

Emissões de Gases de Efeito Estufa do Cultivo de Arroz Irrigado em Ecossistemas Subtropical e Tropical



**OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL**

13 AÇÃO CONTRA A
MUDANÇA GLOBAL
DO CLIMA



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

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
324**

**Emissões de Gases de Efeito Estufa
do Cultivo de Arroz Irrigado em
Ecossistemas Subtropical e Tropical**

*Walkyria Bueno Scivittaro
Thaís Antolini Veçozzi
Thaís Murias Jardim
Nathália Furtado Lucas
Mellissa Ananias Soler da Silva
Yoná Serpa Mascarenhas
Márcia Thaís de Melo Carvalho
Beata Eموke Madari
Germani Concenço*

Embrapa Clima Temperado
*Pelotas, RS
2019*

Embrapa Clima Temperado
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

Comitê Local de Publicações

Presidente
Luis Antônio Suíta de Castro

Vice-Presidente
Ana Cristina Richter Krolow

Secretário-Executivo
Bárbara Chevallier Cosenza

Membros
*Ana Luiza B. Viegas, Fernando Jackson,
Marilaine Schaun Pelufê, Sonia Desimon*

Revisão de texto
Bárbara Chevallier Cosenza

Normalização bibliográfica
Marilaine Schaun Pelufê

Editoração eletrônica
Fernando Jackson

Foto da capa
Mellissa Ananias Soler da Silva

1ª edição
Obra digitalizada (2019)

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

E53 Emissões de gases de efeito estufa do cultivo de arroz
irrigado em ecossistemas subtropical e tropical /
Walkyria Bueno Scivittaro... [et al.]. – Pelotas:
Embrapa Clima Temperado, 2019.
22 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento /
Embrapa Clima Temperado, ISSN 1678-2518 ; 324)

1. Arroz. 2. Arroz irrigado. 3. Efeito estufa.
I. Scivittaro, Walkyria Bueno. II. Série.

CDD 633.18

Sumário

Introdução.....	7
Material e Métodos.....	8
Resultados e Discussão.....	11
Conclusões.....	19
Referências.....	20

Emissões de Gases de Efeito Estufa do Cultivo de Arroz Irrigado em Ecossistemas Subtropical e Tropical

Walkyria Bueno Scivittaro¹

Thaís Antolini Veçozzi²

Thaís Murias Jardim³

Nathália Furtado Lucas³

Mellissa Ananias Soler da Silva⁴

Yoná Serpa Mascarenhas⁵

Márcia Thaís de Melo Carvalho⁴

Beata Eموke Madari⁴

Germani Concenção⁶

Resumo - O cultivo de arroz irrigado constitui-se em importante fonte de emissão de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, particularmente metano (CH_4). As emissões de GEE do cultivo de arroz variam em função de fatores associados ao meio físico, à planta de arroz e ao manejo da cultura. O conhecimento do potencial e principais fatores determinantes de emissões de GEE de diferentes ambientes é fundamental para a definição de estratégias de mitigação adequadas às especificidades das diferentes regiões de cultivo. O presente trabalho foi realizado com o objetivo de comparar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao manejo da adubação nitrogenada no cultivo de arroz irrigado desenvolvido nas regiões subtropical e tropical do Brasil. Para tanto, utilizaram-se dados de experimentos de manejo da adubação nitrogenada para a cultura de arroz irrigado realizados nas regiões subtropical e tropical do Brasil. Os experimentos foram desenvolvidos em duas safras agrícolas consecutivas (2014/2015 e 2015/2016) em Capão do Leão, RS, e em Goianira, GO, representando, respectivamente, os ecossistemas subtropical e tropical de cultivo de arroz no Brasil. Em ambos os ambientes, avaliaram-se três tratamentos de manejo da adubação nitrogenada, sendo uma testemunha com omissão da adubação nitrogenada e duas fontes de nitrogênio para o arroz irrigado [ureia, e ureia revestida com cobre (0,15%) e boro (0,4%) – ureia protegida]. Os dados relativos às duas safras agrícolas avaliadas foram analisados de forma combinada, de forma a minimizar o efeito do ano de cultivo. Avaliaram-se o desempenho produtivo e a eficiência de uso do N do arroz, as emissões de CH_4 e óxido nitroso (N_2O) do solo, o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) e o PAGp por unidade de rendimento de grãos. O manejo da adubação nitrogenada para o arroz irrigado, incluindo fonte solúvel (ureia) e ureia protegida com B e Cu, promove efluxo de N_2O do solo semelhante nos ecossistemas tropical e subtropical. Por sua vez, as emissões de CH_4 de cultivo de arroz irrigado na região subtropical são superiores às da região tropical, estando associadas preponderantemente ao regime hídrico estabelecido durante o período de cultivo. No mesmo ambiente, o manejo da adubação nitrogenada não interfere no potencial de emissão de CH_4 do cultivo de arroz irrigado. O CH_4 é o principal componente do PAGp do cultivo de arroz irrigado desenvolvido nos ecossistemas tropical e subtropical, respondendo por mais de 90% do total. Independentemente do ambiente, tropical ou subtropical, o manejo da adubação nitrogenada não interfere na magnitude do PAGp e do índice PAGp/RG associado ao cultivo de arroz irrigado.

Termos para indexação: *Oryza sativa* L.; metano; óxido nitroso; potencial de aquecimento global; ambiente; adubação nitrogenada.

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

² Gestora Ambiental, doutoranda do Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faem/Ufpel, Pelotas, RS.

³ Graduanda em Agronomia, Faem/Ufpel, Bolsista Pibic do CNPq, Pelotas, RS..

⁴ Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO.

⁵ Engenheira-agrônoma, doutoranda do Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

⁶ Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS.

Greenhouse Gas Emissions from Paddy Rice in Subtropical and Tropical Ecosystems

Abstract - Paddy rice is an important source of greenhouse gas (GHG) emissions to the atmosphere, particularly methane (CH_4). GHG emissions from paddy rice are influenced by factors associated with the environment, rice plant and crop management. Knowledge about the potential and the main determinants of GHG emissions from different environments is fundamental for the definition of mitigation strategies appropriate to the specificities of the different regions. This work had the aim of comparing greenhouse gas emissions associated with the management of nitrogen fertilization in paddy rice from subtropical and tropical regions of Brazil. Data from nitrogen fertilization management experiments performed in the Brazilian subtropical and tropical regions were used. The experiments were carried out in 2014/2015 and 2015/2016 growing seasons in Capão do Leão, state of Rio Grande do Sul, and Goianira, state of Goiás, representing, respectively, the subtropical and tropical paddy rice ecosystems. In both sites, three nitrogen fertilization management treatments were evaluated: control with no nitrogen fertilization and two nitrogen sources for rice: urea; urea with copper (0.15%) and boron (0.4%) (coated urea or protected urea). Data for the two growing seasons were analyzed in a combined way in order to minimize the effect of the season. Rice yield performance and N use efficiency, soil CH_4 and nitrous oxide (N_2O) emissions, global warming potential (GWP) and yield-scaled global warming potential (yield-scaled) were evaluated. Nitrogen fertilization management for paddy rice, including soluble source (urea) and protected urea, promotes similar soil N_2O efflux in tropical and subtropical ecosystems. On the other hand, CH_4 emissions from paddy rice in the subtropical region are higher than those from the tropical region, being mainly related to water regime established during rice growing season. In tropical and subtropical environments, nitrogen fertilization management does not interfere with the potential of CH_4 emission of paddy rice. Methane is the main component of the global warming potential (GWP) of paddy rice in the tropical and subtropical ecosystems, accounting for over 90% of the total. Regardless of the environment, tropical or subtropical ecosystem, nitrogen fertilization management does not affect the magnitude of the GWP and the yield-scaled (GWP per yield unit) associated to the paddy field.

Index terms: *Oryza sativa* L.; methane; nitrous oxide; global warming potential; environment; nitrogen fertilization.

Introdução

O arroz é uma cultura alimentícia de grande importância econômica e social, contribuindo significativamente para a segurança alimentar da população mundial e a economia dos países produtores (Copetti, 2014). No entanto, o cultivo de arroz no sistema irrigado por inundação do solo está associado a elevadas emissões de gases de efeito estufa (GEE), particularmente o metano (CH_4), cuja produção decorre da decomposição da matéria orgânica sob anaerobiose (Le Mer; Roger, 2001; Conrad, 2002). A lavoura de arroz também pode atuar como fonte importante de óxido nitroso (N_2O), que é produto da transformação microbiana do nitrogênio (N) nativo do solo e presente em resíduos orgânicos, estando associada à alternância nas condições de oxirredução do solo, que predispõe à ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação (Reddy; Delaune, 2008).

A maior parte das emissões de CH_4 do cultivo de arroz é gerada nas regiões tropical, subtropical e em partes da região temperada boreal, incluindo diversas áreas no continente americano, África e, principalmente, no sudeste asiático (Aselmann; Crutzen, 1989; Yan et al., 2009). China e Índia são os dois maiores produtores mundiais de arroz e, juntamente com os demais países produtores asiáticos, respondem por cerca de 90% das emissões globais de CH_4 . África e América do Sul contribuem, respectivamente, com 3,5% e 4,7% das emissões de CH_4 . Portanto, as regiões onde mais se produz arroz são também aquelas que proporcionam maiores emissões de CH_4 (Yan et al., 2009).

No Brasil, o cultivo de arroz irrigado ocupa, anualmente, uma área de aproximadamente 1,4 milhão de hectares, estando concentrado na região subtropical, principalmente nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, que respondem por mais de 70% da produção nacional de arroz. Na região tropical, os estados de Mato do Grosso do Sul e Goiás apresentam histórico de cultivo de extensões menores de arroz irrigado e, recentemente, Tocantins tem expandido a área cultivada do cereal, sendo o principal polo produtor de arroz irrigado da região tropical na atualidade (Embrapa Arroz E Feijão, 2018).

Entre os gases de efeito estufa, o CH_4 é considerado o mais importante, por controlar vários processos e espécies químicas presentes na troposfera e estratosfera (Singh et al., 1999). A concentração desse gás mais do que duplicou nos últimos 200 anos (Rudolph, 1994), sendo significativas as emissões decorrentes de lavouras de arroz irrigado por inundação do solo. Estima-se que a taxa de emissão global de CH_4 por lavouras de arroz irrigado varie entre 20 e 60 Tg, ou seja, 3% a 10% das emissões globais, que somam 600 Tg (GRiSP, 2013).

A quantidade de CH_4 emitida pelo cultivo de arroz resulta, em linhas gerais, do balanço de dois processos opostos: (a) produção de CH_4 por bactérias metanogênicas, que são estritamente anaeróbias, e (b) oxidação de CH_4 no solo, estabelecida por bactérias metanotróficas, nas zonas oxidadas do ecossistema (interface água-solo e rizosfera do arroz). As bactérias metanotróficas utilizam o CH_4 como substrato, sendo ativas em interfaces oxidadas/reduzidas, em que os gradientes de concentração de CH_4 e de oxigênio se sobrepõem (Aulakh et al., 2001).

Por sua vez, existem três processos de emissão de CH_4 : (a) ebulição, mecanismo que ocorre durante o estágio inicial de crescimento da planta de arroz e durante as operações de remoção de plantas invasoras da lavoura; (b) difusão através da superfície do solo e da água, caracterizando-se pela lentidão; e (c) transporte através do aerênquima da planta de arroz. Esse último é o principal e mais importante mecanismo de emissão de CH_4 associado ao cultivo de arroz (Cicerone et al., 1983).

A produção de CH_4 ocorre somente em condições altamente reduzidas (potencial redox de 200 mv). Dessa forma, práticas de manejo que promovem a aeração do solo inibem a atividade das bactérias metanogênicas, reduzindo, portanto, a emissão de CH_4 . Simultaneamente, há a diminuição da concentração de CH_4 no solo, devido à oxidação por bactérias metanotróficas. Esse processo também é altamente dependente da quantidade de carbono orgânico disponível no solo, proveniente da palha de arroz ou de outras culturas remanescentes no solo, bem como de outros materiais orgânicos. O fluxo de CH_4 através da planta de arroz depende de vários fatores, como a concentração do gás na solução do solo, o estágio de desenvolvimento, altura e arquitetura da planta de arroz e características específicas das cultivares (Wassmann; Aulakh, 2000).

Resultados de pesquisas mostram que diversos fatores exercem influência sobre as emissões de CH_4 do cultivo de arroz irrigado, como características morfológicas das cultivares (Das; Baruah, 2008), mineralogia do solo (Huang et al., 2002); conteúdo de matéria orgânica, deposição de resíduos orgânicos (Agnihotri et al., 1999); potencial de redução do solo (Agostinetto et al., 2002); adição de fertilizantes nitrogenados (Cai et al., 1997); temperatura, radiação solar, presença e quantidade de biomassa vegetal e manejo da água (Neue et al., 1996; Singh et al., 1999).

Por sua vez, a produção de N_2O está associada à mineralização do nitrogênio no solo, principalmente através dos processos de nitrificação e desnitrificação. O nitrogênio orgânico é mineralizado a amônio (amoni-ficação), que em seguida sofre nitrificação, produzindo nitrato, pela atividade de bactérias aeróbias. Em solos oxidados, a forma estável do nitrogênio inorgânico é o nitrato. Porém, quando o solo é alagado e o oxigênio (O_2) é consumido, os microrganismos anaeróbios utilizam o nitrato como receptor de elétrons, reduzindo-o a N_2 , num processo denominado de desnitrificação, em que NO e N_2O são produzidos como compostos intermediários, sendo perdidos para a atmosfera. Os processos de amonificação, nitrificação e desnitrificação estão relacionados, visto que o produto de um processo é exigido pelo subsequente.

Em ambientes estritamente anaeróbios, ocorre acúmulo de amônio, pois a ausência de oxigênio não permite a atividade das bactérias nitrificadoras. Porém, em zonas oxidadas, como a superfície de solos alagados e a rizosfera, a atividade das bactérias nitrificadoras produz nitrato, que, ao se difundir para zonas reduzidas, pode ser desnitrificado, produzindo N_2O . Todavia, o processo de desnitrificação é intensificado quando ocorre a alternância das condições oxidadas e reduzidas ou quando se realiza a adubação nitrogenada, produzindo maiores quantidades de N_2O (Sousa et al., 2012).

Pelo exposto, evidencia-se que vários fatores associados ao meio físico, à planta de arroz e ao manejo da cultura determinam o potencial de emissão de GEE de lavouras de arroz irrigado. O conhecimento da influência desses fatores é relevante para a proposição de estratégias mitigadoras de emissões adequadas às especificidades das diferentes regiões de cultivo.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de comparar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao manejo da adubação nitrogenada no cultivo de arroz irrigado desenvolvido nas regiões subtropical e tropical do Brasil.

Material e Métodos

Para o trabalho, aproveitaram-se os dados de experimentos de manejo da adubação nitrogenada para a cultura de arroz irrigado realizados nas regiões subtropical e tropical do Brasil.

Os experimentos foram desenvolvidos em duas safras agrícolas consecutivas, 2014/2015 e 2015/2016, na Estação Experimental Terras Baixas, da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS (31° 52' 00" S, 52° 21' 24" W, altitude média: 13 m) e na Estação Experimental da Fazenda Palmital, da Embrapa Arroz e Feijão, em Goianira, GO (16° 43' 33" S, 49° 38' 33" W, altitude média 785 m), representando, respectivamente, os ecossistemas subtropical e tropical de cultivo de arroz no Brasil.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Capão do Leão é classificado como subtropical (Cfa) (Wrege et al., 2012), com precipitação e temperatura do ar média anuais de 1.367 mm e 17,8 °C, respectivamente (Estação, 2017). Por sua vez, Goianira apresenta clima de Cerrado tropical (Aw), com média anual de precipitação de 1.485 mm e temperatura do ar de 23,0 °C (Kottek et al., 2006). Os solos das áreas experimentais de Capão do Leão e Goianira são classificados, respectivamente, como Planossolo Háplico Eutrófico típico (Cunha; Costa, 2013) e Gleissolo Háplico Eutrófico neofluvíssólico (Oliveira; Rodrigues, 2012). Os resultados da análise química do solo das áreas experimentais, por safra agrícola, são apresentados na Tabela 1. Em Capão do Leão, o conteúdo de matéria orgânica (MO) e os teores de fósforo (P) e de potássio (K) disponíveis no solo são interpretados, respectivamente, como baixo, alto e baixo para a cultura de arroz irrigado, na safra 2014/2015, e como baixo, muito alto e médio, na safra 2015/2016. Por sua vez em Goianira, em ambas as safras, esses teores são interpretados como médio, muito alto e médio, de acordo com Reunião... (2016).

Tabela 1. Resultados da análise química do solo¹, na profundidade de 0 a 20 cm, das áreas experimentais de Capão do Leão e Goianira nas safras agrícolas 2014/2015 e 2015/2016.

Local	Safr	pH água	MO	P	K	Al	Ca	Mg
			g dm ⁻³	----- mg dm ⁻³ -----		----- cmol _c dm ⁻³ -----		
Capão do Leão	2014/2015	5,6	11	7,8	32 ¹	0,1	1,3	0,5
	2015/2016	5,6	22	14,3	43 ¹	0,0	2,1	1,1
Goianira	2014/2015	5,6	31	49,8	41 ²	0,2	2,8	0,8
	2015/2016	5,2	40	43,2	59 ²	0,7	2,0	0,6

¹Tedesco et al. (1995).

Em ambos os ambientes, ecossistemas tropical e subtropical, avaliaram-se três tratamentos de manejo da adubação nitrogenada, sendo uma testemunha com omissão da adubação nitrogenada e duas fontes de nitrogênio para o arroz irrigado (ureia e ureia revestida com cobre (0,15%) e boro (0,4%), visando minimizar as perdas de N do fertilizante por volatilização de amônia – NH₃). Os tratamentos foram dispostos em delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial 2x3, com quatro repetições. Os dados relativos às duas safras agrícolas avaliadas foram analisados de forma combinada, de forma a minimizar o efeito do ano de cultivo. As unidades experimentais apresentaram as seguintes dimensões: 3,6 m x 6,0 m, sendo individualizadas por taipas, para evitar a contaminação entre os tratamentos.

Para os tratamentos com aplicação de fonte de nitrogênio, a dose utilizada foi de 120 kg ha⁻¹ de N, em Capão do Leão, e de 150 kg ha⁻¹ de N em Goianira, as quais foram estabelecidas com base nos resultados da análise química de solo e considerando uma expectativa de resposta alta da cultura à adubação em cada região (Reunião..., 2016). Ambas as fontes de N foram aplicadas de forma parcelada em três aplicações: localizada no sulco de semeadura (6,5 a 20 kg ha⁻¹ de N, exclusivamente como ureia, contida na formulação utilizada na adubação básica de semeadura) e em cobertura, sendo metade da dose restante de N aplicada no início do perfilhamento (estádio V4) e a outra metade nos estádios V8 (perfilhamento pleno), em Goianira, e R0 (iniciação da panícula), em Capão do Leão. A primeira cobertura nitrogenada foi realizada em solo seco, com três a quatro dias de antecedência ao início da irrigação definitiva, e a segunda, sobre uma lâmina de água não circulante. Exceção a esse procedimento ocorreu no ecossistema tropical, exclusivamente na safra 2015/2016, quando o intervalo entre a aplicação da primeira cobertura com N e o início da irrigação foi de 14 dias. O estabelecimento de intervalo de tempo entre a primeira cobertura nitrogenada e a entrada de água na lavoura de arroz visou permitir que a fonte de N de eficiência aumentada pudesse expressar seu potencial em reduzir perdas do nutriente por volatilização de NH₃.

Em ambas safras, utilizaram-se as cultivares de arroz irrigado Puitá INTA-CL, de ciclo precoce, em Capão do Leão, e BRS Catiana, de ciclo médio, em Goianira. Os experimentos foram implantados em sistema convencional de preparo do solo nos dois locais. Com exceção da área da região tropical na safra 2014/2015, onde o cultivo de arroz foi realizado em sucessão ao adubo verde *Crotalaria juncea*, os demais cultivos foram realizados em áreas sob pousio invernal. A semeadura do arroz foi realizada nos dias 18 de novembro de 2014 e 25 de novembro de 2015, em Capão do Leão, e nos dias 23 de outubro de 2014 e 24 de outubro de 2015, em Goianira. Adotou-se espaçamento entre linhas de 20 cm e densidade de semeadura variando de 100 a 110 kg ha⁻¹, na safra 2015/16, e de 110 kg ha⁻¹, na safra 2016/17. Para o acompanhamento dos estádios de desenvolvimento da planta de arroz, utilizou-se, como referência, a escala de Counce et al. (2000). O controle de plantas daninhas e demais tratamentos culturais seguiram as indicações técnicas da pesquisa para a cultura de arroz irrigado (Reunião..., 2014; 2016).

Quando as plantas de arroz atingiram o estágio de maturação de colheita (R9), procedeu-se à colheita do arroz para determinação do rendimento de grãos. Para tanto, considerou-se uma parcela útil constituída pelas sete linhas centrais de plantas com 4 m de comprimento. Os dados de produtividade de grãos foram corrigidos para o teor de umidade de 130 g kg⁻¹.

A eficiência no uso de N (EUN, %) pelo arroz foi calculada pela diferença entre o rendimento de grãos dos tratamentos que receberam aplicação de fertilizante nitrogenado e testemunha com omissão da adubação nitrogenada, dividida pelo dose aplicada de N e multiplicada por 100.

As amostragens de ar para determinação das emissões dos gases de efeito estufa CH_4 e N_2O iniciaram por ocasião da semeadura do arroz e estenderam-se até pelo menos uma semana após sua colheita, para permitir a avaliação do CH_4 aprisionado no solo inundado, após a remoção da lâmina de água e secagem do solo. As amostragens de ar para determinação das emissões de CH_4 e N_2O do solo foram realizadas em intervalos regulares de aproximadamente 7 dias em Capão do Leão. Já em Goianira, esse intervalo foi adotado no período em que o solo esteve alagado, sendo reduzido para duas vezes por semana entre a semeadura e o início da irrigação por inundação do solo. Em ambos os locais, nas semanas subsequentes à realização das adubações nitrogenadas em cobertura para o arroz, a frequência de amostragem foi reduzida para intervalos de 1 a 2 dias.

Nas amostragens, utilizou-se o método da câmara estática fechada (Mosier, 1989). Para tanto, dispôs-se nas parcelas experimentais um sistema coletor de gases de efeito estufa, modelo específico para sistemas alagados (base + extensor(es) + câmara) (Scivittaro et al., 2016). As bases, confeccionadas em alumínio ou PVC, de acordo com o local e a safra agrícola, foram inseridas no solo a uma profundidade de 5 cm. Acima da superfície do solo, em dois lados opostos, as bases dispõem de dois orifícios com diâmetro de 2,5 cm, que permitem, quando presente, a circulação de água da área experimental para o interior do sistema coletor. Esses orifícios foram fechados durante os períodos de coleta de amostras de ar, utilizando-se rolhas de borracha.

Apenas as bases dos sistemas coletores permaneceram nas parcelas experimentais durante todo o período de avaliação. Durante as coletas, as câmaras dos sistemas coletores foram dispostas sobre as bases. A partir do momento em que a estatura das plantas de arroz excedeu a do conjunto base + câmara, um ou dois extensores, conforme a necessidade, foram colocados entre as bases e as câmaras.

Os conjuntos base + extensor(es) + câmara foram hermeticamente fechados durante as coletas, pela colocação de água em canaletas existentes na parte superior das bases e dos extensores (Gomes et al., 2009).

As coletas de amostras de ar foram realizadas sempre no período da manhã, entre 9h e 12h, em Capão do Leão, e entre 9h e 11h, em Goianira, horários em que os fluxos de emissão de gases de efeito estufa são representativos das emissões médias diárias nas regiões de clima temperado (Costa et al., 2008) e tropical (Jantalia et al., 2008), respectivamente. As amostras de ar do interior das câmaras foram tomadas manualmente com auxílio de seringas de polipropileno, nos tempos 0, 5, 10 e 20 minutos ou 0, 15 e 30 minutos após o fechamento das câmaras, respectivamente, em Capão do Leão e Goianira. 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 foi monitorada. Simultaneamente, realizou-se a determinação da temperatura do solo, na profundidade de 0 a 10 cm.

Durante os períodos de amostragens, as seringas foram acondicionadas em caixas térmicas e mantidas sob resfriamento. Imediatamente após, o ar armazenado foi transferido para frascos específicos dotados de vácuo.

Foram monitoradas as precipitações pluviométricas ocorridas ao longo de todo o período de avaliação, visando a associação desse dado com as emissões de CH_4 e N_2O do solo.

As concentrações de CH_4 e N_2O nas amostras de ar foram determinadas em cromatógrafo Shimadzu GC 2014 modelo Greenhouse, equipado com detector de captura de elétrons (ECD) a 325 °C e colunas empacotadas em temperatura de 70 °C, utilizando-se o N_2 como gás de arraste a um fluxo de 26 mL min⁻¹ e temperatura do injetor de 250 °C. O equipamento é provido de um metanador, que transforma o CO_2 em CH_4 , o qual é posteriormente quantificado em detector de ionização de chama (FID) trabalhando na temperatura de 250 °C. Por sua vez, os fluxos de CH_4 e de N_2O do solo foram calculados pela relação linear entre a variação na concentração desses gases e o tempo de coleta. 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. As emissões totais de CH_4 e de N_2O do período foram calculadas pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de CH_4 e de N_2O do solo (Gomes et al., 2009). Com base na emissão acumulada de CH_4 e de N_2O , calculou-se o potencial de aquecimento global parcial (PAGp), que considera o potencial de aquecimento de cada gás em relação ao CO_2 , sendo 25, para o CH_4 , e 298, para o N_2O , considerando um

horizonte de 100 anos (IPCC, 2007). Os resultados de PAGp foram relacionados aos de rendimento de grãos (RG), mediante a divisão dos valores de (PAGp) pelos de rendimento de grãos (RG).

Os fluxos de CH₄ e N₂O foram analisados de forma descritiva (média ± desvio padrão). As diferenças entre os ecossistemas de cultivo de arroz em ambas as safras sobre as variáveis rendimento de grãos, eficiência de uso de N pelo arroz, emissões totais de CH₄ e N₂O, PAGp e relação PAGp/RG foram avaliadas utilizando-se intervalo de confiança de 95%.

Resultados e Discussão

Rendimento de grãos e eficiência agrônômica de uso do N

Em ambos os ambientes de estudo, ecossistemas tropical e subtropical, não houve diferença entre as fontes nitrogenadas avaliadas (ureia e ureia protegida) sobre o rendimento de grãos de arroz (Figura 1). Esse resultado corrobora observações de Delgado e Mosier (1995), Alves et al. (2013) e Veçozzi et al. (2017), que constataram pequenas variações na produtividade de arroz irrigado adubado com ureia e fontes nitrogenadas de eficiência aumentada. Entretanto, o efeito de ambas as fontes de N foi estatisticamente superior ao da testemunha com omissão da adubação nitrogenada (Figura 1), demonstrando a importância do suprimento adequado de N no meio de cultivo para o bom desempenho da cultura de arroz irrigado (Snyder; Slaton, 2001), independentemente do ambiente de cultivo.

A comparação entre os ambientes demonstrou, porém, maior potencial de produtividade do arroz produzido no ecossistema subtropical, comparativamente ao tropical, de forma que o rendimento obtido pela testemunha com omissão da adubação nitrogenada em Capão do Leão (8.118 kg ha⁻¹) foi semelhante àqueles alcançadas com o uso de fontes nitrogenadas em Goianira (8.206 kg ha⁻¹ com ureia; e 8.530 kg ha⁻¹ com ureia protegida) (Figura 1). O maior potencial de produtividade da cultura de arroz irrigado na região subtropical se deve ao uso de genótipos-elite com elevado potencial produtivo e adaptados ao ambiente de cultivo, bem como ao elevado nível tecnológico adotado no cultivo do cereal nessa região.

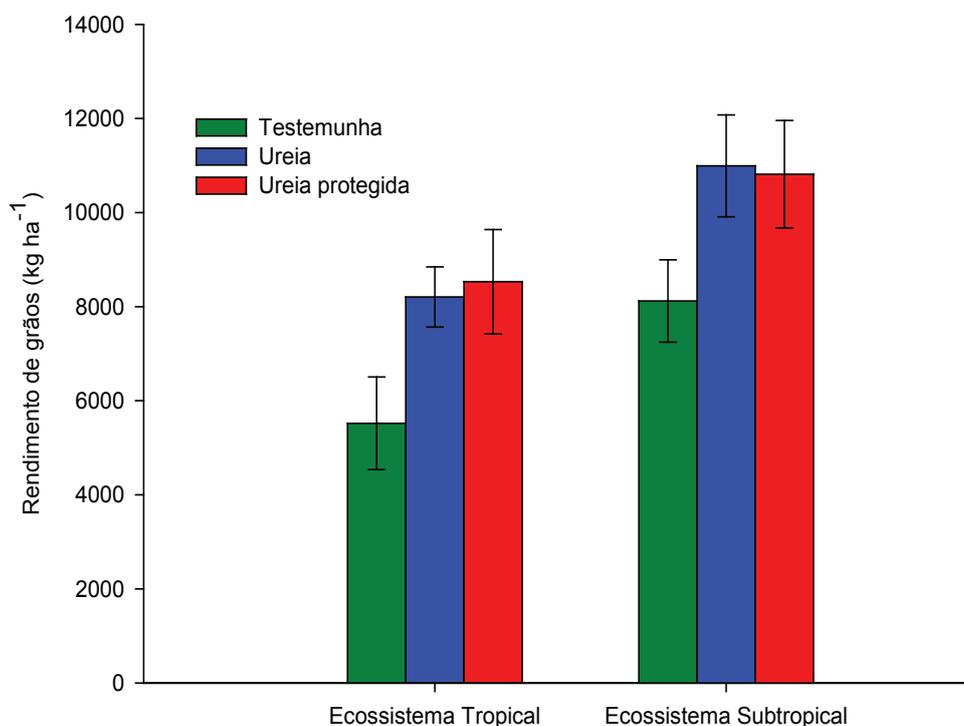


Figura 1. Rendimento de grãos de arroz em função do manejo da adubação nitrogenada nos ecossistemas tropical (Embrapa Arroz e Feijão, Goianira, GO) e subtropical (Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS). Dados relativos às safras agrícolas 2014/2015 e 2015/2016. Barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Acompanhando os dados de rendimento de grãos, não houve diferença entre a ureia e a ureia protegida quanto à eficiência de uso de N pelo arroz produzido nas regiões tropical e subtropical (Figura 2). Resultados semelhantes foram observados por Fageria et al. (2014), que determinaram eficiência de uso do N semelhante para a ureia e ureia revestida no ambiente tropical. Ademais, os resultados de EUN foram semelhantes para os ecossistemas tropical e subtropical (Figura 2).

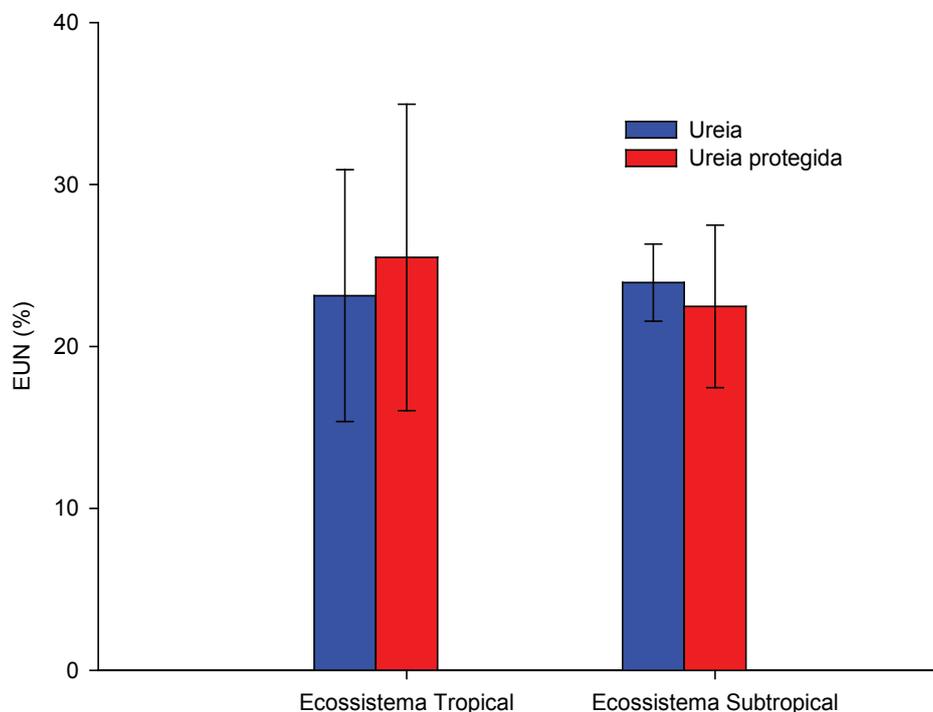


Figura 2. Eficiência agrônoma de uso do nitrogênio (EUN) em cultivo de arroz irrigado em função do manejo da adubação nitrogenada nos ecossistemas tropical (Embrapa Arroz e Feijão, Goianira, GO) e subtropical (Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS). Dados relativos às safras agrícolas 2014/2015 e 2015/2016. Barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Fluxos de N_2O e CH_4 do solo

Os fluxos de N_2O do solo associados ao manejo da fertilização nitrogenada de cultivo de arroz irrigado na região tropical, nas safras 2014/2015 e 2015/2016, são apresentados na Figuras 3A e 3B, respectivamente. De forma geral, em ambas as safras agrícolas, observou-se oscilação entre fluxos negativos (influxos) e emissões de N_2O de baixa magnitude. No entanto, algumas exceções a esse comportamento foram verificadas. No primeiro ano agrícola (2014/2015), destaca-se a ocorrência de pico(s) de emissão de elevada magnitude alguns dias após a semeadura do arroz para todos os tratamentos. Para o tratamento testemunha sem adição de N em cobertura, o pico de emissão máxima de N_2O ocorreu no sexto dia após a semeadura do arroz (DAS), com magnitude de $2.848 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Dois dias após, esse efeito foi parcialmente revertido, registrando-se influxo de elevada magnitude ($-1.581 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Para o tratamento com uso de ureia, por sua vez, observou-se um período de três dias com emissões elevadas de N_2O , do 6º ao 8º DAS, e, novamente, após a colheita do arroz, no 162º DAS. Já para a ureia protegida, picos de emissão de N_2O de elevada magnitude foram determinados logo após a semeadura (6º DAS: $1.021 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), na fase de maturação de grãos (113º DAS: $1.114 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) e após a colheita, entre 115º e 162º DAS (1.085 a $2.100 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Os picos de emissão de N_2O na semana subsequente à semeadura do arroz são atribuídos à decomposição e mineralização do nitrogênio proveniente dos resíduos do adubo verde (*Crotalaria ochroleuca*) incorporados ao solo cerca de 15 dias antes da semeadura do arroz. A incorporação de resíduos de baixa relação C:N tende a intensificar as emissões de N_2O do solo (Zschornack et al., 2011; Das; Adhya, 2014), devido à rápida liberação de formas minerais de nitrogênio ao solo, que participam dos processos de nitrificação e desnitrificação, tendo o N_2O como produto intermediário. Por sua vez, as demais ocorrências de emissões elevadas de N_2O possivelmente estejam relacionadas a variações nas condições de oxirredução do solo, proporcionadas pela

variação no regime hídrico ao longo do cultivo do arroz, que também favorecem a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação.

Ainda com relação ao ecossistema tropical, na safra 2015/2016, emissões elevadas de N_2O também estiveram restritas ao período inicial de cultivo do arroz, anteriormente ao início da irrigação por inundação do solo. Os picos de emissão máxima foram registradas no 10º DAS, correspondendo a 2.506 $mg N_2O ha^{-1} h^{-1}$, para a testemunha sem N; 10.421 $mg N_2O ha^{-1} h^{-1}$, para a ureia; e 4.057 $mg N_2O ha^{-1} h^{-1}$, para a ureia protegida. Esses picos de emissão de N_2O estiveram associados a eventos prévios de chuva de elevada intensidade, promovendo alternância nas condições de oxirredução do solo e, portanto, dos processos de nitrificação e desnitrificação. O aumento da umidade do solo cria sítios de anaerobiose favoráveis à desnitrificação, principal processo relacionado à emissão de N_2O do solo (Bateman; Baggs, 2005; Xu-Ri et al., 2012).

Por sua vez, na primeira safra agrícola, para o ecossistema subtropical, os fluxos de N_2O do solo foram baixos no período que antecedeu a primeira cobertura com N e irrigação do arroz. Esse comportamento se deve à estabilidade na condição de solo oxidado. Assim, apesar da presença de formas minerais de N no solo, não havia condição favorável à redução do nitrato, com a liberação de N_2O como produto intermediário. Independentemente do manejo da adubação nitrogenada, os maiores picos de emissão de N_2O ocorreram, preponderantemente, em sucessão à primeira adubação nitrogenada em cobertura e início da irrigação do arroz por inundação do solo. Esses corresponderam a 9.361; 2.910; e 3.871 $mg N_2O ha^{-1} h^{-1}$, respectivamente, para os tratamentos testemunha, ureia e ureia protegida, respectivamente. O período de emissões elevadas de N_2O estendeu-se por cerca de 15 dias, provavelmente devido à demora no estabelecimento da lâmina de água (Figura 3C). As emissões de N_2O do cultivo de arroz irrigado são devidas principalmente à aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais e à inundação do solo (Nishimura et al., 2004). Isso porque a água contém O_2 dissolvido, favorecendo a nitrificação, com consequente produção de N_2O (Majumdar, 2005). Adicionalmente, a presença de formas minerais de N liberadas pelos fertilizantes minerais, associada à redução do solo devido ao alagamento, condiciona a produção de N_2O , como produto da desnitrificação (Duble; Mailapalli, 2018).

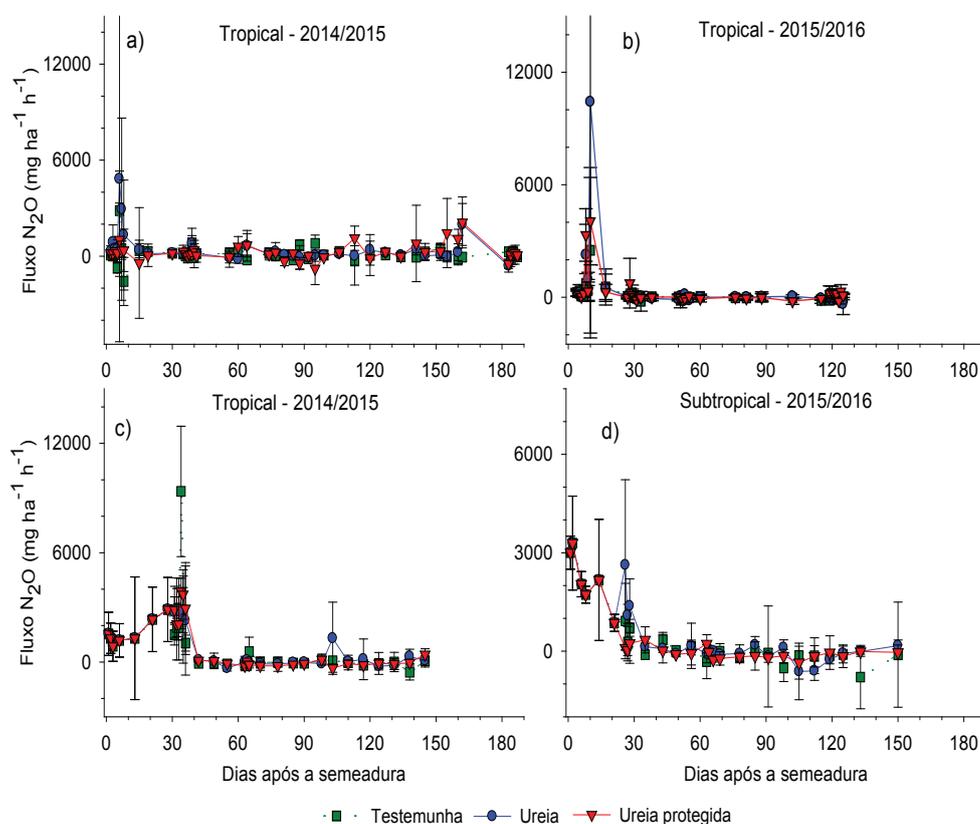


Figura 3. Fluxos de N_2O em cultivo de arroz irrigado em função do manejo da adubação nitrogenada nos ecossistemas tropical (Embrapa Arroz e Feijão, Goianira, GO), safras agrícolas 2014/2015 (a) e 2015/2016 (b), e subtropical (Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS), safras agrícolas 2014/2015 (c) e 2015/2016 (d). Barras verticais representam o desvio padrão da média.

Com relação ao CH_4 , no ecossistema tropical, em ambas as safras avaliadas, as emissões apresentaram, de maneira geral, comportamento anômalo ao de um cultivo de arroz irrigado típico. Esse caracterizou-se por taxas de emissão de baixa magnitude ao longo de todo o período de avaliação e, eventualmente, intercaladas por influxos de baixa magnitude (Figuras 4A e 4B). Na safra 2014/2015, determinou-se um único pico de emissão de CH_4 de elevada magnitude, restrito ao tratamento com aplicação de ureia, em sucessão à colheita do arroz e drenagem da área experimental, o qual muito provavelmente esteja associado à liberação de CH_4 aprisionado no solo inundado, pela drenagem. A comparação entre as safras agrícolas mostra, ainda, que as emissões de CH_4 da safra 2015/2016 foram ainda menores que as da safra 2014/2015, o que pode estar associado à incorporação de adubo verde ao solo anteriormente ao cultivo de arroz nessa safra. No segundo ano de cultivo, o aporte de material orgânico ao solo restringiu-se à palhada do arroz remanescente da safra anterior. O aporte de resíduos vegetais em solos sujeitos ao alagamento intensifica a produção e a emissão de CH_4 (Naser et al., 2007), pois se constitui em fonte de carbono lábil, que é substrato para a metanogênese, contribuindo, ainda, para a redução do solo (Dalal et al., 2008).

Nesse ambiente, os fluxos diários de CH_4 apresentaram comportamento semelhante para todos os tratamentos de manejo da adubação nitrogenada (Figura 4a e 4b). Em ambas as safras, os fluxos de emissão de CH_4 atingiram valores superiores a $100 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ apenas após três semanas do início da irrigação por inundação do solo, tornando-se mais elevados no final da fase vegetativa e início da fase reprodutiva do arroz, correspondendo a 68 dias após a inundação (DAI), na safra 2014/2015, e 50 DAI, na safra 2015/2016. Normalmente, o desenvolvimento das plantas de arroz intensifica o fornecimento de carbono para a metanogênese, que deriva da senescência de raízes e de exsudatos radiculares (Lu et al., 2000). Ademais, o prolongamento do período de inundação do solo resulta em diminuição na disponibilidade de aceptores de elétrons inorgânicos, e os microrganismos anaeróbios passam a utilizar aceptores de origem orgânica, caracterizando processo conhecido como fermentação, que tem o CH_4 como um de seus produtos (Mosier et al., 1998).

As baixas emissões de CH_4 observadas no ambiente tropical muito provavelmente estejam associadas à irregularidade no manejo da irrigação para o arroz, alternando períodos de solo inundado e oxidado, condição essa desfavorável à redução do solo e produção de CH_4 , o que é comprovado pelos valores de potencial redox medidos no solo da área experimental, que em momento algum alcançaram valores negativos, favoráveis para a produção de CH_4 (dados não apresentados). A produção de CH_4 ocorre somente em condições altamente reduzidas, sob potencial redox de -200 mV (Wassmann; Aulakh, 2000).

No ambiente subtropical, observou-se alguma distinção nos fluxos de CH_4 do solo em resposta à variação no manejo da adubação nitrogenada, em ambas as safras agrícolas acompanhadas, porém sem uma tendência definida (Figuras 4C e 4D). Os fluxos de CH_4 do solo, associados aos diferentes tratamentos de manejo da adubação nitrogenada, variaram de $0,4$ a $493,4 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, na safra 2014/2015 (Figura 4C), e de $-11,1$ a $250,3 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, na safra 2015/2016 (Figura 4D). Os valores medidos nesse experimento foram menores que os reportados por Zschornack (2011) ($-0,08$ a $629,5 \text{ g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) para a mesma cultivar de arroz irrigado, em estudo realizado em Gleisolo Háplico, em Cachoeirinha, RS.

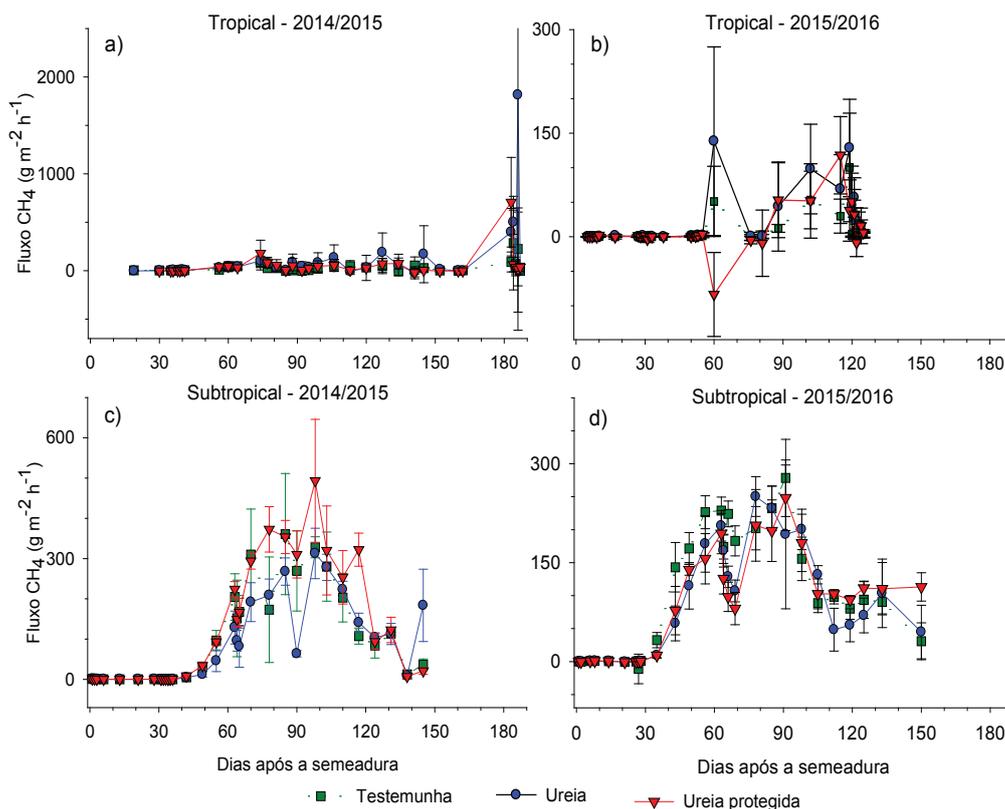


Figura 4. Fluxos de CH_4 em cultivo de arroz irrigado em função do manejo da adubação nitrogenada nos ecossistemas tropical (Embrapa Arroz e Feijão, Goianira, GO), safras agrícolas 2014/2015 (a) e 2015/2016 (b), e subtropical (Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS), safras agrícolas 2014/2015 (c) e 2015/2016 (d). Barras verticais representam o desvio padrão da média.

Muito embora a avaliação dos fluxos de CH_4 do solo tenha iniciado imediatamente antes da semeadura do arroz, emissões significativas desse GEE ocorreram somente após o início da irrigação por inundação do solo, mantendo-se elevadas e, de forma geral, com tendência crescente até a fase de floração. A partir desse momento, até a maturação dos grãos, as emissões de CH_4 decresceram gradualmente (Figuras 4c e 4d). Emissões elevadas de CH_4 foram determinadas poucos dias após a inundação do solo. Nesse momento, a produção de CH_4 decorre da fermentação da matéria orgânica facilmente degradável, presente no solo (Neue et al., 1994). A produção de CH_4 no solo só tem início após a redução de uma fração significativa de Mn^{3+} e Fe^{3+} , que são utilizados como aceptores de elétrons alternativos ao oxigênio na respiração de microrganismos anaeróbios (Ponnamperuma, 1972). Na fase reprodutiva, o fluxo de CH_4 do solo é acentuado, devido à quantidade elevada de biomassa de raízes e ao aumento da capacidade de transporte desse gás pela planta de arroz, decorrente da grande quantidade de perfilhos e de aerênquima (Neue et al., 1994). Em lavouras de arroz irrigado, até 60% das emissões de CH_4 decorrem da decomposição dos exsudatos ou de raízes mortas (Watanabe et al., 1999).

No final do período de cultivo do arroz, correspondendo à fase de maturação dos grãos, houve redução nas emissões de CH_4 . Esse comportamento é relativamente comum em cultivos de arroz irrigado (Lee et al., 2014; Wang et al., 2000; Wassmann et al., 2000), estando associado ao fato de a taxa fotossintética da planta diminuir a partir do início do desenvolvimento dos grãos, limitando a disponibilidade de substratos para a produção de CH_4 (Sinha, 1995). O decréscimo foi ainda mais intenso no final do período de cultivo, em razão da supressão da irrigação visando à colheita, fase em que o fluxo de CH_4 do solo foi baixo, em decorrência da oxidação do solo, inibindo a atividade das bactérias metanogênicas.

Emissões totais de N_2O e CH_4 do solo

Na região tropical, as emissões de N_2O na safra 2014/2015 totalizaram: $0,55 \pm 0,35 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$, para o tratamento testemunha com omissão da adubação nitrogenada; $1,25 \pm 1,06 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$, para o tratamento com aplicação de ureia; e $1,29 \pm 1,30 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$, para o tratamento com aplicação de ureia protegida. Na

safrá seguinte, corresponderam, respectivamente, a $0,47 \pm 0,39$ kg N₂O ha⁻¹; $1,17 \pm 1,17$ kg N₂O ha⁻¹; e $0,65 \pm 1,30$ kg N₂O ha⁻¹, para os tratamentos testemunha, ureia e ureia protegida. Já no ecossistema subtropical, as emissões medidas para os tratamentos testemunha e com aplicação de ureia ou ureia protegida, na safra 2014/2015, corresponderam a $1,63 \pm 0,99$ kg N₂O ha⁻¹; $1,93 \pm 1,54$ kg N₂O ha⁻¹; e $1,69 \pm 0,65$ kg N₂O ha⁻¹, respectivamente. No segundo ano agrícola, os valores medidos foram ainda menores, correspondendo a $0,70 \pm 0,60$ kg N₂O ha⁻¹, para a testemunha; $1,16 \pm 0,46$ kg N₂O ha⁻¹, para a ureia; e $0,80 \pm 0,45$ kg N₂O ha⁻¹, para a ureia protegida. Apesar das diferenças observadas nos valores absolutos de emissões totais de N₂O, devidas aos tratamentos de manejo da adubação nitrogenada, ambientes e ano de cultivo, a análise conjunta dos dados relativos às duas safras não indicou, porém, diferenças entre os manejos de N e ecossistemas de cultivo de arroz de acordo com o intervalo de confiança de 95% (Figura 5). Os resultados obtidos mostram que tanto a ureia, fonte convencional de nitrogênio para o arroz irrigado, quanto a ureia protegida, não intensificam o efluxo de N₂O do solo, quando manejadas de forma adequada. Tal comportamento corrobora observações de Cai et al. (1997), para a ureia. Ademais, destaca-se que esse efeito ocorreu em ambos os ambientes tropical e subtropical.

O efeito descrito deve estar associado ao fato de a aplicação de ambas as fontes de N ter sido realizada de forma parcelada, manejo que é recomendado para o arroz irrigado com vistas a otimizar a utilização do nutriente pela cultura e minimizar as perdas do sistema solo-planta.

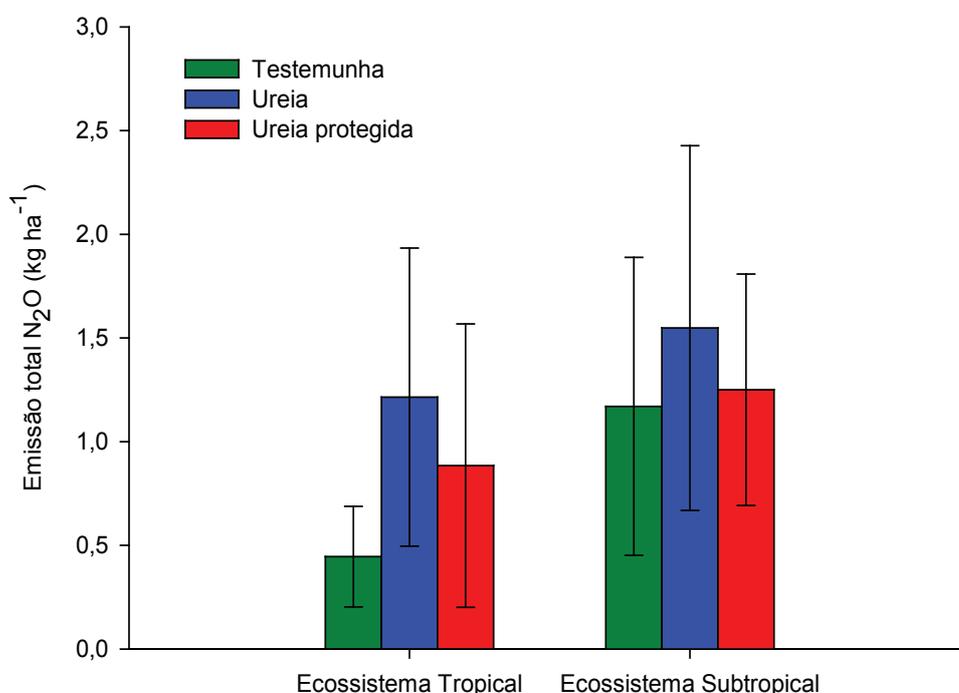


Figura 5. Emissões totais de N₂O em cultivo de arroz irrigado em função do manejo da adubação nitrogenada nos ecossistemas tropical (Embrapa Arroz e Feijão, Goianira, GO) e subtropical (Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS). Dados relativos às safras agrícolas 2014/2015 e 2015/2016. Barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

O efeito dos tratamentos sobre as emissões totais de CH₄ do solo ao longo do ciclo de cultivo do arroz foi distinto ao verificado para as emissões totais de N₂O. Assim, no ambiente subtropical, não foi determinada diferença entre os tratamentos de manejo da adubação nitrogenada sobre as emissões de CH₄ (Figura 6). Esse resultado reforça observações de Xiong et al. (2007), que não verificaram distinção nas emissões de CH₄ em arroz irrigado adubado com fonte orgânica ou sulfato de amônio. No ecossistema tropical, porém, as emissões de CH₄ da testemunha sem N equipararam-se, apenas, às do tratamento com aplicação de ureia protegida, sendo inferiores às da ureia comum. O efeito observado para os dois tratamentos com aplicação de fonte nitrogenada foi semelhante (Figura 6).

Os resultados de pesquisas relativas ao efeito de fontes nitrogenadas sobre as emissões de CH₄ no cultivo de arroz ainda são contraditórios. Segundo Oo et al. (2015), a aplicação de fontes de N ao solo cultivado com arroz irrigado reduz as emissões de CH₄, devido à competição entre as bactérias produtoras de CH₄ e as redutoras de nitrato (NO₃⁻). Além disso, os fertilizantes amoniacais estimulam a população de bactérias

que oxidam o CH_4 a CO_2 , impedindo que esse chegue à atmosfera (Shrestha et al., 2010). Por outro lado, a aplicação de fertilizantes nitrogenados ao arroz pode aumentar os fluxos de CH_4 , devido à maior produção de substratos orgânicos, facilitando a emissão através do aerênquima, em função do maior crescimento das plantas (Linguist et al., 2012).

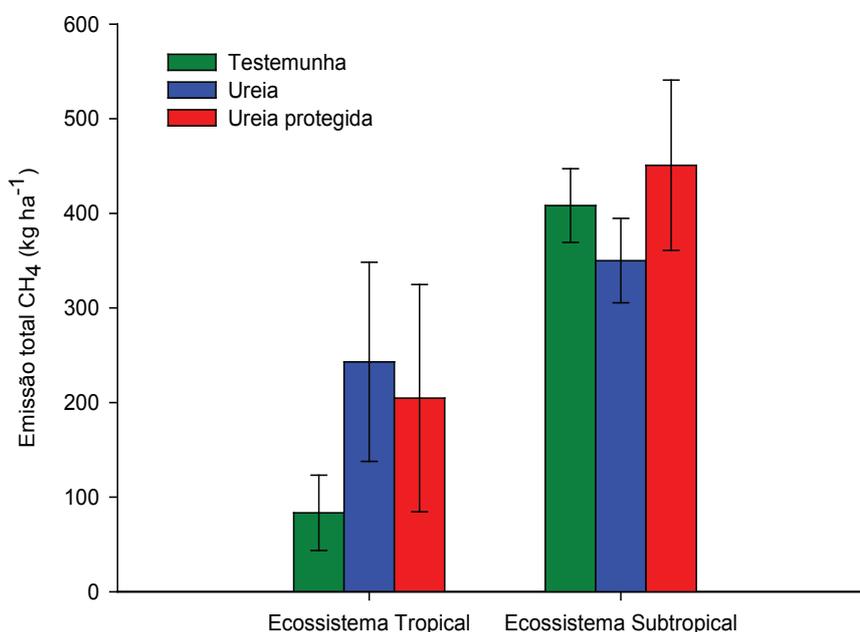


Figura 6. Emissões totais de CH_4 em cultivo de arroz irrigado em função do manejo da adubação nitrogenada nos ecossistemas tropical (Embrapa Arroz e Feijão, Goianira, GO) e subtropical (Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS). Dados relativos às safras agrícolas 2014/2015 e 2015/2016. Barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

A comparação entre manejos da adubação nitrogenada e ambientes, considerando o intervalo de confiança de 95%, mostra, porém, distinções com relação às emissões totais de CH_4 . A emissão do tratamento testemunha da região tropical equiparou-se, apenas, à da ureia protegida nesse ambiente, sendo menor que a de todos os demais tratamentos. Por outro lado, somente o tratamento com uso de ureia no ambiente subtropical apresentou emissão de CH_4 semelhante às dos manejos com uso de fonte de N no ambiente tropical. Os demais tratamentos do ecossistema subtropical proporcionaram emissões de CH_4 superiores às de todos os manejos da adubação nitrogenada na região tropical (Figura 6).

Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) e relação entre PAGp e rendimento de grãos

Em ambos os ambientes, o CH_4 respondeu pela maior parte do PAGp de todos os tratamentos de manejo da adubação nitrogenada, representando 93,0% do total para a testemunha sem N; 92,8% para a ureia e 93,2% para a ureia protegida, no ecossistema Tropical; e 96,7%; 95,0%; e 96,9% do PAGp, respectivamente, para os tratamentos testemunha, ureia e ureia protegida no ecossistema subtropical (Figura 7a e 7b). Resultados similares, em que a contribuição do CH_4 para o PAGp é muito superior à do N_2O , são comuns no cultivo de arroz irrigado por inundação, conforme observado em Veçozzi et al. (2017).

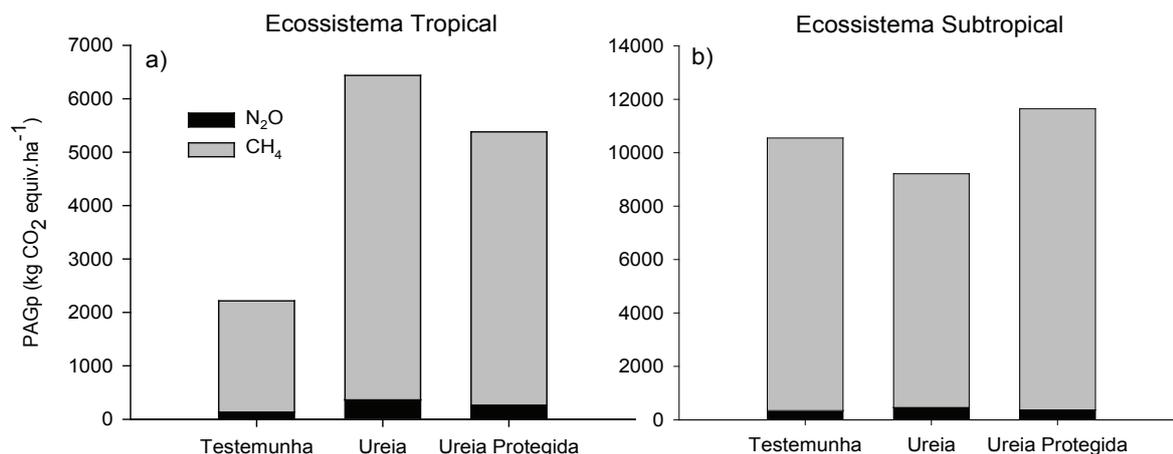


Figura 7. Contribuição dos gases CH₄ e N₂O para o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) em cultivo de arroz irrigado, em função do manejo da adubação nitrogenada nos ecossistemas tropical (Embrapa Arroz e Feijão, Goianira, GO) (a) e subtropical (Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS) (b). Dados relativos às safras agrícolas 2014/2015 e 2015/2016.

A comparação dentro dos ambientes de cultivo mostra efeito do manejo da adubação nitrogenada apenas sobre o potencial de aquecimento global parcial medido no ecossistema tropical, onde o tratamento com aplicação de ureia proporcionou PAGp superior ao da testemunha, enquanto a ureia protegida apresentou desempenho intermediário, equiparável a ambos os anteriores. No ecossistema subtropical, o PAGp de todos os manejos da adubação nitrogenada foi semelhante (Figura 8).

Na comparação geral, incluindo ambientes de cultivo e manejos da adubação nitrogenada, considerando o intervalo de confiança de 95%, verifica-se que o PAGp da testemunha sem N na região tropical foi semelhante, apenas, ao do tratamento com uso de ureia protegida nesse mesmo ambiente, sendo inferior a todos os demais tratamentos. Já o tratamento com uso de ureia no ecossistema tropical foi o único desse ambiente cujo PAGp equiparou-se ao do mesmo tratamento na região subtropical, sendo menor que os demais tratamentos do ambiente subtropical (Figura 8). Esse resultado reflete, basicamente, as menores emissões de CH₄ medidas no ambiente tropical que, conforme reportado previamente, estiveram associadas à irregularidade no manejo da irrigação. Ademais, na região tropical, o uso de ureia, particularmente, como fonte de N, contribuiu para a elevação do PAGp do cultivo de arroz.

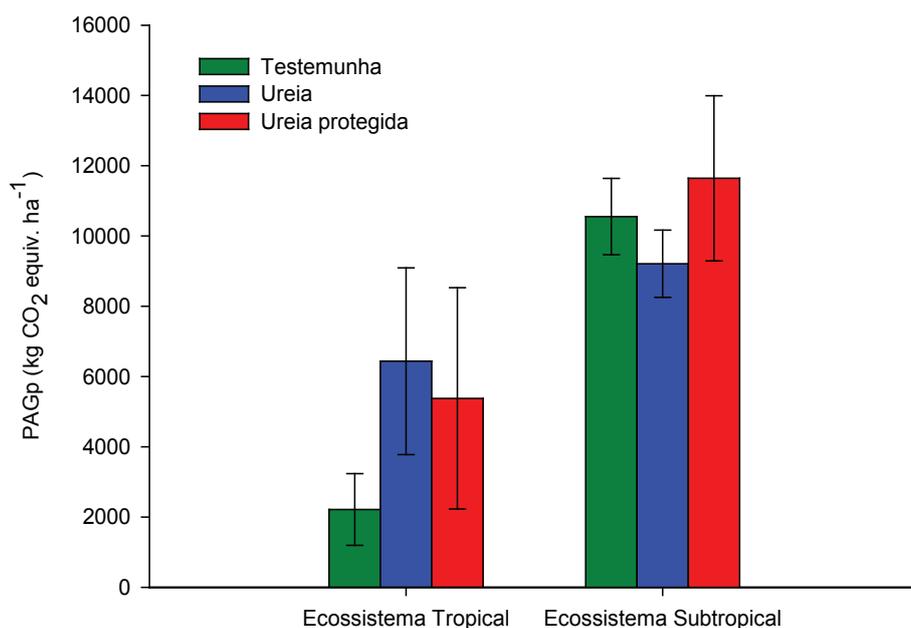


Figura 8. Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) em cultivo de arroz irrigado, em função do manejo da adubação nitrogenada nos ecossistemas subtropical (Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS) e tropical (Embrapa Arroz e Feijão, Goianira, GO). Dados relativos às safras agrícolas 2014/2015 e 2015/2016. Barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Diferenças quanto à variável que expressa a relação entre o potencial de aquecimento global parcial e o rendimento de grãos do arroz (PAGp/RG) estiveram restritas a duas situações: 1) o tratamento testemunha da região tropical apresentou desempenho inferior ao de todos os tratamentos do ecossistema subtropical, equiparando-se, porém, aos demais tratamentos do mesmo ambiente; e 2) a relação PAGp/RG do tratamento ureia protegida no ecossistema tropical foi inferior à da testemunha no ecossistema subtropical, mas equiparou-se às dos tratamentos com uso de fonte de N. Em cada um dos ambientes, não houve diferenças entre os manejos da adubação nitrogenada praticados (Tabela 9).

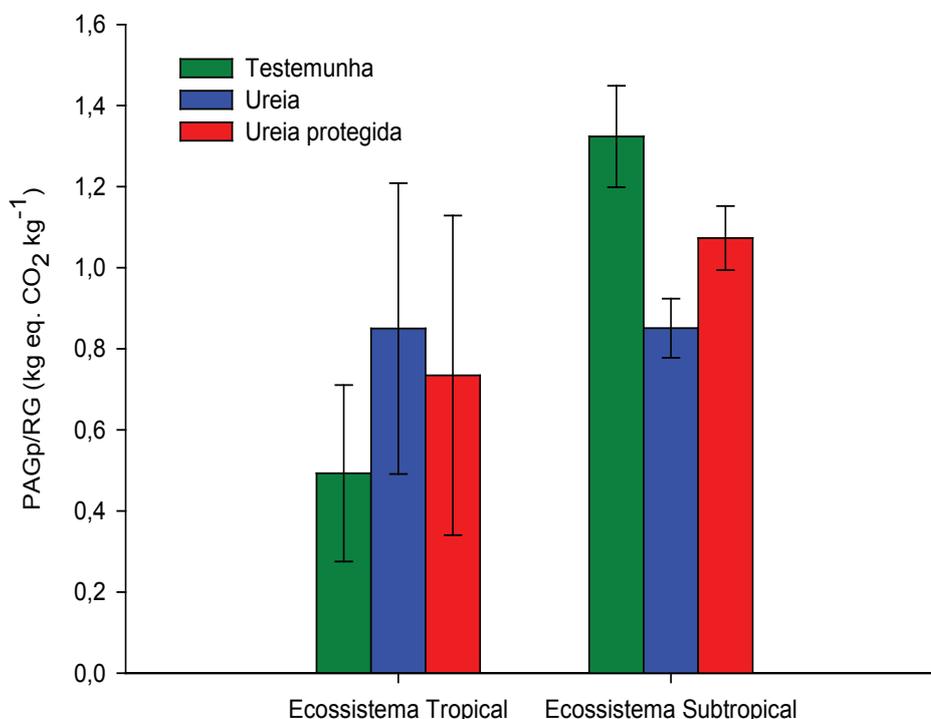


Figura 9. Relação entre o potencial de aquecimento global parcial e rendimento de grãos (PAGp/RG) em cultivo de arroz irrigado, em função do manejo da adubação nitrogenada nos ecossistemas tropical (Embrapa Arroz e Feijão, Goianira, GO) e subtropical (Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS). Dados relativos às safras agrícolas 2014/2015 e 2015/2016. Barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

É importante reforçar, ainda, que o índice PAGp/RG reflete simultaneamente tanto o efeito dos tratamentos e ambiente sobre o potencial de emissão de GEE, quanto à produtividade de grãos alcançada. Portanto, no ecossistema tropical, o índice PAGp/RG reflete tanto a menor emissão de CH₄ decorrente da irregularidade na manutenção da lâmina de água, caracterizada por eventual intermitência da irrigação, quanto o menor potencial de produtividade do arroz irrigado alcançado nesse ambiente. Já no ecossistema subtropical, esse índice, ao atingir patamares mais elevados, retrata maior potencial de emissão de GEE, especialmente CH₄, que é o principal componente do PAGp do cultivo de arroz irrigado, assim como o elevado potencial de produtividade do arroz na região subtropical.

Os resultados obtidos de PAGp e do índice PAGp/RG são indicativos de que, dentro de um ambiente específico, o manejo da adubação nitrogenada, incluindo a omissão da adubação nitrogenada e o uso de fontes distintas de N, exerce pouca influência sobre tais variáveis, possivelmente em razão de o CH₄ constituir a maior parte do PAGp do cultivo de arroz irrigado, cuja produção está associada preponderantemente ao regime hídrico de cultivo e ao aporte de material orgânico ao sistema (Yan et al., 2005).

Conclusões

O manejo da adubação nitrogenada para o arroz irrigado, incluindo fonte solúvel (ureia) e ureia protegida com boro e cobre, promove efluxo de N₂O do solo semelhante nos ecossistemas tropical e subtropical.

As emissões de CH₄ de cultivo de arroz irrigado na região subtropical são superiores às da região tropical, estando associadas preponderantemente ao regime hídrico estabelecido durante o período de cultivo. No

mesmo ambiente, o manejo da adubação nitrogenada não interfere no potencial de emissão de CH₄ desse cultivo.

O CH₄ é o principal componente do potencial de aquecimento global parcial do cultivo de arroz irrigado desenvolvido nos ecossistemas tropical e subtropical, respondendo por mais de 90% do total.

Independentemente do ambiente, tropical ou subtropical, o manejo da adubação nitrogenada não interfere na magnitude do potencial de aquecimento global parcial e do índice que relaciona o potencial de aquecimento global parcial ao rendimento de grãos.

Referências

- AGNIHOTRI, S.; KULSHRESHTHA, K.; SINGH, S. N. Mitigation strategy to contain methane emission from rice-fields. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 58, p. 95-104, 1999.
- AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M. A.; BALBINOT JÚNIOR, A. A. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 32, p. 1073-1081, 2002.
- ALVES, K. D.; SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K. Aplicação de nitrogênio em cobertura no arroz irrigado monitorada com o uso do sensor portátil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2013. v. 2, p.1284-1287.
- ASELMANN, I.; CRUTZEN, J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their primary productivity, seasonality and possible methane emissions. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 8, p. 307-358, 1989.
- AULAKH, M. S.; WASSMANN, R.; BUENO, C.; RENNENBERG, H. Impact of root exudates of different cultivars and plant development stages of rice (*Oryza sativa* L.) on methane production in a paddy soil. **Plant and Soil**, v. 230, p. 77-86, 2001.
- 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.
- CAI, Z.; XING, G.; YAN, X.; XU, H.; TSURUTA, H.; YAGI, K.; MINMI, K. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. **Plant Soil**, v. 196, p. 7-14, 1997.
- CICERONE, R. J.; SHETTER, J. D.; DELWICHE, C. C. Seasonal variation of methane flux from California rice paddy. **Journal of Geophysical Research**, v. 88, p. 11022-11024, 1983.
- CONRAD, R. Control of microbial methane production in wetland rice fields. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 64, p. 59-69, 2002.
- COPETTI, A. C. C. Emissão de óxido nitroso e metano em um Planossolo alagado em casa de vegetação. 2014. 97 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- COSTA, F. S.; BAYER, C.; LIMA, M. A.; FRIGHETTO, R. T. S.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLINI, E. Variação diária da emissão de metano em solo cultivado com arroz irrigado no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 38, n. 7, p. 2049-2053, 2008.
- COUNCE, P.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000.
- CUNHA, N. G.; COSTA, F. A. **Solos da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. 6 p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 152).
- DALAL, R. C.; ALLEN, D. E.; LIVESLEY, S. J.; RICHARDS, G. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review. **Plant and Soil**, v. 309, p. 43-76, 2008.
- DAS, K.; BARUAH, K. K. Methane emission associated with anatomical and morphophysiological characteristics of rice (*Oryza sativa*) plant. **Physiologia Plantarum**, v. 134, p. 303-312, 2008.
- DAS, S.; ADHYA, T. K. Effect of combine application of organic manure and inorganic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a tropical flooded soil planted to rice. **Geoderma**, v. 213, p. 185-192, 2014.
- DELGADO, J. A.; MOSIER, A. R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux. **Journal of Environmental Quality**, v. 25, n. 5, p. 1105-1111, 1995.
- DUBLEY, A.; MAILAPALLI, D. R. Development of control release urea fertilizer model for water and nitrogen movement in flooded rice. **Paddy and Water Environment**, v. 16, p. 1-13, 2018.
- EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. Dados conjunturais da produção de arroz (*Oryza sativa* L.) no Brasil (1986 a 2018): área, produção e rendimento. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2018. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>>. Acesso em: 24 ago. 2018.
- ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA DE PELOTAS (Capão do Leão). Normais climatológicas - mensal/anual. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; UFPEL, 2017. Disponível em: <<http://agromet.cpaet.embrapa.br/estacao/mensal.html>> Acesso em: 26. out. 2017.
- FAGERIA, N. K.; CARVALHO, M. C. S.; SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; PAIXÃO, M. R. R. Eficiência agrônômica de ureia revestida com polímero em arroz de terras altas e de várzea irrigado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 31.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 15.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 13.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 10., 2014, Araxá. **Anais...** Araxá: Núcleo Regional Leste da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2014. 1 CD-ROM.

- 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**, v. 106, p. 36-44, 2009.
- GRISP (GLOBAL RICE SCIENCE PARTINERSHIP). **Rice almanac**. 4. ed. International Rice Research Institute, 2013. 283 p.
- HUANG, Y.; JIAO, Y.; ZONG, L. G.; ZHENG, X. H.; SASS, R. L.; FISHER, F. M. Quantitative dependence of methane emission on soil properties. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 64, p. 157-167, 2002.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 996 p.
- JANTALIA, C. P.; dos SANTOS, H. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 82, n. 2, p. 161-173, 2008.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.
- LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. **European Journal Soil Biology**, v. 37, p. 25-50, 2001.
- LEE, H. J.; KIM, S. Y.; KIM, P. J.; MADSEN, E. L.; JEON, C. O. Methane emission and dynamics of methanotrophic and methanogenic communities in a flooded rice field ecosystem. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 88, p. 195-212, 2014.
- LINQUIST, B. A.; ADVIENTO-BORBE, M. A.; PITTELKOW, C. M.; VAN KESSEL, C.; VAN GROENIGEN, K. J. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis. **Field Crops Research**, v. 135, p. 10-21, 2012a. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.06.007>
- LU, Y.; WASSMANN, R.; NEUE, H-U; CHANGYONG, H. Dynamics of dissolved organic carbon and methane emissions in a flooded rice. **Soil Science Society America Journal**, v. 64, p. 2011-2017, 2000.
- MAJUMDAR, D. Past, present and future of nitrous oxide emission from rice fields: a treatise. In: LIVINGSTON, J. V (Ed.). Trends in Air Pollution Research. Nova York: Nova Science Publishers, 2005. cap. 3, p. 53-130.
- 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.
- MOSIER, A. R.; DUXBURY, J. M.; FRENEY, J. R.; HEINEMEYER, O.; MINAMI, K.; JOHNSON, D. E. Mitigating agricultural emissions of methane. **Climatic Change**, v. 40, p. 39-80, 1998.
- NASER, H. M.; NAGATA, O.; TAMURA, S.; HATANNO, R. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 53, n. 1, p. 95-101, 2007.
- NEUE, H. U.; WASSMANN, R.; LANTIN, R. S.; ALBERTO, M. A. C. R.; ADUNA, J. B.; JAVELLANA, A. M. Factors affecting methane emission from rice fields. **Atmospheric Environment**, v. 30, p. 1751-1754, 1996.
- NEUE, H. U.; WASSMANN, R.; LANTIN, R. S.; ALBERTO, M. C. R.; ADUNA, J. B. Diel and seasonal patterns of methane fluxes in rice fields. **International Rice Research Note**, v. 19, n. 3, p. 33-34, 1994.
- NISHIMURA, S.; SAWAMOTO, T.; AKIYAMA, H.; SUDO, S.; YAGI, K. Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 18, 2004.
- OLIVEIRA, V. A.; RODRIGUES, C. Levantamento detalhado dos solos da Fazenda Palmital, município de Goianira - GO. **Viasat**, Goiânia. 2012. 81 p.
- OO, A. Z.; WIN, K. T.; BELLINGRATH-KIMURA, S. D. Within field spatial variation in methane emissions from lowland rice in Myanmar. **Springer Plus**, v. 4, n. 145, p. 1-11, 2015.
- PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, v. 24, p. 29-96, 1972.
- REDDY, K. R.; DeLAUNE, R. D. **Biogeochemistry of wetlands: science and applications**. Boca Raton: CRC, 2008. p. 257-264.
- REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 30., 2014, Bento Gonçalves. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Santa Maria: SOSBAI, 2014. 192 p.
- REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 31., 2016, Bento Gonçalves. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2016. 200 p.
- RUDOLPH, J. Anomalous methane. **Nature**, v. 368, p. 19-20, 1994.
- SCIVITTARO, W. B.; SOUSA, R. O.; BAYER, C. **Protocolo para medições de emissões de gases de efeito estufa em sistemas de produção de arroz irrigado e em áreas sujeitas ao alagamento do solo – Rede Fluxus**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2016. 41 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 426).
- SHERESTHA, M.; SHERESTHA, P. M.; FRENZEL, P.; CONRAD, R. Effect of nitrogen fertilization on methane oxidation, abundance, community structure, and gene expression of methanotrophs in the rice rhizosphere. **The ISME Journal**, v. 4, p. 1545-1556, 2010. <http://dx.doi.org/10.1038/ismej.2010.89>
- SINGH, S.; SINGH, J. S.; KASHYAP, A. K. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 1219-1228, 1999.
- SINHA, S. K. Global methane emission from rice paddies: excellent methodology but poor extrapolation. **Current Science**, v. 68, p. 643-646, 1995.
- SNYDER, C. S.; SLATON, N. A. Rice production in the United States - an overview. **Better Crops**, v. 85, n. 3, p. 1-7, 2001.

- SOUSA, R. O.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos alagados (reações de redox). In: MEURER, E. J. (Org.). **Fundamentos de química do solo**. 5. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2012. p. 177-197.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995. 174 p. (Boletim técnico de solos, 5).
- VEÇOZZI, T. A.; SCIVITTARO, W. B.; SOUSA, R. O.; SILVEIRA, A. D.; JARDIM, T. M. **Emissões de gases de efeito estufa em cultivo de arroz irrigado: efeito do manejo da adubação nitrogenada**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2017. 39 p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 259).
- WANG, X. Y.; XU, Y. C.; LI, Z.; GUO, Y. X.; WASSMANN, R.; NEUE, H. U.; LANTIN, R. S.; BUENDIA, L. V.; DING, Y. P.; WANG, Z. Z. A four-year record of methane emissions from irrigated rice fields in the Beijing region of China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 58, p. 55-63, 2000.
- WASSMANN, R.; AULAKH, M. S. The role of rice plants in regulating mechanisms of methane emissions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 31, p. 20-29, 2000.
- WASSMANN, R.; LANTIN, R. S.; NEUE, H. U.; BUENDIA, L. V.; CORTON, T. M.; LU, Y. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. III Mitigation options and future research needs. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 58, n. 1-3, p. 23-36, 2000.
- WATANABE, A.; TAKEDA, T.; KIMURA, M. Evaluations of origins of CH₄ carbon emitted from rice paddies. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. 19, p. 23623-23629, 1999.
- WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. (Ed.). **Atlas climático da Região Sul do Brasil**: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. 2. ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012. 333 p.
- XIONG, Z.; XING, G.; ZHU, Z. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen. **Pedosphere**, v. 17, p. 146-155, 2007.
- XU-RI, I.; PRENTICE, C.; SPAHNI, R.; NIU, H. S. **Modelling terrestrial nitrous oxide emissions and implications for climate feedback**. *New Phytologist*, v. 196, p. 472-488, 2012.
- YAN, X.; AKIYAMA, H.; YAGI, K.; AKIMOTO, H. Global estimates of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 23, GB2002, 2009. doi: 10.1029/2008GB003299
- YAN, X.; YAGI, K.; AKIYAMA, H.; AKIMOTO, H. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1131-1141, 2005.
- ZSCHORNACK, T. **Emissões de metano e de óxido nítrico em sistema 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 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ZSCHORNACK, T.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; ANGHINONI, I. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from flood irrigated rice by no incorporation of winter crop residues into the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 623-634, 2011.

Embrapa

Clima Temperado

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

CGPE 15682