



Emissões de Gases de Efeito Estufa da Rotação de Soja e Arroz Irrigado em Terras Baixas do Rio Grande do Sul



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

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
365**

**Emissões de Gases de Efeito Estufa da Rotação de Soja e
Arroz Irrigado em Terras Baixas do Rio Grande do Sul**

*Walkyria Bueno Scivittaro
Eduarda Ehlert Vasconcelos
Samuel Pieper Griep
Vitória Jardim Azevedo
Rogério Oliveira de Sousa*

***Embrapa Clima Temperado
Pelotas, RS
2022***

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
Walkyria Bueno Scivittaro

Secretária-executiva
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
Nathália Santos Fick (46.431.873/0001-50)

Foto da capa
Walkyria Scivittaro

1ª edição
Publicação digital - PDF

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 da rotação
soja-arroz irrigado em Terras Baixas do Rio Grande do
Sul / Walkyria Bueno Scivittaro... [et al.]. –
Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2022.
19 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento /
Embrapa Clima Temperado, ISSN 1981-5980 ; 365)

1. Efeito estufa. 2. Arroz irrigado. 3. Soja. 4. Arroz.
I. Scivittaro, Walkyria Bueno. II. Série.

CDD 551.63

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução.....	7
Material e métodos	8
Resultados e discussão.....	11
Conclusões.....	17
Agradecimentos.....	17
Referências	17

Emissões de Gases de Efeito Estufa da Rotação de Soja e Arroz Irrigado em Terras Baixas do Rio Grande do Sul

Walkyria Bueno Scivittaro¹

Eduarda Ehlert Vasconcelos²

Samuel Pieper Griep²

Vitória Jardim Azevedo²

Rogério Oliveira de Sousa³

Resumo - A introdução da soja em rotação com o arroz irrigado constitui alternativa promissora para elevar a sustentabilidade dos sistemas de produção em terras baixas. Além dos benefícios inerentes à diversificação de culturas, por diminuir o período de tempo em que o solo é mantido inundado para o cultivo de arroz, pode influenciar no potencial de emissão de gases de efeito estufa (GEE) do sistema de produção. Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar as emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) e o potencial de aquecimento global (PAGp) de conformações da rotação soja/arroz irrigado em terras baixas do Rio Grande do Sul. O estudo foi realizado nas safras agrícolas 2019/2020 a 2021/2022, em Planossolo, em Capão do Leão-RS. Avaliaram-se as conformações 2:1 (soja/soja/arroz e arroz/arroz/soja) e 1:1 (soja/arroz/soja e arroz/soja/arroz) da rotação soja/arroz irrigado. Para comparar o efeito das rotações de culturas sobre as emissões de GEE, consideraram-se os dados da safra 2021/2022, que retratam um ciclo completo das conformações 2:1 e 1:1. Comparou-se, ainda, a totalização das emissões sazonais de CH_4 e N_2O e do PAGp das conformações de rotações ao longo das três safras agrícolas. A rotação com soja reduziu as emissões de CH_4 e aumentou as emissões de N_2O do solo, sendo a redução das emissões de CH_4 mais significativa que a elevação nas emissões de N_2O . Esse efeito foi maior para a conformação soja-soja-arroz, relativamente à conformação arroz-soja-arroz. O CH_4 contribuiu com quase a totalidade (>95%) do PAGp da cultura de arroz, enquanto que o N_2O foi o componente principal do PAGp da soja (>90%). As conformações de rotação envolvendo dois cultivos sucessivos (30.231 kg $\text{CO}_2\text{eq.}$) ou intercalados de arroz irrigado (28.153 kg $\text{CO}_2\text{eq.}$) proporcionaram PAGp superiores àquelas com dois cultivos de soja, respectivamente, 10.436 e 11.772 kg $\text{CO}_2\text{eq.}$, para soja/arroz/soja e soja/soja/arroz. A rotação do arroz irrigado com soja reduz o potencial de aquecimento global dos sistemas de produção em terras baixas, constituindo-se em estratégia mitigadora de emissões de gases de efeito estufa.

Termos para indexação: arroz irrigado, soja, rotação de culturas, metano, óxido nitroso, emissão.

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

² Acadêmica(o) de Engenharia Agrônoma, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS

³ Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, professor da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS

Greenhouse Gas Emissions from the Rotation of Soybean with Irrigated Rice in Lowlands of Rio Grande do Sul

Abstract - The introduction of soybeans in rotation with irrigated rice constitutes a promising alternative to increase the sustainability of lowland production systems. Besides the inherent benefits of the crop diversification, by reducing the period of time in which the soil is kept flooded for rice cultivation, it can influence the potential of greenhouse gases (GHG) emissions in the production systems. This study aimed at evaluating methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emissions and the global warming potential ($p\text{GWP}$) of arrangements regarding the soybean/irrigated rice rotation in lowlands of Rio Grande do Sul. The study was carried out from the growing seasons 2019/2020 to 2021/2022, in a Planossolo (Typic Albaqualf), in Capão do Leão, State of Rio Grande do Sul, Brazil. The 2:1 arrangements (soybean/soybean/rice and rice/rice/soybean) and 1:1 arrangements of the rotation soybean/rice (soybean/rice/soybean and rice/soybean/rice) were evaluated. In order to compare the effect of crop rotations on GHG emissions, only the data from the 2021/2022 growing season were considered, which depict a complete cycle of 2:1 and 1:1 soybean-irrigated rice arrangement. We also compared the sum of CH_4 and N_2O seasonal emissions and $p\text{GWP}$ of the rotation arrangements over the three seasons. Soybean rotation reduced CH_4 emissions and increased N_2O emissions from the soil; the reduction of CH_4 emissions was more significant than the increase in N_2O emissions. This effect was greater for the soybean/soybean/rice arrangements than for the rice/soybean/rice conformation. Methane contributed with almost all (>95%) of the global warming potential of the irrigated rice, while nitrous oxide was the main component of the soybean global warming potential (>90%). The arrangements involving two successive (30,231 kg $\text{CO}_2\text{eq.}$) or intercalary irrigated rice crops (28,153 kg $\text{CO}_2\text{eq.}$) provided higher $p\text{GWP}$ than those comprising two soybean crops, being 10,436 and 11,772 kg $\text{CO}_2\text{eq.}$, respectively, for soybean/rice/soybean and soybean/soybean/rice. The rotation of rice irrigated with soybean reduces $p\text{GWP}$ of the lowland production systems, constituting a strategy to mitigate greenhouse gas emissions.

Index terms: irrigated rice, soybeans, crop rotation, methane, nitrous oxide, emission.

Introdução

As áreas de terras baixas do Rio Grande do Sul (RS) localizam-se na metade sul do estado e caracterizam-se pela presença de relevo plano a suave ondulado, que remete à ocorrência de solos com drenagem deficiente (hidromórficos) (Pinto et al., 2004). A condição de hidromorfismo, associada à baixa fertilidade natural e às limitações físicas comuns nos solos de terras baixas, dificultaram por muito tempo a implementação de uma agricultura diversificada nesse ambiente, que historicamente está alicerçada no binômio arroz irrigado/pecuária de corte extensiva.

As áreas de terras baixas aptas e com infraestrutura disponível ao cultivo de arroz irrigado integrado com pecuária no RS somam aproximadamente 3,5 milhões de hectares. Desse total, anualmente, em média um milhão de hectares são utilizados para a produção de arroz e cerca de 60% do total são ocupados com pastagens nativas. Em associação ao arroz, tem-se um rebanho bovino de mais de 12,5 milhões de cabeças e rebanho de ovinos próximo de 4 milhões de cabeças (Reunião..., 2018). Esses números, além de demonstrarem a relevância econômica e social da agricultura das terras baixas do RS, relevam enorme potencial de expansão das atividades produtivas, seja pelo aumento da área cultivada com arroz ou seu aproveitamento para produção de outras culturas de grãos, como soja, milho e sorgo, assim como forrageiras, carne e leite. Entretanto, especificamente para a cultura do arroz, o comportamento observado nos últimos anos tem sido distinto, caracterizando-se por pequena retração da área cultivada com o cereal (IRGA, 2021) em razão, principalmente, da baixa rentabilidade alcançada pela lavoura, comprometendo seriamente sua sustentabilidade.

O cenário descrito ocorre apesar de o sistema de produção ter experimentado níveis crescentes de produtividade da lavoura de arroz ao longo das últimas décadas (IRGA, 2020), o que, em parte, se explica pelo fato de as produtividades relativamente altas ocorrerem às custas do aporte massivo de insumos externos (Theisen, 2017), nem sempre utilizados de forma eficiente, onerando os custos de produção. A solução para a problemática da baixa rentabilidade da lavoura arroseira do RS passa pela diversificação do sistema de produção, com a implementação de sistemas integrados de produção agropecuária, incluindo rotações e sucessões de culturas ao arroz. Nesse sentido, entre as espécies potencialmente utilizáveis, destacam-se a soja e o milho, cultivados durante o verão, forrageiras e algumas culturas de cobertura do solo, no outono/inverno.

Acompanhando essa lógica, áreas tradicionais de produção de arroz têm cada vez mais sido utilizadas para o cultivo de soja, sob o incentivo principal dos preços favoráveis alcançados pela oleaginosa no mercado internacional e a estabilidade do mercado comprador. Assim, a área de soja em terras baixas passou de 11 mil hectares, na safra 2009/2010, para mais de 426.000 hectares, na safra 2021/2022, correspondendo a aproximadamente 45% da área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul nessa safra (Silva et al., 2020; IRGA, 2022).

A adoção de modelos de produção agrícola, envolvendo o cultivo de espécies de sequeiro em rotação ao arroz irrigado, tem potencial para elevar os baixos índices econômicos e sociais das terras baixas do RS, alterando ainda o uso e manejo do solo, da água e da cobertura vegetal nesse complexo e frágil agroecossistema, refletindo-se na sustentabilidade do sistema de produção. No Sul do Brasil, os resultados de pesquisas sobre o impacto da diversificação de culturas no ambiente de terras baixas ainda são incipientes, demandando estudos de diferentes naturezas, incluindo avaliações relativas ao efeito sobre as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Os solos agrícolas são uma importante fonte de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) para a atmosfera, contribuindo, respectivamente, com cerca de 6% e 20% para o aumento no forçamento radiativo global (IPCC, 2013). As emissões de N_2O estão relacionadas principalmente ao aporte de nitrogênio (N) via adubação mineral ou orgânica a sistemas agrícolas aeróbios, enquanto que as emissões de CH_4 decorrem, preponderantemente, do cultivo de arroz irrigado (Nishimura et al., 2011; Yan et al., 2009). Essas últimas representam de 9% a 19% das emissões totais de metano (IPCC, 2013). Contrariamente, as emissões de óxido nitroso associadas ao cultivo de arroz irrigado são pouco representativas, uma vez que, sob inundação contínua, mantém-se a condição de anaerobiose, que é desfavorável à nitrificação, limitando a disponibilidade de nitrato, que é o substrato para a desnitrificação (Cai et al., 1997; Linqvist et al., 2012).

Por outro lado, a introdução de cultivos de sequeiro como a soja, em rotação ao arroz irrigado, reduz drasticamente o período de ocorrência de ambiente anóxico, favorável à produção e emissão de CH_4 . Mas a alternância nas condições de oxirredução do solo são intensificadas, favorecendo os processos de nitrificação e desnitrificação, que têm o N_2O como produto intermediário (Liu et al., 2010). Weller et al. (2015) relataram que a conversão de sistemas de produção de arroz irrigado para sistemas de rotação de culturas onde prevalecem solos sob condições aeróbicas, além de influenciarem a produtividade de grãos, interferem na dinâmica do carbono e do nitrogênio do solo e, conseqüentemente, nas emissões de GEE. Nesse sentido, estudos realizados por Nishimura et al. (2005, 2011), no Japão, mostraram que a conversão de áreas de cultivo contínuo de arroz irrigado para sistemas de produção de arroz aeróbio ou com a rotação soja/trigo promoveram aumento significativo no potencial de aquecimento global (PAG) líquido, devido ao incremento nas emissões de N_2O do solo, mas resultaram em redução nas emissões de CH_4 do arroz irrigado, quando estabelecido em sucessão aos cultivos de sequeiro.

Por sua vez, Yan et al. (2005) reuniram dados de emissões de CH_4 de diversos sistemas alagados da China e propuseram uma equação para estimar as emissões desse GEE a partir de diversos parâmetros ambientais, incluindo o manejo da água no período que antecede o cultivo de arroz irrigado. A aplicação da equação indicou a possibilidade de redução nas emissões de CH_4 do solo decorrente da manutenção do solo drenado no período que antecede o cultivo de arroz irrigado.

Considerando que a diversificação de culturas pode mitigar as emissões de GEE da lavoura de arroz e a expansão da rotação com a soja nas terras baixas do RS, questiona-se sobre a influência da conformação do sistema de culturas nas emissões sazonais de ambas as culturas.

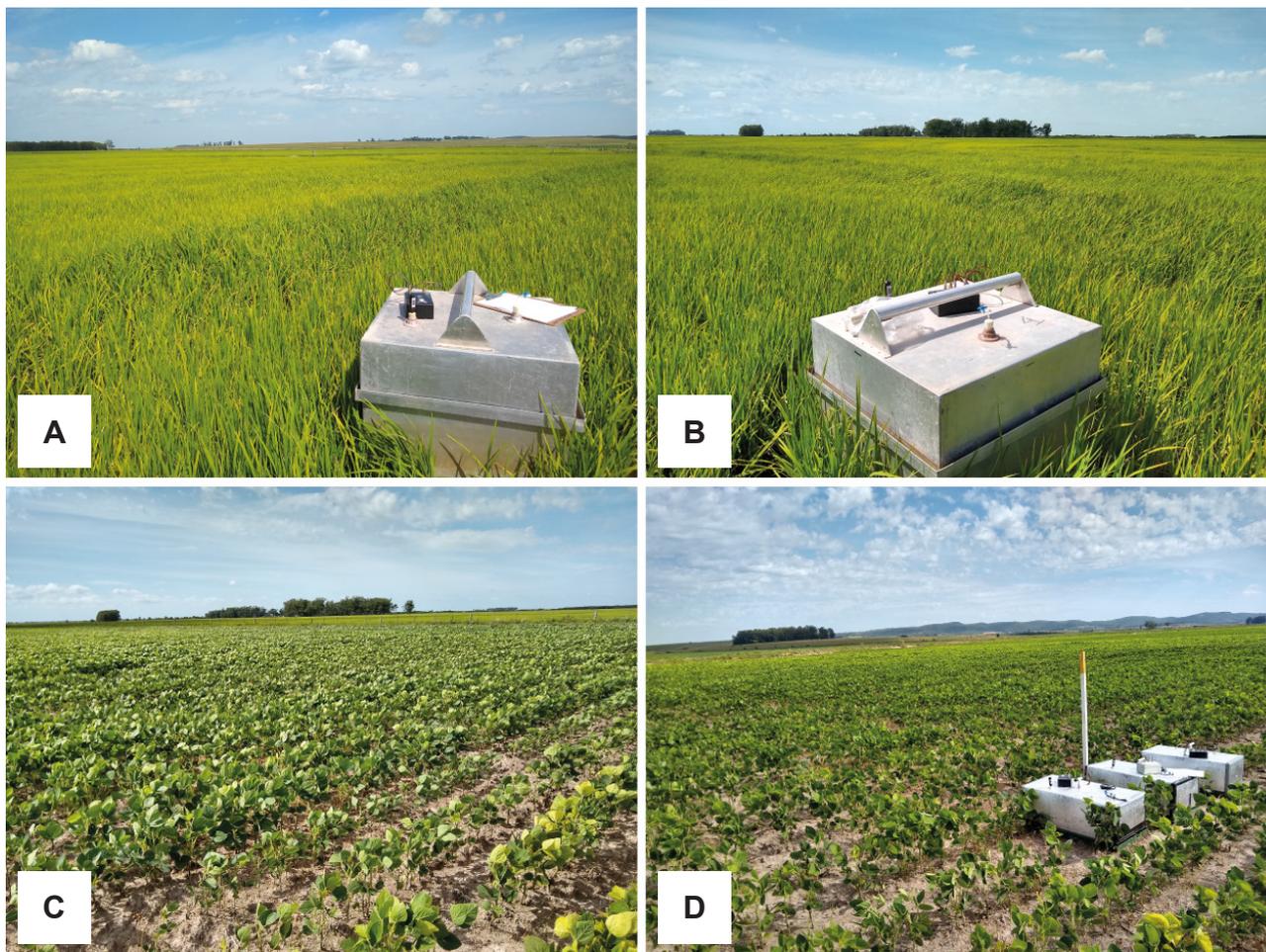
O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar as emissões sazonais de CH_4 e N_2O e o potencial de aquecimento global (PAG) associados à rotação soja/arroz irrigado em terras baixas do Rio Grande do Sul, visando identificar conformações de sistema de produção mitigadores de emissões.

Material e métodos

O experimento foi realizado sob condições de campo, nas safras agrícolas 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, em Planossolo Háptico (Streck et al., 2008), em área de produção comercial localizada no município de Capão do Leão, RS. O clima local é classificado como subtropical (Cfa – Köppen) (Wrege et al., 2012). A precipitação e a temperatura média anual são de 1.367 mm e 17,8 °C (Estação, 2017).

Ao longo das três safras agrícolas, avaliaram-se as conformações (arranjos de cultivos) 2:1 e 1:1 da rotação soja/arroz irrigado (T1: soja/soja/arroz; T2: arroz/soja/arroz; T3: arroz/arroz/soja; e T4: soja/arroz/soja), iniciadas por ambas as culturas, permitindo o acompanhamento integral das quatro conformações possíveis ao longo de três safras. Os tratamentos T1 e T3 caracterizaram as conformações 2:1 e os tratamentos T2 e T4, as conformações 1:1, popularmente conhecidas por “pingue-pongue”.

As áreas de estudo relativas às quatro conformações da rotação soja/arroz irrigado estão localizadas em posições adjacentes, totalizando 40 ha, distribuídos aproximadamente de forma equitativa entre os tratamentos T1 a T4 (Figura 1).



Fotos: Walkyria Bueno Scivittaro

Figura 1. Vista geral das áreas de estudo localizadas no município de Capão do Leão, RS, na safra agrícola 2021/2022, abrigando as conformações da rotação soja arroz irrigado sendo: soja/soja/arroz (A); arroz/soja/arroz (B); arroz/arroz/soja (C); e soja/arroz/soja (D).

Em cada área de estudo foram delimitadas quatro unidades experimentais de 500 m² (20 m x 25 m), onde foram realizadas as avaliações agrônômicas das culturas e de emissões de GEE. As unidades experimentais foram dispostas em delineamento de faixas, com quatro repetições.

O sistema de drenagem das áreas de estudo foi estabelecido a partir do levantamento planialtimétrico, utilizando sistema GNSS/RTK, fundamentando-se no valetamento das áreas, para escoamento superficial da água, quando do cultivo de soja.

Ambas as culturas foram implantadas em sistema convencional de preparo do solo, envolvendo operações de aração, gradagem e aplainamento da superfície do terreno. A correção do solo para pH 6,0, quando necessária, e a adubação das culturas da soja e de arroz irrigado foram estabelecidas considerando-se os resultados da análise química do solo e as indicações técnicas da pesquisa (Sociedade..., 2016; Reunião..., 2018). Apenas o arroz foi irrigado, por inundação do solo, no período compreendido entre os estádios de três folhas (V3) e maturação de colheita (R9), mantendo-se lâmina de água mínima de 10 cm. O controle de plantas daninhas, de doenças e de insetos-praga para as culturas seguiu as indicações técnicas para o Sul do Brasil (Reunião..., 2016; Reunião..., 2018). Nas faixas relativas a cada tratamento (conformações da rotação soja/arroz irrigado) foram instalados, ao acaso, três sistemas coletores de gases de efeito estufa, constituindo as repetições dos tratamentos. Utilizaram-se coletores distintos para as culturas de arroz irrigado (modelo específico para sistemas alagados – base/extensor(es)/topo) e soja (modelo específico para sistemas aeróbios – base/topo) (Scivittaro et al., 2016). Ambos os modelos seguem o método da câmara estática fechada (Mosier, 1989).

Nas três safras agrícolas (2019/2020 a 2021/2022), realizaram-se avaliações de emissões dos gases de efeito estufa CH_4 e N_2O associadas às rotações soja/arroz irrigado nas conformações 2:1 e 1:1 no período de primavera/verão, iniciando na semana seguinte à semeadura das culturas de verão e estendendo-se até uma semana após sua colheita. Para estabelecer a influência das conformações da rotação soja/arroz irrigado sobre as emissões sazonais e o PAG_p , consideraram-se os dados da safra 2021/2022, quando se completou o primeiro ciclo envolvendo as possíveis rotações 2:1 e 1:1 com as culturas de soja e arroz irrigado. Complementarmente, procedeu-se a totalização das emissões sazonais de CH_4 e de N_2O e do PAG_p relativos às quatro conformações da rotação soja/arroz irrigado nas três safras, visando a comparação do efeito globalizado do período.

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. Excepcionalmente, na semana subsequente à realização das adubações nitrogenadas em cobertura para a cultura do arroz, a frequência de amostragem foi reduzida para intervalos de dois a três dias.

As amostragens de ar foram realizadas sempre no período da manhã, entre 9h e 12h, horário em que os fluxos de GEE são representativos das emissões médias diárias na região Sul do Brasil (Costa et al., 2008). As amostras 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 antes de cada amostragem, por meio de ventiladores presentes na parte superior das câmaras, e a temperatura interna, monitorada com termômetro digital de haste com visor externo.

Durante os períodos de amostragens, as seringas foram acondicionadas em caixas térmicas e mantidas sob baixa temperatura. Finalizadas as coletas, o ar armazenado nas seringas foi transferido para frascos específicos dotados de vácuo.

As concentrações de CH_4 e N_2O 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 CH_4 e de N_2O 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 CH_4 ou de N_2O (mmol mol^{-1}) no intervalo de tempo t (min).
- M é o peso molecular do respectivo gás (g mol^{-1}).
- P é a pressão no interior da câmara (assumida como 1,0 atm).
- V corresponde ao volume da câmara expressa em litros (L).
- T corresponde à temperatura interna expressa em Kelvin (K).
- R é a constante universal dos gases ($0,08205 \text{ L atm k}^{-1} \text{ mol}^{-1}$).
- A é a área da base da câmara (m^2).

A taxa de aumento de gás no interior das câmaras foi obtida pelo coeficiente angular da equação da reta 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 CH_4 e de N_2O do solo (Gomes et al., 2009).

Com base nas concentrações medidas de CH_4 e N_2O pela análise das amostras de ar, calculou-se o potencial de aquecimento global parcial (PAG p) de cada tratamento, que permite realizar a análise conjunta das emissões, considerando o PAG p desses gases em relação ao CO_2 , sendo 34, para o CH_4 , e 298, para o N_2O , para um horizonte de 100 anos (IPCC, 2013). Os fluxos diários foram analisados de forma descritiva (média \pm desvio padrão) e as emissões sazonais de CH_4 e N_2O e o PAG p foram submetidos à análise de variância, comparando-se as médias dos tratamentos pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Resultados e discussão

Fluxos de CH_4 e N_2O do solo

A magnitude e o padrão de emissão de CH_4 do solo foram distintos entre os cultivos de arroz irrigado e soja; os fluxos associados ao arroz irrigado foram bem maiores que aqueles medidos para a cultura da soja (Figura 2).

Para o arroz irrigado, os fluxos de CH_4 foram praticamente nulos até cerca de 40 dias após o início das avaliações, correspondendo a três semanas após a entrada de água na lavoura (Figura 2). Nesse sentido, registra-se a ocorrência de período bastante seco na fase inicial de desenvolvimento da cultura (pré-irrigação), caracterizado por baixa umidade do solo, condição desfavorável à produção e emissão de CH_4 . Assim, as reações de redução do solo nas áreas cultivadas com arroz iniciaram com a irrigação por inundação do solo, que ocorreu 20 dias após a emergência (DAE) das plantas; estas, à época, encontravam-se no estágio de quatro a cinco folhas (V4/V5). Entre o 40° e 75° DAE do arroz, os fluxos de CH_4 do solo apresentaram tendência crescente, com uma única oscilação no 57° DAE, quando diminuíram abruptamente, possivelmente em razão de desuniformidade na irrigação, promovendo momentânea oxidação do solo. A partir do 75° DAE até uma semana após a colheita do arroz, os fluxos de CH_4 oscilaram consideravelmente, porém mantendo-se em patamares relativamente elevados. Nesse período, destacaram-se dois momentos onde as emissões de CH_4 decresceram, aos 104 e 130 DAE; no primeiro registraram-se, inclusive, influxos de CH_4 e no segundo, coincidindo com a colheita do arroz, os valores medidos foram praticamente nulos, em razão da drenagem da lavoura para essa operação. Na semana seguinte, porém, as emissões de CH_4 voltaram a aumentar, o que se explica pela liberação desse GEE aprisionado no solo após a remoção da lâmina de água (Figura 2).

A comparação das conformações de rotação de culturas envolvendo o cultivo de arroz irrigado mostra, ainda, que a magnitude dos fluxos de CH_4 do tratamento em que esse cereal foi cultivado em sucessão a apenas um cultivo de soja foi consistentemente superior àquela medida na conformação soja-soja-arroz, com uma única exceção aos 117 DAE (Figura 2), indicando tendência de redução do potencial de emissão de CH_4 do cultivo de arroz, em resposta ao aumento do período de permanência do solo drenado para o estabelecimento de culturas de sequeiro, conforme preconizado por Yan et al. (2005) e Weller et al. (2015).

Os fluxos de CH_4 associados ao arroz irrigado apresentaram amplitude de $-43,8$ a $302,6$ g CH_4 ha^{-1} h^{-1} , para a conformação soja/soja/arroz (S-S-A), e de $-45,4$ a $364,6$ g CH_4 ha^{-1} h^{-1} , para a conformação arroz/soja/arroz (A-S-A). Para a conformação S-S-A, o pico máximo de emissão de CH_4 ocorreu no 117° após o início das avaliações (Figura 2), correspondendo à fase de maturação de grãos, ou seja, mais tardiamente que o usual em cultivos de arroz irrigado, que corresponde à fase de floração (Nishimura et al., 2004, 2011; Wassmann et al., 2000; Buss, 2012), reforçando a constatação de que a extensão do período de rotação com espécies de sequeiro reduz o potencial de emissão de CH_4 do arroz irrigado, uma vez que posterga o processo de redução no solo. Por sua vez, a conformação A-S-A apresentou dois picos elevados de emissão de CH_4 , correspondentes a $359,0$ e $364,6$ g CH_4 ha^{-1} h^{-1} , registrados no 75° e 138° DAE, respectivamente. O primeiro, coincidindo com a fase de floração e o segundo, uma semana após a colheita do arroz (Figura 2).

De acordo com Neue et al. (1994), o aumento na produção e emissão de metano em seguida à inundação do solo decorre da fermentação da matéria orgânica facilmente degradável. Com o desenvolvimento da cultura até a floração, os fluxos crescentes devem-se ao aumento na quantidade de biomassa de raízes, promovendo maior exsudação radicular, principal substrato para as bactérias metanogênicas nessa fase do cultivo de arroz (Le Mer; Roger, 2001; Neue, 1993), bem como à maior capacidade de transporte de CH_4 associada à grande quantidade de perfilhos e de aerênquima (Khosa et al., 2011). Emissões elevadas de CH_4 na fase reprodutiva do arroz resultam de condições ambientais favoráveis à atividade metanogênica (Towprayoon et al., 2005).

Para ambas as conformações de rotação com cultivo de soja, as emissões de CH_4 do solo foram muito próximas de zero ao longo de todo o período de avaliação, com alternância de eventos de efluxo e influxo de baixa magnitude (Figura 2). Esse comportamento é explicado pela manutenção do solo drenado para o cultivo da oleaginosa, inibindo a atividade dos microrganismos metanogênicos, confirmando observações de Camargo (2015).

Com relação ao N_2O , os maiores fluxos foram determinados para a soja cultivada após dois ciclos de cultivo de arroz, que apresentou um pico de elevada magnitude, correspondente a $21.311,4 \text{ mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ no 64° DAE. Este mesmo tratamento apresentou, ainda, três outros picos de emissão de N_2O , aos 31, 71 e 85 DAE da cultura. O comportamento do tratamento em que a soja sucedeu apenas um cultivo de arroz (S-A-S) foi distinto, ou seja, com o registro de apenas três picos de emissão de N_2O com magnitudes menores ao longo do ciclo, especificamente no 64° , 71° e 100° DAE. Este mesmo tratamento apresentou, ainda, um pico de influxo relativamente elevado de N_2O , correspondente a $-4.823,4 \text{ mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ no 151° DAE (Figura 3).

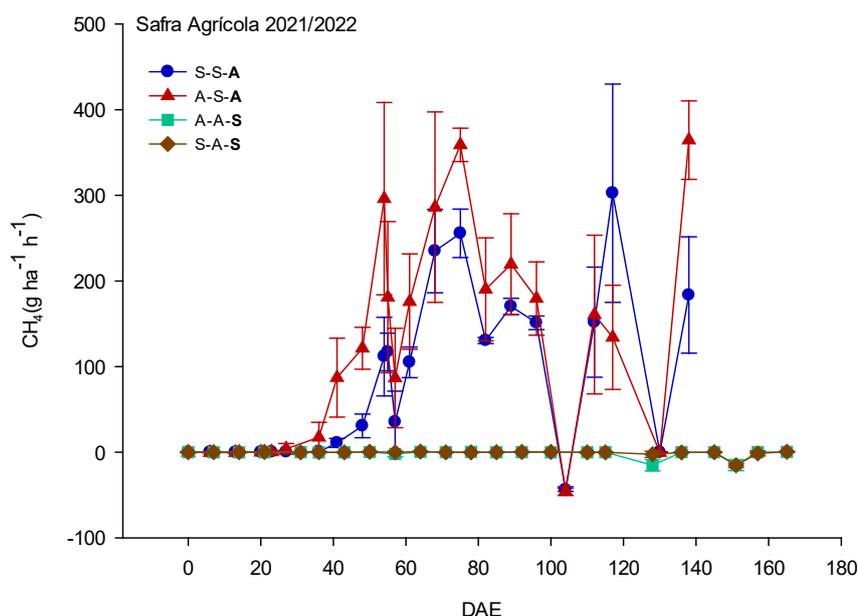


Figura 2. Fluxos de metano (CH_4) associados ao cultivo de arroz irrigado ou soja, inseridos em conformações de rotação de culturas em experimento realizado no município de Capão do Leão-RS, nas safras agrícolas 2019/2020 a 2021/2022, sendo: S-S-A (soja/soja/arroz); A-S-A (arroz/soja/arroz); A-A-S (arroz/arroz/soja); e S-A-S (soja/arroz/soja). Na identificação dos tratamentos, as letras em negrito referem-se à inicial da espécie cultivada na terceira safra agrícola. Barras verticais representam o desvio padrão da média. Embrapa Clima Temperado. Pelotas, RS, 2022.

Para ambas as conformações de rotação com cultivo arroz irrigado, registraram-se poucos eventos de emissão de N_2O , destacando-se os picos máximos de emissão de ambos os tratamentos ocorridos no 55° DAE, correspondentes a $11.151,6$ e $5.742,0 \text{ mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, em sucessão à segunda cobertura nitrogenada para o arroz. Um outro pico de emissão de N_2O foi determinado para ambos os tratamentos, uma semana após a colheita do arroz (138 DAE), com magnitudes de $4.238,0$ e $4.118,7 \text{ mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectivamente para as conformações soja/soja/arroz e arroz/soja/arroz. No restante do período de avaliação, as emissões de

N_2O foram baixas, com alternância entre valores baixos de emissão e influxos (Figura 3). Esse comportamento foi verificado, inclusive, nos períodos subsequentes à primeira cobertura nitrogenada ao arroz, realizada, no 20º dia após a emergência. De forma geral, as emissões de N_2O associadas ao cultivo de arroz irrigado são baixas, podendo ocorrer influxos desse GEE em determinados momentos, que representam absorção pelo solo (Cai et al., 1997; Liu et al., 2010). Isto porque as emissões de N_2O estão associadas tanto à adubação nitrogenada, quanto 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, a absorção de N_2O ocorre por ação de bactérias desnitrificadoras, que reduzem o N_2O a N_2 sob condições anaeróbicas, devido à baixa concentração de NO_3^- (Chapuis-Lardy et al., 2007).

Atribui-se o maior potencial de emissão de N_2O das áreas cultivadas com soja, relativamente ao arroz irrigado, ao elevado potencial de fixação biológica de N desta cultura, aportando elevada quantidade de nitrogênio ao sistema solo-planta. Ademais, em terras baixas, 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, as quais são favoráveis à ocorrência dos processos de nitrificação/desnitrificação (Reddy; Delaune, 2008).

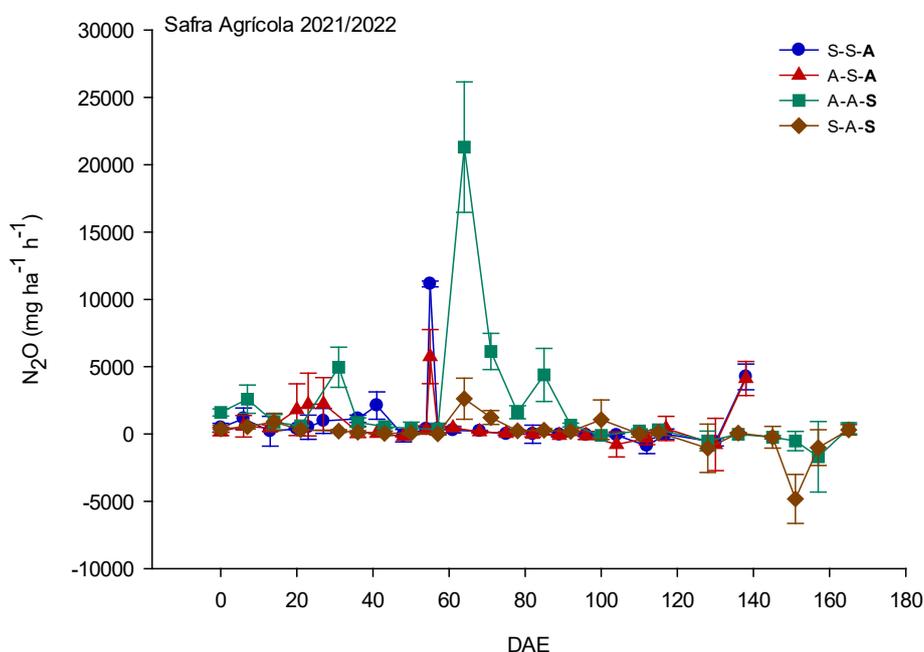


Figura 3. Fluxos de óxido nitroso (N_2O) associados ao cultivo de arroz irrigado ou soja, inseridos em conformações de rotação de culturas nas safras agrícolas 2019/2020 a 2021/2022, em experimento realizado no município de Capão do Leão-RS, sendo: S-S-A (soja/soja/arroz); A-S-A (arroz/soja/arroz); A-A-S (arroz/arroz/soja); e S-A-S (soja/arroz/soja). Na identificação dos tratamentos, as letras em negrito referem-se à inicial da espécie cultivada na terceira safra agrícola. Barras verticais representam o desvio padrão da média. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

A despeito das variações no padrão temporal de emissões de N_2O entre as culturas da soja e arroz irrigado, de forma geral, essas foram baixas, salvo em momentos específicos, que estiveram associadas a práticas de manejo, particularmente às operações de semeadura, adubação nitrogenada e drenagem, bem como à ocorrência de eventos de chuva intensa ao longo do ciclo da soja.

Emissões sazonais de CH₄ e N₂O e potencial de aquecimento global parcial (PAGp)

As emissões sazonais de CH₄ foram fortemente influenciadas pela espécie vegetal, sendo que o cultivo de arroz irrigado proporcionou emissões significativamente superiores às da soja. Esse resultado decorre do fato de a produção de CH₄ ocorrer apenas em ambientes reduzidos, como os estabelecidos pela inundação do solo em lavouras de arroz irrigado, que favorecem a atividade de bactérias metanogênicas, responsáveis por sua produção (Aulakh et al., 2001). As emissões negativas de CH₄ medidas nas áreas cultivadas com soja (-6,44 kg CH₄ ha⁻¹ da conformação arroz/arroz/soja e -2,79 kg CH₄ ha⁻¹ da conformação soja/arroz/soja) (Figura 4) refletem a condição de solo drenado/oxidado, salvo após eventos de precipitação elevada, que promovem a saturação temporária dos solos de terras baixas, devido a sua capacidade limitada de drenagem.

Refletindo os efeitos descritos para os fluxos de CH₄, a conformação 2:1, ou seja, em que o arroz sucedeu dois cultivos subsequentes de soja (S-S-A), resultou em menor emissão sazonal de CH₄ (294,8 kg CH₄ ha⁻¹), relativamente ao sistema “pingue-pongue” (conformação 1:1) (385,7 kg CH₄ ha⁻¹) (Figura 4). As emissões totais medidas para ambos as conformações da rotação soja-arroz irrigado foram menores que a média medida para monocultivo de arroz (448 kg CH₄ ha⁻¹) em Gleissolo Háplico (Camargo, 2015).

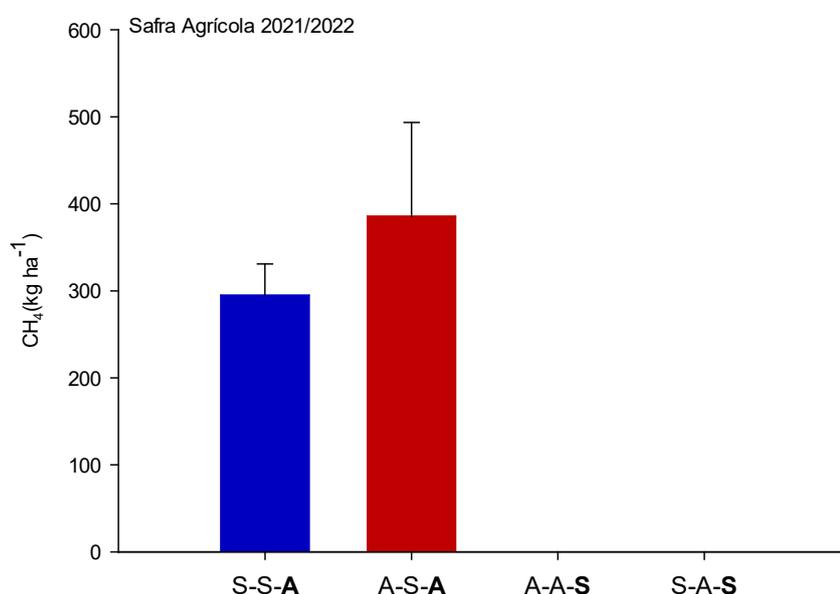


Figura 4. Emissões sazonais de metano (CH₄) associadas ao cultivo de arroz irrigado ou soja, inseridos em conformações de rotação de culturas nas safras agrícolas 2019/2020 a 2021/2022, em experimento realizado no município de Capão do Leão-RS, sendo: S-S-A (soja/soja/arroz); A-S-A (arroz/soja/arroz); A-A-S (arroz/arroz/soja); e S-A-S (soja/arroz/soja). Na identificação dos tratamentos, as letras em negrito referem-se à inicial da espécie cultivada na terceira safra agrícola. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

A produção e emissão de CH₄ do solo dependem, além da condição de anaerobiose do solo, da quantidade de carbono (C) orgânico disponível presente, cuja principal fonte em terras baixas é a palha remanescente de cultivos anteriores e da vegetação espontânea estabelecida nas áreas. 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 CH₄ nesse ambiente (Scivittaro et al., 2015).

Contrariamente ao CH₄, as emissões totais de N₂O associadas aos cultivos de arroz irrigado (1,55 kg N₂O ha⁻¹, conformação S-S-A, e 1,32 kg N₂O ha⁻¹, conformação A-S-A) foram inferiores àquelas determinadas para os cultivos de soja (1,70 kg N₂O ha⁻¹, conformação A-A-S, e 0,60 kg N₂O ha⁻¹, conformação S-A-S) (Figura 5). Os valores baixos de emissão total de N₂O determinados para o arroz irrigado confirmam observações anteriores de que a irrigação por inundação contínua minimiza o potencial de emissão desse GEE (Cai et al., 1997; Linqvist et al., 2012; Zschornack, 2011).

Por outro lado, as maiores emissões sazonais associadas à cultura da soja demonstram que a inserção da oleaginosa em rotação ao arroz irrigado potencializa as emissões de N_2O do solo, dado ao aporte elevado de N via FBN a sistema aeróbio (Yan et al., 2009), favorecendo os processos de nitrificação e desnitrificação, que têm o N_2O como produto intermediário (Liu et al., 2010).

Na Figura 6 é apresentado o potencial de aquecimento global parcial (PAG_p) associado ao cultivo de arroz irrigado e soja em conformações de rotação de culturas 2:1 e 1:1. Acompanhando os resultados das emissões sazonais de CH_4 e N_2O , a cultura de arroz irrigado proporcionou PAG_p consideravelmente superior ao da soja.

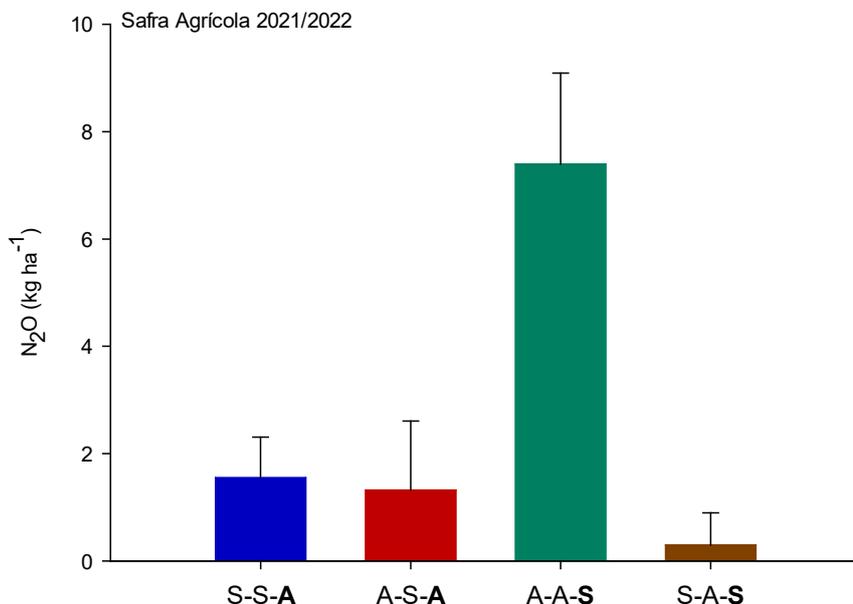


Figura 5. Emissões sazonais de óxido nitroso (N_2O) associadas ao cultivo de arroz irrigado ou soja, inseridos em conformações de rotação de culturas, em experimento realizado no município de Capão do Leão-RS nas safras agrícolas 2019/2020 a 2021/2022, sendo: S-S-A (soja-soja-arroz); A-S-A (arroz-soja-arroz); A-A-S (arroz-arroz-soja); e S-A-S (soja-arroz-soja). Na identificação dos tratamentos, as letras em negrito referem-se à inicial da espécie cultivada na terceira safra agrícola. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

No cultivo de arroz irrigado, o CH_4 respondeu por quase a totalidade das emissões (95,6%, para a conformação S-S-A, e 97,1%, para a conformação A-S-A) (Figura 6). Comumente, a contribuição do CH_4 para o PAG_p de cultivo de arroz irrigado é superior a 90% do total, devido ao elevado potencial de emissão de CH_4 em solo inundado, bem como ao fato de a estabilidade nas condições de oxirredução do solo não ser favorável à emissão de N_2O . Por outro lado, nos cultivos de soja, o óxido nitroso respondeu pela totalidade do PAG_p da cultura, dado que em ambas as conformações de rotação de culturas a oleaginosa não propiciou emissão de CH_4 ; ao contrário, resultou em alguma absorção desse GEE. Apesar de o cultivo de soja ter favorecido as emissões de N_2O do solo, relativamente ao arroz irrigado, o PAG_p da soja foi menor que o do arroz irrigado, em razão de elevado potencial de emissão de CH_4 pelo arroz (Figura 6).

A inserção da soja em rotação ao arroz irrigado promoveu redução significativa no potencial de aquecimento global do sistema de produção em terras baixas. Focando-se na cultura de arroz irrigado, a conformação 2:1, ou seja, onde o arroz é cultivado após duas safras sucessivas de soja, a redução no PAG_p foi 22,4%, relativamente à conformação 1:1 (“pingue-pongue”). Da mesma forma, para a cultura da soja, maior PAG_p esteve associado ao cultivo em sucessão a dois cultivos de arroz, relativamente a um único cultivo do cereal (Figura 6). Quanto a este último resultado, vale destacar que a conformação S-A-S resultou em PAG_p negativo na safra 2021/2022 (Tabela 1), demonstrando o efeito positivo da inserção da cultura da soja em rotação ao arroz irrigado, como forma de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, particularmente CH_4 , em sistemas de produção grãos em terras baixas do Rio Grande do Sul.

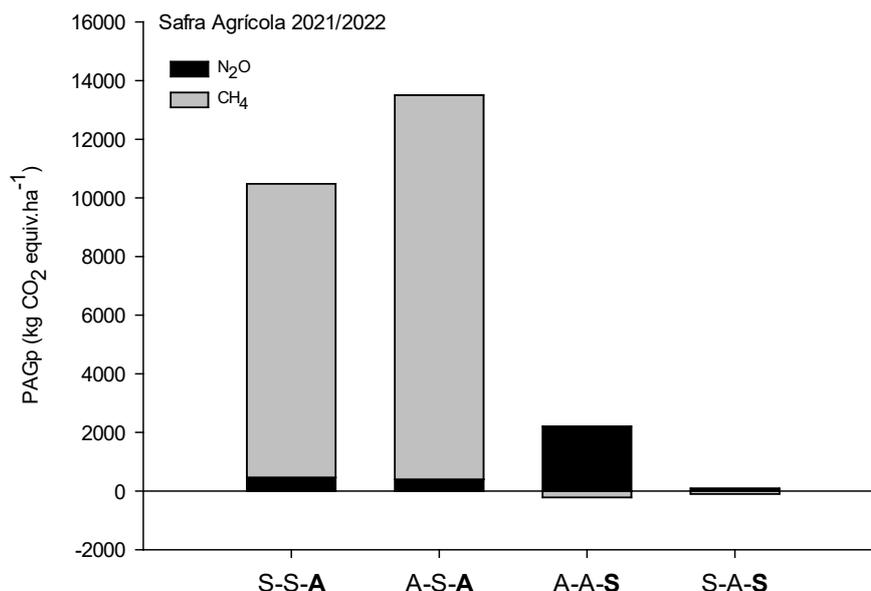


Figura 6. Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) associado aos cultivos de arroz irrigado ou soja, inseridos em conformações de rotação de culturas nas safras agrícolas 2019/202 a 2021/2022, sendo: S-S-A (soja-soja-arroz); A-S-A (arroz-soja-arroz); A-A-S (arroz-arroz-soja) e S-A-S (soja-arroz-soja). Na identificação dos tratamentos, as letras em negrito referem-se à inicial da espécie cultivada na terceira safra agrícola. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2021/2022.

Emissões de CH₄ e N₂O e potencial de aquecimento global parcial (PAGp) globalizado do período 2019/2020 a 2021/2022

Considerando-se a totalização das três safras agrícolas, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 (Tabela 1), que reflete o efeito globalizado em termos de emissões de GEE e potencial de aquecimento global (PAGp) das conformações de rotação de culturas sob avaliação, verifica-se que ambas as conformações envolvendo dois cultivos de arroz irrigado proporcionaram PAGp superior ao daquelas contemplando apenas uma safra do cereal. Esse resultado se deve às elevadas emissões sazonais de CH₄ associadas ao cultivo de arroz irrigado, respondendo por mais de 90% do PAGp da cultura. Assim como reportado para a safra 2021/2022, na totalização das três safras, dois cultivos sucessivos de arroz irrigado promoveram PAGp maior (>6,9%) que quando intercalados com uma safra de soja, em razão das maiores emissões de CH₄ (Tabela 1).

Esses resultados indicam que a rotação do arroz irrigado com soja nas terras baixas do RS constitui-se em eficiente estratégia mitigadora de emissão de gases de efeito estufa e do potencial de aquecimento global em sistemas de produção de grãos em terras baixas; esse efeito é intensificado pelo aumento da frequência de cultivos de soja no sistema de produção.

Tabela 1. Totalização e emissões sazonais de metano (CH₄) e de óxido nitroso (N₂O) e potencial de aquecimento global parcial (PAG_p) das conformações de rotação de culturas soja/soja/arroz (S-S-A); arroz/soja/arroz (A-S-A); arroz/arroz/soja (A-A-S) e soja/arroz/soja (S-A-S) nas safras agrícolas 2019/2020 a 2021/2022. Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS, 2022.

Conformação	Safrá 2019/2020			Safrá 2020/2021			Safrá 2021/2022			Total	
	Rot. Cult.	CH ₄	N ₂ O	PAG _p	CH ₄	N ₂ O	PAG _p	CH ₄	N ₂ O	PAG _p	PAG _p
		----- kg ha ⁻¹ -----		kgCO ₂ eq.	----- kg ha ⁻¹ -----		kgCO ₂ eq.	----- kg ha ⁻¹ -----		kgCO ₂ eq.	kgCO ₂ eq.
S-S-A		-0,3	0,2	59,6	0,1	4,1	1.226,7	294,8	1,6	10.485,9	11.772,3
A-S-A		316,2	2,9	11.611,1	-0,4	10,2	3.035,8	385,7	1,3	13.506,4	28.153,3
A-A-S		288,8	0,1	9.841,8	541,5	-0,1	18.404,3	-6,4	7,4	1.984,8	30.231,0
S-A-S		-0,1	2,7	797,5	282,7	0,1	9.644,8	-2,8	0,3	-6,10	10.436,2

Conclusões

A inserção da soja em rotação ao arroz irrigado reduz as emissões de CH₄ e aumenta as emissões de N₂O, sendo a redução nas emissões de CH₄ mais significativa para a redução do potencial de aquecimento global do sistema de produção que a elevação nas emissões de N₂O. Esse efeito é potencializado pelo cultivo do arroz em sucessão a dois cultivos de soja (soja/soja/arroz), relativamente ao cultivo alternado das duas culturas (arroz/sojaarroz).

As emissões sazonais de CH₄ e o potencial de aquecimento global estão associados à espécie cultivada, arroz irrigado ou soja, mas também à sequência de cultivos. Assim, as emissões de CH₄ e o potencial de aquecimento global da cultura do arroz são reduzidos quando cultivado em sucessão à soja, comparativamente a dois cultivos sucessivos de arroz irrigado.

O metano contribui com quase a totalidade (>95%) do potencial de aquecimento global do arroz irrigado em terras baixas, enquanto que o óxido nitroso é o componente principal do potencial de aquecimento global (>90%) da soja.

A diversificação de culturas em terras baixas, pela inclusão dos cultivos de sequeiro, como a soja, em rotação ao arroz irrigado, reduz o potencial de aquecimento global do sistema de produção em terras baixas, constituindo-se em estratégia mitigadora de emissões de gases de efeito estufa para esse 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 à Embrapa, pelo suporte financeiro para a execução da pesquisa.

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.

BUSS, G. L. **Emissões de metano e óxido nitroso em cultivo de arroz irrigado por aspersão, alagamento contínuo e intermitente**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

CAI, Z.; XING, G.; YAN, X.; XU, H.; TSURUTA, H.; YAGI, K.; MINAMI, 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.

- CAMARGO, E. S. **Potencial de práticas agrícolas em mitigar as emissões de gases de efeito estufa na cultura do arroz irrigado**. 2015. 138 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CHAPUIS-LARDY, E.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J. L.; BERNOUX, M. Soils, a sink for N₂O? A review. **Global Change Biology**, v. 13, p.1-17, 2007.
- 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.
- ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA DE PELOTAS (Capão do Leão). Normais climatológicas - mensal/annual. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; UFPel, 2017. Disponível em: <http://agromet.cpact.embrapa.br/estacao/mensal.html>. Acesso em: 26. out. 2017.
- 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.
- INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ (IRGA). **Área e produção de arroz**. Porto Alegre: IRGA, 2021. 3 p. Disponível em: <https://admin.irga.rs.gov.br/upload/arquivos/202108/03112722-producao-rs-historico.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ (IRGA). **Arroz RS: área x produtividade**. Porto Alegre: IRGA, 2020. 1 p. Disponível em: <https://irga-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/202001/24151001-arroz-rs-area-x-produtividade.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ (IRGA). **Soja em rotação com arroz: produtividades municipais – safra 2021/2022**. Porto Alegre: IRGA, 2022. 2 p. Disponível em: <https://admin.irga.rs.gov.br/upload/arquivos/202207/07094256-soja-produtividades-municipais-safra-2021-22.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (ed.). **Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
- KHOSA, M. K.; SIDHU, B. S.; BENBI, D. K. Methane emission from rice fields in relation to management of irrigation water. **Journal of Environmental Biology**, v. 32, p. 169-172, 2011.
- LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. **European Journal of Soil Biology**, v. 37, p. 25-50, 2001.
- LINQUIST, B. A.; VAN GROENIGEN, K. J.; ADVIENTO-BORBE, M. A.; PITTELKOW, C. M.; VAN KESSEL, C. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops. **Global Change Biology**, v. 18, p. 194-209, 2012.
- LIU, S.; QIN, Y.; ZOU, J.; LIU, Q. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China. **Science of the Total Environment**, v. 408, p. 906-913, 2010.
- 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. p. 175-187, 1989.
- NEUE, H. U. Methane emission from rice fields: wetland rice fields may make a major contribution to global warming. **BioScience**, v. 43, n. 7, p. 466-73, 1993.
- 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.; AKIYAMA, H.; SUDO, S.; FUMOTO, T.; CHENG, W.; YAGI, K. Combined emissions of CH₄ and N₂O from a paddy field was reduced by preceding upland crop cultivation. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 57, p. 167-178, 2011.
- NISHIMURA, S.; SAWAMOTO, T.; AKIYAMA, H.; SUDO, S.; CHENG, W.; YAGI, K. Continuous, automated nitrous oxide measurements from paddy soils converted to upland crops. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1977-1986, 2005.
- 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, GB2017, 2004.
- PINTO, L. F. S.; LAUS NETO, J. A. L.; PAULETTO, E. A. Solos de várzeas do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. S. da; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. de. (ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 75-95.
- REDDY, K. R.; DeLAUNE, R. D. **Biogeochemistry of wetlands: science and applications**. New York: CRC, 2008. 780 p.
- REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 31., 2016, Bento Gonçalves. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2016. 200 p.
- REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 32., Farroupilha. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Cachoeirinha: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2018. 205 p.
- SCIVITTARO, W. B.; SILVEIRA, A. D.; LACERDA, C. L.; FARIAS, M. O.; SOUSA, R. O. **Sazonalidade das Emissões de Gases de Efeito Estufa em Terras Baixas: Efeito do Manejo do Solo e do Cultivo de Verão**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2015. 31 p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 231).
- 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).
- SILVA, P. R. F. da; MARCHESAN, E.; ANGHINONI, I. **Milho no contexto da lavoura arroeira: potencialidades, desafios e avanços**. Porto Alegre: IRGA, 2020. 12 p. (Instituto Rio Grandense do Arroz. Circular técnica, 006).
- 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.

- THEISEN, G. **A comprehensive assessment of agriculture in lowlands of south Brazil**: characterization and comparison of current and alternative concepts. 234 p. PhD thesis. Wageningen University. Wageningen, Netherlands, 2017.
- TOWPRAYOON, S.; SMAKGAHN, K.; POONKAEW S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. **Chemosphere**, v. 59, n. 11, p.1547-1556, 2005.
- 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, p. 23-36, 2000.
- WELLER, S.; KRAUS, D.; AYAG, K. R. P.; WASSMANN, R.; ALBERTO, M. C. R.; BUTTERBACH-BAHL, K.; KIESE, R. Methane and nitrous oxide emissions from rice and maize production in diversified rice cropping systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 101, p. 37-53, 2015.
- 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.
- YAN, X.; AKIYAMA, H.; YAGI, K.; AKIMOTO, H. Global estimations 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.
- 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 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, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Embrapa

Clima Temperado



Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento

