



Emissão de óxido nitroso de solos cultivados com cana-de-açúcar⁽¹⁾.

Vitor Paulo Vargas⁽²⁾; Heitor Cantarella⁽³⁾; Acácio Agostinho Martins⁽⁴⁾; Rafael de Melo Sousa⁽⁴⁾; Johnny Rodrigues Soares⁽⁴⁾; Cristiano Alberto de Andrade⁽⁵⁾

⁽¹⁾ FAPESP; CNPq

⁽²⁾ Doutorado, IAC, Bolsista FAPESP (2010/05300-4); Av. Barão de Itapura, 1481, 13020-902, CP. 28, Campinas, São Paulo; vitorpvargas@hotmail.com; ⁽³⁾ Pesquisador, IAC; ⁽⁴⁾ Estudantes de Pós-Graduação, IAC ⁽⁵⁾ Pesquisador Embrapa – Meio Ambiente, Jaguariúna-SP.

RESUMO: A emissão de óxido nitroso (N₂O), associada ao uso de fertilizantes nitrogenados, durante a produção de cana-de-açúcar, também regula a eficiência ambiental do sistema sucro-energético. O objetivo desse trabalho foi avaliar as emissões de N₂O em função da aplicação de N mineral e inoculação com bactérias diazotróficas em dois locais (Jaú e Piracicaba) em dois anos de avaliação (2011/12 e 2012/13). Os solos dos dois locais são contrastantes no conteúdo de argila. Foram realizadas medições frequentes dos fluxos de N₂O em parcelas com 0, 50, 100 e 150 kg N ha⁻¹. Também foram avaliadas parcelas com inoculação isolada e associada à 100 kg N ha⁻¹. A aplicação de N aumentou a emissão de N₂O a partir das linhas de cana-de-açúcar em Piracicaba (solo argiloso) nos dois anos de avaliação. Em 2012/13 foi verificado um incremento linear em função da quantidade de N aplicada. O impacto da fertilização nitrogenada foi inferior no solo arenoso (Jaú) nos dois anos. A aplicação de N também aumentou a emissão a partir das entrelinhas da cultura. A inoculação isolada não alterou os fluxos diários de N₂O em relação ao controle. Por outro lado, quando associada ao uso de N mineral, a inoculação reduziu os fluxos diários e a emissão acumulada em 110 dias de avaliação em Piracicaba. O fator médio de emissão, nos dois anos e locais, alcançou o máximo de 0,16%. A perda de N-fertilizante como N₂O é pouco significativa durante a produção da biomassa garantindo balanços mais favoráveis à indústria energética do Brasil.

Termos de indexação: gases de efeito estufa; inoculação; N-fertilizante; tipos de solo.

INTRODUÇÃO

Entre os fatores principais que norteiam a eficiência ambiental do etanol, com relação aos gases de efeito estufa (GEE), estão a eficiência de cultivo da cana-de-açúcar e as emissões de óxido nitroso (N₂O) durante o processo produtivo da biomassa (Börjesson et al., 2009).

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) assume em seus relatórios que 1% do N reativo é emitido como N₂O (IPCC, 2007). Contudo, Crutzen et al. (2008) refutaram esse valor por acreditarem que a emissão de N₂O seria maior (3-5%). Por ser um potente GEE (1 kg N₂O = 298 kg CO₂) e estar

associado a aplicações de fertilizantes nitrogenados e resíduos, constantemente usados na fase agrícola da produção de etanol, Crutzen et al. (2008) inclusive negaram a eficiência ambiental de biocombustíveis apenas pela emissão de N₂O. Este trabalho impactou de tal modo o setor sucro-energético brasileiro levando a publicação recente de outros resultados obtidos em condições de campo. Signor et al. (2013) e Oliveira et al. (2013) calcularam fatores de emissão isolados para N-fertilizante e N-vinhaça, respectivamente. Carmo et al. (2013) obtiveram fatores de emissão em função do uso associado de fertilizante nitrogenado e vinhaça, aplicados sobre diferentes quantidades de palhada. Os fatores de emissão variaram de 0,3 a 12,9%, com um coeficiente de variação de 113,5%, indicando a necessidade de revisão de alguns valores e mais estudos.

Diante da escassez de resultados na literatura e da incerteza para se assumir um fator fixo a partir dos resultados já apresentados é importante reavaliar o impacto da adubação nitrogenada sobre a emissão de N₂O na produção de cana-de-açúcar a partir de diferentes solos e durante mais de uma safra. O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de N mineral por meio de diferentes doses sobre a emissão desse GEE a partir de solos contrastantes em termos de granulometria, durante as safras 2011/12 e 2012/13. Avaliações da emissão de N₂O também foram realizadas em parcelas que receberam inoculante a base bactérias diazotróficas.

MATERIAL E MÉTODOS

As avaliações foram realizadas em experimentos pertencentes a uma rede de ensaios cujo escopo principal visa verificar o efeito da adubação mineral com N e inoculação com bactérias sobre o rendimento de diferentes cultivares de cana-de-açúcar. A emissão de N₂O foi determinada para as áreas de Piracicaba e Jaú. O experimento de Piracicaba está localizado a 22°41'6"S, 47°38'55"O e 547 m de altitude. A área de Jaú fica a 22°15'10"S, 48°34'7"O e 522 m de altitude. A temperatura média anual de ambas as áreas é 21,6°C. A precipitação média anual é 1321 mm em Piracicaba, e 1344 mm em Jaú. Os solos são contrastantes no conteúdo de argila. As principais características físico-químicas dos

solos estão apresentadas na **Tabela 1**.

A cana-de-açúcar foi plantada nos dois locais em abril, 2010. As colheitas foram realizadas em início de julho e fim de agosto, 2011, em Piracicaba e Jaú, respectivamente; e no final de agosto e final de outubro, 2012. O resíduo remanescente da colheita foi mantido sobre as duas áreas, exceto em Jaú após a colheita de 2011 devido a uma queima acidental.

Em 2011/12 a avaliação foi realizada em parcelas que receberam as seguintes doses de N, em kg ha⁻¹: 0, 100 e 150. Amostragens também foram realizadas em parcelas inoculadas com uma mistura de estirpes de bactérias diazotróficas fornecida pela Embrapa Agrobiologia (tratamento N0+I). No segundo ano de avaliação as amostragens foram realizadas em parcelas com as seguintes doses de N, em kg ha⁻¹: 0, 50, 100 e 150, e nos tratamentos com inoculação isolada (N0+I) e associada à 100 kg N ha⁻¹ (N100+I). Foram conduzidas quatro replicatas de cada tratamento. Cada repetição tem duas câmaras para amostragem de gases que foram posicionadas a aproximadamente 15 cm das linhas de plantio. Nos tratamentos controle (N0) e N150 (N150) também foram posicionadas câmaras nas entrelinhas. O fertilizante (sulfato de amônio em 2011 e nitrato de amônio em 2012) foi distribuído em filetes próximos às linhas. Quantidades equivalentes aos tratamentos foram distribuídas dentro das bases posicionadas nas linhas para amostragem de gases. A adubação nitrogenada em Piracicaba foi realizada no início de outubro, em 2010, e final de setembro, em 2012. Em Jaú a adubação foi realizada no final de outubro, em 2011, e final de novembro, em 2012.

A amostragem de N₂O foi realizada de modo intensivo (a cada dois dias) nos primeiros dois meses após a adubação nos dois locais, exceto no segundo ano em Piracicaba cujo período intensivo foi estendido por mais um mês. Após esse período as amostragens foram menos regulares. O método para avaliação dos fluxos diários de N₂O utilizava-se de câmaras de PVC circulares, constituídas de uma base e uma tampa branca com tubo de respiro e uma saída para retirada das amostras de ar em intervalos regulares. As amostras de ar foram analisadas por meio de cromatografia gasosa (GC-2014, Shimadzu Co, Japão) com um detector de captura de elétrons (ECD, 325°C). Os fluxos foram calculados por meio das mudanças da concentração durante o tempo de incubação utilizando-se um ajuste linear. Após corrigir-se em função da temperatura e da pressão atmosférica, os fluxos foram extrapolados para a escala diária. Para o cálculo da emissão acumulada os fluxos diários foram interpolados

considerando o intervalo de tempo entre as medidas. A percentagem de N-fertilizante emitida como N₂O foi calculada em função da quantidade emitida a partir de cada câmara e da quantidade aplicada na parte interna.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os fluxos de N-N₂O em Piracicaba ao longo de dois anos variaram de -0,4±0,1 a 2,2±0,3 mg m⁻²d⁻¹ no tratamento N0 e de -0,3±0,1 a 3,3±0,9 mg N m⁻²d⁻¹ onde foi apenas inoculado com a mistura de estirpes (**Figura 1**). Em Jaú, a oscilação ao longo das duas safras foi entre -0,2±0,1 a 1,2±0,2 mg N m⁻²d⁻¹ no tratamento N0 e de -0,4±0,2 a 1,5±0,7 mg m⁻²d⁻¹ no tratamento N0+I (**Figura 1**). Os maiores fluxos nos tratamentos N0 e N0+I ocorreram no início do período chuvoso e depois com a redução dos intervalos entre ciclos de secamento e umedecimento, os fluxos passaram a ser reduzidos. A inoculação isolada com bactérias diazotróficas não alterou o padrão de emissão de N₂O em nenhum dos locais, em dois anos de avaliação. Isso provavelmente está associado à ausência de efeito da aplicação do inoculante no rendimento de biomassa de cana-de-açúcar (dados não apresentados). Deste modo, não houve extração e nem reposição (resíduo) diferencial no aporte de N, o que fez com que essa prática tida como potencial não afetasse o *background* do ambiente.

A adubação com sulfato de amônio em 2011/12 e nitrato de amônio em 2012/13 alterou o padrão de emissão diária nos dois locais (**Figura 1**), mas em ambos os anos o comportamento dos fluxos de N₂O tiveram clara dependência das condições ambientais (dados não apresentados). Os efeitos do uso de N, da precipitação e da umidade do solo sobre os fluxos de N-N₂O dependeram do tipo de solo. Os maiores efeitos da aplicação de N foram verificados em Piracicaba (**Figura 1**), cujo solo apresenta maior teor de argila (**Tabela 1**). Fluxos altos de N₂O em Jaú dependeram de maior volume de chuvas. Em Piracicaba os fluxos foram altos logo após a aplicação de N em 2011/12 devido à preservação da umidade do solo a níveis favoráveis aos processos de emissão por vários dias. Em 2012/13, esse padrão foi diferente. Apesar da aplicação de N ter sido após uma chuva, houve um período de quase 20 dias sem chuvas nessa área e a baixa umidade do solo dificultou os processos de transformação do N no solo. Com o retorno das chuvas, os fluxos aumentaram e alcançaram máximas equivalentes a 2,4; 6,2; 4,0 e 7,2 mg N-N₂O m⁻²d⁻¹, respectivamente, nos tratamentos N50, N100, N100+I e N150. Esses valores tiveram a mesma magnitude das máximas

alcançadas no primeiro ano de avaliação em Piracicaba.

Em Jaú foram observados apenas picos isolados de emissão de N_2O nos tratamentos com N nos dois anos de avaliação (**Figura 1**). Apesar de as chuvas terem sido frequentes nesse local nos três primeiros meses após a adubação, independentemente do ano, os picos de emissão ocorreram apenas após chuvas de grande magnitude. Por exemplo, o pico observado no primeiro ano foi registrado após período cujo acumulado foi de 200 mm, permitindo que a porosidade total preenchida com água ultrapassasse 60% (dados não apresentados). Esse é o limite inferior para iniciar o estímulo às perdas de $N-N_2O$ (Denmead et al., 2009). Jantália et al. (2008) têm argumentado que os solos brasileiros por serem profundos e apresentarem rápida infiltração de água têm baixo potencial de emissão de N_2O . Visto que o solo arenoso de Jaú apresenta maior infiltração, a adubação nitrogenada teve menores impactos sobre os fluxos diários e sobre a emissão acumulada (**Tabela 2**) que em Piracicaba, nos dois anos de avaliação. No primeiro ano não houve resposta significativa (Tukey $p < 0,05$) à aplicação de N em Jaú. Em Piracicaba, a aplicação de N aumentou a emissão 110 e 210% em relação à emissão verificada no controle, respectivamente para as doses de 100 e 150 $kg N ha^{-1}$. No segundo ano, foi verificada uma resposta linear à aplicação do fertilizante em ambos os locais (regressões não apresentadas). Para cada 10 kg de N aplicados foi constatado um incremento aproximado na emissão a partir das linhas de 18 e 8 $mg N m^{-2}$ para Piracicaba e Jaú, respectivamente. Os resultados do segundo ano ainda são parciais, mas os maiores efeitos da aplicação de N provavelmente já foram contabilizados.

A inoculação associada à aplicação de N reduziu a emissão de $N-N_2O$ em 41,8% em Piracicaba em relação ao uso isolado dos 100 $kg N ha^{-1}$ (**Tabela 2**), sendo que os fluxos diários revelaram-se consistentes durante o tempo (**Figura 1**). Esse resultado, contudo, não foi repetido em Jaú. É provável que tenha havido um efeito indireto da inoculação associada ao uso de N mineral em Piracicaba, visto que a associação das duas práticas também aumentou o perfilhamento nesse local (dados não apresentados). A emissão nas entrelinhas de parcelas com 150 $kg de N$ foi maior que a emissão do controle em Piracicaba em 2011/12 e nos dois locais em 2012/13 (**Tabela 2**). Isso provavelmente é relacionado a aumento da quantidade de N reativo no sistema todo mesmo que a aplicação de N tenha sido feita apenas em faixas nas linhas.

Ao calcular-se a % de N emitida como N_2O ,

verificou-se que as perdas estão muito aquém do estabelecido como valor referência pelo IPCC, que é 1%, apesar de em ambos os locais e anos ter sido verificado que a adubação com N aumenta a emissão desse GEE. No primeiro ano a perda média (doses de 100 e 1500 $kg N ha^{-1}$) foi de 0,15%, em Piracicaba, e $< 0,05\%$ em Jaú. No segundo ano as perdas relativas foram equivalentes às do primeiro ano, sendo 0,16% em Piracicaba e 0,1% em Jaú. É importante ressaltar que o método de avaliação utilizado permitia quantificar as reais quantidades de N aplicadas dentro das câmaras e as quantidades perdidas via emissão de N_2O , dando boa segurança aos valores obtidos. Alves et al., (2010) também verificaram perdas de mesma magnitude (0,13%) em soqueira de cana-de-açúcar no Rio de Janeiro.

CONCLUSÕES

A adubação nitrogenada tem maior impacto sobre os fluxos de N_2O em solos argilosos que arenosos e seu efeito depende das condições ambientais, principalmente de eventos que aumentem a umidade do solo.

A inoculação isolada não altera os fluxos de N_2O .

O fator de emissão do IPCC para estimativas anuais a partir de solos tropicais e cultivados com cana-de-açúcar deve ser revisado.

REFERÊNCIAS

- ALVES, B.J.R. et al. Emissões de óxido nitroso de solos pelo uso de fertilizantes nitrogenados em áreas agrícolas. Seropédica: Embrapa, 2010. 6p. Comunicado Técnico.
- BÖRJESSON, P. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – What determine this? *Applied Energy*, 86:589-594, 2009.
- CARMO, J.B. et al. In-field greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from the use of synthetic and organic fertilizers and crop trash accumulation. *Global Change Biology Bioenergy*, 5: 267-280, 2013.
- CRUTZEN, P.J. et al. N_2O release from agro bio-fuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8:389-395, 2008.
- DENMEAD, O.T. et al. Emissions of methane and nitrous oxide from Australia sugarcane soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150:748-756, 2009.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. Climate change, 2007. Synthesis report of 4th assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 22p.

JANTÁLIA, C. et al. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and systems in the south of Brazil. *Nutrient Cycling and Agroecosystems*, 82:161-173, 2008.

OLIVEIRA, B.G. et al. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. *Geoderma*, 200:77-84, 2013.

SIGNOR, D.; CERRI, C.E.P.; CONANT, R. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. *Environmental Research Letters*, doi: 10.1088/1748-9326/8/1/01513, 2013.

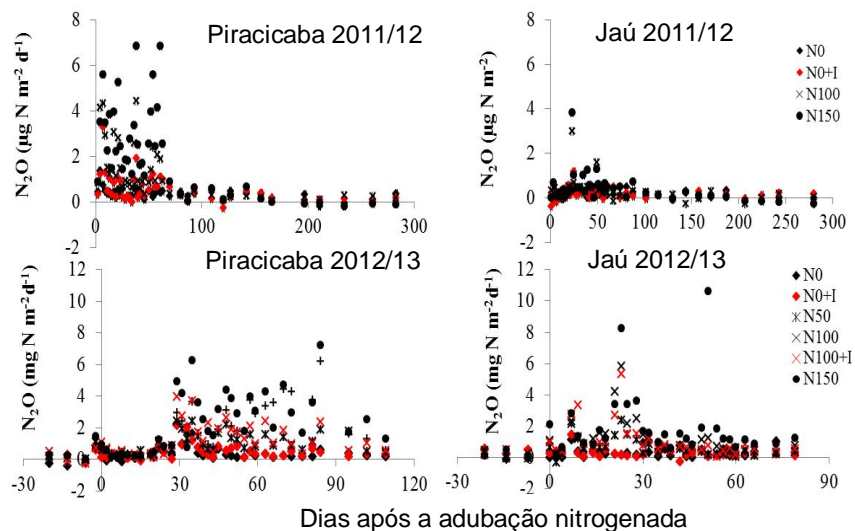


Figura 1 – Fluxos de N-N₂O a partir de solo argiloso (Piracicaba/SP) e franco-arenoso (Jaú/SP), em dois anos de avaliação (2011/12 e 2012/13), em função da aplicação de doses de N e inoculação com bactérias diazotróficas endofíticas.

Tabela 1 – Características físico-químicas gerais de solos dos locais estudados

Prof. cm	Argila ¹ g kg ⁻¹	Areia g kg ⁻¹	MOS g kg ⁻¹	pH	P mg dm ⁻³	K mmolc dm ⁻³	Ca mmolc dm ⁻³	Mg	CTC	V %
<i>Jaú (Latossolo vermelho) – Solo arenoso</i>										
0-20	178	766	22	4.8	17.8	1.6	15.8	6.3	49.0	48.3
20-40	236	702	34	4.3	9.3	0.9	7.5	1.8	34.7	29.5
<i>Piracicaba (Latossolo vermelho) – Solo argiloso</i>										
0-20	519	314	28	5.8	11.3	3.8	44.3	20.5	98.5	69.0
20-40	618	276	19	4.7	3.3	2.4	24.3	9.8	77.9	46.5

¹Protocolos extraídos de Camargo et al. (1996) e Raji et al. (2001).

Tabela 2- Emissão acumulada de N-N₂O de dois locais cultivados com cana-de-açúcar, em dois anos de avaliação, em função da aplicação de doses de N e inoculação com bactérias diazotróficas.

Tratamento	mg N-N ₂ O m ⁻²			
	2011/12		2012/13	
	Piracicaba	Jaú	Piracicaba	Jaú
N0 ²	73,6 (±12,6) ¹	23,3 (± 8,6)	24,8 (± 21,5)	26,9 (± 10,3)
N0+I	89,2 (± 15,1)	42,7 (± 10,9)	24,2 (± 29,2)	21,0 (± 8,8)
N50	s.i. ²	s.i.	68,9 (± 35,4)	46,5 (± 21,3)
N100	155,3 (± 14,8)	43,5 (± 13,7)	156,3 (± 80,8)	87,6 (± 18,4)
N100+I	s.i.	s.i.	90,9 (±39,1)	103,2 (± 91,1)
N150	229,1 (±50,0)	46,1 (±13,4)	160,5 (± 82,0)	148,3 (± 103,6)
N0EL	77,2 (± 30,9)	42,4 (± 30,9)	29,7 (± 27,4)	24,6 (±2,0)
N150EL	102,6 (± 35,7)	45,8 (± 27,3)	48,7 (± 23,0)	33,4 (± 3,9)
Período de avaliação	280 dias		110 dias	80 dias

¹Média (± erro padrão da média). ²N0: controle, linha; N0+I: inoculante, linha; N50: 50 kg N ha⁻¹, linha; N100: 100 kg N ha⁻¹; N100+I: 100 kg N ha⁻¹+inoculante; N150: 150 kg N ha⁻¹; N0EL: controle, entrelinha; N150EL: 150 kg N ha⁻¹, entrelinha. ³Sem informação.