

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Dissertação

**Emissões de Gases de Efeito Estufa de Cultivares de Arroz
sob Irrigação por Inundação Contínua e Intermitente**

Giovana Tavares Silva

Pelotas, 2020

Giovana Tavares Silva

**Emissões de Gases de Efeito Estufa de Cultivares de Arroz
sob Irrigação por Inundação Contínua e Intermitente**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Dra. Walkyria Bueno Scivittaro

Coorientador: Dr. Rogério Oliveira de Sousa

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S586e Silva, Giovana Tavares

Emissões de gases de efeito estufa de cultivares de arroz sob irrigação por inundação contínua e intermitente / Giovana Tavares Silva ; Walkyria Bueno Scivittaro, orientadora ; Rogério Oliveira de Sousa, coorientador. — Pelotas, 2020.

75 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Arroz irrigado. 2. Manejo da água. 3. Mitigação - Metano - Óxido nitroso. I. Scivittaro, Walkyria Bueno, orient. II. Sousa, Rogério Oliveira de, coorient. III. Título.

CDD : 633.18

Giovana Tavares Silva

Emissões de Gases de Efeito Estufa de Cultivares de Arroz
sob Irrigação por Inundação Contínua e Intermitente

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 09 de Setembro de 2020 às 8 horas e 30 minutos

Banca examinadora:

Pesq. Dra. Walkyria Bueno Scivittaro (Orientadora)
Doutora em Ciências pelo Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo (CENA-USP)

Pesq. Dra. Thaís Antolini Veçozzi
Doutora em Ciências pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

Pesq. Dr. Paulo Ricardo Reis Fagundes
Doutor em Fitomelhoramento pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

**Dedico este trabalho a meus pais, minha avó,
meu namorado e meus amigos**

Agradecimentos

Aos meus pais, pela minha existência e ajuda.

À minha avó, Elaine Barbosa Berndt, que durante sua vida colaborou com sua sabedoria e experiência.

Ao meu namorado, pelo intenso apoio, paciência e compreensão.

À minha família, pelo incentivo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, seu corpo docente, direção e administração, que oportunizaram a realização do curso de Mestrado Acadêmico.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Clima Temperado, pelo financiamento da pesquisa e fornecimento de infraestrutura física e pessoal para a realização do trabalho.

A todos meus professores, pela contribuição para meu crescimento intelectual e, também, para a formação de meu caráter e afetividade pela educação ao longo de minha formação profissional.

Aos colegas e amigos que, direta ou indiretamente, fizeram parte de minha caminhada no curso de pós-graduação, em nível de mestrado.

Aos alunos e bolsistas de iniciação científica, que participaram e contribuíram para a execução deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Rogério Oliveira de Sousa, e à minha orientadora, Pesq. Dra. Walkyria Bueno Scivittaro, por acreditarem no meu potencial e tornarem possível este trabalho.

Obrigada.

*“Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu.
É sobre escalar e sentir que o caminho te fortaleceu.”*

(Ana Vilela, 2016)

Resumo

SILVA, Giovana Tavares. **Emissões de gases de efeito estufa de cultivares de arroz sob irrigação por inundação contínua e intermitente.** 2020. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

A produção brasileira de arroz provém, predominantemente, das lavouras irrigadas do Rio Grande do Sul, onde a atividade é considerada como de impacto ambiental negativo, devido ao elevado potencial de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e uso de água. Diversos fatores influenciam as emissões de GEE da lavoura de arroz, como o manejo da água e as cultivares. Este trabalho visou comparar o potencial de emissão de GEE de cultivares de arroz sob irrigação por inundação contínua e intermitente. O estudo foi realizado sob condições de campo, na safra de 2019/2020, na Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão-RS. Avaliaram-se as cultivares de arroz irrigado XP 113 (híbrido - subespécie índica), BRS Pampa CL (subespécie índica) e BRS 358 (subespécie japônica) em dois sistemas de irrigação (inundação contínua e intermitente) e duas populações de planta (150 e 300 plantas m⁻²). As coletas de amostras de ar para avaliação de emissões de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) foram feitas utilizando-se o método da câmara estática fechada, com periodicidade semanal ou superior. Avaliaram-se os fluxos e emissões totais de CH₄ e N₂O do solo, assim como o desempenho produtivo e o rendimento industrial das cultivares de arroz. Calculou-se, também, o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp), a partir das emissões sazonais de CH₄ e N₂O e seus respectivos potenciais de aquecimento global (34 e 298), e o índice PAGp em escala de rendimento de grãos (PAGp/RG). As principais diferenças nos fluxos de CH₄ estiveram associadas ao sistema de irrigação do arroz, sendo que picos maiores de emissão ocorreram no período compreendido entre o emborrachamento e início da floração do arroz. Para o N₂O, não foi observado um padrão temporal característico de emissão em função da variação dos fatores avaliados. As emissões sazonais de CH₄ foram superiores sob irrigação por inundação contínua, relativamente à inundação intermitente, não se verificando efeito do sistema de irrigação sobre as emissões totais de N₂O. O híbrido XP 113 proporcionou menores emissões totais de CH₄ e PAGp que as cultivares convencionais BRS Pampa CL e BRS 358. As emissões de CH₄ e o PAGp aumentaram com a população de plantas. O CH₄ contribuiu com quase a totalidade do PAGp associado à cultura do arroz. As cultivares BRS Pampa CL e XP 113 proporcionaram maior produtividade de grãos que a ‘BRS 358’. O sistema de irrigação por inundação intermitente proporcionou menor índice PAGp/RG, relativamente à inundação contínua, indicando que a intermitência na inundação foi efetiva em mitigar as emissões de GEE e o PAGp da cultura do arroz. O híbrido XP 113 e a ‘BRS Pampa CL’, sob menor população de plantas, foram superiores à ‘BRS 358’ quanto à efetividade de mitigação do PAGp em escala de rendimento de grãos. O manejo da água e o uso de cultivares de arroz com menor potencial de emissão de GEE constituem-se em alternativas promissoras de mitigação do PAGp da lavoura de arroz irrigado.

Palavras-chave: Arroz irrigado. Manejo da água. Cultivar. População de planta. Metano. Óxido nitroso. Mitigação.

Abstract

SILVA, Giovana Tavares. **Greenhouse gas emissions from rice cultivars under continuous and intermittent flood irrigation.** 2020. 76f. Thesis (Master of Science) – Faculty of Agronomy “Eliseu Maciel”, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

Brazilian rice production comes predominantly from irrigated crops in *Rio Grande do Sul*, where the activity is considered to have a negative environmental impact, due to the high potential for greenhouse gas (GHG) emissions and water use. Several factors influence GHG emissions from rice fields, such as water management and cultivars. This work aimed to compare the GHG emission potential of rice cultivars under continuous and intermittent flood irrigation. The study was carried out under field conditions, in the 2019/2020 harvest, at the *Experimental Station Terras Baixas of Embrapa Clima Temperado*, in Capão do Leão-RS. The irrigated rice cultivars XP 113 (hybrid - Indian subspecies), BRS Pampa CL (Indian subspecies) and BRS 358 (Japanese subspecies) were evaluated in two irrigation systems (continuous and intermittent flooding) and two plant populations (150 and 300 plants m⁻²). The collections of air samples for the evaluation of methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions were performed using the closed static chamber method, with weekly or higher frequency. The total flows and emissions of CH₄ and N₂O from the soil were evaluated, as well as the productive performance and industrial yield of rice cultivars. The partial Global Warming Potential (pGWP) was also calculated, based on seasonal CH₄ and N₂O emissions and their respective global warming potentials (34 and 298), and the pGWP index on a grain yield scale (pGWP/GY). The main differences in CH₄ fluxes were associated with the rice irrigation system, with higher emission peaks occurring in the period between booting stage and the beginning of flowering. For N₂O, a characteristic emission temporal pattern was not observed due to the variation of the factors evaluated. Seasonal CH₄ emissions were higher under continuous flood irrigation than intermittent flooding, with no effect of the irrigation system on total N₂O emissions. The hybrid XP 113 provided lower total CH₄ and pGWP emissions than the conventional cultivars BRS Pampa CL and BRS 358. The CH₄ and pGWP emissions increased with the plant population. CH₄ contributed to almost all of the pGWP associated with rice cultivation. The cultivars BRS Pampa CL and XP 113 provided higher grain yield than ‘BRS 358’. The intermittent flood irrigation system provided a lower pGWP/GY index, compared to continuous flooding, indicating that the flooding intermittency was effective in mitigating the GHG emissions and the pGWP of the rice crop. The hybrid XP 113 and ‘BRS Pampa CL’, under a smaller plant population, were superior to ‘BRS 358’ in terms of pGWP mitigation effectiveness in grain yield scale. Water management and the use of rice cultivars with less GHG emission potential are promising alternatives for mitigating pGWP in irrigated rice fields.

Key words: Paddy rice. Water management. Plant population. Methane. Nitrous oxide. Mitigation.

Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama representativo do efeito estufa.	15
Figura 2 - Fluxograma representativo da produção e emissão de metano em lavouras de arroz irrigado.....	16
Figura 3 - Representação do ciclo do nitrogênio.	20
Figura 4 - Vista parcial da área experimental.	26
Figura 5 - Precipitação pluviométrica e temperatura média do ar, registradas durante o período experimental (safra 2019/2020).	30
Figura 6 - Conjunto completo do sistema coletor de GEE do tipo câmara estática fechada.	33
Figura 7 - Fluxos de CH ₄ do solo das cultivares de arroz XP 113 (a), BRS Pampa CL (b) e BRS 358 (c) nas densidades de 150 (D150) e 300 plantas m ⁻² (D300), sob irrigação por inundação contínua e intermitente. Barras verticais representam o desvio padrão da média. N1 e N2 indicam o momento de realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura/início da irrigação e segunda adubação nitrogenada em cobertura, respectivamente.	35
Figura 8 - Fluxos de N ₂ O do solo das cultivares de arroz XP 113 (a), BRS Pampa CL (b) e BRS 358 (c) nas densidades de 150 (D150) e 300 plantas m ⁻² (D300), sob irrigação por inundação contínua e intermitente. Barras verticais representam o desvio padrão da média. N1 e N2 indicam o momento de realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura/início da irrigação e segunda adubação nitrogenada em cobertura, respectivamente.	40
Figura 9 – Emissões totais de CH ₄ das cultivares de arroz XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358 nas densidades de 150 (D150) e 300 plantas m ⁻² (D300), sob irrigação por inundação contínua (a) e intermitente (b). Barras verticais representam o desvio padrão da média.	44
Figura 10 - Emissões totais de N ₂ O das cultivares de arroz XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358 nas densidades de 150 (D150) e 300 plantas m ⁻² (D300), sob irrigação por inundação contínua (a) e intermitente (b). Barras verticais representam o desvio padrão da média.	47
Figura 11 - Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) das cultivares de arroz XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358 nas densidades de 150 (D150) e 300 plantas m ⁻² (D300), sob irrigação por inundação contínua (a) e intermitente (b).	49

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Descrição das características das cultivares utilizada no experimento.....	27
Tabela 2 - Emissões sazonais de CH ₄ e potencial de aquecimento global parcial (PAGp) associadas ao cultivo de arroz sob irrigação por inundação contínua e intermitente. Dados médios de três cultivares e duas populações de planta. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/2020.	43
Tabela 3 – Emissões sazonais de CH ₄ e potencial de aquecimento global parcial (PAGp) das cultivares de arroz irrigado XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358. Dados médios de dois sistemas de irrigação e duas populações de planta. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/2020.	46
Tabela 4 - Emissões sazonais de CH ₄ e potencial de aquecimento global parcial (PAGp) associado ao cultivo de arroz irrigado em função da população de planta. Dados médios de dois sistemas de irrigação e três cultivares de arroz. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/2020.	46
Tabela 5 - Produtividade de grãos de arroz em função do sistema de irrigação. Dados médios de três cultivares e duas populações de planta. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/20.	51
Tabela 6 - Produtividade de grãos (Prod.), esterilidade de espiguetas (Ester.), peso de 1000 grãos (P1000) e percentuais de grãos inteiros (Gr.int.) e quebrados (Gr.queb) das cultivares de arroz XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358. Dados médios de dois sistemas de irrigação e duas populações de planta. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/2020.	51
Tabela 7 - Peso de mil grãos de arroz, em função do sistema de irrigação e da densidade de plantas. Embrapa Clima Temperado. Dados médios de três cultivares de arroz. Capão do Leão, RS Safra 2019/20.	52
Tabela 8 - Potencial de aquecimento global parcial em escala de rendimento de grãos (PAGp/RG), em função do sistema de irrigação, da cultivar de arroz e da população de planta. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/20.	54

Sumário

1. Introdução	11
2. Referencial teórico	13
2.1. Cultivo do arroz	13
2.2. Efeito estufa	14
2.3. Produção e emissões de gases de efeito estufa em solos de terras baixas cultivados com arroz irrigado.....	15
2.4. Fatores interferentes nas emissões de GEE de solos cultivados com arroz irrigado	20
2.4.1. Manejo da irrigação	20
2.4.2. Cultivares de arroz irrigado	22
3. Hipóteses	24
4. Objetivos	25
4.1. Objetivo geral	25
4.2. Objetivos específicos	25
5. Material e Métodos	26
5.1. Caracterização da área	26
5.2. Tratamentos, delineamento experimental	26
5.3. Implantação, condução e avaliação da cultura do arroz	28
5.4. Coleta de amostras e avaliação das emissões de GEE	31
5.5. Análise estatística	33
6. Resultados e discussão	34
6.1. Fluxos de CH ₄ e N ₂ O do solo	34
6.3. Desempenho produtivo e rendimento industrial do arroz	49
6.4. Potencial de aquecimento global parcial em escala de rendimento de grãos (PAGp/RG).....	53
7. Conclusões	55
Referências	56
Anexos	67

1. Introdução

Nos últimos anos, modificações ambientais estão ocorrendo devido, principalmente, à ação antropogênica. Uma delas é a alteração nas condições climáticas, podendo ser ocasionada pelo aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE). Existem inúmeras fontes de emissões de GEE, como a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e, também, a atividade agrícola.

Dentre as atividades agrícolas, a orizicultura é uma atividade geradora de GEE, principalmente, o gás metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Esses gases apresentam, respectivamente, potencial de aquecimento global 34 e 298 vezes superior ao do gás carbônico (CO_2) (IPCC, 2013; SIMMONDS et al., 2015).

Grande parte da produção de arroz brasileira é oriunda da região Sul, mais especificamente do estado do Rio Grande do Sul (RS). Em 2018, segundo o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), o RS gerou mais de 10 Tg de CH_4 . Essa alta emissão de CH_4 em solos cultivados com arroz é devida ao sistema de cultivo. O cultivo de arroz no RS ocorre principalmente em sistema irrigado por inundação do solo, o qual propicia condições de solo reduzido, influenciando os processos de oxirredução e favorecendo a produção e efluxo de CH_4 para a atmosfera.

Sob inundação, o oxigênio (O_2) presente no solo é consumido, promovendo um ambiente anaeróbio. Nestas condições, há a predominância de microrganismos anaeróbios facultativos e obrigatórios, que, após o esgotamento dos compostos inorgânicos, passam a utilizar compostos orgânicos como aceptores de elétrons. Esse processo é denominado fermentação, sendo responsável pela formação de etanol, acetato, gás hidrogênio (H_2), gás nitrogênio (N_2), CO_2 e CH_4 (MOSCOSO, 2018). A formação do N_2O ocorre naturalmente no solo, principalmente, através da desnitrificação do nitrato (NO_3^-), gerado a partir da oxidação do íon amônio (NH_4^+) (SMITH et al., 2003).

O elevado potencial de emissões de GEE do cultivo de arroz irrigado, pode ser minimizado pela adoção de diversas estratégias de mitigação, fundamentadas em adequações no manejo da cultura, como a substituição do sistema de irrigação/manejo da água para a cultura, e o uso de cultivares de alto produtivo e com menor potencial de emissão de GEE (CHIDTHAISONG et al., 2018; ISLAM et al., 2018a; MOTERLE, 2011).

O sistema de irrigação por inundação intermitente consiste em método alternativo à inundação contínua, onde o solo é mantido oxidado por um ou mais períodos durante o ciclo de cultivo do arroz, diminuindo, assim, a produção e a emissão de CH₄ do solo. Entretanto, esse sistema pode promover um aumento na emissão de N₂O (CARRIJO; LUNDY; LINQUIST, 2017; MOTERLE, 2011).

A variabilidade genética, natural ou promovida através do melhoramento vegetal, é outro fator importante na produção agrícola, representando, ainda, opção promissora para mitigar as emissões de GEE da lavoura de arroz. As cultivares de arroz apresentam características morfológicas e fisiológicas específicas que podem influenciar o potencial de emissões de GEE, principalmente de CH₄ (SIMMONDS et al., 2015). Tais características têm efeito sobre o transporte do GEE produzidos no solo para a atmosfera e, portanto, em seu potencial de emissão. Também estão associadas à liberação de exsudatos radiculares, que atuam como fonte de carbono (C) para o processo de metanogênese no cultivo de arroz irrigado por inundação do solo (MOSCÔSO, 2018).

O aumento da produção de arroz para atender a demanda crescente de alimentos da população mundial deve ocorrer de forma associada ao desenvolvimento de tecnologias e práticas que mitiguem as emissões de GEE da lavoura, conferindo maior sustentabilidade à lavoura (HUSSAIN et al., 2015).

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o potencial de emissão de gases de efeito estufa de cultivares de arroz irrigado produzidas sob irrigação por inundação contínua e intermitente.

2. Referencial teórico

2.1. Cultivo do arroz

O arroz é o segundo cereal mais produzido no mundo, suprimindo 20% das calorias consumidas na alimentação humana. Desempenha, portanto, papel estratégico na solução de questões de segurança alimentar (REUNIÃO..., 2018; USDA, 2018). Mundialmente, o arroz é a segunda *commodity* mais importante, com uma produção de mais de 700 milhões de toneladas de grãos em casca, o que corresponde a 29% do total de grãos utilizados na alimentação humana. O cereal ocupa uma área de aproximadamente 161 milhões de hectares, predominantemente no sistema irrigado por inundação do solo, que corresponde a 57% da área total (DA SILVA et al., 2011; REUNIÃO..., 2018).

O Brasil é maior produtor de arroz fora do continente asiático, ocupando a nona posição no panorama mundial, com uma produção estimada, para a safra 2019/2020, de mais de 11 milhões de toneladas. No país, a cultura é produzida nos sistemas irrigado e sequeiro, sendo que o primeiro responde por cerca de 92% da produção brasileira. Os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Tocantins são considerados os principais produtores de arroz do Brasil (CONAB, 2015; 2020).

No sul do Brasil, predomina o cultivo de arroz irrigado, o qual, conforme a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), responde por cerca de 70% da produção brasileira (COLTRO et al., 2017; CONAB, 2020). O Estado do Rio Grande do Sul é o principal produtor nacional de arroz. A produção na safra de 2019/2020 foi de 7.866,9 mil de toneladas do grão, sendo 6,5% superior à safra anterior. Nessa safra, a produtividade da cultura foi 12,7% superior à anterior, correspondendo a 8.316 kg ha⁻¹ (CONAB, 2020).

A irrigação por inundação proporciona ao solo condições anaeróbicas, que são favoráveis à produção do arroz; tais condições aumentam a disponibilidade de nutrientes e o pH de solos ácidos. Porém, esse sistema favorece a produção de CH₄.

2.2. Efeito estufa

O efeito estufa é um fenômeno natural, que está associado à distribuição da energia solar, na forma de radiação ultravioleta, visível e infravermelho (BRAGA, 2005). Entretanto, parte da energia que incide sob o planeta é absorvida pela superfície terrestre e pelos oceanos e parte é refletida para o espaço por corpos refletantes. A energia que é refletida para o espaço pode ser absorvida por gases de efeito estufa (GEE), fazendo com que esta seja reemitida para a superfície terrestre (Figura 1).

Os GEE garantem que a temperatura média da Terra se mantenha ao redor dos 15°C, propiciando condições climáticas favoráveis à vida dos seres humanos. A hipotética ausência destes gases promoveria temperaturas médias planetárias de -19°C, limitando a existência de vida no Planeta (ZSCHORNACK, 2011; MALYAN et al., 2016).

Os principais GEE são o vapor d'água, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio (O₃) e os clorofluorcarbonos (CFC). Entre esses, o CO₂ é o gás com maior contribuição para o efeito estufa, devido à emissão em quantidade elevada, cerca de 55% do total (CARVALHO et al., 2010).

As concentrações de N₂O, CO₂ e CH₄ na atmosfera têm aumentado pela ação antrópica, como, por exemplo, pela agricultura (ZANATTA, 2009; KHAPRE et al., 2019). Esses GEE são considerados os mais relevantes, devido à capacidade de reter a radiação solar e pelo tempo de permanência na atmosfera (IPCC, 2013). Estudos sobre as emissões de GEE para a atmosfera têm sido alvo de interesse da pesquisa, pois esses estão intensificando o efeito estufa natural. Segundo o IPCC (2007), é muito provável que o aumento observado na temperatura média global se deva ao aumento das concentrações de GEE gerados pela atividade antropogênica. Entretanto, ainda não se sabe ao certo a magnitude do impacto do aumento da concentração dos GEE na atmosfera, dado que muitos dos fenômenos atribuídos a esse aumento podem ser explicados por oscilações naturais na órbita terrestre que influenciam a quantidade de radiação solar que atinge o planeta. De qualquer forma, existem fortes evidências de que as atividades antropogênicas contribuem para o aumento acelerado das concentrações dos GEE na atmosfera (PORTELA; LEITE, 2016).

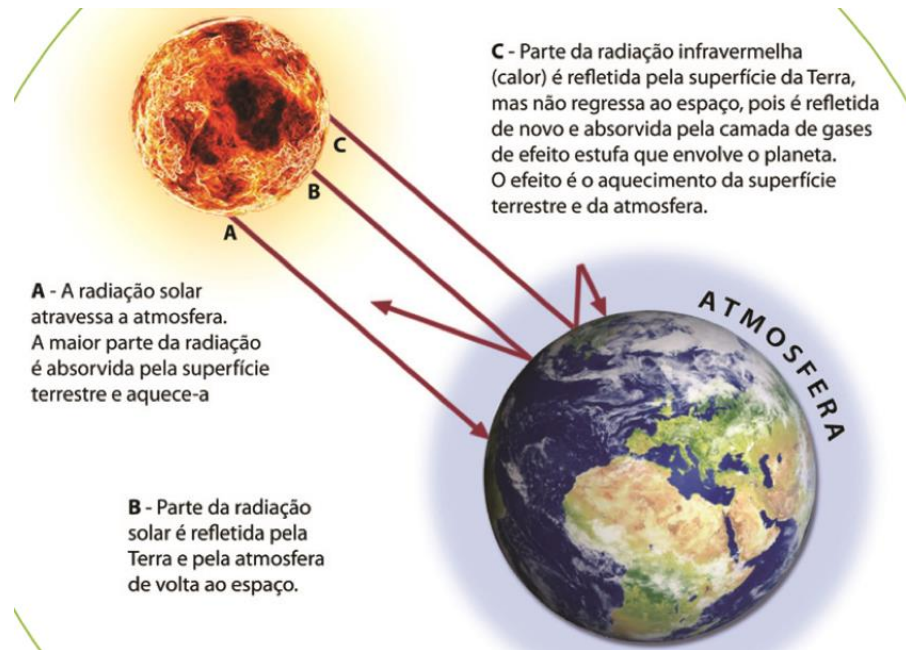


Figura 1 - Diagrama representativo do efeito estufa.
Fonte: MAPA, 2012.

2.3. Produção e emissões de gases de efeito estufa em solos de terras baixas cultivados com arroz irrigado

O cultivo de arroz está aumentando gradualmente em todo mundo e a expectativa é de que continue em expansão, acompanhando o incremento na população mundial. No entanto, o cultivo de arroz em sistema irrigado por inundação do solo contribui significativamente para as emissões de GEE, particularmente o CH_4 (Figura 2), mas também o N_2O (ZHANG et al., 2014; CARLSON et al., 2017; YUAN; DAI; WANG, 2019).

A produção de gases de efeito estufa do cultivo de arroz irrigado provém do metabolismo de microrganismos. A produção e emissão de CH_4 está associada ao alagamento do solo, que promove a diminuição da concentração de oxigênio no solo. Em ambientes anaeróbios, há o favorecimento do desenvolvimento de microrganismos anaeróbios facultativos e obrigatórios (LE MER; ROGER, 2001; TANG et al., 2018; ZSCHORNACK, 2011). Os microrganismos obtêm energia através da oxidação do carbono dos compostos orgânicos, por meio de reações redox, ou seja, de oxidação e redução. Os microrganismos anaeróbios utilizam compostos inorgânicos oxidados do solo, como o NO_3^- , Mn^{+4} , Fe^{+3} , SO_4^{2-} e CO_2 , como eletroceptores, que são reduzidos a N_2 , Mn^{+2} , Fe^{+2} , H_2S e CH_4 , respectivamente (KÖGEL-KNABNER et al., 2010). Com a diminuição da

disponibilidade dos aceptores inorgânicos, os microrganismos anaeróbios passam a utilizar aceptores de origem orgânica, caracterizando um processo conhecido como fermentação, que tem como produtos etanol, acetato, H_2 , N_2 , CO_2 e CH_4 (SILVA et al., 2008).

Ademais, o alagamento promove alterações em atributos físicos, químicos e biológicos do solo, exercendo grande influência sobre a dinâmica do C e do N. Assim, alterações no conteúdo de umidade do solo podem ser utilizadas como ferramentas eficazes para mitigar as emissões de GEE em solos cultivados com arroz irrigado (TANG et al., 2018; ZSCHORNACK, 2011).

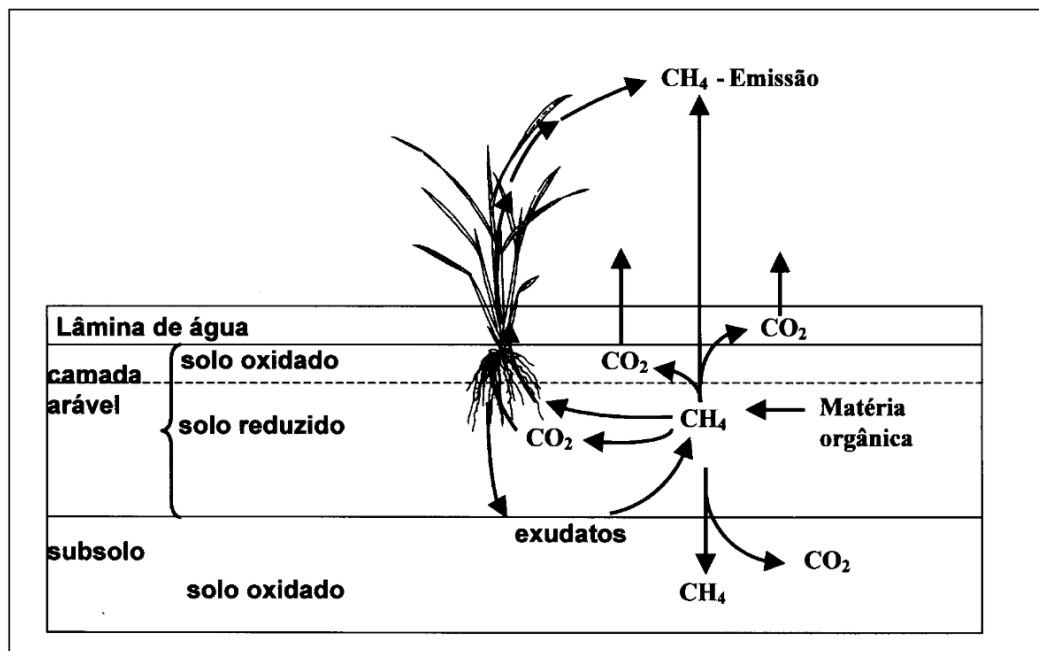


Figura 2 - Fluxograma representativo da produção e emissão de metano em lavouras de arroz irrigado.

Fonte: AGOSTINETTO et al, 2002.

O potencial de redução de ambientes alagados apresenta estratificação vertical, de forma que as condições de redução aumentam com a profundidade. A criação desse gradiente é resultado do balanço entre o influxo de O_2 da atmosfera pela água e o consumo de O_2 pela microflora do solo. Assim, a condição de solo oxidado ocorre nos primeiros milímetros superficiais da lâmina de água do solo e a concentração de O_2 diminui com a profundidade do solo. Por essa razão, a ocorrência de condições adequadas à metanogênese aumenta com a profundidade do solo, onde a produção de CH_4 é maior (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009).

O CH₄ é um gás incolor, inodoro, mais leve que o ar e pouco tóxico, porém é um dos GEE mais importantes da atmosfera por possuir a segunda maior força radiativa, devido ao seu alto potencial de aquecimento global, cerca de 34 vezes maior que o do CO₂ em uma escala de tempo de 100 anos (GE et al., 2018). A produção biológica de CH₄ ocorre principalmente em áreas úmidas terrestres anóxicas (LAAKSO; SCHRAG, 2019; SAMPAIO; NÄÄS; SALGADO, 2006).

A quantidade de CH₄ emitida em solos cultivados com arroz irrigado por inundação do solo resulta do balanço de dois processos: a produção de metano por bactérias metanogênicas e a oxidação desse GEE no solo, mediada por bactérias metanotróficas nas zonas oxidadas (interface água-solo e na rizosfera da cultura do arroz) (AULAKH; WASSMANN; RENNENBERG, 2001).

Segundo Dubey (2005), o CH₄ é produzido por um grupo de bactérias, pertencentes aos gêneros *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanococcus* e *Methanosarcina*. Especificamente em cultivos de arroz irrigado, o CH₄ é produzido pelos gêneros *Methanobacterium* e *Methanosarcina*, que compreendem bactérias estritamente anaeróbias, que necessitam de um potencial redox (Eh) de aproximadamente -200 mV para reduzir o carbono e produzir CH₄. O potencial redox é uma medida quantitativa da tendência de um determinado sistema ser oxidado ou reduzido. Se o Eh for positivo, o sistema é altamente oxidado e quando o Eh é negativo, significa que o sistema é fortemente reduzido. Os solos cultivados com arroz irrigado são reduzidos em praticamente sua totalidade.

Nem todo o CH₄ produzido tem como destino final a atmosfera, pois os microrganismos metanotróficos oxidam o CH₄ em condições de solo oxidado. Nos solos cultivados com arroz irrigado existem duas zonas oxidadas, a camada superficial, onde a atividade microbiana realiza processos típicos de zonas aeróbias, e a rizosfera, que é oxidada pelo aerênquima das plantas de arroz. O aerênquima são canais dentro dos colmos e raízes que permitem trocas gasosas, promovendo a emissão de gases por difusão direta para a atmosfera. Parte do CH₄ produzido é oxidado nessas regiões, evitando emissões (SMITH et al., 2003; SOUSA et al., 2009). Estes canais das plantas de arroz constituem-se na principal via de liberação do CH₄ produzido em cultivos de arroz irrigado, podendo, ainda, ser transportado para a atmosfera pelos mecanismos de ebulição e difusão (LIMA et al., 2008). No entanto, cerca de 90% do CH₄ produzido em solos cultivados com arroz irrigado,

podem ser oxidado nas zonas oxidadas, chegando à atmosfera na forma de CO₂ (NEUE, 1997; YUN et al., 2012).

A produção de CH₄ ocorre pela associação de dois fatores, substrato disponível e condição favorável para as bactérias metanogênicas, que ocorrem no cultivo do arroz irrigado por inundação do solo. A quantidade de matéria orgânica facilmente biodegradável (substrato) e a magnitude do sistema redox após a redução do Fe⁺³ e do SO₄⁻² são os fatores que dão início ao processo de produção de CH₄ em solos inundados (MOTERLE, 2011; MOSCÔSO, 2018).

Além do CO₂ e do CH₄, o N₂O também é um GEE, sendo o terceiro gás mais importante, apesar de sua emissão ser numericamente menor que a dos demais GEE de interesse agrícola. Porém, o N₂O gás apresenta um potencial de absorção de radiação de 298 vezes maior que o CO₂ em um tempo de residência de 100 anos na atmosfera (IPCC, 2013). O N₂O contribui para a elevação da temperatura da atmosfera, devido a sua capacidade de absorver radiação de ondas de comprimentos longos, como a radiação infravermelha (SOUZA; ENRICH-PRAST, 2012). Outra característica relevante do N₂O é que ele é estável na troposfera, mas instável na estratosfera, causando a liberação de ativos químicos, como o óxido nítrico (NO), que reage com o ozônio da camada de ozônio, causando sua destruição catalítica (BORTOLI et al., 2012).

As emissões de N₂O estão associadas, principalmente, à utilização de adubos nitrogenados, contribuindo com a intensificação dos processos de nitrificação e desnitrificação, que geram o óxido nitroso como produto intermediário (O'MARA, 2012; REDDY; DELAUNE, 2008). No cultivo de arroz irrigado por inundação contínua, as emissões de N₂O são pouco representativas devido à estabilidade de condição de ausência de oxigênio. Por outro lado, a intermitência da irrigação ou a drenagem da lavoura promovem alternância nas condições de oxirredução do solo, favorecendo os processos produtores de N₂O (LIU et al., 2010). O uso de fertilizante mineral e a adubação orgânica promovem maior disponibilidade de N na forma mineral no solo (NH₄⁺ + NO₃⁻), que, em condições propícias de umidade, acentuam os processos microbiológicos responsáveis pela produção de N₂O (COSTA et al., 2009).

Os processos de mineralização, nitrificação e desnitrificação estão associados à emissão de N₂O do solo (Figura 3). A mineralização consiste na transformação do N na forma orgânica para inorgânica (NH₄⁺), sendo realizada por microrganismos

heterotróficos do solo, que utilizam os compostos da matéria orgânica do solo (MOS) como fonte de energia, resultando, geralmente, em aumento do pH do meio devido ao consumo de prótons (ROBERTSON; GROFFMAN, 2015). O processo de nitrificação consiste na oxidação biológica de formas reduzidas do nitrogênio. Neste processo, bactérias quimioautotróficas oxidam o NH_4^+ presente no solo, produzindo NO_3^- (SNYDER et al., 2009). A desnitrificação ocorre em condições de anaerobiose, sendo no processo de redução de NO_3^- a N_2 geram-se como produtos intermediários, o N_2O e NO , que são perdidos para atmosfera. Portanto, o N_2O é gerado quando a conversão de NH_4^+ à N_2 não é completa, gerando esse GEE, que escapa para atmosfera (VAHL; SOUZA, 2004; SOUSA NETO, 2008; SNYDER et al., 2009; ZANATTA, 2009). Esses processos estão intimamente relacionados, visto que a desnitrificação requer NO_3^- e nitrito (NO_2^-), produzidos por nitrificação, e a nitrificação necessita do NH_4^+ , que é produto da mineralização da MOS.

Em condições aeróbicas, o processo de nitrificação é favorecido, visto que sua reação requer O_2 como acceptor final de elétrons. Já em condições anaeróbicas, a desnitrificação prevalece, devido ao fato de as bactérias que realizam o processo serem anaeróbias facultativas, capazes de utilizar NO_3^- como acceptor de elétrons para a respiração, sob níveis baixos ou na ausência de O_2 (BATEMAN; BAGGS, 2005).

A emissão de N_2O é estimulada pela alternância dos processos de e umedecimento do solo proporcionados pela irrigação (XIONG; XING; ZHU, 2007). Portanto, os fluxos de N_2O no cultivo de arroz irrigado são estimulados, principalmente, pela aplicação de fertilizantes orgânicos e minerais e pela irrigação por inundação do solo.

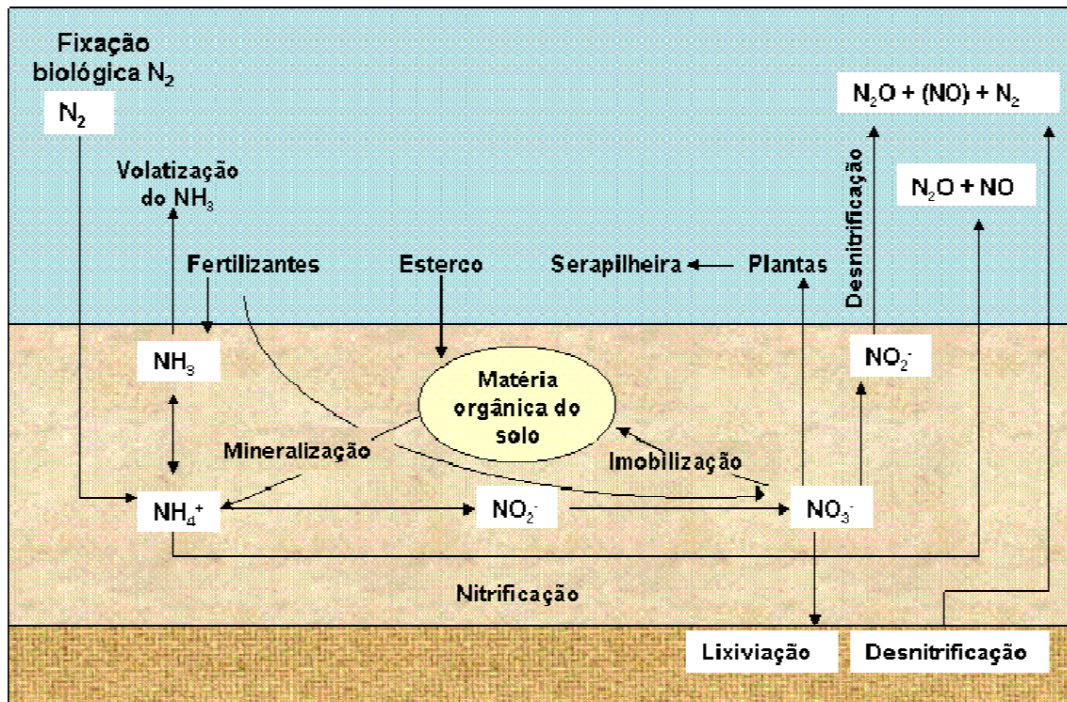


Figura 3 - Representação do ciclo do nitrogênio.
Fonte: NETO, 2008.

2.4. Fatores interferentes nas emissões de GEE de solos cultivados com arroz irrigado

Diversos fatores influenciam as emissões de GEE em sistemas agrícolas. Em solos cultivados com arroz irrigado, a magnitude das emissões de CH₄ e N₂O varia consideravelmente com o sistema de irrigação e as práticas de manejo da água, como por exemplo o sistema de irrigação por inundação intermitente, assim como entre cultivares de arroz, dado que existem genótipos com menor potencial de emissão de GEE, em especial o CH₄. O manejo da adubação e práticas de manejo do solo também interferem, entre outros, no potencial de emissão de GEE da lavoura de arroz.

2.4.1. Manejo da irrigação

No Rio Grande do Sul, o arroz irrigado é cultivado, predominantemente, no sistema de irrigação por inundação contínua. Esse sistema de irrigação traz vários benefícios para a cultura, que asseguram altas produtividades, tais como a facilidade no manejo da água (STONE, 2005), o controle físico de plantas daninhas (CORREA

et al., 1997), efeito termoregulador (REUNIÃO..., 2018) e aumento do pH e da disponibilidade de nutrientes no solo (PONNAMPERUMA, 1972). Nesse sistema, a água permanece sobre a superfície do solo, durante grande parte do ciclo da cultura, proporcionando ao solo condições anaeróbias, favorecendo o desenvolvimento de microrganismos que não necessitam de O_2 para desenvolverem suas atividades e condições favoráveis à metanogênese, devido ao elevado conteúdo de carbono e à baixa taxa de decomposição da fitomassa, proporcionando, assim, condições ideais para a produção de GEE, como o CH_4 (AGOSTINETTO et al., 2002; REDDY, 2015). Condições prolongadas de alagamento do solo podem restringir as emissões de N_2O , dado que esse GEE pode ser biologicamente reduzido a N_2 , minimizando sua emissão (REDDY, K. R.; DELAUNE, 2008; TOWPRAYOON; SMAKGAHN; POONKAEW, 2005).

Uma alternativa para mitigar as emissões de CH_4 no cultivo de arroz irrigado é a implementação do sistema de irrigação por inundação intermitente, na qual são alternados ciclos de solo inundado e drenado (ausência da lâmina de água) (LAHUE et al., 2016). Além de diminuir os efluxos de CH_4 , a irrigação por inundação intermitente proporciona o uso mais eficiente da água, diminuindo as perdas por escoamento superficial e a percolação; melhora, também, o aproveitamento da água da chuva e, eventualmente, controla a toxidez por ferro (Fe) (MOTERLE, 2011; STONE, 2005; TYAGI; KUMARI; SINGH, 2010). Zhang et al (2012) verificaram que o potencial de produção de CH_4 de solo sob irrigação por inundação intermitente aumenta mais lentamente, apresentando menor pico de emissão, em relação à inundação contínua. Segundo esses autores, a irrigação intermitente reduz o potencial de produção de CH_4 em 45% em comparação com à inundação contínua.

Em contrapartida, a irrigação por inundação intermitente pode aumentar as emissões de N_2O (LAGOMARSINO et al., 2016), pois favorece a alternância dos processos de nitrificação do NH_4^+ a NO_3^- , quando o solo se encontra oxidado, e de desnitrificação do NO_3^- a NH_4^+ , quando da inundação do solo, que têm o N_2O como produto intermediário (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009; LIU et al., 2010).

O emprego de práticas de manejo do arroz, como drenagens, em períodos como o final do estágio de afillamento e o início da diferenciação da panícula e após o completo enchimento dos grãos podem contribuir para a redução das emissões de CH_4 , sem prejudicar o desempenho produtivo da cultura (FENG et al., 2013; LU et al., 2000) e, também, para a redução no uso da água (NELSON et al., 2015).

2.4.2. Cultivares de arroz irrigado

A crescente demanda por arroz levou à seleção de variedades de arroz com alta produtividade, eficientes na utilização de nitrogênio do solo e resistente a pragas e doenças (LE MER; ROGER, 2001; LIAO et al., 2019).

A produção de arroz é uma das principais atividades agropecuárias geradores de GEE, principalmente o gás CH₄, respondendo por cerca de 11% das emissões totais de CH₄ (IPCC, 2013). Entre os principais cereais, o arroz tem o maior potencial de aquecimento global, devido às altas emissões de CH₄ (LINQUIST et al., 2012).

Entre as estratégias mitigadoras de emissão de GEE da lavoura de arroz, a seleção de cultivares de arroz tem sido considerada bastante promissora, podendo desempenhar um papel importante na regulação das emissões de CH₄.

As cultivares de arroz apresentam características morfológicas distintas, que podem influenciar na produção e liberação de GEE para a atmosfera. É por meio dos exsudatos radiculares, da decomposição de raízes, da ciclagem de material vegetal e da capacidade de transporte de gases que as plantas de arroz fornecem carbono ao solo, o qual é substrato para a produção de CH₄ (LIMA et al., 2013; MITRA et al., 1999; MOSCOSO, 2018).

Informações sobre a emissão diferencial de N₂O de cultivares de arroz são bastante restritas; em contrapartida, com relação ao CH₄, resultados de pesquisa indicam que emissões diferenciais de cultivares de arroz, associando-as à variação na estrutura da planta, tamanho, número de perfilhos, metabolismo, potencial de transporte de gás CH₄ e exsudação radicular, entre outros fatores (AULAKH; WASSMANN; RENNENBERG, 2001; ISLAM et al., 2018a). Menores emissões geralmente ocorrem em plantas de porte baixo, de ciclo curto e com alta produtividade de grãos (GROHS et al., 2020). Cultivares híbridas, de forma geral, apresentam maior biomassa, quando comparadas às convencionais e, por essa razão, aportam ao meio de cultivo maior quantidade de carbono lábil, que é o substrato para a produção de metano; porém, por outro lado, apresentam maior volume de parte aérea e superfície radicular, podendo transportar maior quantidade de O₂ ao solo, favorecendo a atividade de metanotróficos, promovendo a oxidação do CH₄ (BHATTACHARYYA et al., 2019; MA; QIU; LU, 2010; MA et al., 2012).

O carbono utilizado por microrganismos metanogênicos para a produção de CH₄ provém, em grande parte, do carbono assimilado via fotossíntese. Assim, a alta

taxa fotossintética da cultura no estágio de florescimento aumenta a liberação de carbono das plantas via exsudatos radiculares, aumentando a produção de CH₄ no solo nessa fase do ciclo da cultura (ZHANG et al., 2011). Os microrganismos presentes em áreas alagadas, onde ocorre ambiente anóxico, principalmente bactérias metanogênicas, usam carbono dos exsudatos radiculares como receptores finais de elétrons, resultando na formação de CH₄. Com a liberação de carbono via exsudatos radiculares em quantidade variável, as cultivares de arroz apresentam potencial distinto de emissão de CH₄ (LE MER; ROGER, 2001; LIMA et al., 2013)

Aulakh et al. (2000) observaram maior taxa de emissão de CH₄ na fase reprodutiva, pois é o período em que desenvolvimento dos aerênquimas está completo, e, também, onde ocorre maior exsudação radicular, que servem como substrato para as bactérias metanogênicas. Diversos trabalhos mostram que cultivares híbridas apresentam potencial de mitigar as emissões de CH₄. A redução nas emissões de CH₄ do arroz híbrido está provavelmente relacionada às diferenças na oxidação do CH₄ na zona da raiz em comparação com as cultivares convencionais (LIAO et al., 2019; ROGERS et al., 2014).

Dessa forma, o melhoramento vegetal inicialmente promoveu aumentos nos componentes de rendimento da cultura do arroz; porém são as características morfológicas e fisiológicas distintas das cultivares de arroz que influenciam a produção de CH₄ no solo e o seu transporte até a atmosfera (WASSMANN et al., 1998). A identificação de tais características é importante a fim de verificar os atributos que melhor se correlacionam com o efluxo de CH₄ e de N₂O do solo, podendo ser utilizadas como estratégias para a mitigação do efluxo desses gases do cultivo de arroz.

3. Hipóteses

As cultivares de arroz desenvolvidas para o sistema irrigado por inundação contínua apresentam adaptação distinta à intermitência da inundação, assim como potencial de emissão de gases de efeito estufa variável.

A população de plantas influencia os fluxos e as emissões totais de gases de efeito estufa de cultivares de arroz, independentemente do método de irrigação, inundação contínua ou intermitente.

Cultivares híbridas de arroz apresentam menor potencial de emissão de gases de efeito estufa em comparação às cultivares convencionais.

4. Objetivos

4.1. Objetivo geral

Comparar o potencial de emissão dos gases de efeito estufa de cultivares de arroz produzidas em sistema irrigado por inundação contínua e intermitente.

4.2. Objetivos específicos

Determinar os fluxos, emissões totais e o potencial de aquecimento global parcial de cultivares de arroz sob irrigação por inundação contínua e intermitente.

Comparar o potencial de emissão de gases de efeito estufa de cultivares de arroz convencionais e híbrida sob irrigação por inundação contínua e intermitente.

Estabelecer a influência da população de plantas sobre as emissões de gases de efeito estufa de cultivares de arroz em sistema irrigado por inundação contínua e intermitente.

5. Material e Métodos

5.1. Caracterização da área

O experimento foi realizado na safra agrícola 2019/2020, sob condições de campo, na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, localizada no município do Capão do Leão, RS (Figura 4). O solo da área experimental é classificado como Planossolo Háptico (STRECK et al., 2018).



Figura 4 - Vista parcial da área experimental.

5.2. Tratamentos, delineamento experimental

Os tratamentos incluíram as combinações de dois sistemas de irrigação (inundação contínua e inundação intermitente), três cultivares de arroz irrigado (híbrido XP 113 (tipo índica) e as cultivares convencionais BRS Pampa CL (tipo índica) e BRS 358 (tipo japônica)) (Tabela 1) e duas populações de plantas (150 plantas m^{-2} e 300 plantas m^{-2}), sendo dispostos em delineamento de blocos ao acaso em parcelas subdivididas com cinco repetições. Nas parcelas principais,

foram alocados os níveis do fator sistema de irrigação, nas parcelas secundárias, os níveis do fator cultivar de arroz, e nas terciárias, os níveis do fator população de planta. A variação na população de plantas visou verificar a possível interferência desse fator sobre o potencial de emissões de GEE das cultivares de arroz, dado que, normalmente, os híbridos são semeados em densidade correspondente a aproximadamente 50% daquela utilizada para cultivares convencionais de arroz, dado que apresentam sistema radicular mais robusto e maior capacidade de perfilhamento que as cultivares convencionais.

Tabela 1 - Descrição das características das cultivares utilizada no experimento.

Cultivar	Grupo	Ciclo biológico (dia)	Perfilhamento	Floração plena (dia)
BRS Pampa CL	Índica	118 precoce	Alto	87
BRS 358	Japônica	125 médio	Alto	81
XP 113	Índica	120 precoce	Alto	ND

ND – não disponível

No sistema de irrigação por inundação contínua (controle), as parcelas experimentais foram inundadas no estágio de quatro folhas (V4), imediatamente após a primeira adubação nitrogenada em cobertura para o arroz, com manutenção de lâmina de água contínua de cerca de 7 cm até o estágio de maturação de colheita (estádio R9), quando a irrigação foi suprimida. A segunda cobertura com nitrogênio foi realizada por ocasião da iniciação da panícula (estádio R0), sobre uma lâmina de água não circulante.

Por sua vez, o sistema de irrigação por inundação intermitente compreendeu o estabelecimento de fases aeradas (solo drenado), nas fases vegetativa (entre os estádios V4+10 dias e a iniciação da panícula (R0)) e reprodutiva (entre os estádios R1+5 dias e R7). Neste manejo, o início da irrigação também ocorreu em V4, imediatamente após a primeira adubação nitrogenada em cobertura para o arroz, com manutenção de lâmina de água de cerca de 7 cm por dez dias (V4+10 dias), quando se iniciou o primeiro ciclo de intermitência da irrigação na fase vegetativa. Os ciclos de intermitência na irrigação, limitados à tensão de água no solo de 20 kPa, foram procedidos repetidamente a partir de V4+10 dias até a maturação de

colheita, exceção feita no início da fase reprodutiva, quando foi realizada a segunda adubação nitrogenada em cobertura para o arroz, mantendo-se lâmina de água de cerca de 7 cm por cinco dias, a partir da aplicação do fertilizante.

Para garantir a avaliação da tolerância das cultivares de arroz ao estresse hídrico proporcionado pela intermitência da irrigação e seu efeito sobre o potencial de emissão de gases de efeito estufa, em cada ciclo de intermitência da irrigação, a aeração do solo foi estabelecida mediante a drenagem das parcelas experimentais. O retorno da irrigação ocorria sempre que a tensão de água no solo, medida por sensores de umidade, atingia o limite pré-estabelecido de 20 kPa. Estabelecida nova lâmina de irrigação de 7 cm, esta era mantida por três dias (72 horas), após o que se iniciava novo ciclo de intermitência, com a drenagem das parcelas. Esse procedimento foi repetido ao longo de todo o ciclo biológico do arroz.

A tensão de água no solo foi medida por seis sensores de umidade Watermark®, instalados na 15 cm de profundidade, distribuídos nas parcelas experimentais. Para tanto, leituras diárias da tensão de água no solo foram realizadas diariamente no período da manhã. A decisão de retorno da irrigação baseava-se no valor médio de tensão de água no solo medido pelos sensores Watermark®, ocorrendo quando esse era igual ou superior a 20 kPa.

No sistema de irrigação intermitente, a manutenção de lâmina de água constante por 10 e 5 dias após a realização da primeira e segunda coberturas nitrogenadas ao arroz, respectivamente, visou evitar que a variação nas condições de oxirredução do solo, provocadas pelos ciclos de intermitência da irrigação, interferissem na eficiência de utilização de nitrogênio pela cultura do arroz, refletindo-se em seu desempenho produtivo.

5.3. Implantação, condução e avaliação da cultura do arroz

Anteriormente à instalação do experimento, foi realizada a amostragem e análise química do solo da área experimental para avaliação da fertilidade e recomendação de adubação para a cultura de arroz irrigado, cuja interpretação revelou níveis baixos de matéria orgânica, muito alto de fósforo disponível e médio de potássio extraível (REUNIÃO..., 2018).

O arroz foi implantado em sistema convencional de preparo do solo, que compreendeu operações com grade aradora, grade niveladora e plaina, realizadas

nos dias 26 de outubro e 11 de novembro de 2019, em razão de nesse intervalo ter ocorrido período de chuvas intensas.

A semeadura do arroz ocorreu no dia 12 de novembro de 2019 e a emergência (50%) foi registrada 10 dias após (22/11/2020) para todas as cultivares avaliadas. Esta última data foi utilizada para a estimativa da ocorrência dos estádios de desenvolvimento das plantas de arroz, de acordo com a escala de Counce et al. (2000), utilizando-se o método de graus-dia (STEINMETZ et al., 2013). A partir dessa informação foram aplicadas as práticas de manejo para a cultura.

A recomendação de adubação para a cultura foi estabelecida de acordo com os resultados da análise de solo e considerando uma expectativa de resposta alta à adubação (REUNIÃO..., 2018). Na semeadura, aplicaram-se 300 kg/ha da formulação 5-20-20 de forma localizada no sulco de semeadura. Em cobertura foram aplicadas as quantidades restantes de nitrogênio (135 kg/ha de N) e de potássio (40 kg/ha de K₂O). O nitrogênio foi parcelado em duas aplicações, nos estádios de quatro folhas (90 kg/ha de N) e iniciação da panícula (45 kg/ha de N), como ureia, e o potássio, como cloreto de potássio, foi aplicado integralmente junto com a primeira cobertura nitrogenada. A primeira adubação em cobertura (nitrogênio e potássio) foi realizada em solo seco, imediatamente antes do início da irrigação por inundação do solo do arroz, e a segunda, sobre uma lâmina de água não circulante.

O controle de plantas daninhas e demais tratos culturais para o arroz foram realizados seguindo as indicações técnicas para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (REUNIÃO..., 2018).

Ao longo do ciclo da cultura, realizou-se o acompanhamento de variáveis climáticas (precipitação pluviométrica (mm) e temperatura do ar (°C)), que foram obtidas junto à Estação Agroclimatológica de Pelotas, do Laboratório de Agrometeorologia da Embrapa Clima Temperado. Adicionalmente, nas parcelas relativas aos tratamentos sob irrigação por inundação intermitente, durante as fases de solo drenado dos ciclos de intermitência da irrigação, procedeu-se a leitura diária da tensão de água no solo. Os dados das variáveis climáticas (Figura 5) e de tensão de água no solo foram utilizados como variáveis auxiliares para a interpretação dos resultados de emissões de gases de efeito estufa das cultivares de arroz irrigado.

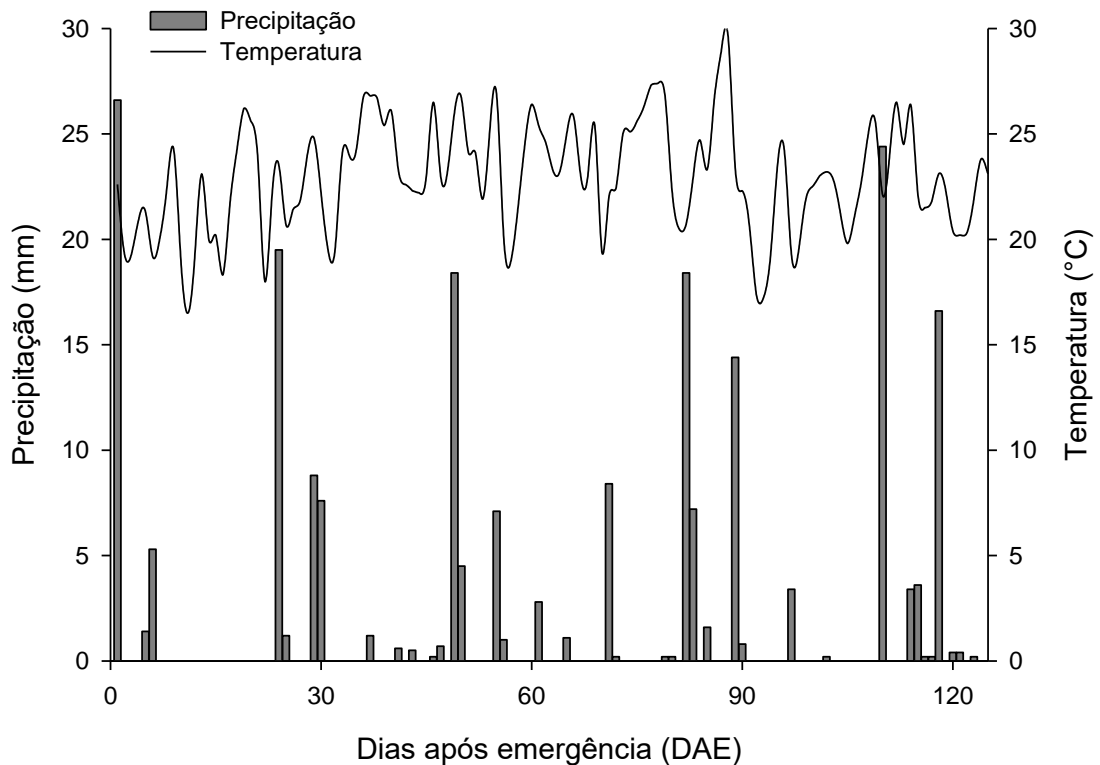


Figura 5 - Precipitação pluviométrica e temperatura média do ar, registradas durante o período experimental (safra 2019/2020).

Na maturação de colheita, foi realizada a coletas de 10 panículas de cada parcela experimental para avaliação de componentes de rendimento do arroz (esterilidade de espiguetas, número de grãos por panícula e massa de 1000 grãos).

A colheita do arroz foi realizada de forma escalonada para as cultivares, quando o teor médio de umidade dos grãos atingiu 22%, ocorrendo nos dias 20 de março, para a cultivar BRS Pampa CL, e 23 de março de 2020, para as cultivares BRS 358 e XP 113. As parcelas úteis para avaliação do rendimento de grãos foram constituídas pelas plantas presentes em 5 linhas centrais com 4 m de comprimento. O material colhido foi trilhado, seco e pesado para determinação da produtividade de grãos, sendo os dados corrigidos para 13% de umidade). Adicionalmente, amostras de grãos foram avaliadas quanto ao rendimento de engenho, determinando-se os percentuais de grãos inteiros e quebrados.

5.4. Coleta de amostras e avaliação das emissões de GEE

Para a avaliação das emissões dos gases de efeito estufa CH_4 e N_2O , utilizou-se o método da câmara estática fechada (MOSIER, 1989), que consiste em um sistema fechado sem a substituição de ar presente no interior da câmara durante as coletas, de forma que a concentração desses gases é continuamente alterada (DENMEAD; RAUPACH, 1993).

Os sistemas coletores são constituídos por câmaras de alumínio que são dispostas sobre as bases (Figura 6), formando um sistema hermeticamente fechado por meio da presença de água na canaleta disposta na parte superior das bases onde as câmaras são apoiadas (GOMES et al., 2009). A medida que as plantas de arroz cresceram, foram utilizados um ou dois extensores, de acordo com a necessidade, dispostos entre o topo e a base do sistema coletor.

As amostragens de ar foram realizadas no período de 28 de novembro de 2019 (6 dias após a emergência do arroz) a 25 de março de 2020 (uma semana após a colheita do arroz). Para os tratamentos com irrigação por inundação contínua, as coletas de amostras foram feitas uma vez por semana e nos tratamentos com irrigação por inundação intermitente foram realizadas duas coletas por semana. Nas semanas de realização das adubações nitrogenadas em cobertura para o arroz, a frequência de amostragem foi aumentada para a cada dois dias, visando melhorar as estimativas das emissões de N_2O dos sistemas.

As amostras de ar do interior das câmaras foram tomadas manualmente com auxílio de seringas de polipropileno (20 mL), equipadas com válvulas do tipo *Luer Lock*, nos tempos 0; 5; 10; e 20 minutos após seu fechamento, sempre no horário entre as nove e as onze da manhã, por ser o período que melhor representa as emissões diárias de GEE (COSTA et al., 2008).

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 auxílio de termômetro digital de haste com visor externo. Imediatamente após as amostragens, as seringas foram acondicionadas em caixas térmicas e mantidas em baixa temperatura, para subsequente transferência para frascos evacuados, que possuem tampa de borracha que impede a dispersão da amostra para o ambiente.

Posteriormente, as amostras de ar foram encaminhadas para o Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre, RS, para determinação das concentrações de CH₄ e N₂O, por cromatografia gasosa, em cromatógrafo Shimadzu GC-2014 (modelo "Greenhouse"), equipado com coluna empacotada (70°C), detector de captura de elétrons (ECD) a 325°C, onde é quantificado o N₂O, detector de ionização de chama (FID) a 250°C, onde se quantifica o CH₄, utilizando o N₂ como gás de arraste (26 mL min⁻¹).

Os fluxos de N₂O e CH₄ do solo foram calculados pela relação linear entre a variação na concentração desses gases e o tempo de coleta, conforme a Equação 1.

$$f = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) \times \left(\frac{PV}{RT} \right) \times \left(\frac{M}{A} \right) \quad (1)$$

onde: F corresponde ao fluxo de N₂O e CH₄ (μg m⁻² h⁻¹); Q é a quantidade do gás na câmara no momento da coleta (μmol mol⁻¹); t é o tempo da amostragem (min); P é pressão atmosférica no interior da câmara (atm), assumida como 1 atm; V é o volume da câmara (L); R é a constante dos gases ideais (0,08205 atm L mol⁻¹ K⁻¹); T é a temperatura dentro da câmara no momento da amostragem (K); M é a massa molar do gás (μg mol⁻¹) e A é a área da base da câmara (m²) (BAYER et al., 2014).

A emissão acumulada no período foi calculada pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de N₂O e de CH₄ do solo (GOMES et al., 2009).

Com base nas concentrações obtidas de CH₄ e N₂O pela análise das amostras de ar, calculou-se o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) de cada tratamento, convertendo as emissões dos respectivos gases para o CO₂ equivalente (kg CO₂ equiv. ha⁻¹), de acordo com a Equação 2.

$$\text{PAGp} = (\text{CH}_4 \times 34) + (\text{N}_2\text{O} \times 298) \quad (2)$$

onde: CH₄ e N₂O correspondem às emissões de cada gás (kg ha⁻¹) e os valores de 34 e 298 são os valores do potencial de aquecimento global do CH₄ e N₂O, respectivamente, para um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (IPCC, 2013).

Foi calculado, também, o índice PAGp em escala de rendimento de grãos, o qual considera a razão do PAGp por unidade de grãos de arroz produzido, conforme a Equação 3.

$$\text{PAGp/RG} = \frac{\text{PAGp}}{\text{Rend}} \quad (3)$$

onde: PAGp/RG é o potencial de aquecimento global parcial por rendimento de grãos produzidos (kg CO₂ equiv. kg⁻¹ de grãos), PAGp é o potencial de aquecimento global parcial (kg ha⁻¹) (BAYER et al., 2014).

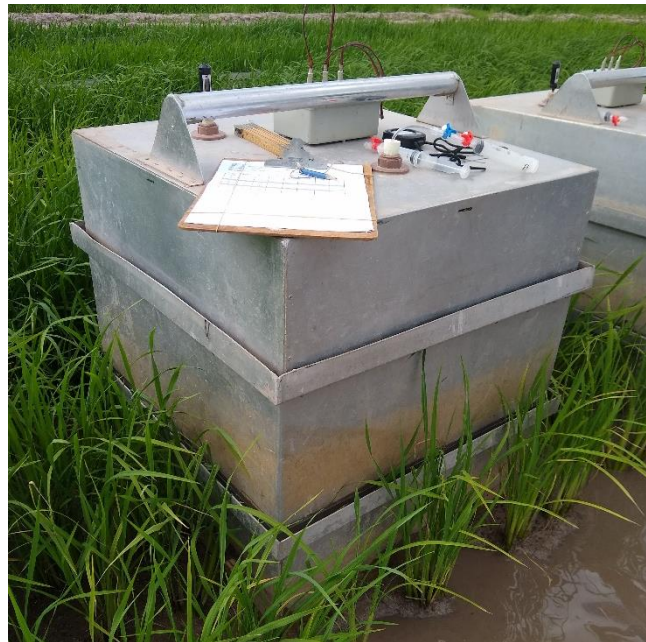


Figura 6 - Conjunto completo do sistema coletor de GEE do tipo câmara estática fechada.

5.5. Análise estatística

Os dados de fluxos foram determinados por estatística descritiva (média + desvio padrão). As emissões totais, PAGp e das variáveis de planta foram submetidos à análise de variância – ANOVA (teste F, $p < 0,05$). Quando significativa, as médias dos fatores sistema de irrigação, cultivar de arroz e população de planta foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey com nível de significância de 5%.

6. Resultados e discussão

6.1. Fluxos de CH₄ e N₂O do solo

As principais diferenças nos fluxos de CH₄ do solo estiveram associadas ao sistema de irrigação do arroz, inundação contínua ou inundação intermitente. Para cada um dos sistemas de irrigação adotados, o padrão temporal dos fluxos de CH₄ foi semelhante para as três cultivares de arroz avaliadas, nas duas populações de plantas, embora com algumas particularidades, descritas na sequência (Figura 7). No período compreendido entre a emergência das plântulas de arroz e o início da irrigação da cultura por inundação do solo, praticamente não se detectou emissão de CH₄, dado que o solo se encontrava drenado e, portanto, oxidado, condição que não predispõe à produção de CH₄. Esse comportamento manteve-se por aproximadamente mais 20 dias após o início da irrigação nos tratamentos sob inundação contínua, quando os fluxos de CH₄ começaram a aumentar; a elevação nos fluxos foi lenta por cerca de 25 dias, intensificando-se bastante após esse período, atingindo valores máximos entre 76 e 88 dias após a emergência (DAE), coincidindo com o final da fase de emborrachamento (R2) e início da floração do arroz (R4). Na sequência, os fluxos de CH₄ decresceram progressivamente até a drenagem da área para a colheita do arroz, mantendo-se em declínio até a última avaliação realizada, uma semana após a colheita da cultura (Figura 8). A produção e emissão de CH₄ do solo ocorre em sequência às reduções sequenciais de formas oxidadas de manganês e ferro no solo, que atuam como aceptores de elétrons preferenciais no processo de redução, sendo sucedidos pelos compostos orgânicos, que são utilizados pelos metanogênicos, gerando CH₄, como produto final de sua degradação em condições anaeróbias (SILVA et al., 2011), o que explica os fluxos inicialmente baixos desse GEE após a inundação do solo.

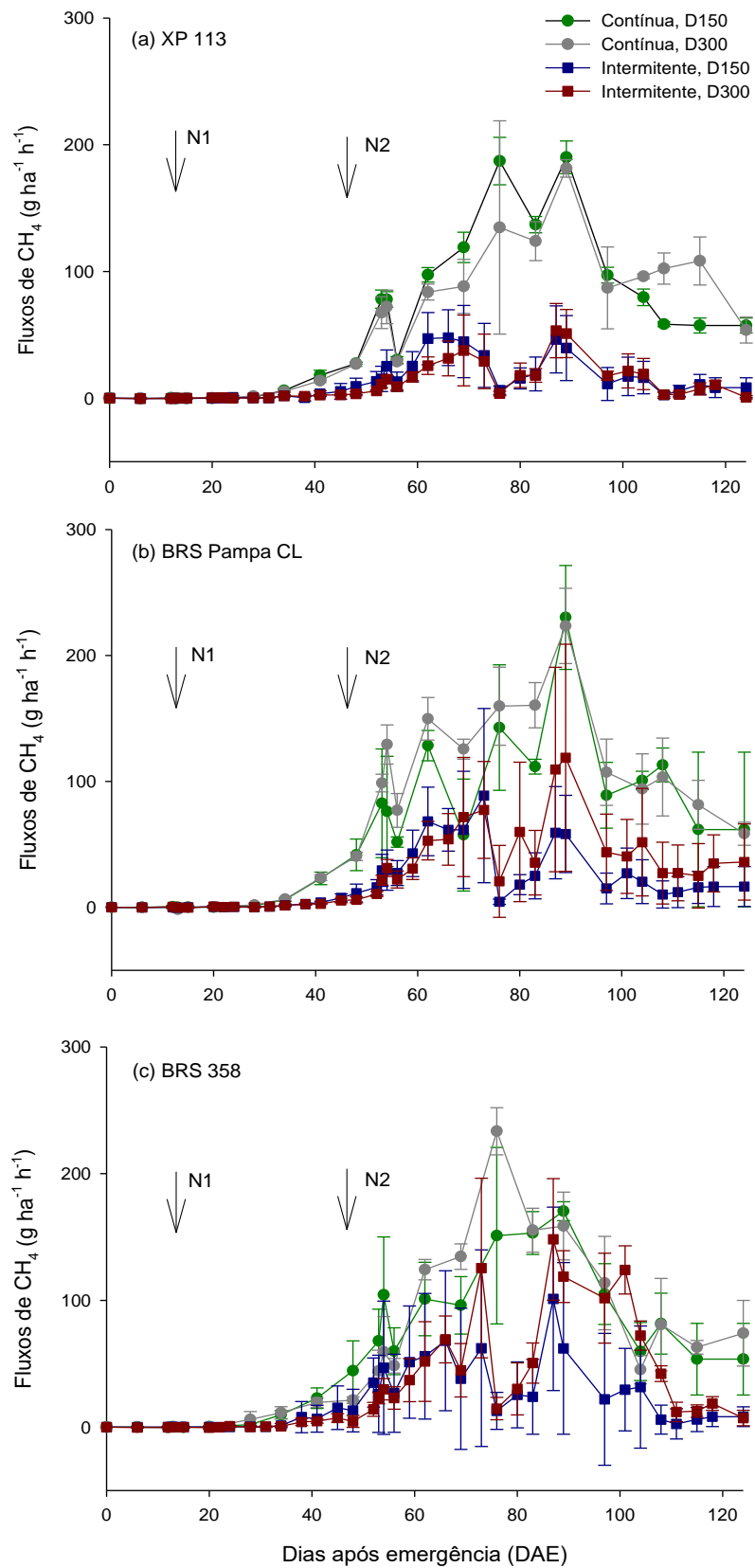


Figura 7 - Fluxos de CH₄ do solo das cultivares de arroz XP 113 (a), BRS Pampa CL (b) e BRS 358 (c) nas densidades de 150 (D150) e 300 plantas m⁻² (D300), sob irrigação por inunda ção contínua e intermitente. Barras verticais representam o desvio padrão da média. N1 e N2 indicam o momento de realiza o da primeira aduba o nitrogenada em cobertura/início da irriga o e segunda aduba o nitrogenada em cobertura, respectivamente.

Algumas variações entre as cultivares de arroz e as densidades de plantas quanto ao padrão de fluxos de CH₄ foram observadas. O híbrido XP 113, de forma geral, apresentou maiores fluxos de CH₄ quando cultivado sob menor densidade de plantas (150 plantas m⁻²), a qual é convencionalmente utilizada para cultivares híbridas, em razão do sistema radicular mais robusto e elevada capacidade de perfilhamento. Exceção a esse comportamento ocorreu no período final do ciclo biológico do arroz, a partir de 97 DAE, quando os fluxos de CH₄ do tratamento com população de 300 plantas m⁻² superaram os da população de 150 plantas m⁻². As cultivares BRS Pampa CL e BRS 358, por sua vez, apresentaram menor variação nos fluxos de CH₄ em resposta às diferentes populações de plantas, embora, em geral, fluxos de CH₄ ligeiramente superiores tenham estado associadas à maior população de plantas utilizada (indicada para cultivares convencionais de arroz), especialmente no final do ciclo da cultura (Figura 7). Possivelmente, a tendência de maior potencial de emissão de CH₄ observada sob maior população de plantas esteja associada à maior quantidade de raízes presentes, favorecendo a liberação de exsudatos radiculares, que se constituem em fonte de carbono lábil para os microrganismos metanogênicos, especialmente no final do ciclo da cultura (TOWPRAYOON et al., 2000; MITRA et al., 2005).

Ainda com relação à comparação do comportamento das cultivares de arroz irrigado, destaca-se o fato de as cultivares convencionais terem apresentado picos máximos de emissão de CH₄ maiores que do híbrido XP 133, correspondentes a 230,2 e 223,4 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹ (BRS Pampa CL) e 188,7 e 233,5 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹ (BRS 358), nas populações de 150 e 300 plantas m⁻², respectivamente. Para o híbrido XP 113, esses foram de 187,1 e 181,4 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹, nas mesmas populações (Figura 7). Outro aspecto a mencionar refere-se ao fato de o pico máximo de emissão de CH₄ da cultivar BRS 358, sob a população de 300 plantas m⁻², ter ocorrido anteriormente ao dos demais tratamentos, aos 75 DAE, enquanto para os demais tratamentos sob o mesmo regime de irrigação (inundação contínua), esse ocorreu no 88º DAE.

Sob irrigação por inundação contínua, independentemente da cultivar e população de plantas de arroz, os fluxos máximos de CH₄ coincidiram com a fase de floração da cultura. Nessa fase ocorre elevada liberação de exsudatos radiculares e o potencial de oxirredução do solo é baixo, condições que favorecem a atividade dos microrganismos responsáveis pela produção de CH₄ na rizosfera das plantas de

arroz, aumentando a emissão desse GEE (MOTERLE, 2011). Na sequência, o efluxo de CH₄ decresce, devido à redução da atividade fotossintética das plantas (WASSMANN et al., 2000; PITTELKOW et al., 2013).

Singh; Singh; Kashyap (1998), ao avaliarem o padrão temporal de emissão de CH₄ do cultivo de arroz, também determinaram fluxos elevados na floração, atribuindo-os à alta taxa de exsudação de compostos orgânicos pelas raízes nessa fase do ciclo da cultura, favorecendo a produção e emissão de CH₄. Da mesma forma Aulakh et al. (2000), ao estudarem a capacidade de transporte de CH₄ de plantas de arroz, verificaram que o pico máximo de emissão desse GEE ocorre durante a fase reprodutiva, estando associado tanto à liberação de quantidades elevadas de exsudatos radiculares, quanto à maior capacidade de transporte de CH₄ pelas plantas de arroz, dado à presença de aerênquima completamente desenvolvido (LE MER; ROGER, 2001). De outra forma, ao compararem o potencial de emissão de CH₄ de cultivares de arroz irrigado, Islam et al. (2018a) verificaram dois momentos ao longo do ciclo da cultura, perfilhamento pleno e floração, nos quais ocorrem fluxos elevados de CH₄, superiores àqueles medidos no início da fase vegetativa e na maturação de grãos.

No sistema de irrigação por inundação intermitente, o padrão de emissão de CH₄ das cultivares de arroz foi distinto daquele observado sob inundação contínua, caracterizando-se por períodos de incrementos de fluxo, intercalados com períodos de decréscimo, em resposta à alternância nas condições de oxirredução do solo, proporcionada pelos ciclos de umedecimento e secagem do solo (Figura 7). Esse método de irrigação proporcionou, também, dois efeitos bastante característicos para as três cultivares testadas em ambas as populações de plantas: o primeiro refere-se ao atraso no início da produção de CH₄, em relação à inundação contínua, em razão da frequente variação nas condições de oxirredução do solo, postergando o estabelecimento de potencial redox (Eh) adequado à produção de CH₄, o qual, segundo Yu e Patrick Junior (2004), atinge valores máximos com Eh = -150 mV. O segundo efeito diz respeito à magnitude dos fluxos de emissão de CH₄, que foi consistentemente menor ao longo de todo o ciclo biológico do arroz, comparativamente à inundação contínua, como reflexo da maior frequência e prevalência de condição de solo oxidado. Os metanogênicos são microrganismos estritamente anaeróbicos, tendo sua atividade afetada em solo oxidado. A aeração

periódica do solo, causada pela intermitência da irrigação, reduz sua população e, em decorrência, a produção e emissão de CH₄ (ZHANG et al., 2011).

Zhang et al. (2012) avaliaram a produção, oxidação e emissão de CH₄ em cultivos de arroz sob diferentes sistemas de irrigação e verificaram que o potencial de produção de CH₄ aumentou mais lentamente, apresentando pico menor sob irrigação por inundação intermitente, comparativamente à inundação contínua, corroborando com os resultados do presente estudo. Também Oo et al. (2018) estudaram as emissões de GEE em cultivo de arroz irrigado por inundação contínua, comparando-o à inundação intermitente, determinando menor emissão de CH₄ sob inundação intermitente. Segundo estes autores, a irrigação intermitente dificulta a ocorrência de condições de redução do solo adequadas à produção de CH₄, devido a aeração do solo, de forma que o Eh do solo demora mais para atingir valores suficientemente baixos para desencadear a atividade dos metanogênicos, reduzindo, conseqüentemente, a emissão de CH₄. Ademais, as plantas de arroz apresentam menor desenvolvimento do aerênquima (KLUDZE; DELAUNE; PATRICK, 1993), reduzindo o transporte e emissão do CH₄ produzido no solo (ISLAM et al., 2018b).

A comparação entre as cultivares de arroz no sistema irrigado por inundação intermitente revela, também, que o híbrido XP 113 apresentou menor variação e magnitude de fluxo de CH₄, relativamente às cultivares convencionais BRS Pampa CL e BRS 358. Da mesma forma, os fluxos de CH₄ da 'XP 113' praticamente não variaram com a população de plantas. No entanto, para as cultivares BRS Pampa CL e BRS 358, de forma geral, observou-se tendência de incremento nos fluxos de CH₄ quando do cultivo sob maior população de plantas, ou seja, 300 plantas m⁻², relativamente à população de 150 plantas m⁻², especialmente a partir do início da fase reprodutiva do arroz.

Sob irrigação por inundação intermitente, o fluxo máximo de emissão de CH₄ do híbrido XP 113 correspondeu a 47,8 e 53,3 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹, para as populações de 150 e 300 plantas m⁻², respectivamente, enquanto para a 'BRS Pampa CL', os valores determinados foram 88,7 e 118,8 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹ e, para a 'BRS 358', esses foram 101,2 e 148,2 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹, nas mesmas populações (Figura 7).

Segundo Jiang et al. (2017; 2019), os híbridos apresentam maior biomassa radicular e número de perfilhos que as cultivares convencionais, características que podem promover o transporte de oxigênio para a rizosfera, estimulando o

crescimento da população de metanotróficos e, conseqüentemente, a oxidação de CH_4 , minimizando as emissões (BHATTACHARYYA et al. 2019). Esse efeito foi confirmado por Liao et al. (2019), que determinaram população de metanotróficos na rizosfera de híbrido de arroz 93,4% superior à encontrada na rizosfera de cultivar convencional, resultando em redução de 18,6% nas emissões de CH_4 .

Com relação ao óxido nitroso, não se observou um padrão temporal de fluxos característico para os sistemas de irrigação, cultivares de arroz e populações de plantas avaliados (Figura 8). De forma geral, independentemente do tratamento, observou-se oscilação entre fluxos de baixa magnitude e fluxos negativos (influxos) de N_2O ao longo de todo o ciclo de cultivo do arroz. No entanto, algumas exceções a esse comportamento foram verificadas. No sistema irrigado por inundação contínua, determinou-se no período inicial de avaliação, correspondendo a 6 DAE do arroz, ou seja, antecedendo o início da irrigação da cultura por inundação do solo, um pico elevado de emissão de N_2O , com magnitude média correspondente a 2.367; 2.676; 2.626; 1.666; 1.187 e 2.937 $\text{mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, para as cultivares XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358 nas densidades de 150 e 300 plantas m^{-2} , respectivamente (Figura 8). Esse pico de emissão de N_2O é atribuído a eventos prévios de chuva de média intensidade (Figura 6), que promoveram alternância nas condições de oxirredução do solo e, portanto, nos processos de nitrificação e desnitrificação, tendo como fonte de nitrogênio o nutriente nativo do solo e aportado ao sistema via adubação na semeadura. 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). Poucas foram as situações em que se verificaram outros picos de emissão relativamente elevado de N_2O , os quais não foram uniformes e simultâneos para as cultivares de arroz e populações de plantas. Os picos de emissão observados estiveram relacionados, preponderantemente, às variações nas condições de oxirredução, proporcionadas por eventuais alterações na umidade do solo ao longo do período de cultivo do arroz, favorecendo a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação, que têm o N_2O como produto intermediário. Adicionalmente, o aporte de nitrogênio mineral ao solo, via adubação, também pode ter contribuído de alguma forma, embora em menor magnitude, para as eventuais emissões de N_2O do solo.

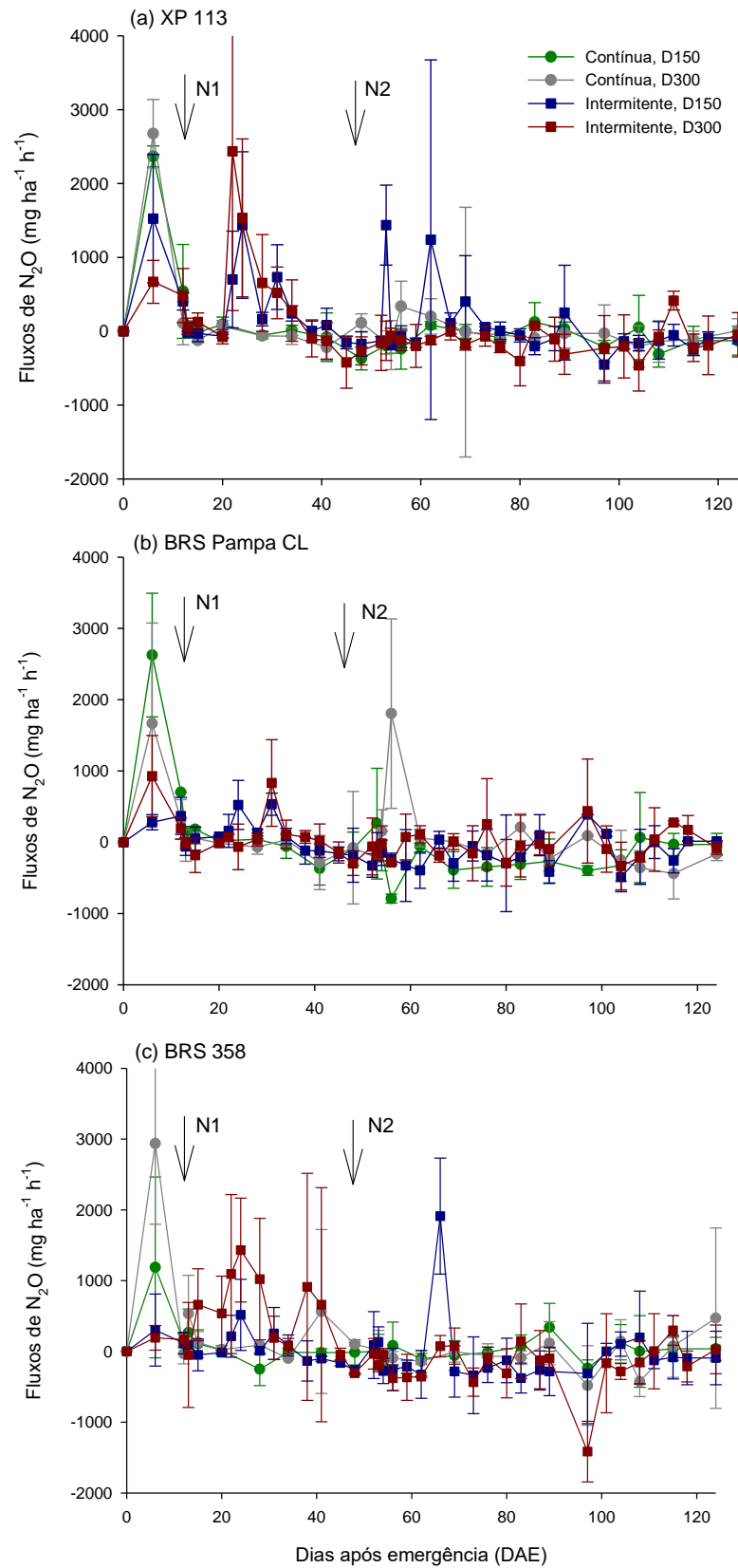


Figura 8 - Fluxos de N_2O do solo das cultivares de arroz XP 113 (a), BRS Pampa CL (b) e BRS 358 (c) nas densidades de 150 (D150) e 300 plantas m^{-2} (D300), sob irrigação por inundação contínua e intermitente. Barras verticais representam o desvio padrão da média. N1 e N2 indicam o momento de realiza o da primeira aduba o nitrogenada em cobertura/início da irriga o e segunda aduba o nitrogenada em cobertura, respectivamente.

De acordo com Guo e Zhou (2007), as condições de umidade do solo e práticas de manejo da adubação são os principais fatores determinantes das emissões de N_2O em solos cultivados com arroz irrigado. Isso porque a água contém O_2 dissolvido, favorecendo a nitrificação, com a 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 (DUBLEY; MAILAPALLI, 2018).

Em síntese, a estabilidade na manutenção de lâmina de água sob o sistema de irrigação por inundação contínua proporcionou fluxos muito baixos e, mesmo, influxos (absorção) de N_2O do solo, devido à prevalência de condições estritamente anaeróbias, que limitam sua produção e emissão (TOWPROYOON et al., 2005; JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009; KÖGEL-KNABNER et al., 2010; WESZ, 2012). Esse comportamento foi observado, independentemente da cultivar de arroz e população de plantas considerada. A absorção de N_2O pode ocorrer pela ação das bactérias desnitrificadoras, que reduzem N_2O a N_2 sob condições anaeróbias (CHAPUIS-LARDY et al., 2007). Em um ambiente anaeróbio, a baixa concentração de NO_3^- pode induzir as bactérias desnitrificadoras a utilizar o N reduzido na forma de N_2O , resultando no consumo desse gás.

Por sua vez, no sistema irrigado por inundação intermitente, além de picos de emissão anteriores ao início da irrigação, foram verificados alguns picos de emissão de N_2O ao longo do ciclo de cultivo de arroz, os quais estiveram relacionados com a alternância das condições de oxidação do solo resultantes da intermitência da irrigação. Na ausência de lâmina de água, o oxigênio atmosférico se difunde para o interior do solo, promovendo a oxidação de formas reduzidas de nitrogênio, produzindo nitrato. Entretanto, com o retorno da inundação do solo, o nitrato presente sofre desnitrificação e gera N_2O , que é produto intermediário da redução do nitrato (HOU et al., 2000; JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009).

A alternância na condição de umidade do solo, proporcionada pela irrigação por inundação intermitente, estabelece um ambiente favorável aos processos de nitrificação e desnitrificação, que geram N_2O (TARLERA et al., 2016).

No entanto, mesmo sob irrigação por inundação intermitente, não se verificaram picos expressivos de fluxos de N_2O em sucessão às adubações nitrogenadas em cobertura, que ocorreram aos 12 e 52 dias após a emergência das

plantas de arroz (Figura 8). Esse efeito se justifica pelo fato de ambas as coberturas nitrogenadas terem sido realizadas em solo seco, sendo sucedidas por irrigação por inundação do solo, promovendo a incorporação do fertilizante ao solo, minimizando sua suscetibilidade a perdas. Esses resultados confirmam observações de Liu et al. (2010), que também não constataram incremento nas taxas de emissão de N_2O de solo cultivado com arroz irrigado, mesmo após as aplicações de nitrogênio em cobertura.

A comparação entre as cultivares de arroz e as populações de plantas nesse sistema de irrigação revela semelhança no comportamento dos fluxos de N_2O . Cabe destacar, porém, que a cultivar BRS Pampa CL foi a que manteve maior uniformidade quanto ao baixo potencial de fluxo de N_2O a partir do início da irrigação. As demais cultivares apresentaram eventuais picos de emissão e influxo desse GEE ao longo do período de irrigação (Figura 8). Mesmo após a drenagem do solo, para a colheita do arroz, não se verificaram picos de emissões de N_2O do solo, para as três cultivares de arroz avaliadas, muito embora esse seja um efeito verificado com relativa frequência (TOWPRAYOON et al., 2005; LIU et al., 2010). Outros autores, porém, determinaram efeito contrário, ou seja, a drenagem do solo promoveu diminuição nas taxas de emissão de N_2O (BUSS, 2016).

6.2. Emissões sazonais de CH_4 e N_2O e o potencial de aquecimento global parcial (PAGp)

As emissões sazonais de CH_4 do cultivo de arroz foram influenciadas pelos três fatores avaliados de forma isolada, sistema de irrigação, cultivar e população de plantas, não se determinando significância da interação entre os mesmos. Na médias das três cultivares e duas densidades de plantas testadas, emissões de CH_4 significativamente maiores foram determinadas para o sistema de irrigação por inundação contínua ($190,7 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1}$), relativamente à inundação intermitente $63,0 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1}$ (Tabela 2), o que representa diminuição de 67% no potencial de emissão desse GEE. Explica-se esse resultado em razão de, no sistema irrigado por inundação contínua, a manutenção de lâmina de água durante todo ou a maior parte do ciclo de cultivo do arroz proporcionar condições anaeróbias no solo, que favorecem a produção de CH_4 (BUENDIA et al., 1997). Contrariamente, os ciclos de umedecimento e secagem do solo proporcionados pela irrigação por inundação

intermitente retardam o estabelecimento do potencial de oxirredução propício à produção de CH₄, minimizando o potencial de emissão desse GEE. Isto porque a redução de material orgânico (C lábil) a CH₄ ocorre apenas em sucessão à redução de outros aceptores de elétrons preferenciais, particularmente Fe³⁺, Mn⁴⁺ e SO₄²⁻, que são convertidos, respectivamente, a Fe²⁺, Mn²⁺ e S²⁻ (YU et al., 2007).

Tabela 2 - Emissões sazonais de CH₄ e potencial de aquecimento global parcial (PAGp) associadas ao cultivo de arroz sob irrigação por inundação contínua e intermitente. Dados médios de três cultivares e duas populações de planta. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/2020.

Sistema de irrigação	CH ₄	PAGp
	kg ha ⁻¹	kg CO ₂ equiv ha ⁻¹
Inundação contínua	190,7 a	6.486,2 a
Inundação intermitente	63,0 b	2.142,2 b
CV (%)	25,2	25,8

Médias seguidas de mesma letra minúscula, nas colunas, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (P<0,05).

No sistema irrigado por inundação contínua, as emissões de CH₄ do híbrido XP 113 totalizaram 164,8 e 182,0 kg ha⁻¹, nas populações de 150 e 300 plantas m⁻², respectivamente, enquanto que para as cultivares convencionais os valores foram 183,9 e 231,4 kg CH₄ ha⁻¹ (BRS Pampa CL) e 174,1 e 208,4 kg CH₄ ha⁻¹ (BRS 358), respectivamente, nas mesmas populações. Por sua vez, sob irrigação por inundação intermitente, as emissões foram reduzidas para 36,8 e 35,7 kg CH₄ ha⁻¹; 55,7 e 86,7 kg CH₄ ha⁻¹; 58,0 e 105,1 kg CH₄ ha⁻¹, respectivamente, para as cultivares XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358 nas populações de 150 e 300 plantas m⁻² (Figura 9).

Redução significativa nas emissões de CH₄ devidas à adoção de diferentes modalidades de irrigação por inundação intermitente no cultivo de arroz, relativamente à inundação contínua, têm sido extensivamente reportadas em nível mundial (SETYANTO; BAKAR, 2005; TOWPRAYOON et al., 2005; HADI et al., 2010; LIU et al., 2010; ZHANG et al., 2011; TARLERA et al., 2016), de forma que adequações no manejo da água para a cultura do arroz são vistas como uma das ferramentas mais efetivas para mitigar as emissões de CH₄ e o potencial de aquecimento global desse cultivo (HUSSAIN et al., 2015; CHIRINDA et al., 2018). Em nível nacional, algumas iniciativas nesse sentido já foram empreendidas, com resultados também promissores. Em estudo realizado em Cachoeirinha, RS,

Zschornack (2011) verificou mitigação de 41% nas emissões de CH₄ do cultivo de arroz decorrente da adoção de irrigação por inundação intermitente, caracterizada pela drenagem do solo na fase vegetativa (V6 a V8), em relação à irrigação por inundação contínua. Por sua vez, pesquisa desenvolvida por Wesz (2012) demonstrou resultado de maior magnitude em estudo desenvolvido na região de Pelotas, RS, indicando redução de 77% nas emissões de CH₄ do cultivo do arroz pelo uso de irrigação por inundação intermitente, em substituição à inundação contínua. Na mesma região, os resultados obtidos por Buss (2012) foram menos marcantes, segundo os quais a irrigação por inundação intermitente diminuiu em apenas 22% as emissões sazonais de CH₄ de solo cultivado com arroz, relativamente à inundação contínua. Segundo este autor, a diferença na mitigação de emissões de CH₄ entre seu trabalho e o de Wesz (2012) deve-se a distinções no manejo da água para a cultura, contemplando número distinto de ciclos de intermitência da irrigação, assim como a variações nas condições climáticas em diferentes safras agrícolas. Por sua vez, MOTERLE et al. (2013), em Santa Maria, RS, verificaram que a adoção de irrigação por inundação intermitente, assim como a irrigação por banhos, constituem-se em alternativas eficientes para reduzir as emissões de CH₄ da lavoura de arroz nas condições de cultivo do Sul do Brasil, porém a magnitude do efeito varia em função do clima local durante o período de cultivo, que influenciam o estabelecimento de períodos de solo drenado.

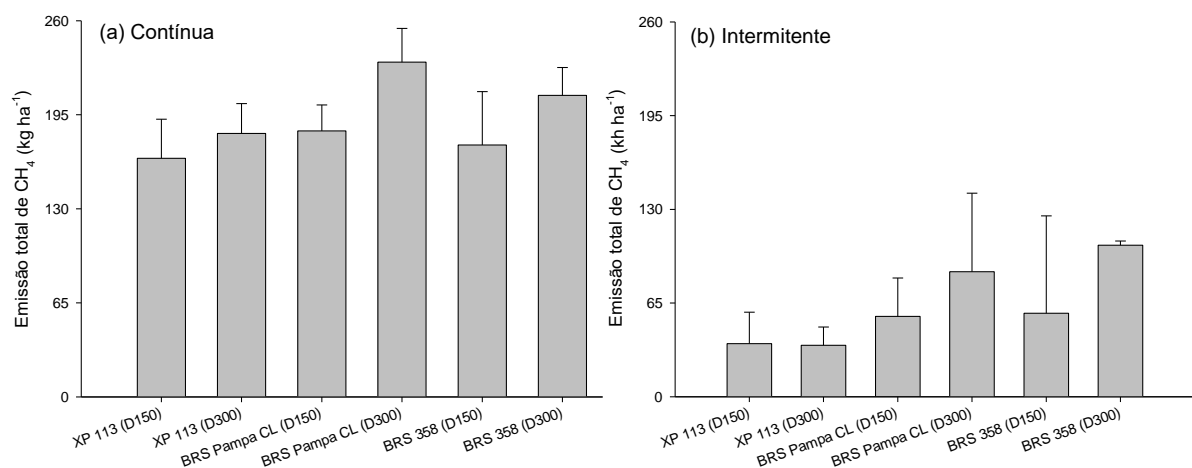


Figura 9 – Emissões totais de CH₄ das cultivares de arroz XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358 nas densidades de 150 (D150) e 300 plantas m⁻² (D300), sob irrigação por inundação contínua (a) e intermitente (b). Barras verticais representam o desvio padrão da média.

A comparação das emissões sazonais de CH₄ das cultivares de arroz demonstrou que o híbrido XP 113 (104,8 kg CH₄ ha⁻¹) proporcionou emissões significativamente inferiores que as cultivares convencionais BRS Pampa CL (139,4 kg CH₄ ha⁻¹) e BRS 358 (136,4 kg CH₄ ha⁻¹), que não diferiram entre si (Tabela 3). Possivelmente esse resultado se deva ao fato de os híbridos de arroz, por possuírem maior biomassa de parte aérea e de raízes que as cultivares convencionais de arroz (JIANG et al., 2017; 2019), promoverem o transporte de O₂ atmosférico para a rizosfera, favorecendo a população e atividade dos microrganismos metanotróficos, responsáveis pela oxidação do CH₄ produzido no solo, reduzindo, portanto, o potencial de emissão desse GEE (BHATTACHARYYA et al. 2019).

Ao avaliarem o potencial de emissão de CH₄ de cultivares de arroz, Ma; Qiu; Lu (2010) verificaram que cultivar híbrida apresentou emissão de CH₄ semelhante à de cultivar convencional japonesa, porém inferior à de cultivar convencional do tipo indica.

Por sua vez, ao se confrontarem as populações de plantas (Tabela 4), verifica-se que maiores emissões de CH₄ estiveram associadas ao uso da população de 300 plantas m⁻² (141,6 kg CH₄ ha⁻¹), relativamente à população de 150 plantas m⁻² (112,2 kg CH₄ ha⁻¹). Infere-se que esse efeito também esteja associado à maior quantidade de raízes e de perfilhos e, conseqüentemente, de aerênquima, por onde o CH₄ produzido é transportado para a atmosfera (AGOSTINETTO et al., 2002). Caracteres morfológicos das plantas de arroz podem influenciar sua capacidade de transporte de CH₄ (AULAKH et al., 2000).

Tabela 3 – Emissões sazonais de CH₄ e potencial de aquecimento global parcial (PAGp) das cultivares de arroz irrigado XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358. Dados médios de dois sistemas de irrigação e duas populações de planta. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/2020.

Cultivar	Emissão total de CH ₄	PAGp
	kg ha ⁻¹	kg CO ₂ equiv ha ⁻¹
XP 113	104,8 b	3.596,1 b
BRS Pampa CL	139,4 a	4.740,4 a
BRS 358	136,4 a	4.637,6 a
CV (%)	25,2	25,8

Médias seguidas de mesma letra minúscula, nas colunas, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (P<0,05).

Tabela 4 - Emissões sazonais de CH₄ e potencial de aquecimento global parcial (PAGp) associado ao cultivo de arroz irrigado em função da população de planta. Dados médios de dois sistemas de irrigação e três cultivares de arroz. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/2020.

População de planta	Emissão total de CH ₄	PAGp
	kg ha ⁻¹	kg CO ₂ equiv ha ⁻¹
150 plantas m ⁻²	112,2 b	3.815,6 b
300 plantas m ⁻²	141,6 a	4.812,9 a
CV (%)	25,2	25,8

Médias seguidas de mesma letra minúscula, nas colunas, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (P<0,05).

Quanto às emissões sazonais de N₂O do solo, destaca-se o fato dessas terem sido extremamente baixas, indistintamente para todos os tratamentos avaliados, incluindo sistemas de irrigação, cultivares de arroz e populações de planta. Para alguns dos tratamentos, os resultados indicaram, inclusive, absorção desse gás de efeito estufa (Figura 10).

Sob irrigação por inundação contínua, determinou-se absorção do N₂O para as cultivares XP 113 e BRS Pampa CL, na população de 150 plantas m⁻². Na maior população, as emissões de N₂O dessas cultivares totalizaram 0,104 e 0,027 kg ha⁻¹, respectivamente. Para a cultivar BRS 358, no mesmo sistema de irrigação, as emissões de N₂O foram de 0,181 e 0,244 kg ha⁻¹, respectivamente, para as populações de plantas de 150 e 300 plantas m⁻² (Figura 10a). Quanto ao sistema irrigação por inundação intermitente, as cultivares BRS Pampa CL e BRS 358, na população de 150 plantas m⁻², proporcionaram absorção de N₂O; mas na população

de 300 plantas m^{-2} , os valores medidos foram, respectivamente, 0,140 e 0,624 $kg\ ha^{-1}$. As emissões do híbrido XP 113 foram de 0,263 e 0,063 $kg\ m^{-2}$, nas populações de 150 e 300 plantas m^{-2} , respectivamente, sob irrigação por inundação intermitente (Figura 10b).

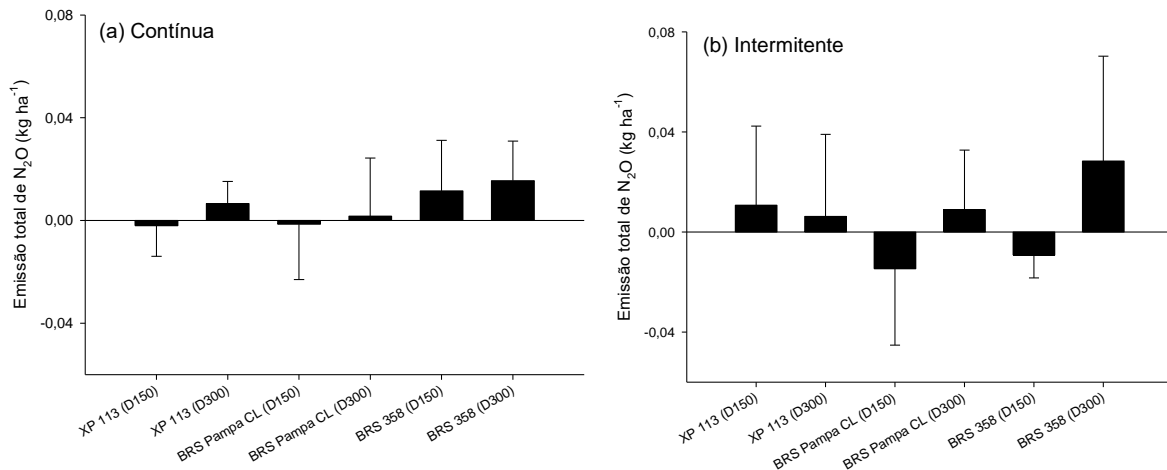


Figura 10 - Emissões totais de N_2O das cultivares de arroz XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358 nas densidades de 150 (D_{150}) e 300 plantas m^{-2} (D_{300}), sob irrigação por inundação contínua (a) e intermitente (b). Barras verticais representam o desvio padrão da média.

Muito embora, via de regra, o CH_4 seja o principal componente do potencial de aquecimento global parcial (PAGp) de cultivo de arroz irrigado por inundação contínua, correspondendo normalmente a mais de 90% do total (TOWPRAYOON et al., 2005; BAYER et al., 2014; SCIVITTARO et al., 2015), sob irrigação por inundação intermitente a contribuição do N_2O para o PAGp da cultura pode aumentar consideravelmente (ZSCHORNACK et al., 2016), dado que os ciclos de umedecimento e secagem do solo favorecem os processos de nitrificação e desnitrificação no solo, que geram N_2O como produto intermediário (HOU et al., 2000; JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009; LIU et al., 2010). Tal efeito não se confirmou no presente trabalho, dado que não se determinou aumento das emissões de N_2O do solo decorrente da adoção de irrigação por inundação intermitente, comparativamente à inundação contínua. Atribuem-se as baixas emissões de N_2O do solo determinadas no presente trabalho à adequação no manejo da adubação nitrogenada para a cultura, de forma que ambas as coberturas nitrogenadas foram realizadas em solo seco, sendo sucedidas por irrigação por inundação do solo, visando a incorporação do fertilizante ao solo e minimização de perdas.

Dado que o CH₄ foi o GEE dominante do potencial de aquecimento global parcial (PAGp) do cultivo de arroz, independentemente do tratamento, o comportamento observado para essa variável foi semelhante ao descrito para as emissões sazonais de CH₄, ou seja, a irrigação por inundação contínua proporcionou PAGp (6.486,2 kg CO₂ equiv. ha⁻¹) superior ao proporcionado pela inundação intermitente (2.142,2 kg CO₂ equiv. ha⁻¹) (Tabela 2). Portanto, a intermitência na irrigação proporcionou redução média de 67% no PAGp da cultura do arroz. Esses resultados corroboram observações de Wesz (2012) e Buss (2012) de estudos realizados em mesmo tipo de solo, também na região de Pelotas, RS, demonstrando a efetividade do sistema de irrigação por inundação intermitente para a mitigação do PAGp do cultivo de arroz irrigado.

Da mesma forma, o efeito das cultivares e populações de planta de arroz sobre o PAGp da cultura seguiu aquele descrito para as emissões totais de CH₄. Portanto, a cultivar híbrida XP 113 destacou-se em relação às cultivares convencionais BRS Pampa CL e BRS 358, pelo menor potencial de aquecimento global parcial (Tabela 3). Da mesma forma, o uso da menor população de plantas também promoveu menor PAGp relativamente à população de 300 plantas m⁻² (Tabela 4), que é usualmente recomendada para cultivares convencionais de arroz (REUNIÃO..., 2018).

Ma et al. (2012) avaliaram as emissões de GEE de cultivares de arroz irrigado sob distintas densidades de semeadura e verificaram que a magnitude do PAGp foi diretamente proporcional à densidade de semeadura.

Conforme referido anteriormente, o CH₄ contribuiu com praticamente a totalidade do PAGp da cultura do arroz. Independentemente do tratamento, os valores medidos foram superiores a 99% do total (Figura 11). Em alguns tratamentos específicos, a pequena absorção de N₂O (Figura 10) contribuiu, inclusive, para ligeira redução no PAGp do arroz.

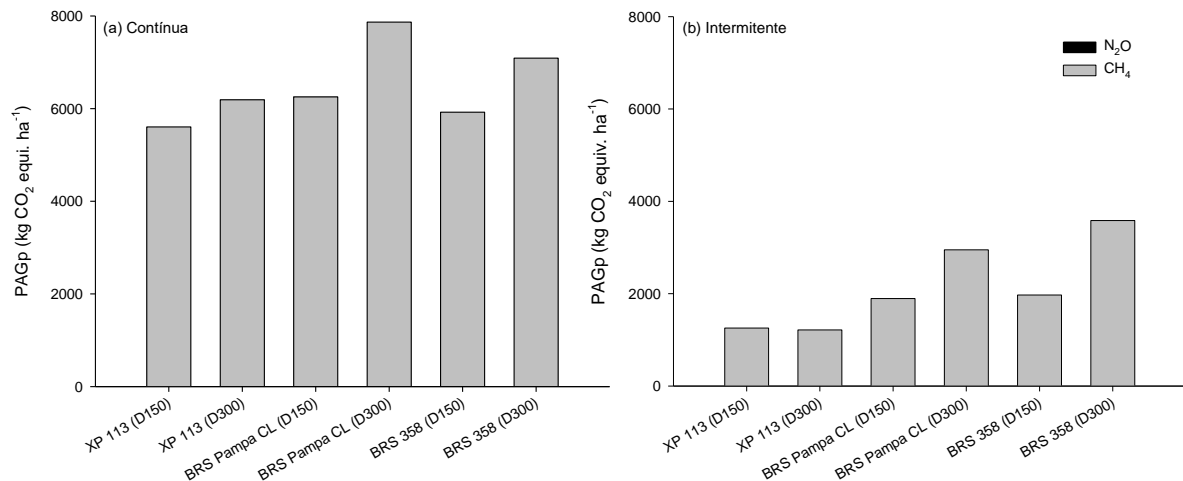


Figura 11 - Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) das cultivares de arroz XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358 nas densidades de 150 (D150) e 300 plantas m⁻² (D300), sob irrigação por inundação contínua (a) e intermitente (b).

6.3. Desempenho produtivo e rendimento industrial do arroz

A variável produtividade de grãos foi influenciada pelos fatores sistema de irrigação e cultivar de arroz de forma isolada, não havendo efeito do fator população de plantas e das interações entre os fatores.

Independentemente da cultivar de arroz e população de plantas, maior produtividade de grãos foi obtida sob irrigação por inundação contínua, relativamente à irrigação intermitente (Tabela 5), demonstrando alguma sensibilidade das três cultivares avaliadas ao estresse hídrico relativo proporcionado pelos ciclos de umedecimento e secagem estabelecidos pelo sistema de irrigação intermitente estabelecido. Apesar desse efeito, é importante observar o elevado potencial de produtividade alcançado pela cultura sob ambos os sistemas de irrigação, o que se explica pela adequação dos demais fatores determinantes da produtividade da cultura, de maneira especial as condições climáticas extremamente favoráveis vigentes na região de cultivo durante a safra agrícola 2019/2020.

A redução na produtividade dos grãos em resposta à intermitência na irrigação é um efeito possível no cultivo de arroz irrigado (TARLERA et al., 2016), dado que as cultivares correntemente utilizadas são desenvolvidas para o sistema inundado, sendo expostas a algum nível de estresse hídrico sob irrigação por inundação intermitente. Nesse sentido, nas condições de cultivo do Sul do Brasil, Silva et al. (2011) avaliaram a produtividade do arroz sob distintos sistemas de

irrigação e manejos da água, verificando redução da produtividade em resposta à intermitência da irrigação, relativamente à inundação contínua, corroborando com os resultados do presente estudo. Segundo esses autores, o arroz apresenta sensibilidade variável ao déficit hídrico ao longo de seu ciclo biológico, apresentando maior tolerância durante as fases vegetativa e de maturação de grãos; mas contrariamente é mais suscetível durante a fase reprodutiva. Assim, a manutenção de uma lâmina de água nessa fase do ciclo da cultura é fundamental para manter altas produtividades. Além disso, a intermitência da irrigação impede que alguns benefícios decorrentes de alterações químicas promovidas pela inundação do solo (aumento do pH e na disponibilidade de nutrientes) sejam atingidas em plenitude, devido à alternância nas condições de oxirredução.

De acordo com Zschornack et al. (2016), o efeito da irrigação intermitente sobre a produtividade do arroz é controverso, dado que períodos de ausência de lâmina de água na lavoura também podem resultar em manutenção ou, até mesmo, em incremento na produtividade da cultura, relativamente à inundação contínua, conforme constatado em estudos desenvolvidos por Zou et al., (2007); Moterle et al. (2013) e Tarlera (2016). Mas por outro lado, situações de redução na produtividade da cultura, como a observada no presente trabalho, também são possíveis (TOWPRAYOON et al, 2005; KUDO et al., 2014).

Vale destacar que a redução na produtividade do arroz devida à intermitência na irrigação é um efeito indesejado, especialmente nas condições de cultivo do Rio Grande do Sul, onde eventuais perdas de produtividade podem comprometer, ainda mais, a sustentabilidade da lavoura arrozeira, que já há alguns anos vem sendo penalizada pela baixa rentabilidade. De qualquer forma, essa opção de manejo da cultura não deve ser descartada, dado ao seu potencial de economizar água e mitigador de emissões de GEE. Assim, é importante, ao se considerar o efeito de sistemas de irrigação e manejos alternativos da água para o arroz, que esse seja avaliado com base em escala que associe a produtividade da cultura a esses demais fatores, particularmente o potencial mitigador de emissões de GEE, conforme indicado por van Groenigen et al. (2010) e Zschornack et al. (2016).

Tabela 5 - Produtividade de grãos de arroz em função do sistema de irrigação. Dados médios de três cultivares e duas populações de planta. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/20.

Sistema de irrigação	Produtividade de grãos
	kg ha ⁻¹
Inundação contínua	11.306 a
Inundação intermitente	10.046 b
CV (%)	6,1

Médias seguidas de mesma letra minúscula, nas colunas, e maiúscula, nas linhas, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (P<0,05).

A comparação entre as cultivares de arroz (Tabela 6) mostra que, na média de sistemas de irrigação e populações de planta, o desempenho produtivo das cultivares híbrida XP 113 e convencional BRS Pampa CL foi estatisticamente semelhante e superior ao da cultivar BRS 358, respectivamente. Este resultado é atribuído ao potencial produtivo desta cultivar (tipo japônica), que originalmente é menor que o das cultivares índicas XP 113 e BRS Pampa CL.

Tabela 6 - Produtividade de grãos (Prod.), esterilidade de espiguetas (Ester.), peso de 1000 grãos (P1000) e percentuais de grãos inteiros (Gr.int.) e quebrados (Gr.queb) das cultivares de arroz XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358. Dados médios de dois sistemas de irrigação e duas populações de planta. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/2020.

Cultivar	Prod.	Ester.	P1000	Gr. int.	Gr. queb.
	kg ha ⁻¹	%	g	----- % -----	
XP 113	11148 a	18,4 a	21,66 b	56,3 c	8,6 a
BRS Pampa CL	11348 a	11,1 c	22,67 a	58,7 b	7,2 b
BRS 358	9532 b	14,8 b	18,66 c	63,2 a	2,3 c
CV (%)	6,1	19,1	2	5,1	30

Médias seguidas de mesma letra minúscula, nas colunas, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (P<0,05).

A cultivar de arroz exerceu efeito, ainda, sobre as variáveis esterilidade de espiguetas, peso de 1000 grãos e rendimento de engenho (Tabela 6). Com relação à esterilidade de espiguetas, maior percentual foi determinado para o híbrido XP 113, seguido pela cultivar BRS 358, com desempenho intermediário, e, finalmente, pela 'BRS Pampa CL', com menor índice de esterilidade entre as cultivares avaliadas. A associação desse resultado ao de produtividade de grãos demonstra o

elevado potencial produtivo da cultivar BRS Pampa CL, que se destacou positivamente em ambos os aspectos, especialmente ao se considerar que os dados apresentados referem-se a valores médios oriundos dos sistemas de irrigação por inundação contínua e intermitente, este último com possibilidade de afetar o desempenho produtivo da cultura do arroz.

Com relação à variável peso de 1000 grãos, os valores decresceram na seguinte ordem: 'BRS Pampa CL' > 'XP 113' > 'BRS 358'. Vale destacar que se trata de uma variável fortemente associada às características genéticas das cultivares de arroz (Tabela 6). Esta variável foi influenciada, ainda, pela interação entre os fatores sistema de irrigação x população de planta. Independentemente da cultivar de arroz, quando cultivada sob menor população (150 plantas m⁻²), maior peso de grãos esteve associado ao cultivo sob inundação contínua, relativamente à inundação intermitente. Esse efeito não se verificou para a população de 300 plantas m⁻², para a qual não houve diferença no peso de grãos devido ao sistema de irrigação (Tabela 7).

Tabela 7 - Peso de mil grãos de arroz, em função do sistema de irrigação e da densidade de plantas. Embrapa Clima Temperado. Dados médios de três cultivares de arroz. Capão do Leão, RS Safra 2019/20.

População de planta	Sistema de irrigação	
	Inundação contínua	Inundação intermitente
	-----g ha ⁻¹ -----	
150 plantas m ⁻²	24,35 Aa	22,94 Ba
300 plantas m ⁻²	23,93 Aa	23,68 Ba

Médias seguidas de mesma letra maiúscula, nas linhas, e minúscula, nas colunas, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (P<0,05).

Por sua vez, maior rendimento de grãos inteiros foi obtido pela cultivar BRS 358, seguida pela 'BRS Pampa CL' e, finalmente, o híbrido XP 113. Neste particular destacam-se o elevado desempenho da cultivar japônica BRS 358 e o fato de a 'BRS Pampa CL' não ter expressado, no presente estudo, seu potencial de rendimento de inteiros, que, em média, é 62% (REUNIÃO..., 2018). Vários fatores podem ter determinado esse comportamento, dado que o rendimento de grãos inteiros é influenciado pelo genótipo, as condições ambientais durante o cultivo e o momento de colheita (JONGKAEWWATTANA; GENG, 2002; GHOSH et al., 2004;

SIEBENMORGEN; GRIGG; LANNING, 2013). Durante as fases de enchimento de grãos e de maturação, a temperatura média diária foi de 21,3°C e a precipitação média foi de 48,6 mm, variáveis que também podem ter contribuído para a redução de grãos inteiros das cultivares BRS Pampa CL e XP 113. Da mesma forma, a ocorrência de chuva na maturação faz com que os grãos absorvam água rapidamente, favorecendo a formação de fissuras (LONDERO et al., 2015), reduzindo o rendimento de grãos inteiros.

Blanche et al., (2009), ao avaliarem a interação genótipo x ambiente sobre o rendimento de grãos inteiros de arroz, verificaram que, independentemente da condição ambiental, as cultivares híbridas apresentaram menor rendimento de inteiros que as cultivares convencionais, atribuindo esse resultado ao tamanho da panícula, dado que os híbridos possuem panícula maior, dificultando o enchimento de grãos e prejudicando a uniformidade das características de qualidade de grãos inteiros (LONDERO et al., 2015; YANG; ZHANG, 2010).

6.4. Potencial de aquecimento global parcial em escala de rendimento de grãos (PAGp/RG)

Com base no índice estabelecido entre o potencial de aquecimento global parcial e a produtividade de grãos (PAGp/RG), verifica-se que, indistintamente entre cultivares de arroz e populações de planta, o sistema de irrigação por inundação intermitente foi superior quanto à mitigação das emissões de GEE e do PAGp da cultura do arroz, relativamente à inundação contínua, demonstrando que as perdas de produtividade, proporcionadas pelo estresse hídrico relativo dos ciclos de umedecimento e secagem do solo, foram integralmente compensadas, restando, ainda, saldo significativamente positivo quanto à redução do PAGp (Tabela 8).

Comparando-se as cultivares de arroz, verifica-se que o híbrido XP 113 destacou-se pelo maior potencial de mitigação de emissões e do PAGp, apresentando desempenho superior ao da cultivar BRS 358 sob ambos os sistemas de irrigação e populações de planta avaliados. O comportamento da 'BRS Pampa CL' equiparou-se ao do híbrido XP 113, quando cultivada sob menor população de planta (150 plantas m⁻²). Os resultados obtidos mostram que o elevado potencial produtivo da 'BRS Pampa' compensou, em condição específica, o potencial de emissão de GEE superior ao do híbrido XP 113, sendo, portanto, importante

considerar a possibilidade de cultivo sob densidades de semeadura inferiores à convencionalmente utilizada, como forma de otimizar sua performance sob os aspectos produtivo e ambiental. Por sua vez, a cultivar BRS 358 apresentou, de forma geral, maior índice PAGp/RG que as demais cultivares de arroz, o que é negativo, dado que indica que para um quilograma de arroz produzido, maior quantidade de GEE foi emitida (Tabela 7).

Para as cultivares convencionais, em ambos os sistemas de irrigação, e para o híbrido XP 133, exclusivamente sob inundação contínua, maior índice PAGp/RG esteve associado ao uso de maior população de planta, sugerindo que a maior população de planta seja um dos possíveis fatores determinantes do maior potencial de emissão de GEE associado ao cultivo de arroz. Porém, sob irrigação por inundação intermitente, a cultivar híbrida XP 113 não sofreu influência da densidade de plantas quanto ao índice PAGp/RG (Tabela 7).

Tabela 8 - Potencial de aquecimento global parcial em escala de rendimento de grãos (PAGp/RG), em função do sistema de irrigação, da cultivar de arroz e da população de planta. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2019/20.

Cultivar	Sistema de irrigação			
	Inundação contínua		Inundação intermitente	
	150 pl. m ⁻²	300 pl. m ⁻²	150 pl. m ⁻²	300 pl. m ⁻²
	----- kg CO ₂ equiv. kg ⁻¹ grãos -----			
XP 113	0,47 Abβ	0,53 Abα	0,13 Bbα	0,12 Bcα
BRS Pampa CL	0,51 Abβ	0,69 Aaα	0,17 Bbβ	0,27 Bbα
BRS 358	0,59 Aaβ	0,71 Aaα	0,22 Baβ	0,41 Baα

Médias seguidas de mesma letra maiúscula, nas linhas, ou grega, nas linhas para cada sistema de irrigação, e minúscula, nas colunas, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (P<0,05). Letras maiúsculas, minúscula e grega comparam, respectivamente sistemas de irrigação, cultivares de arroz e densidades de plantas.

7. Conclusões

As cultivares de arroz XP 113, BRS Pampa CL e BRS 358 proporcionam maior emissão sazonal de CH₄ e PAGp sob cultivo irrigado por inundação contínua, comparativamente à inundação intermitente.

O híbrido XP 113 apresenta menor potencial de emissão de CH₄ e PAGp que as cultivares convencionais BRS Pampa CL e BRS 358.

As emissões de CH₄ das cultivares de arroz irrigado aumentam proporcionalmente à população de planta.

As emissões sazonais de N₂O das cultivares de arroz são semelhantes, independentemente do sistema de irrigação e da população de planta.

A irrigação por inundação intermitente reduz o potencial produtivo das cultivares de arroz, em relação à inundação contínua.

O sistema de irrigação por inundação intermitente é mais efetivo que a inundação contínua em mitigar o índice PAGp em escala de rendimento de grãos da cultura do arroz.

O híbrido XP113 e a 'BRS Pampa CL', sob menor população de planta, apresentam maior potencial mitigador de emissões do PAGp em escala de rendimento de grãos que a 'BRS 358'.

Ambas as estratégias, manejo da água e o uso de cultivares com menor potencial de emissão de GEE, constituem-se em alternativas promissoras de mitigação do PAGp da lavoura de arroz irrigado.

Referências

- AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M. A.; BALBINOT JR, A. A. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 32, n. 6, p. 1073–1081, 2002.
- AULAKH, M. S.; BODENBENDER, J.; WASSMANN, R. RENNENBERG, H.. Methane transport capacity of rice plants. I. Influence of methane concentration and growth stage analyzed with an automated measuring system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 58, p. 357–366, 2000.
- AULAKH, M. S.; WASSMANN, R.; RENNENBERG, H. Methane emissions from rice fields - quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options. **Advances in Agronomy**, v. 70, p. 193–260, 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.
- BAYER, C.; MARCOLIN, E.; CAMARGO, E. S.; COSTA, F. D. S.; PEDROSO, G. M.; GOMES, J.; DE LIMA, M. A.; FRIGHETO, R. T. S.; ZSCHORMACK, T.; MACEDO, V, R. M. Yield-scaled greenhouse gas emissions from flood irrigated rice under long-term conventional tillage and no-till systems in a Humid Subtropical climate. **Field Crops Research**, v. 162, p. 60–69, 2014.
- BHATTACHARYYA, P.; DASH, P. K.; SWAIN, C. K.; PADHY, S. R.; ROY, K. S.; NEOGI, S.; BERLINER, J.; ADAK, T.; POKHARE, S. S.; BAIG, M. J.; MOHAPATRA, T. Mechanism of plant mediated methane emission in tropical lowland rice. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 84–92, 2019.
- BLANCHE, S. B.; UTOMO, H. S.; WENEFRIDA, I.; MYERS, G. O. Genotype x Environment Interactions of Hybrid and Varietal Rice Cultivars for Grain Yield and Milling Quality. **Crop Science**, v. 49, p. 2011–2018, 2009.
- BORTOLI, M.; KUNZ, A.; SOARES, H. M.; FILHO, P. B.; DA COSTA, R. H. R. Emissão de óxido nitroso nos processos de remoção biológica de nitrogênio de efluentes. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 1–6, 2012.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; de BARROS. M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. Pearson Prentice Hall, 2005.
- BUENDIA, L. V.; NEUE, H. U.; WASSMANN, R.; LANTIN, S.; JAVELLANA, A. M. Understanding the nature of methane emission from rice ecosystem as basis of mitigation strategies. **Applied Energy**. v. 56, p. 433–444. 1997.

BUSS, G. L. **Emissões de metano e óxido nitroso em cultivo de arroz irrigado por aspersão, alagamento contínuo e intermitente**. 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

BUSS, G. L. **Emissões de Metano e Óxido Nitroso em Sistemas de Cultivo em Terras Baixas sob Diferentes Manejos de Água, do Solo e da Cobertura Vegetal**. 2016. 123 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

CARLSON, K. M.; GERBER, J.S.; MUELLER, N. D.; HERRERO, M.; MACDONALD, G. K.; BRAUMAN, K. A.; HAVLIK, P.; O'CONNELL, C. S.; JOHNSON, J. A.; SAATCHI, S.; WEST, P. C. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 1, p. 63–68, 2017.

CARRIJO, D. R.; LUNDY, M. E.; LINQUIST, B. A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 203, p. 173–180, 2017.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; DE MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 2, p. 277–289, 2010.

CHAPUIS-LARDY, L.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J.; BERNOUX, M. Soils, a sink for N₂O? A review. **Global Change Biology**, v. 13, p. 1–17, 2007.

CHIDTHAISONG, A.; CHA-UN, N.; ROSSOPA, B.; BUDDABOON, C.; KUNUHAI, C.; SRIPHIROM, P.; TOWPRAYOON, S.; TOKIDA, T.; PADRE, A. T.; MINAMIKAWA, K. Evaluating the effects of alternate wetting and drying (AWD) on methane and nitrous oxide emissions from a paddy field in Thailand. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 64, n. 1, p. 31–38, 2018.

CHIRINDA, N., ARENAS, L., KATTO, M., LOAIZA, S., CORREA, F., ISTHITANI, M., Ana Maria LOBOGUERRERO, A. M.; MARTÍNEZ-BARÓN, D.; GRATEROL, E.; JARAMILLO, E.; TORRES, C. F.; ARANGO, M.; GUZMÁN, M.; AVILA, I.; HUBE, S.; KURTZ, D. B.; ZORRILLA, G.; TERRA, J.; IRISARRI, P.; TARLERA, S.; LA HUE, G.; SCIVITTARO, W. B.; NOGUERA, A.; BAYER, C. Sustainable and low greenhouse gas emitting rice production in latin america and the caribbean: a review on the transition from ideality to reality. **Sustainability**, v.10, n. 3, p. 671, 2018..

COLTRO, L.; MARTON, L. F. M.; PILECCO, F. P.; PILECCO, A. C.; MATTEI, L. F. Environmental profile of rice production in Southern Brazil: A comparison between irrigated and subsurface drip irrigated cropping systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 491–505, 2017.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2019/2020, N.9**, v. 7, 2020.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A cultura do arroz**. v. 182, 2015.

CORRÊA, N. I.; CAICEDO, N. L.; FEDDES, R.; LOUZADA, J. A. S.; BELTRAME, L. F. Consumo de água na irrigação do arroz por inundação. **Lavoura Arrozeira**, v. 50, n. 432, p. 3-8, 1997.

COSTA, F. D. S.; BAYER, C.; DE LIMA, M. A.; FRIGHETTO, R. T. S.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E. Variação diária da emissão de metano em solo cultivado com arroz irrigado no Sul do Brasil. **Ciencia Rural**, v. 38, n. 7, p. 2049–2053, 2008.

da COSTA, A. R.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. D. M.; MACHADO, P. D. A.; Bernardes, T. G.; da SILVEIRA, P. M. Uso do nitrogênio na agricultura e suas implicações na emissão do gás de efeito estufa óxido nitroso (N₂O). **Embrapa Arroz e Feijão-Documentos 249**, 2009.

COUNCE, P. A.; 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.

DA SILVA, L. S.; GRIEBELER, G.; MOTERLE, D. F.; BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; POCOJESKI, E. Dinâmica da emissão de metano em solos sob cultivo de arroz irrigado no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 2, p. 473–481, 2011.

DENMEAD, O. T.; RAUPACH, M. R. Methods for Measuring Atmospheric Gas Transport in Agricultural and Forest Systems. In: HARPER, L.A. *et al.* (ed). **Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change**. Madison: ASA, CSSA e SSSA (ASA Spec. Publ. 55), p.19-43, 1993.

DUBEY, S. K. Microbial ecology of methane emission in rice agroecosystem: A review. **Applied ecology and environmental research**, v. 3, n. 2, p. 1–27, 2005.

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.

FENG, J.; DENG, A.; CHEN, C.; ZHENG, C.; ZHANG, W.; ZHANG, Y.; SONG, Z. Impacts of cropping practices on yield-scaled greenhouse gas emissions from rice fields in China: A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 164, p. 220–228, 2013.

GE, H. X.; ZHANG, H. S.; ZHANG, H. CAI, X. H.; SONG, Y.; KANG, L. The characteristics of methane flux from an irrigated rice farm in East China measured using the eddy covariance method. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 249, p. 228–238, 2018.

GHOSH, M.; MANDAL, B. K.; MANDAL, B. B.; LODH, S. B.; DASH, A. K. The effect of planting date and nitrogen management on yield and quality of aromatic rice (*Oryza sativa*). **Journal of Agricultural Science**, v. 142, p. 183–191, 2004.

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, n. 1, p. 36–44, 2009.

GROHS, M.; BAYER, C.; DA SILVA, L. S.; GIACOMINI, S. J. **A lavoura arrozeira, bem conduzida, contribui para reduzir a emissão de gases de efeito estufa.** Circular Técnica. Nº 3. IRGA, Instituto Rio Grandense de Arroz. 2020.

GUO, J.; ZHOU, C. Greenhouse gas emissions and mitigation measure in Chinese agroecosystems. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 142, p. 270-277, 2007.

HADI, A.; INUBUSHI, K.; YAGI, K. Effect of water management on greenhouse gas emissions and microbial properties of paddy soils in Japan and Indonesia. **Paddy Water Environment**, v. 8, p. 319-324, 2010.

HOU, A. X.; CHEN, G. X.; WANG, Z. P.; van CLEEMPUT, O.; PATRICK JR, W. H. Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice Field in Relation to Soil Redox and Microbiological Processes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. June 1998, p. 2180–2186, 2000.

HUSSAIN, S.; PENG, S.; FAHAD, S.; KHALIG, A.; HUANG, J.; CUI, K.; NIE, L. Rice management interventions to mitigate greenhouse gas emissions: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 5, p. 3342–3360, 2015.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The physical science basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.** 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2020.

ISLAM, M. R.; SIDDIQUE, I. A.; ALI, M. H.; ISLAM, M.R.; MAHMUD, A. A. Rice genotypic variation in methane emission patterns under irrigated culture. **Fundamental and Applied Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 1, 2018a.

ISLAM, S. F.; GROENIGEN, J. W.; JENSEN, L. S.; SANDER, B. O.; DE NEERGAARD, A. The effective mitigation of greenhouse gas emissions from rice paddies without compromising yield by early-season drainage. **Science of the Total Environment**, v. 612, p. 1329–1339, 2018b.

JIANG, Y.; QIAN, H. Y.; HUANG, S.; ZHANG, X. Y.; WANG, L.; ZHANG, L.; SHEN, M. X.; XIAO, X. P.; CHEN, F.; ZHANG, H. L.; LU, C. Y.; LI, C.; ZHANG, J.; DENG, A. X.; van GROENIGEN, K. J.; ZHANG, W. J. Acclimation of methane emissions from rice paddy fields to straw addition. **Science Advances**, v. 5, eaau9038, 2019.

JIANG, Y.; van GROENIGEN, K. J.; HUANG, S.; HUNGATE, B. A.; van KESSEL, C.; HU, S. J.; ZHANG, J.; WU, L. H.; YAN, X. J.; WANG, L. L.; CHEN, J.; HANG, X. N.; ZHANG, Y.; HORWATH, W. R.; YE, R. Z.; LINQUIST, B. A.; SONG, Z. W.; ZHENG, C. Y.; DENG, A. X.; ZHANG, W. J. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars. **Global Change Biology**, v. 23, p. 4728-4738, 2017.

JOHNSON-BEEBOUT, S. E. J.; ANGELES, O.; ALBERTO, M. C. R.; BURESH, R. J. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soils is improbable due to redox potential changes with depth in a greenhouse experiment without plants. **Geoderma**, v. 149, n. 1–2, p. 45–53, 2009.

JONGKAEWWATTANA, S.; GENG, S. Non-Uniformity of Grain Characteristics and Milling Quality of California Rice (*Oryza sativa* L.) of Different Maturities. **Journal of Agronomy & Crop Science**, v. 188, n. 3, p. 161–167, 2002.

KHAPRE, A.; JAISWAL, A.; RENA; KUMAR, S. Utilizing the Greenhouse Effect as a Source to Produce Renewable Energy. **Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials**, p. 1–9, 2019.

KLUDZE, H. K.; DELAUNE, R. D.; PATRICK, W. H. Aerenchyma Formation and Methane and Oxygen Exchange in Rice. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 2, p. 386–391, 1993.

KÖGEL-KNABNER, I.; AMELUNG, W.; CAO, H.; FIEDLER, S.; FRENZEL, P.; JAHN, R.; KALBITZ, K.; KOLBL, A.; SCHOLOTER, M. Geoderma Biogeochemistry of paddy soils. **Geoderma**, v. 157, n. 1–2, p. 1–14, 2010.

KUDO, Y.; NOBORIOM K.; SHIMOOZONO, N.; KURIHARA, R. Tje effective water management practice for mitigating greenhouse gas emissions and maintaining rice yield in central Japan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 186, p. 77-85, 2014.

LAAKSO, T. A.; SCHRAG, D. P. Methane in the Precambrian atmosphere. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 522, p. 48–54, 2019.

LAGOMARSINO, A.; AGNELLI, A. E.; LINQUIST, B.; ADVIENTO-BORBE, M. A.; AGNELLI, A.; GAVINA, G.; RAVAGLIA, S.; FERRARA, R. M. Alternate Wetting and Drying of Rice Reduced CH₄ Emissions but Triggered N₂O Peaks in a Clayey Soil of Central Italy. **Pedosphere**, v. 26, n. 4, p. 533–548, 2016.

LAHUE, G. T.; CHANEY, R. L.; BORBEC, M. A. A.; LINQUISTA, B. A. Alternate wetting and drying in high yielding direct-seeded rice systems accomplishes multiple environmental and agronomic objectives. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 229, p. 30–39, 2016.

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.

LIAO, P.; SUN, Y.; JIANG, Y.; ZENG, Y.; WU, Z.; HUANG, S. Hybrid rice produces a higher yield and emits less methane. **Plant, Soil and Environment**, v. 65, n. 11, p. 549-555, 2019.

LIMA, M. A. *et al.* **Emissão de Metano em Sistemas de Produção de Arroz Irrigado: Quantificação e Análise.** Ministério da Ciência e Tecnologia e EMBRAPA, Relatório técnico, 2008.

LIMA, M.A.; PESOA, M.C.P.Y.; VILELLA, O.V. **Emissão de metano em cultivo de arroz irrigado por inundação.** In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.93-140, 2013.

LINQUIST, B.; GROENIGEN, K. J. V.; ADVIENTO-BORBE, M. A.; PITTELKOW, C.; KESSEL, C. V. 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, n. 4, p. 906–913, 2010.

LONDERO, G. P.; MARCHESAN, E.; PARISOTTO, E.; COELHO, L. L.; SOARES, C. F.; DA SILVA, A. L.; ARAMBURU, B. B. Qualidade industrial de grãos de arroz decorrente da supressão da irrigação e umidade de colheita. **Irriga**, v. 20, n. 3, p. 587–601, 2015.

LU, Y.; WASSMAN, R.; NEUE, H. U.; HUANG, C.; BUENO, C. S. Response of methanogenesis in anaerobic rice soils to exogenous substrates. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 1683–1690, 2000.

MA, K. E.; QIU, Q.; LU, Y. Microbial mechanism for rice variety control on methane emission from rice field soil. **Global Change Biology**, v. 16, n. 11, p. 3085–3095, 2010.

MA, Y.; WANG, J.; ZHOU, W.; YAN, X.; XIONG, Z. Greenhouse gas emissions during the seedling stage of rice agriculture as affected by cultivar type and crop density. **Biology and Fertility of Soils**, v. 48, n. 5, p. 589–595, 2012.

MAJUMDAR, D. Past, present and future of nitrous oxide emission from rice fields: a treatise. Cap. 3. In: LIVINGSTON, J. V (eds). **Trends in Air Pollution Research.** Nova Science Publishers, Inc, cap. 3, p. 53-130, 2005.

MALYAN, S. K.; BHATIA, A.; KUMAR, A.; GUPTA, D. K.; SINGH, R.; KUMAR, S. S.; TOMER, R.; KUMAR, O.; JAIN, N. Methane production, oxidation and mitigation: A mechanistic understanding and comprehensive evaluation of influencing factors. **Science of the Total Environment**, v. 572, p. 874–896, 2016.

MITRA, S.; AULAKH, M. S.; WASSMANN, R.; OLK, D. C. Triggering of methane production in rice soils by roots exudates: effects of soil properties and crop management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 563-570, 2005.

MITRA, S.; JAIN, M. C.; KUMAR, S.; BANDYOPADYAY, S. K.; KALRA, N. Effect of rice cultivars on methane emission. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 73, n. 3, p. 177–183, 1999.

MOSCÔSO, J. S. C. **Efluxo de metano relacionado com ácidos orgânicos no solo e carbono de exsudados radiculares no cultivo do arroz irrigado**. 2018. 126f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MOSIER, A. R. Chamber and isotope techniques. In: ANDREAE, M.O. & SCHIMEL, D.S., ed. **Exchange of traces gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere: report of the Dahlem Workshop**. Berlin, Wiley, p. 175-187, 1989.

MOTERLE, D. F. **Efluxo de metano em solo sob manejos de irrigação e cultivares de arroz irrigado**. 2011. 146f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MOTERLE, D. F.; SILVA, L. S.; MORO, V. J.; BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; AVILA, L. A. de; BUNDT, A. C. Methane efflux in rice paddy field under diferente irrigation managements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 431-437, 2013.

NELSON, A.; WASSMANN, R.; SANDER, B. O.; PALAO, L. K. Climate-Determined Suitability of the Water Saving Technology “alternate Wetting and Drying” in Rice Systems: A Scalable Methodology demonstrated for a Province in the Philippines. **Plos One**, v. 10, n. 12, p. 1–19, 2015.

NETO, E. R. S. **Perdas de nitrogênio pela emissão de óxido nitroso (N₂O) e sua relação com a decomposição da serapilheira e biomassa de raízes na floresta de Mata Atlântica**. 2008. 80f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo, Piracicaba.

NEUE, H. U. Fluxes of methane from rice fields and potential for mitigation. **Soil Use and Managemeta**, v. 13, p. 258–267, 1997.

O'MARA, F. P. The role of grasslands in food security and climate change. **Annals of Botany**, v. 110, n. 6, p. 1263–1270, 2012.

OO, A. Z.; SUDO, S.; INUBUSHI, K.; CHELLAPPAN, U.; YAMAMOTO, A.; ONO, K.; MANO, M.; HAYASHIDA, S.; KOOTHAN, V.; OSAWA, T.; TERAU, Y.; PALANISAMY, J.; PALANISAMY, E.; VENKATACHALAM, R. Mitigation potential and yield-scaled global warming potential of early-season drainage from a rice paddy in Tamil Nadu, India. **Agronomy**, v. 8, n. 10, 2018.

PITTELKOW, C. M.; ADVIENTO-BORBE, M. A.; HILL, J. E.; SIX, J.; van KEASSEL, C.; LINQUIST, B. Yield-scaled global warming potential of annual nitrous oxide and

methane emissions from continuously flooded rice in response to nitrogen input. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v. 177, p. 10-20, 2013.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, v. 24, p. 29–96, 1972.

PORTELA, M. G. T.; LEITE, L. F. C. Emissões de GEE pela agricultura: O caso dos cultivos de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, 2016.

REDDY, K. R.; DELAUNE, R. D. **Biogeochemistry of wetlands: science and applications**. CRC press, 2008.

REDDY, P. P. Causes of Climate Change. In: **CLIMATE Resilient Agriculture for Ensuring Food Security**. India: Springer, p. 17-26, 2015.

REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 32., Farroupilha-RS. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Cachoeirinha: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2018, 205 p.

ROBERTSON, G. P.; GROFFMAN, P. M. Nitrogen transformations. In: PAUL, E. A. **Soil microbiology, ecology and biochemistry**. ed. 4. Academic Press, Burlington, Massachusetts, USA, p. 421-446, 2015.

ROGERS, C. W.; BRYE, K. R.; SMARTT, A. D.; NORMAN, R. J.; GBUR, E. E.; EVANS-WHITE, M. A. Cultivar and previous crop effects on methane emissions from drill-seeded, delayed-flood rice production on a silt-loam soil. **Soil Science**, v. 179, n. 1, p. 28–36, 2014.

SAMPAIO, C. A. P.; NÄÄS, I. A.; SALGADO, D. D. Amônia, gás sulfídrico, metano e monóxido de carbono na produção de suínos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 5, p. 156–164, 2006.

SEEG – **Sistema de estimativas de emissões de gases de efeito estufa**. 2018. Disponível em: < <http://seeg.eco.br/>> Acesso em 25 de julho de 2020.

SETYANTO, P; BAKAR, R. A. Methane emission from paddy fields as influenced by diferente water regimes in central Java. **Indonesian Journal of Agricultural Science**, v. 6, p. 1-9, 2005.

SCIVITTARO, W. B.; BUSS, G. L.; SOUSA, R. O.; SILVEIRA, A. D.; FARIAS, M. de O. **Emissões anuais de metano e de óxido nitroso em terras baixas: efeito do método de irrigação para o arroz**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2015. 33 p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 236).

SIEBENMORGEN, T. J.; GRIGG, B. C.; LANNING, S. B. Impacts of Preharvest Factors During Kernel Development on Rice Quality and Functionality. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 4, p. 101–115, 2013.

SILVA, L. S.; SOUSA, R. O.; POCOJESKI, E. Dinâmica da matéria orgânica em ambientes alagados. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F.A.O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008, v. 1, p. 525-543.

SIMMONDS, M. B.; ANDERS, M.; ADVIENTO-BORBE, M. A.; KESSEL, C. V.; MCCLUNG, A.; LINQUIST, B. A. Seasonal Methane and Nitrous Oxide Emissions of Several Rice Cultivars in Direct-Seeded Systems. **Journal of Environment Quality**, v. 44, n. 1, p. 103, 2015.

SINGH, S.; SINGH, J. S.; KASHYAP, A. K. Contrasting pattern of methane flux in rice agriculture. **Naturwissenschaften**, v. 85, p. 494–497, 1998.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J.; REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v. 54, n. 4, p. 779–791, 2003.

SNYDER, C. S.; BRUULSEMA, T.; JENSEN, T. L.; FIXEN, P. E. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 133, p. 247–266, 2009.

SOUSA, R. O.; VAHL, L. C.; OTERO, X. L. Química de Solos Alagados. In: MELLO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e Mineralogia do Solo**. Parte II – Aplicações. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 485-528, 2009.

SOUZA, V. F.; ENRICH-PRAST, A. Óxido nitroso (N₂O) em ambientes aquáticos continentais: produção, fatores reguladores e fluxos de diferentes ambientes. **Oecologia Australis**, v. 16, n. 2, p. 311–329, 2012.

STEINMETZ, S.; PETRINI, J. A.; ALMEIDA, I. R. de; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. de; FAGUNDES, P. R. R.; DEIBLER, A. N.; RADIN, B.; PRESTES, S. D.; SILVA, M. F. da; BERMUDEZ, D. A. **Uso do método de graus-dia para estimar a data de ocorrência dos principais estádios de desenvolvimento de subgrupos de cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. Partes 1 e 2 (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 205).

STONE, L. F. **Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005.

STRECK, E.V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 3 ed. revista e ampliada. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR. p. 251. 2018.

TANG, J.; WANG, J.; LI, Z.; WANG, S.; QU, Y. Effects of irrigation regime and nitrogen fertilizer management on CH₄, N₂O and CO₂ emissions from saline–alkaline paddy fields in Northeast China. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 2, 2018.

TARLERA, S.; CAPURRO, M. C.; IRISARRI, P.; SCAVINO, A. F.; CANTOU, G.;

ROEL, A. Yield-scaled global warming potential for two irrigation management systems in a highly productive system. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 1, p. 43-50, 2016.

TOWPRAYOON, S.; HARVEY, N. W.; JITTASATRA, O.; KERDCHUCHEAN, O. Influence of rice variety and soil type on production and emission of methane from rice fields. **Asian Journal of Energy Environment**, v. 1, p. 251-262, 2000.

TOWPRAYOON, S.; SMAKGAHN, K.; POONKAEW, S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. **Chemosphere**, v. 59, p. 1547–1556, 2005.

TYAGI, L.; KUMARI, B.; SINGH, S. N. Water management - A tool for methane mitigation from irrigated paddy fields. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 5, p. 1085–1090, 2010.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **This Report Contains Assessments of Commodity and Trade Issues Made by Usda Staff and Not Necessarily Statements of Official US Government Policy**. 2018. Disponível em: <<http://www.usdabrazil.org.br/pt-br/reports/grain-and-feed-annual-2018.pdf>>. Acesso em: 6 jun. 2020.

VAHL, L. C.; SOUSA, R. O. Aspectos físico-químicos de solos alagados. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Cap.4, p. 97-118.

van GROENIGEN, J. W.; VELTHOF, G. L.; OENEMA, O.; van GROENIGEN, K. J.; van KESSEL, C. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. **European Journal of Soil Science**, v. 61, p. 903-913, 2010.

WASSMANN, R.; NEUE, H. U.; BUENO, C.; LANTIN, R. S.; ALBERTO, M. C. R.; BUENDIA, L. V.; BRONSON, K.; PAPAN, H.; RENNENBERG, H. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates. **Plant and Soil**, v. 203, p. 227–237, 1998

WASSMANN R., NEUE H.U., LANTIN R.S., MAKARIM K., CHAREONSILP N., BUENDIA L.V., RENNENBERG H. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia II. Differences among irrigated, rainfed and deepwater ecosystems. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, v. 58 p. 13–22, 2000.

WESZ, J. **Mitigação das emissões de metano e óxido nitroso no cultivo de arroz irrigado em Planossolo sob diferentes manejos da água**. 2012. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

XIONG, Z. Q.; XING, G. X.; ZHU, Z. L. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen. **Pedosphere**, v. 17, n. 2, 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.

- YANG, J.; ZHANG, J.. Grain-filling problem in 'super' rice. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 1, p. 1–5, 2010.
- YU, K.; BOHME, F.; RINKLEBE, J.; NEUE, H. U.; DeLAUNE, R. D. Major biogeochemical processes in soils: a microcosmo incubation from reducing to oxidizing conditions. **Soil Science Society of America Journal**, V. 71, p. 1406-1417, 2007.
- YU, K.; PATRICK JUNIOR, W. H. Redox window with minimum global warming potential contribution from rice soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 2086-2091, 2004.
- YUAN, Y. E.; DAI, X.; WANG, H. Fertilization effects on CH₄, N₂O and CO₂ fluxes from a subtropical double rice cropping system. **Plant, Soil and Environment**, v. 65, n. 4, p. 189–197, 2019.
- YUN, J.; YU, Z.; LI, K.; ZHANG, H. Diversity, abundance and vertical distribution of methane-oxidizing bacteria (methanotrophs) in the sediments of the Xianghai wetland, Songnen Plain, northeast China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 1, p. 242-252, 2012.
- ZANATTA, J. A. **Emissão de óxido nitroso afetada por sistemas de manejo do solo e fontes de nitrogênio**. 2009. 79f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ZHANG, G.; JI, Y.; MA, J.; XU, H.; CAI, Z.; YAGI, K. Intermittent irrigation changes production, oxidation, and emission of CH₄ in paddy fields determined with stable carbon isotope technique. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 52, p. 108–116, 2012.
- ZHANG, G.; ZHANG, X.; MA, J.; XU, H.; CAI, Z. Effect of drainage in the fallow season on reduction of CH₄ production and emission from permanently flooded rice fields. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, n. 1, p. 81–91, 2011.
- ZHANG, X.; YIN, S.; LI, Y.; ZHUANG, H.; LI, C.; LIU, C. Comparison of greenhouse gas emissions from rice paddy fields under different nitrogen fertilization loads in Chongming Island, Eastern China. **Science of the Total Environment**, v. 472, p. 381–388, 2014.

Anexos

Anexo 1 - Quadro da ANOVA da variável emissão sazonal de CH₄ do cultivo de arroz para os fatores sistema de irrigação, cultivar e população de planta.

Efeito	GL	SQ	QM	F calculado
Irrigação	1	146916.9167	146916,91674	143.3636*
Cultivar	2	8800.9836	4400,49182	4.2941*
População de plantas	1	7743.4533	7743,45326	7.5562*
Irrigação x Cultivar	2	1469.8782	734,9391	0.7172
Irrigação x População de plantas	1	120.7229	120,72295	0.1178
Cultivar x População de plantas	2	2046.7721	1023,38604	0.9986
Irrigação x Cultivar x População de plantas	2	459.0274	229,51369	0.224
Repetição	2	2717.2104	1358,60521	1.3257
Resíduo	22	22545.2832	1024.7856	
Total	33	192820.2479		
CV (%)	25,23			

Anexo 2 - Quadro da ANOVA da variável emissão sazonal de N₂O do cultivo de arroz para os fatores sistema de irrigação, cultivar e população de planta.

Efeito	GL	SQ	QM	F calculado
Irrigação	1	0.00896	0,00896	0.0612
Cultivar	2	0.36740	0,1837	1.2546
População de plantas	1	0.34056	0,34056	2.3259
Irrigação x Cultivar	2	0.03995	0,01998	0.1364
Irrigação x População de plantas	1	0.12805	0,12805	0.8745
Cultivar x População de plantas	2	0.31811	0,15905	1.0863
Irrigação x Cultivar x População de plantas	2	0.39835	0,19918	1.3603
Repetição	2	0.08548	0,04274	0.2919
Resíduo	22	3.22127	0.14642	
Total	33	4.90812		
CV (%)	371,19			

Anexo 3 - Quadro da ANOVA da variável PAGp do cultivo de arroz para os fatores sistema de irrigação, cultivar e população de planta.

Efeito	GL	SQ	QM	F calculado
Irrigação	1	169101589.68	169101589,6784	134.257*
Cultivar	2	10099218.11	5049609,05694	4.0091*
População de plantas	1	10022292.03	10022292,03424	7.9571*
Irrigação x Cultivar	2	1691656.71	845828,35315	0.6715
Irrigação x População de plantas	1	71254.15	71254,14787	0.0566
Cultivar x População de plantas	2	2865951.36	1432975,67816	1.1377
Irrigação x Cultivar x População de plantas	2	790349.84	395174,91773	0.3137
Repetição	2	2850696.64	1425348,31839	1.1316
Resíduo	22	27709793.89	1259536.08585	
Total	33	225202802.40		
CV (%)	25,83			

Anexo 4 - Quando da ANOVA da variável produtividade de grãos de arroz para os fatores sistema de irrigação, cultivar e população de planta.

Efeito	GL	SQ	QM	F calculado
Irrigação	1	2.379133x10 ⁷	23791325.4	
Cultivar	2	3.964524x10 ⁷	19822619.31667	
População de plantas	1	5.226667x10 ¹	52.26667	1e-04
Irrigação x Cultivar	2	5.284011x10 ⁵	264200.55	0.631
Irrigação x População de plantas	1	2.861040x10 ⁶	2861040.06667	6.8326
Cultivar x População de plantas	2	1.095598x10 ⁶	547799.01667	1.3082
Irrigação x Cultivar x População de plantas	2	5.375170x10 ⁵	268758.51667	0.6418
Repetição	4	3.127102x10 ⁶	781775.55833	
Resíduo	44	1.842422x10 ⁷	418732.24924	
Total	55	9.001049x10 ⁷		
CV (%)	6,06			

Anexo 5 - Quadro da ANOVA da variável esterilidade de espiguetas para os fatores sistema de irrigação, cultivar e população de planta.

Efeito	GL	SQ	QM	F calculado
Irrigação	1	17.52083	17.52083	2.2024
Cultivar	2	428.04167	214.02083	26.9033*
População de plantas	1	58.52083	58.52083	7.3563*
Irrigação x Cultivar	2	40.29167	20.14583	2.5324
Irrigação x População de plantas	1	0.18750	0.1875	0.0236
Cultivar x População de plantas	2	40.54167	20.27083	2.5481
Irrigação x Cultivar x População de plantas	2	3.12500	1.5625	0.1964
Repetição	3	7.72917	2.57639	0.3239
Resíduo	33	262.52083	7.95518	
Total	44	858.47917		
CV (%)	19,1			

Anexo 6 - Quadro da ANOVA da variável peso de 1000 grãos para os fatores sistema de irrigação, cultivar e população de planta.

Efeito	GL	SQ	QM	F calculado
Irrigação	1	6.53425	6.53425	24.7532*
Cultivar	2	139.00795	69.50398	263.2963*
População de plantas	1	0.25375	0.25375	0.9613
Irrigação x Cultivar	2	0.03575	0.01788	0.0677
Irrigação x População de plantas	1	3.19817	3.19817	12.1154*
Cultivar x População de plantas	2	0.31958	0.15979	0.6053
Irrigação x Cultivar x População de plantas	2	0.18611	0.09306	0.3525
Repetição	3	1.15626	0.38542	1.4601
Resíduo	33	8.71122	0.26398	
Total	44	159.40305		
CV (%)	2,45			

Anexo 7 - Quadro da ANOVA da variável grãos inteiros para os fatores sistema de irrigação, cultivar e população de planta.

Efeito	GL	SQ	QM	F calculado
Irrigação	1	11.26667	11.26667	1.2398
Cultivar	2	489.43333	244.71667	26.9301*
População de plantas	1	35.26667	35.26667	3.881
Irrigação x Cultivar	2	17.43333	8.71667	0.9592
Irrigação x População de plantas	1	0.60000	0.6	0.066
Cultivar x População de plantas	2	16.03333	8.01667	0.8822
Irrigação x Cultivar x População de plantas	2	0.30000	0.15	0.0165
Repetição	3	33.76667	8.44167	0.929
Resíduo	44	399.83333	9.08712	
Total	55	1003.93333		
CV (%)	5,08			

Anexo 8 - Quadro da ANOVA da variável grãos quebrados para os fatores sistema de irrigação, cultivar e população de planta.

Efeito	GL	SQ	QM	F calculado
Irrigação	1	5.40000	5.4	1.6588
Cultivar	2	437.73333	218.86667	67.2339*
População de plantas	1	4.26667	4.26667	1.3107
Irrigação x Cultivar	2	8.40000	4.2	1.2902
Irrigação x População de plantas	1	0.26667	0.26667	0.0819
Cultivar x População de plantas	2	5.73333	2.86667	0.8806
Irrigação x Cultivar x População de plantas	2	0.13333	0.06667	0.0205
Repetição	3	16.76667	4.19167	1.2876
Resíduo	44	143.23333	3.2553	
Total	55	621.93333		
CV (%)	29,9			

Anexo 9 - Quadro da ANOVA da variável PAG/RG para os fatores sistema de irrigação, cultivar e população de planta.

Efeito	GL	SQ	QM	F calculado
Irrigação	1	1.96497	1.96497	2601.7174*
Cultivar	2	0.30231	0.15116	200.1375*
População de plantas	1	0.16974	0.16974	224.7438*
Irrigação x Cultivar	2	0.00566	0.00283	3.7499*
Irrigação x População de plantas	1	0.00405	0.00405	5.3657*
Cultivar x População de plantas	2	0.05098	0.02549	33.7485*
Irrigação x Cultivar x População de plantas	2	0.01748	0.00874	11.5726*
Repetição	3	0.00392	0.00098	1.2964
Resíduo	44	0.03323	0.00076	
Total	55	2.55235		
CV (%)	6,86			