreas sob pastejo, que ocorre de forma localizada (Sordi et al., 2014) e proporciona sítios de alta produção de N_2O , já que grande parte do N consumido pelos animais é excretada (Lessa et al., 2014); e os fatores climáticos, que variam conforme o período do ano.

As precipitações pluviais favorecem o aumento do teor de umidade do solo e, conseqüentemente, o déficit de oxigênio, condição ideal para a desnitrificação, processo-chave na produção de N_2O no solo (Davidson et al., 2000). A temperatura do solo afeta a atividade dos microrganismos. O aumento da temperatura provoca uma intensificação das transformações no solo, principalmente quanto à mineralização do material orgânico, à dinâmica do N e às emissões dos gases do solo (Haney et al., 2004).

Os fluxos médios de N_2O , na área da pastagem e no cerrado nativo, foram $14,12$ e $-2,45$ $\text{ng m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. A emissão total obtida na área da pastagem foi de $1.644,19$ g ha^{-1} . Na área de cerrado nativo, não houve emissão de N_2O do solo para a atmosfera. Nogueira et al. (2015) relataram fluxos médios de N_2O de $4,17$ e $1,67$ $\text{ng m}^{-2} \text{s}^{-1}$, em áreas de pastagem manejada e de floresta, respectivamente; além de fluxos médios, em outra localidade, de $17,50$ e $1,39$ $\text{ng m}^{-2} \text{s}^{-1}$, nesses mesmos usos do solo, respectivamente.

Os valores de Ds, PT, MiPs, MaP, EPPA e θ_g diferiram entre a pastagem e o cerrado nativo (Tabela 1). O solo sob cerrado nativo apresentou menor Ds e melhor distribuição dos valores de MaP e MiP do que o solo sob pastagem do ILP.

Segundo Jorge et al. (2012), os solos do bioma Cerrado são caracterizados por excelentes atributos físicos em condições naturais, o que foi verificado nos resultados encontrados no presente estudo, em que a área sob cerrado nativo apresentou melhor estrutura física do solo. A Ds é um atributo cujo valor varia em razão do manejo adotado no sistema (Jorge et al., 2012) ou conforme o uso de operações mecanizadas, e esse valor é condicionado por diversos fatores como agregação do solo, compactação, porosidade, entre outros (Bicalho, 2011); além disso, podem ocorrer alterações na distribuição e no tamanho dos poros e, conseqüentemente, a tensão com que a água é retida (Larson & Gupta, 1980). Isso foi verificado na presente pesquisa, em que a área sob pastagem apresentou menor

PT, menor quantidade de MaPs e maior quantidade de MiPs – este último associado à maior percentagem de EPPA do que o da área sob cerrado nativo (Tabela 1).

O conteúdo de água no solo variou com a precipitação pluvial. A θ_g na camada de 0–0,10 m variou entre 9,1 e 29,5%, no solo sob pastagem, e entre 16,9 e 34%, no solo sob cerrado nativo. Os valores de θ_g do solo encontrados na área da pastagem foram inferiores aos da área do cerrado nativo. Esse comportamento está relacionado ao processo de compactação do solo, que promove a redução da macroporosidade e PT.

O solo sob pastagem apresentou maior teor médio de NH_4^+ . Provavelmente, as adubações nitrogenadas, a deposição de fezes e urina pelos animais e a decomposição da palha da braquiária favoreceram a maior concentração de NH_4^+ no solo. Segundo Subbarão et al. (2013), certas plantas podem suprimir o processo de nitrificação do solo por meio da liberação de inibidores pelas raízes, tal fenômeno é observado em gramíneas. Os estudos de campo realizados por tais autores sugerem, ainda, que gramíneas do gênero *Urochloa* spp. podem suprimir a nitrificação e a emissão de N_2O do solo.

Estudos como o de Sidiras & Pavan (1985) indicam que o sistema plantio direto consolidado demanda

menores teores de calcário, e que, em contrapartida, o teor de alumínio trocável e a percentagem de saturação da CTC efetiva por alumínio tendem a diminuir com o decorrer dos anos de implantação do sistema. O alto teor de MOS e o aporte de resíduos vegetais e animais mantidos na área de ILP pode ter favorecido o aumento e a manutenção dos níveis de pH na área sob pastagem, que apresentou maior valor médio do que a área do cerrado nativo.

A relação C_i/N_i do solo da pastagem foi comparável à do solo do cerrado nativo (Tabela 1). Porém, as perdas de C_i nos solos sob pastagem e cerrado foram de 7,1 e 9,3%, respectivamente.

No período das avaliações, os fluxos de N_2O apresentaram correlação positiva e significativa com o teor de NO_3^- , EPPA e a temperatura do solo (Tabela 2). Embora o NH_4^+ estivesse presente no solo em maiores concentrações, o NO_3^- afetou significativamente as emissões de N_2O .

Altas taxas de N_2O ocorrem quando o solo apresenta EPPA acima de 60%, o que dificulta a difusão de O_2 e favorece a formação de ambientes anaeróbicos ideais para a desnitrificação (Bateman & Baggs, 2005). Na maioria das vezes, esse processo é intensificado quando há aumento do teor de NO_3^- no solo (Carmo et al., 2005; Ruser et al., 2006) e quando fatores como temperatura e C orgânico disponível não são limitantes (Dalal et al., 2003).

Segundo Chapuis-Lardy et al. (2007), a quantidade de N_2O a ser emitida será maior quando a disponibilidade de NO_3^- no solo for elevada, pois esse composto é preferido como acceptor de elétrons em

Tabela 1. Média das variáveis físicas e químicas de solo sob pastagem, em sistema de integração lavoura-pecuária, e de solo sob cerrado nativo⁽¹⁾.

Variável ⁽²⁾	Pastagem	Cerrado nativo
Densidade do solo (g cm^{-3})	1,35***	0,96
Porosidade total (%)	51,75**	56,02
Microporos (%)	40,97***	30,45
Macroporos (%)	10,78***	25,58
EPPA (%)	57,00***	34,54
Umidade gravimétrica (%)	19,99***	22,72
pH	5,79***	4,64
Matéria orgânica do solo	34,31 ^{ns}	35,48
Carbono total (g kg^{-1})	22,87***	25,22
Nitrogênio total (g kg^{-1})	1,55**	1,67
Relação C_i/N_i	14,77 ^{ns}	15,09
NO_3^- ($\text{mg N-NO}_3^- \text{kg}^{-1}$)	30,68***	62,37
NH_4^+ ($\text{mg N-NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$)	37,28***	10,90

⁽¹⁾Dados referentes às coletas de solo à profundidade 0–0,10 m, entre fevereiro e setembro de 2013. ⁽²⁾O teste t foi aplicado para avaliar as variáveis densidade do solo, macroporos, microporos, porosidade total e carbono total; e o teste de Wilcoxon, para as variáveis espaço poroso preenchido por água (EPPA), umidade gravimétrica, pH, matéria orgânica do solo, nitrogênio total (N_t), relação C_i/N_i , amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-). ^{ns}Não significativo. ***e**Significativo a 0,1 e 1,0% de probabilidade, respectivamente.

Tabela 2. Correlação bivariada de Spearman entre os valores médios dos fluxos de N_2O e das variáveis físicas e químicas do solo, na área sob cultivo de pastagem em sistema de integração lavoura-pecuária, no período de 5 de fevereiro a 30 de setembro de 2013.

Variável	N_2O	pH	EPPA	NH_4^+	NO_3^-	T solo ($^{\circ}\text{C}$)	T ar ($^{\circ}\text{C}$)
N_2O		-0,092	0,538	0,404	0,716	0,397	0,034
pH	ns		0,358	0,038	-0,382	0,059	-0,060
EPPA	***	ns		-0,264	-0,292	0,565	0,116
NH_4^+	ns	ns	ns		0,667	0,147	-0,011
NO_3^-	***	ns	ns	***		0,211	-0,016
T solo ($^{\circ}\text{C}$)	**	ns	***	ns	ns		0,620
T ar ($^{\circ}\text{C}$)	ns	ns	ns	ns	ns	***	

^{ns}Não significativo. ***e**Significativo a 0,1 e 1,0% de probabilidade, respectivamente. EPPA, espaço poroso preenchido por água.

relação ao N₂O. A temperatura e a umidade do solo são fatores que influenciam os processos biológicos do solo, pois afetam a atividade dos microrganismos que realizam tais processos. Perdomo et al. (2009) observaram maiores fluxos de N₂O, principalmente após a ocorrência de precipitações pluviais e durante períodos de alta temperatura do solo.

Com o intuito de avaliar o efeito da estação do ano sobre a incidência dos fluxos de N₂O, estes foram correlacionados aos atributos físicos do solo na estação chuvosa e aos atributos físicos e químicos do solo na estação seca. Na estação chuvosa, observou-se correlação positiva entre os fluxos de N₂O e o EPPA do solo (Tabela 3). As precipitações pluviais favoreceram a mineralização do N orgânico oriundo das fezes dos animais e a hidrólise da ureia aplicada ao solo e, como consequência, houve aumento dos fluxos de N₂O. Na estação seca, observou-se correlação positiva e significativa entre os fluxos de N₂O e os teores de NH₄⁺ e NO₃⁻ do solo. A ocorrência das precipitações pluviais, após o período seco, favoreceu as maiores magnitudes de fluxos de N₂O dentro do período estudado, conforme relatado por Varella et al. (2004). Em períodos secos, os processos de nitrificação e de desnitrificação podem ocorrer de forma simultânea no solo com a ocorrência

de precipitações pluviais (Souza & Enrich-Prast, 2012) e favorecer a formação de N₂O. A correlação positiva observada entre os fluxos de N₂O e os teores de NH₄⁺ e NO₃⁻ no solo indica que tais processos ocorreram de forma simultânea e favoreceram a formação de N₂O.

Conclusões

1. Os fluxos de N₂O apresentam correlação positiva com o teor de nitrato, o espaço preenchido pela água do solo e a temperatura do solo.

2. Na época chuvosa, os fluxos apresentam correlação positiva com o espaço preenchido pela água do solo e, na época seca, com o teor de amônio e o nitrato do solo.

3. O solo sob pastagem em sistema de integração lavoura-pecuária apresenta fluxos maiores de N₂O, principalmente após longo período seco precedido de precipitações pluviais.

4. Na área sob Cerrado há ocorrência predominante de fluxos negativos de N₂O.

5. O solo com pastagem manejada em sistema de integração lavoura-pecuária apresenta perdas de N₂O para a atmosfera, enquanto no cerrado nativo não há emissão de N₂O.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, projeto 562601/2010-14), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (Fapeg, 20090044900417) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo auxílio financeiro.

Referências

ALVARENGA, R.C.; NOCE, M.A. **Integração lavoura-pecuária**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 16p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 47).

BATEMAN, E.J.; BAGGS, E.M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. **Biology and Fertility of Soils**, v.41, p.379-388, 2005. DOI: 10.1007/s00374-005-0858-3.

BICALHO, I.M. Um estudo da densidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, p.1-9, 2011.

BOUWMAN, A.F.; BOUMANS, L.J.M.; BATJES, N.H. Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. **Global Biogeochemical Cycles**, v.16, p.28-1-28-9, 2002. DOI: 10.1029/2001gb001812.

Tabela 3. Correlação bivariada de Spearman, entre os valores médios dos fluxos de óxido nitroso e das variáveis físicas e químicas do solo, na área sob cultivo de pastagem em sistema de integração lavoura-pecuária, nos períodos chuvoso, de 5 de fevereiro a 24 de abril de 2013, e seco, de 15 de maio a 30 de setembro de 2013.

Variável	N ₂ O	pH	EPPA	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	T solo (°C)	T ar (°C)
Época chuvosa							
N ₂ O		-	0,671	-	-	0,034	-0,209
EPPA	**	-		-	-	-0,342	-0,322
T solo (°C)	ns	-	ns	-	-		0,715
T ar (°C)	ns	-	ns	-	-	***	
Época seca							
N ₂ O		0,041	0,176	0,466	0,788	0,207	-0,017
pH	ns		0,384	0,229	-0,153	-0,123	-0,265
EPPA	ns	ns		0,135	-0,200	0,024	-0,072
NH ₄ ⁺	*	ns	ns		0,636	0,716	0,285
NO ₃ ⁻	***	ns	ns	**		0,705	0,256
T solo (°C)	ns	ns	ns	***	***		0,568
T ar (°C)	ns	ns	ns	ns	ns	**	

ns Não significativo. ***e**Significativo a 0,1 e 1,0% de probabilidade, respectivamente.

- BRASSEUR, G.P.; ORLANDO, J.J.; TYNDALL, G.S. **Atmospheric chemistry and global change**. New York: Oxford University, 1999. 654p.
- CARMO, J.B. do; ANDRADE, C.A. de; CERRI, C.C.; PICCOLO, M. de C. Disponibilidade de nitrogênio e fluxos de N₂O a partir de solo sob pastagem após aplicação de herbicida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.843-852, 2005. DOI: 10.1590/S0100-06832005000500009.
- CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Agricultura e aquecimento global. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.40-44, 2007.
- CHAPUIS-LARDY, L.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J.-L.; BERNOUX, M. Soils, a sink for N₂O? A review. **Global Change Biology**, v.13, p.1-17, 2007. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01280.x.
- CLAESSEN, M.E.C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPQ, 1997. 212p. (Embrapa-CNPQ. Documentos, 1).
- DALAL, R.C.; WANG, W.; ROBERTSON, G.P.; PARTON, W.J. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.41, p.165-195, 2003. DOI: 10.1071/SR02064.
- DAVIDSON, E.A.; KELLER, M.; ERICKSON, H.E.; VERCHOT, L.V.; VELDKAMP, E. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. **BioScience**, v.50, p.667-680, 2000. DOI: 10.1641/0006-3568(2000)050[0667:TAC.
- DRURY, C.F.; YANG, X.M.; REYNOLDS, W.D.; TAN, C.S. Influence of crop rotation and aggregate size on carbon dioxide production and denitrification. **Soil and Tillage Research**, v.79, p.87-100, 2004. DOI: 10.1016/j.still.2004.03.020.
- ESTIMATIVAS anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2013. 76p.
- GIACOMINI, S.J.; JANTALIA, C.P.; AITA, C.; URQUIAGA, S.S.; ALVES, B.J.R. Emissão de óxido nitroso com a aplicação de dejetos líquidos de suínos em solo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1653-1661, 2006. DOI: 10.1590/S0100-204X2006001100012.
- HANEY, R.L.; FRANZLUEBBERS, A.J.; PORTER, E.B.; HONS, F.M.; ZUBERER, D.A. Soil carbon and nitrogen mineralization: influence of drying temperature. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.489-492, 2004. DOI: 10.2136/sssaj2004.0489.
- HUTCHINSON, G.L.; MOSIER, A.R. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.311-316, 1981. DOI: 10.2136/sssaj1981.03615995004500020017x.
- JORGE, R.F.; ALMEIDA, C.X. de; BORGES, E.N.; PASSOS, R.R. Distribuição de poros e densidade de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. **Bioscience Journal**, v.28, p.159-169, 2012.
- LAL, R.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A.; KIMBLE, J.M. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. **Soil Science**, v.172, p.943-956, 2007. DOI: 10.1097/ss.0b013e31815cc498.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.1127-1132, 1980. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400060001x.
- LESSA, A.C.R.; MADARI, B.E.; PAREDES, D.S.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; ALVES, B.J.R. Bovine urine and dung deposited on Brazilian savannah pastures contribute differently to direct and indirect soil nitrous oxide emissions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.190, p.104-111, 2014. DOI: 10.1016/j.agee.2014.01.010.
- LIMA, M.A. de. Emissão de gases de efeito estufa provenientes de sistemas agrícolas no Brasil. **Biocologia, Ciência e Desenvolvimento**, v.3, p.38-43, 2000.
- MACHADO, P.L.O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v.28, p.329-334, 2005. DOI: 10.1590/S0100-40422005000200026.
- NOGUEIRA, A.K. da S.; RODRIGUES, R. de A.R.; CASTRO, B.S.; NOGUEIRA, T.F.; SILVA, J.J.N. da; BEHLING, M.; MOMBACH, M.; ARMACOLO, N.; SILVEIRA, J.G. Emissões de óxido nitroso e metano do solo em áreas de recuperação de pastagens na Amazônia matogrossense. **Química Nova**, v.38, p.937-943, 2015. DOI: 10.5935/0100-4042.20150109.
- PAUL, E.A.; CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1996. 340p.
- PERDOMO, C.; IRISARRI, P.; ERNST, O. Nitrous oxide emissions from an Uruguayan Argiudoll under different tillage and rotation treatments. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.84, p.119-128, 2009. DOI: 10.1007/s10705-008-9231-x.
- RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R.; SCHMIDT, G.; BUEGGER, F.; MUNCH, J.C. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. **Soil Biology and Biochemistry**, v.38, p.263-274, 2006. DOI: 10.1016/j.soilbio.2005.05.005.
- SANTOS, G.G.; SILVEIRA, P.M. da; MARCHÃO, R.L.; BECQUER, T.; RIOS, A.J.W.; RODRIGUES, C. **Descrição morfológica de perfis de solos da Fazenda Capivara da Embrapa Arroz e Feijão**: relatório do ano de 2010. Santo Antônio: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 52p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 258).
- SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.249-254, 1985.
- SILVA, S.C. da; HEINEMANN, A.B.; PAZ, R.L.F. da; AMORIM, A. de O. **Informações meteorológicas para pesquisa e planejamento agrícola, referentes ao Município de Santo Antônio de Goiás, GO, 2012**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2014. 29p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 298).
- SNYDER, C.S.; BRUULSEMA, T.W.; JENSEN, T.L.; FIXAN, P.E. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.133, p.247-266, 2009. DOI: 10.1016/j.agee.2009.04.021.

- SORDI, A.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, M.A.; PIVA, J.T.; ZANATTA, J.A.; TOMAZI, M.; ROSA, C.M. da; MORAES, A. de. Nitrous oxide emission factors for urine and dung patches in a subtropical Brazilian pastureland. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v.190, p.94-103, 2014. DOI: 10.1016/j.agee.2013.09.004.
- SOUZA, V.F.; ENRICH-PRAST, A. Óxido nitroso (N₂O) em ambientes aquáticos continentais: produção, fatores reguladores e fluxos de diferentes ambientes. **Oecologia Australis**, v.16, p.311-329, 2012. DOI: 10.4257/oeco.2012.1602.09.
- SUBBARÃO, G.V.; RAO, I.M.; NAKAHARA, K.; ANDO, Y.; SAHRAWAT, K.L.; TEFAMARIAM, T.; LATA, J.C.; BOUDSOCQ, S.; MILES, J.W.; ISHITANI, M.; PETERS, M. Nitrogen management in grasslands and forage-based production systems – role of biological nitrification inhibition (BNI). **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v.1, p.168-174, 2013. DOI: 10.17138/TGFT(1)168-174.
- VARELLA, R.F.; BUSTAMANTE, M.M.C.; PINTO, A.S.; KISSELLE, K.W.; SANTOS, R.V.; BURKE, R.A.; ZEPP, R.G.; VIANA, L.T. Soil fluxes of CO₂, CO, NO, and N₂O from an old pasture and from native savanna in Brazil. **Ecological Applications**, v.14, p.221-231, 2004. DOI: 10.1890/01-6014.
- VILELA, L.; MARTHA-JÚNIOR, G.B.; MARCHÃO, R.L. Integração lavoura-pecuária-floresta: alternativa para intensificação do uso da terra. **Revista UFG**, ano 8, p.92-99, 2012.

Recebido em 31 de agosto de 2015 e aprovado em 11 de fevereiro de 2016