

Sazonalidade das Emissões de Gases de Efeito Estufa em Terras Baixas: Efeito do Manejo do Solo e do Cultivo de Verão



ISSN 1678-2518

Dezembro, 2015

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Clima Temperado
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 231

Sazonalidade das Emissões de Gases de Efeito Estufa em Terras Baixas: Efeito do Manejo do Solo e do Cultivo de Verão

Walkyria Bueno Scivittaro
Anderson Dias Silveira
Camila Lemos Lacerda
Marla de Oliveira Farias
Rogério Oliveira de Sousa

Embrapa Clima Temperado
Pelotas, RS
2015

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Clima Temperado

Endereço: BR 392, Km 78

Caixa postal 403, CEP 96010-971 - Pelotas/RS

Fone: (53) 3275-8100

www.embrapa.br/clima-temperado

www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Comitê de Publicações da Embrapa Clima Temperado

Presidente: *Ana Cristina Richter Krolow*

Vice-Presidente: *Enio Egon Sosinski Junior*

Secretária: *Bárbara Chevallier Cosenza*

Membros: *Ana Luiza Barragana Viegas, Fernando Jackson, Marilaine Schaun Pelufê, Sonia Desimon*

Revisão de texto: *Bárbara Cosenza*

Normalização bibliográfica: *Marilaine Schaun Pelufê*

Editoração eletrônica: *Nathália Coelho Moreira (estagiária)*

Foto de capa: *Walkyria Scivittaro*

1ª edição

1ª impressão (2015): 30 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Clima Temperado

S273 Sazonalidade das emissões de gases de efeito estufa em Terras Baixas: efeito do manejo do solo e do cultivo de verão / Walkyria Bueno Scivittaro... [et al.]. - Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2015. 31 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Clima Temperado, ISSN 1678-2518 ; 231)

1. Efeito estufa. 2. Solo hidromórfico. I. Scivittaro, Walkyria Bueno. II. Série.

CDD 631.8

©Embrapa 2015

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Material e Métodos	13
Resultados e Discussão	17
Conclusões	27
Referências	28

Sazonalidade das Emissões de Gases de Efeito Estufa em Terras Baixas: Efeito do Manejo do Solo e do Cultivo de Verão

Walkyria Bueno Scivittaro¹

Anderson Dias Silveira²

Camila Lemos Lacerda³

Marla de Oliveira Farias⁴

Rogério Oliveira de Sousa⁵

Resumo

No ambiente de terras baixas, o manejo do solo e as espécies vegetais cultivadas, por estarem associados ao potencial de oxirredução do solo, influenciam o potencial de emissão de gases de efeito estufa (GEE). Realizou-se um trabalho para avaliar a influência das operações de preparo do solo e do cultivo de verão nas emissões de metano e de óxido nitroso em terras baixas, ao longo do ano. O estudo foi realizado de abril de 2013 a maio de 2014, em Capão do Leão-RS. Avaliaram-se três sistemas envolvendo associações de manejos do solo na entressafra e cultivos de primavera/verão: T1- solo mantido em pousio no outono-inverno e cultivado com arroz irrigado em sistema convencional de preparo na primavera; T2- solo preparado com rolo-faca no outono e cultivado com arroz irrigado em sistema de semeadura direta na primavera; e T3- solo preparado no outono e cultivado com soja em sistema de semeadura direta na primavera.

¹ Engenheira-agrônoma, D.Sc. em Ciências, pesquisadora da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS.

² Engenheiro-agrônomo, Faem/UFPel, Pelotas, RS.

³ Graduanda em Agronomia, Faem/UFPel, bolsista PIBIC da Fapergs.

⁴ Engenheira-agrônoma, D.Sc. em Agronomia, bolsista DTI do CNPq, Pelotas, RS.

⁵ Engenheiro-agrônomo, D.Sc. em Ciência do Solo, professor da Faem/UFPel, Pelotas, RS.

As coletas dos gases foram realizadas semanalmente, utilizando-se o método da câmara estática fechada. O preparo antecipado do solo no outono minimiza as emissões de metano em terras baixas durante a entressafra, relativamente ao preparo convencional de primavera e ao preparo com rolo-faca. Independentemente do manejo do solo, as emissões de metano na entressafra são pequenas relativas àquelas medidas na safra, em cultivo de arroz irrigado. A manutenção do solo em pousio no período de outono/inverno elimina as emissões de óxido nitroso durante a entressafra, relativamente a manejos que preconizam o preparo antecipado no outono. Mesmo nesses manejos, as emissões de N_2O durante a entressafra são baixas, estando concentradas no período de safra. O cultivo de soja em rotação ao arroz irrigado praticamente elimina as emissões de metano, embora potencializa as emissões de N_2O em Planossolo. Independentemente disso, a rotação de cultura com soja reduz consideravelmente o potencial de aquecimento global parcial em terras baixas, representando uma alternativa promissora para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa nesse ambiente.

Termos para indexação: metano, óxido nitroso, preparo do solo, potencial de aquecimento global, arroz irrigado, soja.

Seasonality of Greenhouse Gas Emissions in Lowlands: Effect of Soil Management and Summer Crops

Abstract

In the lowlands environment, soil management practices and crop grown are associated to redox potential of the soil. Therefore both factors influence soil potential of greenhouse gases emissions. An experiment was carried out to evaluate the influence of soil tillage and summer crops on methane and nitrous oxide emissions in lowlands throughout the year. The study was conducted from April 2013 to May 2014 in a Planossolo (Typic Albaqualf), in Capão do Leão, Rio Grande do Sul State, Brazil. Three systems, including combinations of soil tillage and spring/summer crops, were evaluated: 1) soil kept under fallow during autumn/winter season and grown with flooded rice in the spring (conventional tillage); 2) soil tillage with cutting-roller in the autumn and grown with flooded rice in no-tillage system in the spring; and 3) early soil tillage held during autumn and grown with soybeans in no-till system in the spring. The air sampling for CH₄ and N₂O soil emissions analysis was performed weekly, using static closed chambers. Early soil tillage in the autumn reduces methane emissions in lowlands during the autumn/winter season, comparing to conventional tillage in the spring and soil tillage with cutting-roller in the autumn. Regardless of soil management, methane emissions during autumn/winter season are lower than the emissions measured during flooded rice grown. Soil maintained

under fallow during autumn/winter season eliminates nitrous oxide emissions during this period, comparing to the management with early soil tillage in the autumn. Even in these managements, nitrous oxide emissions during autumn/winter season are low. On the other hand, nitrous oxide emissions occurs mainly during spring/summer season. Soybean rotation with flooded rice reduces significantly methane emissions, although it enhances N₂O emissions in lowlands. Regardless of this fact, soybean crop rotation substantially reduces partial global warming potential from lowlands, representing a promising alternative for mitigation of greenhouse gas emissions in this environment.

Index terms: *methane, nitrous oxide, soil tillage, global warming potential, flooded rice, soybean.*

Introdução

O efeito estufa é um processo natural ocasionado por gases traços que, em conjunto com o vapor d'água da atmosfera, absorvem e emitem radiação infravermelha, mantendo a temperatura média do planeta ao redor dos 15 °C, sendo essencial para o surgimento e a manutenção da vida no planeta (BAEDE et al., 2001). Os principais gases traços, também conhecidos como gases de efeito estufa (GEE), são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), sendo responsáveis, respectivamente, por aproximadamente 50%; 15,5% e 5% do forçamento radiativo causador do efeito estufa (IPCC, 2007).

O desenvolvimento industrial e a expansão das fronteiras agrícolas, principalmente a partir de meados do século XIX, promoveram incremento na emissão de GEE, gerando um efeito estufa adicional (COSTA et al., 2008). Como consequência, a temperatura média do planeta tem aumentado, fenômeno esse chamado de aquecimento global, que apresenta sérias consequências ambientais e ao setor produtivo (IPCC, 2007). A partir da Revolução Industrial até o ano 2005, a concentração de CO_2 aumentou 35%, a de CH_4 148%, e a de N_2O 55%. Embora o N_2O e o CH_4 sejam emitidos em menores quantidades que o CO_2 , apresentam potencial de aquecimento 298 e 25 vezes maior do que o CO_2 para um tempo de permanência de 100 anos na atmosfera, respectivamente (FORSTER et al., 2007), com contribuição importante para o aquecimento global.

Dados publicados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) indicam ser muito provável (90-99% de probabilidade) que a maior parte do aumento observado na temperatura média global se deva ao aumento das concentrações de GEE decorrente de ações antrópicas. Essa constatação decorre do fato de que muitas atividades antropogênicas são geradoras de GEE, principalmente a queima de combustíveis fósseis. Porém, a atividade agropecuária, em conjunto com a mudança no uso da terra,

contribuem com uma parcela significativa das emissões.

A contribuição da atividade agropecuária está associada, principalmente, à criação de ruminantes, ao cultivo de arroz irrigado, ao uso de fertilizantes minerais nitrogenados, à queima de resíduos culturais e à decomposição da matéria orgânica do solo, representando, em nível global, 22% das emissões de CO_2 , 55% das emissões de CH_4 e 80% das emissões de N_2O (IPCC, 2007). No Brasil, em razão de a economia ser altamente dependente do agronegócio, a agropecuária tem participação proporcionalmente maior, sendo responsável por 75% das emissões de CO_2 , 91% das emissões de CH_4 , e 94% das emissões de N_2O (CERRI; CERRI, 2007).

Tais dados indicam que, no setor agropecuário, os gases metano e óxido nitroso assumem maior importância relativa. As emissões brasileiras de N_2O desse setor são diretas, cerca de 64% oriundas da aplicação de fertilizantes. Por sua vez, as emissões de CH_4 estão associadas principalmente à atividade pecuária (90%), seguida do cultivo de arroz irrigado por inundação, que representa 3% do total (BRASIL, 2013).

A maior parte da produção brasileira de arroz provém da região Sul, particularmente do Estado do Rio Grande do Sul, onde se cultivam anualmente mais de um milhão de hectares com o cereal, predominantemente no sistema irrigado por inundação contínua (SOSBAI, 2014). Essa atividade, essencial para o agronegócio do Rio Grande do Sul, torna-o principal emissor nacional de CH_4 , com uma emissão de aproximadamente 4,5Tg de equivalente CO_2 (67% da emissão nacional) (LIMA et al., 2010).

O metano é, pois, considerado o gás de efeito estufa crítico associado ao cultivo de arroz irrigado. Isso porque a quantidade de metano emitida para a atmosfera resulta do balanço de dois processos opostos que ocorrem no solo, produção e consumo

(DUTAUR; VERCHOT, 2007). A produção de CH_4 ocorre apenas em ambientes reduzidos, de forma que a condição de solo inundado, presente em lavouras de arroz irrigado, é favorável à atividade de bactérias metanogênicas, responsáveis por sua produção. Por outro lado, o consumo ou oxidação de CH_4 é procedido por bactérias metanotróficas, nas zonas oxidadas desse agroecossistema (interface água-solo e rizosfera do arroz), onde os gradientes de concentração de metano e oxigênio sobrepõem-se (AULAKH et al., 2001).

A produção e emissão de metano também dependem da quantidade de carbono (C) orgânico disponível no solo, cuja principal fonte em terras baixas é a palha remanescente do cultivo de arroz, de outras espécies componentes do sistema de produção e da vegetação espontânea. Por essa razão, as práticas de manejo do solo e os sistemas de culturas estabelecidos determinam o potencial de incorporação de carbono ao solo e de emissão de CH_4 nesse ambiente ao longo do ano, incluindo os períodos de safra e de entressafra. Isso porque, no sistema de preparo convencional, a palha remanescente dos cultivos de verão e a cobertura vegetal desenvolvida durante o outono/inverno são incorporadas ao solo com pequena antecedência à semeadura do arroz, atuando como uma fonte de C lábil para a produção de CH_4 , quando da inundação do solo. Por outro lado, com a antecipação do preparo, a movimentação do solo e a incorporação da palha ocorrem no outono/inverno, possibilitando que grande parte dos resíduos vegetais seja decomposta sob condições aeróbicas, liberando dióxido de carbono e diminuindo o potencial de emissão de CH_4 do solo, uma vez que a inundação durante o próximo cultivo de arroz ocorre, apenas, na primavera (BAYER et al., 2013).

De forma geral, a emissão de óxido nitroso não é considerada crítica durante o período de cultivo de arroz irrigado por inundação contínua, especialmente quando comparada à emissão de metano. Entretanto, em razão de seu potencial de aquecimento extremamente elevado e pelo fato de sua produção e emissão no solo estarem associadas à

presença de fonte de carbono orgânico e dos íons amônio e nitrato (SCHLESINGER, 2013), é importante conhecer a magnitude de sua contribuição em sistemas de produção envolvendo a cultura de arroz irrigado.

Na agricultura, o óxido nitroso origina-se, principalmente, nos processos biológicos de nitrificação e desnitrificação, que ocorrem no solo. Em condições aeróbias, bactérias nitrificadoras convertem amônio em nitrato, podendo resultar na emissão de N_2O , como produto intermediário das reações de oxidação do nitrogênio (N). Mas em condições anaeróbias, o N_2O é gerado no processo de redução do nitrato a amônio, por microrganismos desnitrificadores (BARTON et al., 2008). Assim, a produção de N_2O é favorecida pelo aumento na disponibilidade de formas minerais de N, seja por meio da adição de fertilizantes sintéticos ou adubos orgânicos, ou ainda pela deposição de resíduos agrícolas e excretas de animais.

O balanço entre a produção e o consumo de N_2O no solo depende de mecanismos físicos, que variam com a temperatura e umidade (RAFIQUE et al., 2011). Assim, os sistemas de culturas e de manejo do solo, por alterarem a disponibilidade de fontes de carbono e nitrogênio, podem promover variações nas emissões de N_2O .

No Rio Grande do Sul, dados do setor orizícola revelam aumento significativo do preparo antecipado do solo, que apresentava área próxima a 100 mil hectares no início da década de 1990, passando a cerca de 700 mil hectares em 2010. No mesmo período, a área preparada no sistema convencional decresceu de cerca de 650 mil para menos de 260 mil hectares (IRGA, 2014). Essa conversão de sistemas implica em redução média de 33% nas emissões de metano (CH_4) associadas à lavoura de arroz irrigado, visto que no preparo antecipado a movimentação do solo ocorre no outono/inverno, possibilitando que a grande parte da palha do arroz seja decomposta sob condições aeróbias (BAYER et al., 2013). Pouco se conhece sobre

a influência dos sistemas de culturas e de preparo do solo sobre as emissões de N_2O em terras baixas.

Pelo exposto, realizou-se o presente trabalho que teve por objetivo determinar a influência das operações de preparo do solo e do cultivo de verão nas emissões anuais de metano e de óxido nitroso em terras baixas.

Material e Métodos

O experimento foi realizado em Planossolo Háplico (STRECK et al., 2008), na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS. As avaliações incluíram os períodos de outono/inverno (15 abril a 28 out. 2013) e de safra de primavera/verão(14 nov. 2013 a 26 maio 2014), totalizando pouco mais de um ano.

Previamente, a área experimental foi cultivada com arroz irrigado (safra 2012/2013), o qual foi colhido no dia 10 de abril de 2013. Nessa área estabeleceram-se os tratamentos, envolvendo associações de manejos do solo na entressafra e cultivos de primavera/verão, sendo descritos na sequência: T1- solo mantido em pousio no outono-inverno e cultivado com arroz irrigado em sistema convencional de preparo (operações de aração, gradagem e aplainamento da superfície do terreno) na primavera; T2- solo preparado com rolo-faca no outono e cultivado com arroz irrigado em sistema de semeadura direta na primavera; e T3- solo preparado de forma convencional no outono (preparo antecipado) e cultivado com soja em sistema de semeadura direta na primavera. Esses tratamentos foram dispostos em delineamento de faixas (7 m x 100 m), com três repetições.

Nos cultivos de arroz irrigado e soja, desenvolvidos na safra 2013/2014, seguiram-se as indicações técnicas da pesquisa para essas culturas

no Sul do Brasil, respectivamente, SOSBAI (2014) e REUNIÃO... (2014). De acordo com tais recomendações, apenas a cultura de arroz irrigado recebeu aporte de nitrogênio, via adubação.

As amostragens de ar para determinação das emissões de CH_4 e N_2O do solo foram realizadas em intervalos regulares de aproximadamente sete dias, nos períodos de entressafra (outono/inverno) e de safra (primavera/verão). Excepcionalmente, na semana subsequente à realização das adubações nitrogenadas em cobertura para o arroz, no início do perfilhamento (estádio V4) e na fase de iniciação da panícula, a frequência de amostragem foi reduzida para intervalos de dois dias.

Nas amostragens, utilizou-se o método da câmara estática fechada adaptado de Mosier (1989). Para tanto, em cada repetição dos tratamentos, foi disposto um sistema coletor de gases de efeito estufa, composto por base, extensor (exclusivo para o cultivo de arroz irrigado) e câmara ou topo.

Nas parcelas relativas aos tratamentos com cultivo de arroz irrigado, as bases dos sistemas coletores foram confeccionadas em alumínio, apresentando formato quadrado (64 cm x 64 cm) e 30 cm de altura. Essas foram inseridas no solo a uma profundidade de 5 cm. Acima da superfície do solo, em dois lados opostos, as bases dispunham de dois orifícios com diâmetro de 2,5 cm, que permitiam, quando presente, a circulação de água das parcelas experimentais para o interior do sistema coletor. Esses orifícios foram fechados durante os períodos de coletas, por meio do uso de rolhas de borracha. Por sua vez, no tratamento com cultivo de soja, as bases dos sistemas coletores foram confeccionadas em aço galvanizado revestido com pintura galvanite na cor verde. Essas bases apresentavam formato retangular (82,5 cm x 42 cm) e 10 cm de altura, tendo sido inseridas no solo também na profundidade de 5 cm.

Apenas as bases dos sistemas coletores permaneceram nas parcelas

experimentais durante todo o período de avaliação. Embora eventualmente, especialmente por ocasião de operações agrícolas mecanizadas, tenham sido temporariamente retiradas do solo.

Durante as coletas, câmaras de alumínio (tratamentos com cultivo de arroz irrigado) ou de aço galvanizado pintado galvanite na cor branca (tratamento com cultivo de soja) foram dispostas sobre as bases. Exclusivamente nos tratamentos e período de cultivo do arroz, quando as plantas atingiram alturas superiores à do conjunto base-câmara, um ou dois extensores, conforme a necessidade, foram colocados entre as bases e as câmaras.

Os conjuntos base/extensores-câmaras foram fechados hermeticamente durante as coletas, pela colocação de água em canaletas existentes na parte superior das bases e dos extensores (GOMES et al., 2009).

As amostragens de ar foram realizadas sempre no período da manhã, entre 9 e 12 horas, horário em que os fluxos de emissão de gases de efeito estufa são representativos das emissões médias diárias na região Sul do Brasil (COSTA et al., 2008). As amostras de ar do interior das câmaras foram tomadas manualmente com auxílio de seringas de polipropileno (20 mL) nos tempos 0, 5, 10 e 20 minutos após seu fechamento. O ar no interior das câmaras foi homogeneizado durante 30 segundos anteriormente a cada amostragem, por meio de ventiladores presentes na parte superior das câmaras e a temperatura interna, monitorada com auxílio de termômetro digital de haste com visor externo (WESZ, 2012).

Durante os períodos de amostragens, as seringas foram acondicionadas em caixas térmicas e mantidas sob baixa temperatura, sendo o ar armazenado nas seringas transferido para frascos específicos dotados de vácuo, imediatamente após a conclusão da coleta. As precipitações ocorridas ao longo do período de avaliação

foram monitoradas continuamente (Figura 1a).

As concentrações de CH₄ e N₂O nas amostras de ar foram determinadas por cromatografia gasosa, no laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Por sua vez, os fluxos de CH₄ e de N₂O do solo (taxas de emissão) foram calculados pela relação linear entre a variação na concentração desses gases e o tempo de coleta, segundo a equação:

$$f = \frac{dC}{dt} \frac{MPV}{RT} \frac{1}{A}$$

onde: dC/dt corresponde à mudança na concentração de CH₄ ou de N₂O (mmol mol⁻¹) no intervalo de tempo t (min); M é o peso molecular do respectivo gás (g mol⁻¹); P é a pressão (atm) no interior da câmara (assumida como 1,0 atm); V e T correspondem ao volume da câmara (L) e à temperatura interna (K); R é a constante universal dos gases (0,08205 L atm K⁻¹ mol⁻¹) e A é a área da base da câmara (m²).

A taxa de variação de gás no interior das câmaras foi obtida pelo coeficiente angular da equação ajustada entre a concentração dos gases e o tempo. A emissão total do período foi calculada pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de CH₄ e de N₂O do solo (GOMES et al., 2009). Com base na emissão acumulada de CH₄ e de N₂O, foi calculado o potencial de aquecimento global parcial (PAGp), que considera o potencial de aquecimento de cada gás em relação ao CO₂ (25 vezes para o CH₄ e 298 para o N₂O). Os fluxos diários e as emissões totais foram analisados de forma descritiva (média ± desvio padrão).

Resultados e Discussão

No período de entressafra, a área sob pousio, destinada ao preparo convencional na primavera (T1), e a área preparada com rolo-faca (T2) apresentaram pico máximo de emissão de CH_4 nove dias após o início das avaliações, correspondentes a 192 e 340 $\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectivamente. Na área sob preparo antecipado (T3), a emissão máxima de CH_4 ocorreu duas semanas após a dos demais sistemas e em magnitude bem menor (14 $\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Para todos os sistemas, emissões significativas de CH_4 ocorreram, apenas, nos primeiros 56 dias de avaliação; após essas foram praticamente nulas, havendo, inclusive, registros de influxo desse GEE. Exceção a esse padrão foi determinada na última época de avaliação (196 dias), onde se registraram picos menores de emissão de CH_4 (Figura 1b), associados a eventos concentrados de precipitação intensa (Figura 1a).

Grande parte da variabilidade nas emissões de CH_4 observadas entre os sistemas de preparo no período de outono/inverno pode ser atribuída às condições distintas de umidade do solo por ocasião da colheita do arroz, sendo: solo saturado/barro, na área mantida em pousio (T1), e com presença de lâmina de água, na área preparada com rolo-faca (T2), as quais, pelo maior conteúdo de água, principalmente no período inicial de avaliação, favoreceram a emissão de CH_4 , relativamente ao solo seco, estabelecido na área destinada ao preparo antecipado do solo (T3). Essa última condição foi proporcionada pela supressão antecipada da irrigação do arroz e pelo estabelecimento de sistema de drenagem na área. Também a distribuição e magnitude dos eventos de chuva, que determinaram a ocorrência e duração de períodos de anaerobiose no solo, devem ter contribuído para as emissões de metano, visto que a produção desse GEE está associada à decomposição microbiana de materiais orgânicos, via fermentação, em ambientes anaeróbios (CONRAD, 2002).

Durante a safra de verão, o fator determinante da magnitude das emissões de metano foi a espécie cultivada; ambas as áreas cultivadas com arroz apresentaram diversos picos de emissão elevada de CH_4 ao longo do período de cultivo, decorrentes da condição de anaerobiose, estabelecida pela irrigação por inundação do solo. Os dois maiores picos de emissão de metano ocorreram no 261º e 268º dia após o início das avaliações, de 357,4 e 322,0 g $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, na área sob preparo convencional (T1); e 424,1 e 289,4 g $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, na área preparada com rolo-faca (T2), correspondendo ao início da fase reprodutiva do arroz. Imediatamente após, foram observados dois eventos sucessivos de influxo de metano, aos 273 e 279 dias após o início das avaliações, possivelmente associadas à instabilidade temporária na manutenção da lâmina de irrigação para o arroz, condicionando a oxidação do solo (Figura 1b). O consumo de CH_4 em lavouras de arroz irrigado é resultado da atividade de bactérias metanotróficas, ocorrendo em zonas oxidadas, com sobreposição dos gradientes de CH_4 e oxigênio (O_2) (AULAKH et al., 2001), ou ainda pela intermitência na inundação do solo, estabelecendo ambiente aeróbio (SINGH et al., 2003). Na área cultivada com soja, as emissões de CH_4 foram muito próximas de zero ao longo de todo o período de avaliação (Figura 1b), em razão da manutenção do solo drenado para sua produção, inibindo a atividade dos microrganismos metanogênicos.

As emissões de N_2O do solo oscilaram bastante durante o período de outono/inverno (entressafra). Mas, em geral, apresentaram magnitude reduzida, especialmente na área mantida em pousio, destinada ao preparo convencional na primavera (T1), onde a emissão máxima, de 217 mg $\text{N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, ocorreu no 14º dia após o início das avaliações. Na área preparada com rolo-faca (T2), foram determinados alguns picos de emissão de N_2O , dois deles superiores a 1.000 mg $\text{N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, aos 105 e 147 dias após o início das avaliações. Esses foram intercalados com picos menores e, inclusive, com fluxos negativos. Já na área sob preparo antecipado (T3), as maiores emissões de N_2O

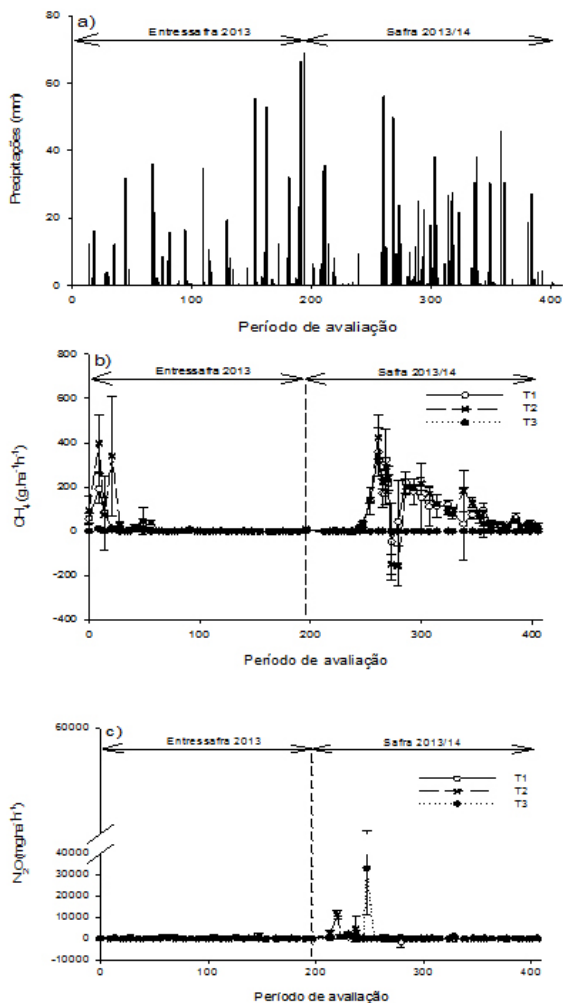
ocorreram no mês de junho, entre o 56° e 70° dia após o início das avaliações (Figura 1c).

Também durante a maior parte do período de safra (primavera/verão), as emissões de óxido nitroso do solo foram de baixa magnitude, determinando-se alternância entre valores baixos de emissão e influxos de N_2O . De maneira geral, em todos os tratamentos, as maiores emissões de N_2O ocorreram no período inicial de desenvolvimento das culturas de verão, especialmente entre o 213° até o 237° dia após o início das avaliações. Nesse período ocorreram os dois maiores picos de emissão de N_2O em ambas as áreas cultivadas com arroz irrigado; esses corresponderam, respectivamente, a $1.903 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (237° dia) e $1.164 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (213° dia), na área sob preparo convencional de primavera (T1), e a $11.403 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (220° dia) e $4.728 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (237° dia), na área preparada com rolo-faca no outono (T2) (Figura 1c). Esses picos ocorreram em período subsequente à época de realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura para o arroz, que é realizada em solo seco, imediatamente antes ao início da irrigação por inundação do solo. Em lavouras de arroz irrigado, as emissões de N_2O estão associadas à adubação nitrogenada e à alternância nas condições de oxirredução do solo, que predispõem a ocorrência dos processos de nitrificação/desnitrificação (REDDY; DELAUNE, 2008), que têm o óxido nitroso como produto intermediário.

Por sua vez, na área sob preparo antecipado e cultivada com soja (T3), o pico máximo de emissão de óxido nitroso ocorreu no 247° dia após o início das avaliações, ou seja, 10 dias após ao das áreas cultivadas com arroz irrigado. A magnitude desse pico foi, também, bem maior que nas áreas cultivadas com arroz, atingindo $33.126 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Na sequência, as emissões de N_2O na lavoura de soja decresceram rapidamente até o 261° dia após o início das avaliações; a partir desse momento até o final do ciclo da cultura, as emissões apresentaram um padrão aproximadamente uniforme, caracterizado pela oscilação entre

valores médios e baixos de emissão, eventualmente intercalados por eventos de influxo, de baixa magnitude. Coincidindo com a fase de floração, ocorreu, ainda, um último pico de emissão de N_2O , de $1.173 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, aos 328 dias após o início das avaliações (Figura 1c). Atribui-se o maior potencial de emissão de N_2O da área cultivada com soja, relativamente ao arroz irrigado, ao elevado potencial de fixação de N da soja, mesmo em terras baixas, gerando resíduos ricos no nutriente. Ademais, nesse ambiente, em razão da baixa condutividade hidráulica do solo, é comum a alternância nas condições de oxidação/redução do solo, especialmente após eventos de precipitação intensa (Figura 1a), as quais são favoráveis à ocorrência dos processos de nitrificação/desnitrificação.

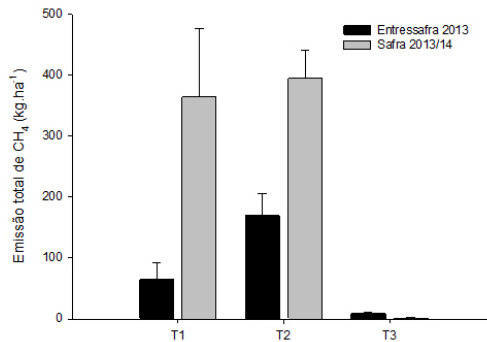
Na entressafra, a emissão total de CH_4 decresceu na seguinte ordem: área preparada com rolo-faca (T2) ($170 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1}$) > área em pousio/preparo convencional (T1) ($64 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1}$) > área sob preparo antecipado (T3) ($9 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1}$) (Figura 2), demonstrando o potencial de redução nas emissões de CH_4 decorrente da adoção do preparo antecipado do solo no ambiente de terras baixas. Apesar das diferenças entre os manejos do solo, as emissões de CH_4 medidas no outono/inverno foram relativamente baixas, considerando-se aquelas observadas durante o período de cultivo do arroz, variando entre $364,5 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1}$, na área sob preparo convencional (T1), a $394,3 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1}$, na área preparada com rolo-faca (T2). Por outro lado, na área cultivada com soja, pela manutenção do solo oxidado, praticamente não se determinaram emissões de CH_4 ($1,3 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1}$) (Figura 2).



T1: solo mantido em pousio no outono-inverno e cultivado com arroz irrigado em sistema convencional de preparo na primavera; T2: solo preparado com rolo-faca no outono e cultivado com arroz irrigado em sistema de semeadura direta na primavera; e T3: solo preparado no outono e cultivado com soja em sistema de semeadura direta na primavera.

Figura 1. Precipitação pluviométrica (a) e fluxos de CH_4 (b) e N_2O (c) em Planossolo durante os períodos de entressafra e de safra, em função do manejo do solo e do cultivo de verão. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

As emissões anuais de metano totalizaram, respectivamente, 429,0 e 563,8 kg CH₄ ha⁻¹, nas áreas sob preparo convencional e preparada com rolo-faca, e na sequência cultivadas com arroz irrigado, sendo que o período de safra respondeu por 85% e 70% desses totais. Por outro lado, na área manejada sob preparo antecipado e cultivada com soja, as emissões somaram, apenas, 10,4 kg CH₄ ha⁻¹, sendo geradas, em grande parte, na entressafra (88%). Tais resultados indicam a importância do preparo antecipado do solo e da rotação de culturas com soja para a mitigação das emissões de metano no ambiente de terras baixas.



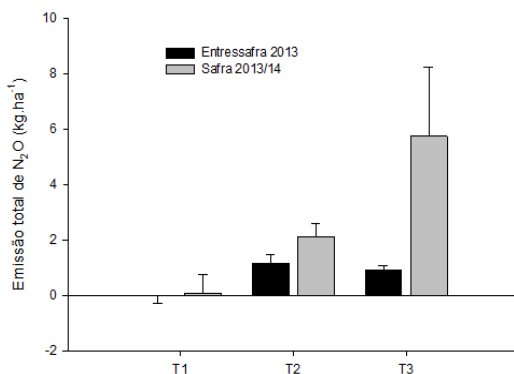
T1: solo mantido em pousio no outono-inverno e cultivado com arroz irrigado em sistema convencional de preparo na primavera; T2: solo preparado com rolo-faca no outono e cultivado com arroz irrigado em sistema de semeadura direta na primavera; e T3: solo preparado no outono e cultivado com soja em sistema de semeadura direta na primavera.

Figura 2. Emissão total de metano (CH₄) em Planossolo durante os períodos de entressafra e safra, em função do manejo do solo e do cultivo de verão. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

Na entressafra, a emissão total de N₂O foi muito baixa, nas áreas preparadas com rolo-faca (T2) (1,1 kg ha⁻¹) e antecipadamente (T3) (0,9 kg ha⁻¹), e nula, na área mantida sob pousio, aguardando o preparo na primavera (T1) (Figura 3). As baixas emissões de N₂O no outono-inverno devem estar associadas ao baixo conteúdo de N na palha do arroz. Também durante a safra as áreas cultivadas com arroz irrigado apresentaram baixas emissões totais de N₂O, especialmente

na área manejada sob preparo convencional (T1) ($0,1 \text{ kg ha}^{-1}$); na área preparada com rolo-faca, as emissões totalizaram $2,1 \text{ kg ha}^{-1}$, confirmando observações de que o arroz irrigado por inundação contínua apresenta baixo potencial de emissão de óxido nítrico (ZSCHORNACK, 2011). Já na área cultivada com soja, as emissões de N_2O alcançaram $5,7 \text{ kg ha}^{-1}$, o que é um indicativo de que o cultivo dessa oleaginosa em rotação ao arroz irrigado potencializa as emissões de N_2O .

A emissão anual de N_2O foi menor que $0,1 \text{ kg ha}^{-1}$ na área cultivada com arroz sob preparo convencional na primavera (T1), estando restrita ao período de safra. Na área preparada com rolo-faca (T2), o somatório dos períodos de safra e entressafra totalizou $3,2 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$, sendo 66% emitidos durante o cultivo de arroz irrigado. Por sua vez, na área cultivada com soja, preparada antecipadamente no outono (T3), as emissões atingiram $6,6 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$, dos quais 86% foram gerados durante a safra de primavera/verão.

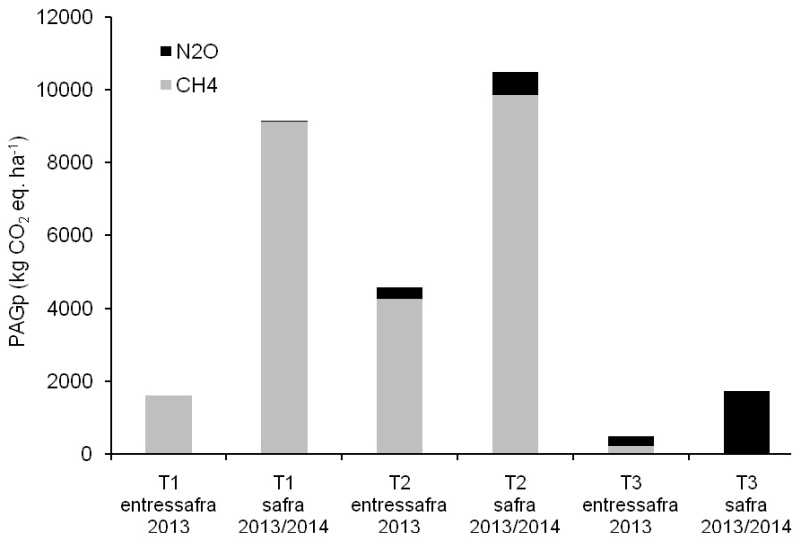


T1: solo mantido em pousio no outono-inverno e cultivado com arroz irrigado em sistema convencional de preparo na primavera; T2: solo preparado com rolo-faca no outono e cultivado com arroz irrigado em sistema de semeadura direta na primavera; e T3: solo preparado no outono e cultivado com soja em sistema de semeadura direta na primavera.

Figura 3. Emissão total de óxido nítrico (N_2O) em Planossolo durante os períodos de entressafra e safra, em função do manejo do solo e do cultivo de verão. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

Na Figura 4 é apresentado o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) dos sistemas avaliados ao longo do ano (entressafra 2013 e safra 2013/2014). Independentemente do sistema, o período de safra (primavera/verão) apresentou maior potencial de aquecimento global comparativamente à entressafra. Especificamente no período de outono/inverno, a área preparada com rolo-faca imediatamente após a colheita do arroz apresentou maior potencial de aquecimento global ($4.778 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1}$) que as áreas colhida no barro e mantidas sob pousio durante o outono/inverno (T1), com potencial de aquecimento global parcial intermediário, e colhida no seco e preparada no outono (T3). Atribui-se o maior PAGp da área preparada com rolo-faca à incorporação ao solo da palha do arroz imediatamente após a colheita, realizada em presença de lâmina de água, condição que predispõe à decomposição microbiana de materiais orgânicos, via fermentação, gerando e emitindo metano (CONRAD, 2002), em razão do ambiente anaeróbico. Nesse período, o metano foi o único gás de efeito estufa emitido na área mantida sob pousio (T1), predominando, ainda, na área preparada com rolo-faca (92,8%), enquanto que na área em que o arroz foi colhido em solo seco e preparada no outono (T3), o óxido nitroso apresentou maior contribuição para o PAGp, respondendo por 54,4% do total.

Durante a safra de primavera/verão, o PAGp de ambas as áreas cultivadas com arroz irrigado foi bastante elevado, correspondendo a $10.483 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1}$, na área previamente preparada com rolo-faca (T2), e a $9.142 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1}$, na área mantida sob pousio no outono/inverno e com preparo convencional de primavera (T1). Em ambos os tratamentos, o metano foi o principal gás de efeito estufa emitido, correspondendo a 99,7% do total de emissões, para T1, e a 94%, para T2. Por sua vez, o PAGp da área cultivada com soja foi bastante inferior ao daquelas cultivadas com arroz irrigado ($1.731 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1}$, 98,1% na forma de óxido nitroso) (Figura 4). De acordo com Gomes et al. (2009), a emissão de N_2O é um dos fatores que mais contribui para o aumento do PAG em sistemas cultivados com espécies leguminosas.

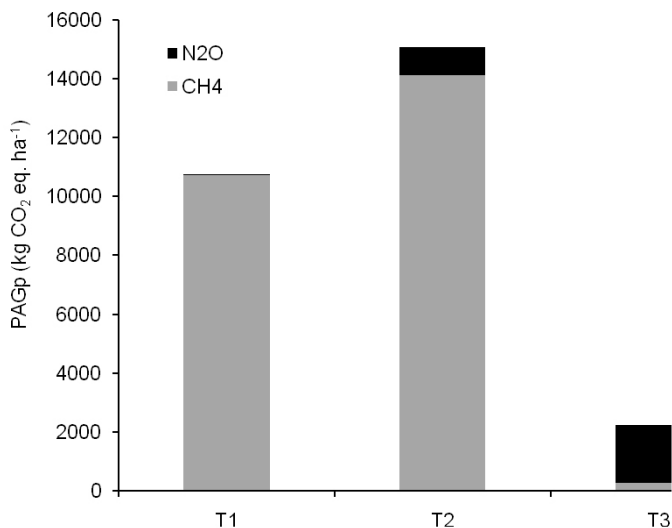


T1: solo mantido em pousio no outono-inverno e cultivado com arroz irrigado em sistema convencional de preparo na primavera; T2: solo preparado com rolo-faca no outono e cultivado com arroz irrigado em sistema de semeadura direta na primavera; e T3: solo preparado no outono e cultivado com soja em sistema de semeadura direta na primavera.

Figura 4. Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) em Planossolo durante os períodos de entressafra e safra, em função do manejo do solo e do cultivo de verão.

A totalização das emissões no ano, incluindo os períodos de entressafra 2013 e safra 2013/2014, mostra que o sistema envolvendo preparo do solo com rolo-faca imediatamente após a colheita do arroz em presença de lâmina de água, associado ao cultivo de arroz irrigado na safra de primavera/verão subsequente, proporcionou emissões superiores de gases de efeito estufa que o sistema envolvendo preparo convencional do solo na primavera, seguido de cultivo de arroz irrigado, que apresentou emissões intermediárias, e o sistema com colheita do arroz em solo seco, preparo do solo no outono e cultivo de soja em sistema de semeadura direta na safra de primavera/verão subsequente. Este último sistema (T3) destacou-se pelo menor PAGp ao longo do ano, em relação aos demais sistemas, 4,8 vezes

inferior a T1 e 6,7 vezes inferior a T2 (Figura 5). O PAGp anual das áreas cultivadas com arroz irrigado na primavera/verão foi composto preponderantemente por metano, e o da área cultivada com soja predominantemente por óxido nitroso.



T1: solo mantido em pousio no outono-inverno e cultivado com arroz irrigado em sistema convencional de preparo na primavera; T2: solo preparado com rolo-faca no outono e cultivado com arroz irrigado em sistema de semeadura direta na primavera; e T3: solo preparado no outono e cultivado com soja em sistema de semeadura direta na primavera.

Figura 5. Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) em Planossolo em função do manejo do solo e do cultivo de verão, ao longo de um ano (períodos de safra e entressafra).

Conclusões

O preparo antecipado do solo minimiza as emissões de metano em terras baixas durante a entressafra, relativamente ao preparo convencional de primavera e ao preparo com rolo-faca. Independentemente do manejo do solo, as emissões de metano na entressafra são pequenas relativas àquelas medidas na safra, em cultivo de arroz irrigado.

A manutenção do solo em pousio no período de outono/inverno elimina as emissões de óxido nitroso durante a entressafra, relativamente a manejos que preconizam o preparo antecipado no outono. Mesmo nesses manejos, as emissões de N_2O durante a entressafra são baixas, estando concentradas no período de safra. O cultivo de soja em rotação ao arroz irrigado praticamente elimina as emissões de metano, embora potencialize as emissões de N_2O em Planossolo. Independentemente desse fato, a rotação de cultura com soja reduz consideravelmente o potencial de aquecimento global parcial em terras baixas, representando uma alternativa promissora para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa nesse ambiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapergs e ao CNPq, pela concessão das bolsas de estudo e auxílio financeiro para a realização do trabalho, e aos funcionários do Laboratório de Fertilidade do Solo da Embrapa Clima Temperado, pelo auxílio na coleta e preparo de amostras de ar.

Referências

AULAKH, M. S.; KHERA, T. S.; DORAN, J. W.; BRONSON, K. F. Denitrification, N₂O and CO₂ fluxes in rice-wheat cropping system as affected by crop residues, fertilizer N and legume green manure. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 34, p. 375-389, 2001.

BAEDE, A. P. M.; AHLONSOU, E.; DING, Y.; SCHIMEL, D. **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

BARTON, L.; KIESE, R.; GATTER, D.; BUTTERBACH-BAHL, K.; BUCK, R.; HINZ, C.; MURPHY, D. V. Nitrous oxide emissions from a cropped soil in a semi-arid climate. **Global Change Biology**, Oxford, v. 14, p. 177-192, 2008. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01474.x

BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; SOUSA, R. O.; SILVA, L. S. da.; SCIVITTARO, W. B.; SILVA, P. R. F. da.; GIACOMINI, S. J.; CARMONA, F. de C. Strategies to mitigate methane emissions in lowland rice fields in South Brazil. **Better Crops**, Atlanta, v. 97, n. 1, p. 27-29, 2013.

BRASIL. MCTI (Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação). **Estimativas Anuais de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. Brasília, 2013. 76 p.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Seqüestro de carbono em solos na América Latina. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 40-44, 2007.

CONRAD, R. Control of microbial methane production in wetland rice fields. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 64, p. 59-69, 2002.

COSTA, F. S.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C. Emissões de gases de efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metropole, 2008. p. 545-559.

DUTAUR, L.; VERCHOT, L. V. A global inventory of the soil CH₄ sink. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 21, GB4013, 2007. DOI: 10.1029/2006GB002734.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; van DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: SOLOMON, D.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER H. L. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 129-234.

GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F. S.; PICCOLO, M. C.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; SIX, J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 106, p. 36-44, 2009.

IRGA (INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ). **Setor de Política Setorial**. Porto Alegre, 2014.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

LIMA, M. A. de; LIGO, M. A. V.; PESSOA, M. C. P.Y.; LUIZ, A. J. B.; NEVES, M. C.; MAIA, A. de H. N. **Emissões de metano do cultivo de arroz**. Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. 59 p. Segundo inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Relatórios de referência.

MOSIER, A. R. Chamber and isotope techniques. In: ANDREAE, M. O.; SCHIMMEL, D. S. (Ed.). **Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere: report of the Dahlem Workshop**. Berlin: Wiley, 1989. p. 175-187.

RAFIQUE, R.; HENNESSY, D.; KIELY, G. Nitrous oxide emission from grazed grassland under different management systems. **Ecosystems**, New York, v. 14, n. 4, p. 563-582, June 2011.

REDDY, K. R.; DeLAUNE, R. D. **Biogeochemistry of wetlands: science and applications**. New York: CRC, 2008. 780 p.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 40., 2014, Pelotas. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2014/2015 e 2015/2016**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 2014. 124 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 382). Editores técnicos: Ana Cláudia Barneche de Oliveira, Ana Paula Schneid Afonso da Rosa.

SCHLESINGER, W. H. An estimate of the global sink for nitrous oxide in soils. **Global Change Biology**, Oxford, v. 19, p. 2929-2931, 2013.

SINGH, S. N.; VERMA, A.; TYAGI, L. Investigating options for attenuating methane emission from Indian rice fields. **Environmental International**, New York, v. 29, n. 5, p. 547-553, Aug. 2003.

SOSBAI (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO). **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Santa Maria: SOSBAI, 2014. 192 p.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. do; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222 p.

WESZ, J. **Emissões de metano e óxido nitroso em Planossolo em função do manejo da água no arroz irrigado**. 2012. 71 f. - Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Solos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

ZSCHORNACK, T. **Emissões de metano e de óxido nitroso em sistemas de produção de arroz irrigado no Sul do Brasil e potencial de mitigação por práticas de manejo**. 2011. 87 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

Embrapa

Clima Temperado

Ministério da
**Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

G O V E R N O F E D E R A L
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA

CGPE 13136