

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 e Estoques de Carbono em
Planossolo Cultivado com Arroz Irrigado: Efeito dos Sistemas de Preparo
do Solo e de Rotação de Culturas**

Camila Lemos Lacerda

Pelotas, 2020

Camila Lemos Lacerda

Emissões de Gases de Efeito Estufa e Estoques de Carbono do Solo em Planossolo Cultivado com Arroz Irrigado: Efeito do Sistema de Preparo do Solo e de Rotação de Culturas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área de conhecimento: Manejo e Conservação do Solo e da Água).

Orientadora: Pesquisadora Dr^a. Walkyria Bueno Scivittaro
Coorientador (es): Professor Dr. Rogério Oliveira de Sousa
Professora Dr^a. Rosa Maria Vargas Castilhos

Pelotas, 2020.

Camila Lemos Lacerda

Emissões de Gases de Efeito Estufa e Estoques de Carbono do solo em Planossolo Cultivado com Arroz Irrigado: Efeito do Sistema de Preparo do Solo e de Rotação de Culturas

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: 31 de julho de 2020.

Banca examinadora:

Dra Walkyria Bueno Scivittaro (Orientadora)
Doutora em Ciências pela Universidade de São Paulo

Dra. Thais Antolini Veçozzi
Doutora em Ciências pela Universidade Federal de Pelotas

Profª. Dra. Flavia Fontana Fernandes
Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

L131e Lacerda, Camila Lemos

Emissões de gases de efeito estufa e estoques de carbono em planossolo cultivado com arroz irrigado: efeito dos sistemas de preparo do solo e de rotação de culturas / Camila Lemos Lacerda ; Walkyria Bueno Scivittaro, orientadora ; Rogério Oliveira de Sousa, Rosa Maria Vargas Castilhos, coorientadores. — Pelotas, 2020.

99 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. Solos - Metano - Carbono - Óxido nitroso. 2. Arroz irrigado. 3. Rotação de culturas. 4. Panossolo. I. Scivittaro, Walkyria Bueno, orient. II. Sousa, Rogério Oliveira de, coorient. III. Castilhos, Rosa Maria Vargas, coorient. IV. Título.

CDD : 632.4

Dedico este trabalho aos meus pais Valdir e Viviane.

Agradecimentos

A Deus, pela minha vida, pela minha família e pelas oportunidades que tem colocado no meu caminho.

Aos meus pais Valdir e Viviane, pelo amor, carinho, apoio, compreensão e esforços para que eu alcançasse meus objetivos, meu eterno obrigada.

À minha orientadora, Pesquisadora Dra. Walkyria Bueno Scivittaro, pela oportunidade, confiança, contribuições e orientação desde a iniciação científica.

Aos Professores coorientadores, Dr. Rogério Oliveira de Sousa e Dra. Rosa Maria Vargas Castilhos, pela disponibilidade e contribuições para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa, e aos demais professores do PPG MACSA, que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água (PPG MACSA), pelas condições para a realização do curso de mestrado.

À Embrapa Clima Temperado, pela concessão de área experimental e financiamento da pesquisa, e à equipe do Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição Vegetal, pela amizade e colaboração, em especial a Denoir e Paulo, pela ajuda nas coletas de amostras.

Àqueles que dividiram comigo todos os momentos deste período – meu irmão Rafael, por ser minha fonte de mansuetude, ao meu namorado Sérgio, por sempre me incentivar pessoal e profissionalmente, às minhas avós Ely e Eva, minha madrinha Andréia, meus amigos e demais familiares, por todo apoio e torcida.

Aos colegas do PPG MACSA, pelo companheirismo e convivência, em especial aos que ingressaram comigo no mestrado em 2018/1, também ao Anderson e Thais, pela ajuda nas coletas e por transmitirem seus conhecimentos, à Yasmin, que me auxiliou quando eu precisei e ao estagiário Eltiéres, pela colaboração incansável em todas etapas de coletas e análises.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

A todos os demais que, de alguma forma contribuíram, para a consolidação do mestrado.

Muito obrigada!

“Ontem passado.

Amanhã futuro.

Hoje agora.

Ontem foi.

Amanhã será.

Hoje é.

Ontem experiência adquirida.

Amanhã lutas novas.

Hoje, porém, é a nossa hora de fazer e de construir.”

(Francisco Cândido Xavier)

Resumo

LACERDA, Camila Lemos. **Emissões de Gases de Efeito Estufa e Estoques de Carbono do solo em Planossolo cultivado com arroz irrigado: efeito do sistema de preparo do solo e de rotação de culturas**. 2020. 99f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

A diversificação de culturas, com a inserção de cultivos de sequeiro em rotação ao arroz irrigado, tem crescido em interesse nas terras baixas do Rio Grande do Sul, favorecendo a adoção do sistema plantio direto, em substituição ao preparo convencional do solo. A rotação do arroz irrigado com cultivos de sequeiros apresenta potencial mitigador de emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente o CH₄, por reduzir o período em que o solo é mantido inundado. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de sistemas de rotação de culturas e de preparo do solo sobre os fluxos e emissões totais de CH₄ e N₂O, o potencial de aquecimento global parcial (PAGp), a relação entre PAGp e rendimento de grãos (PAGp/RG) (estudo 1), e os estoques de carbono do solo e suas frações (estudo 2) em um Planossolo Háplico cultivado com arroz irrigado. No estudo 1, os tratamentos incluíram as combinações de dois sistemas de preparo do solo (convencional – SC e plantio direto – PD) e quatro sistemas de rotação culturas (arroz-arroz-arroz-arroz; soja-soja-soja-arroz; sorgo-sorgo-milho-arroz e soja-sorgo-soja-arroz). Utilizou-se o método da câmara estática fechada para coleta dos GEE. As avaliações foram feitas durante a entressafra 2018 e safra agrícola 2018/2019. Na safra, o monocultivo de arroz sob SC emitiu mais N₂O que em PD, enquanto que o inverso ocorreu para a rotação soja-soja-soja-arroz. Maior emissão de CH₄ ocorreu para as rotações arroz-arroz-arroz-arroz e soja-soja-soja-arroz sob SC, em relação ao PD. O PAGp da safra respondeu pela maior parte das emissões anuais de GEE de todos os tratamentos. A rotação arroz-arroz-arroz-arroz/SC apresentou maior relação PAGp/RG que as demais rotações e sistema de preparo. Conclui-se que a inserção de culturas de sequeiro em rotação ao arroz irrigado em terras baixas apresenta potencial mitigador das emissões de CH₄ nos períodos de safra e entressafra, mas potencializa as emissões de N₂O e o PAGp na entressafra. O sistema PD reduz o PAGp em Planossolo cultivado com arroz irrigado. No estudo 2, os tratamentos incluíram as combinações dos sistemas de preparo do solo SC e PD, e das rotações de culturas arroz-arroz-arroz-arroz e sorgo-sorgo-milho-arroz. Realizou-se o fracionamento físico da matéria orgânica para determinação dos estoques total e das frações de C do solo. As avaliações foram realizadas em pré-semeadura e pós-colheita do arroz, na quarta fase desses sistemas de rotação de culturas. O monocultivo de arroz apresentou maior estoque de C orgânico total (COT) em comparação à rotação sorgo-sorgo-milho-arroz em ambas as épocas. Na pré-semeadura do arroz, o sistema PD proporcionou maior estoque de COT e Carbono Associado aos Minerais (CAM). Em pós-colheita, porém, o sistema PD reduziu reservas de COT sob monocultivo de arroz; efeito contrário ocorreu na rotação sorgo-sorgo-milho-arroz.

Palavras-chave: terras baixas, carbono, metano, óxido nitroso, arroz irrigado, rotação de culturas, sistema convencional, plantio direto.

Abstract

LACERDA, Camila Lemos. **Greenhouse gases emissions and Soil Carbon Stocks from a Planossolo cultivated with irrigated rice: influence of soil tillage system and crop diversification.** 2020. 99p. Thesis (Master degree) – Graduate Program in Management and Conservation of Soil and Water. Federal University of Pelotas, Pelotas.

The interest on crop diversification including rainfed crops in rotation to irrigated rice has grown in the Lowlands of Rio Grande do Sul, favoring the adoption of no-tillage systems, replacing conventional tillage. Irrigated rice rotation with rainfed crops present potential to mitigate greenhouse gases (GHG) emissions, especially CH₄, as it reduces the period the soil is kept flooded. This study aimed to evaluate the influence of crop rotation and soil tillage systems on CH₄ and N₂O fluxes and cumulative emissions, partial Global Warming Potential (pGWP), Yield-scaled GHG (study 1), and soil carbon stocks and its fractions (study 2) in a Planossolo Háplico (typic Albaqualf) cultivated with irrigated rice. In study 1, treatments included combination of two soil tillage systems (conventional – CT and no-tillage NT) and four crop rotation systems (rice-rice-rice-rice; soybean-soybean-soybean-rice; sorghum-sorghum-maize-rice and soybean-sorghum-soybean-rice). Air was sampled during the drained non-rice season 2018 and during the flooded rice-growing season 2018/2019, using the static closed chamber method. During the rice-growing season, rice-rice-rice-rice system under CT emitted more N₂O in relation to NT, while the reverse occurred for soybean-soybean-soybean-rice rotation. During the rice-growing season, higher CH₄ emissions occurred for rice-rice-rice-rice and soybean-soybean-soybean-rice rotations under CT, in comparison to NT. The rice-growing season pGWP accounted for most of annual GHG emissions from all treatments. The pGWP/grain yield index of rice/rice/rice/rice/CT was higher than the other rotations and tillage systems. In conclusion, introducing rainfed crops in rotation to irrigated rice in Lowlands has potential to mitigate CH₄ emissions from both periods, but enhances N₂O emission and pGWP from the non-rice season; NT reduces pGWP from a Planossolo cultivated with irrigated rice. In study 2, treatments included combinations of conventional tillage (CT) and no-tillage (NT) systems; and rice-rice-rice-rice and sorghum-sorghum-maize-rice crop rotation. Physical fractionation of organic matter was performed to determine total and C content in fraction stocks. The evaluations were carried out in pre-sowing and post-harvest of rice, in the fourth phase of two crop rotation systems. Rice-rice-rice-rice system provided higher total C stock, compared to sorghum-sorghum-maize-rice, regardless of the evaluation period. In pre-sowing, NT system presented greater total C and non-labile C. However, in the post-harvest period, NT system reduced total C stocks from rice-rice-rice-rice system whereas increased for sorghum-sorghum-maize-rice rotation.

Key-words: lowlands, carbon, methane, nitrous oxide, irrigated rice, crop rotation, conventional tillage, no tillage.

Lista de Figuras

- Figura 1.** Sistema coletor de amostras de GEE do tipo câmara estática fechada, composto por base (a), câmara/topo (b) e extensor (c).....35
- Figura 2.** Precipitação pluviométrica e fluxos de N_2O em Planossolo na entressafra 2018 e safra 2018/2019, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. N = adubação nitrogenada na entressafra; 1º N = primeira aplicação de N em cobertura; 2º N = segunda aplicação de N em cobertura.40
- Figura 3.** Precipitação pluviométrica e fluxos de CH_4 em Planossolo na entressafra 2018 e safra 2018/2019, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. N = adubação nitrogenada entressafra; 1º N = primeira aplicação de N em cobertura; 2º N = segunda adubação de N em cobertura; Sup. Irrigação = supressão da irrigação da lavoura de arroz e colheita de arroz.....43
- Figura 4.** Potencial de aquecimento global parcial em Planossolo na (a) entressafra 2018 e na (b) safra 2018/2019, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS.55
- Figura 5.** (a) Contribuição dos gases CH_4 e N_2O e dos (b) períodos de entressafra 2018 e safra 2018/2019 para o Potencial de Aquecimento Global parcial anual (Entressafra 2018 + Safra 2018/2019) de Planossolo em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS.58
- Figura 6.** Coleta de amostras de solo indeformadas com auxílio de anéis volumétricos para a determinação da densidade do solo.....64
- Figura 7.** Coleta de amostras de solo deformadas com auxílio de pá de corte para determinação dos conteúdos do carbono orgânico total e do carbono orgânico particulado.....65

Lista de Tabelas

- Tabela 1.** Descrição dos sistemas de rotação de culturas e de preparo do solo, destacando os tratamentos avaliados na safra 2018/2019.....32
- Tabela 2.** Informações gerais do experimento com a descrição das principais práticas culturais e épocas de realização para a cultura de arroz irrigado..... 34
- Tabela 3.** Emissões totais de N₂O de Planossolo na entressafra 2018, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS.....46
- Tabela 4.** Emissões totais de N₂O em Planossolo cultivado com arroz irrigado, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2018/2019.....48
- Tabela 5.** Emissões anuais de N₂O em Planossolo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Entressafra 2018 e Safra 2018/201949
- Tabela 6.** Emissões totais de CH₄ em Planossolo na entressafra 2018 e na Safra 2018/2019, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. 51
- Tabela 7.** Emissões anuais totais de CH₄ em Planossolo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado, RS. Entressafra 2018 e Safra 2018/201952
- Tabela 8.** Potencial de aquecimento global parcial de Planossolo na entressafra 2018 e na Safra 2018/2019, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS54
- Tabela 9.** Potencial de aquecimento global parcial anual de Planossolo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio

direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Entressafra 2018 e safra 2018/201957

Tabela 10. Rendimento de Grãos (RG) de arroz e relação entre o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) e RG, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2018/2019.....59

Tabela 11. Densidade do solo (Ds) de Planossolo em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado, RS. Dados relativos a avaliações realizadas em pré-semeadura (outubro/2018) e pós-colheita (março/2019) da quarta fase do sistema de rotação de culturas.....67

Tabela 12. Estoques de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono associado aos minerais (CAM) de diferentes camadas de solo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Dados relativos a avaliação realizada em pré-semeadura (outubro/2018) da quarta fase do sistema de rotação de culturas.....69

Tabela 13. Estoques de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico partícula (COP) e carbono associado aos minerais (CAM) em diferentes camadas de solo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Dados relativos a avaliação realizada em pós-colheita (março/2019) da quarta fase do sistema de rotação de culturas.....73

Sumário

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1.	Emissões de GEE e a agricultura	16
2.2.	Mecanismos de produção e emissão de GEE em arroz irrigado	18
2.2.1.	Metano (CH ₄).....	18
2.2.2.	Óxido Nitroso (N ₂ O).....	20
2.3.	Influência da rotação de culturas e do sistema de preparo do solo nas emissões de CH ₄ e N ₂ O em arroz irrigado	22
2.3.1.	Sistemas de preparo do solo	22
2.3.2.	Rotação de Culturas.....	25
2.4.	Influência da rotação de culturas e do sistemas de preparo do solo nos estoques de carbono do solo das terras baixas	26
2.4.1.	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo	27
3.	HIPÓTESES	29
4.	OBJETIVOS.....	29
4.1.	Geral	29
4.2.	Específicos.....	29
5.	CAPÍTULO 1: EMISSÕES DE METANO E ÓXIDO NITROSO EM PLANOSSOLO CULTIVADO COM ARROZ IRRIGADO: INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE ROTAÇÃO DE CULTURAS E DE PREPARO DO SOLO.....	30
5.1.	Introdução.....	30
5.2.	Material e Métodos.....	32
5.2.1.	Caracterização da área experimental e manejo da cultura do arroz.....	32
5.2.2.	Coleta de amostras e avaliação de emissões de gases de efeito estufa.....	34
5.3.	Resultados e Discussão.....	37
5.3.1.	Fluxos de N ₂ O do solo.....	37
5.3.2.	Fluxos de CH ₄ do solo	42
5.3.3.	Emissões totais de N ₂ O do solo	46

5.3.4. Emissões totais de CH ₄ do solo.....	49
5.3.5. Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) e relação PAGp/rendimento de grãos (PAGp/RG).....	52
5.4. Conclusões	60
6. CAPÍTULO 2: ESTOQUES DE CARBONO EM SOLO CULTIVADO COM ARROZ IRRIGADO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E DE ROTAÇÃO DE CULTURAS.....	61
6.1. Introdução.....	61
6.2. Material e Métodos.....	63
6.3. Resultados e Discussão.....	66
6.4. Conclusões	75
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

1. INTRODUÇÃO GERAL

A intensificação do uso de recursos naturais e o aumento populacional mundial são motivos de preocupação sobre o equilíbrio e manutenção dos ecossistemas. Por essa razão, questões ambientais como as relacionadas às mudanças climáticas se tornaram tema de estudo das mais diversas áreas de pesquisas. Quando tem suas concentrações atmosféricas intensificadas, os Gases de Efeito Estufa (GEE) como o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e o dióxido de carbono (CO₂), se tornam responsáveis por tais mudanças, apesar de serem emitidos tanto por fontes naturais quanto antropogênicas (IPCC, 2014).

A expressão “Efeito Estufa”, frequentemente utilizada com conotação negativa, refere-se a um fenômeno natural de aquecimento da atmosfera e necessário para a manutenção da vida terrestre. Todavia, a partir do século passado, a intensificação de determinadas atividades antrópicas promoveu um aumento na emissão de GEE, o que está sendo relacionada ao aumento da temperatura global e mudanças climáticas mundiais (IPCC, 2007). Dentre as atividades antrópicas intensificadoras da emissão destes gases, a queima de combustível fóssil e a mudança do uso da terra se caracterizam como as maiores fontes capazes de impulsionar a concentração de CO₂, enquanto que o acréscimo na concentração de CH₄ e N₂O está relacionado, principalmente, a determinadas práticas agrícolas (IPCC, 2013). No Brasil, a atividade agropecuária e as associadas a mudanças no uso da terra contribuem com mais de 70% da emissão de GEE (SEEG, 2019). É, entretanto, neste setor, que se encontram as opções menos onerosas para a mitigação de emissão destes gases, estando, diversas vezes, em conformidade com políticas de desenvolvimento sustentável.

Os ecossistemas naturais são diversas vezes impactados pela expansão e intensificação dos sistemas de produção agropecuário, repercutindo nos ciclos de carbono (C) e do nitrogênio (N), de tal forma que a adoção de práticas agrícolas, associadas em muitas ocasiões à falta de preocupação com a conservação dos recursos naturais, provoca perdas de C dos solos e intensifica a emissão dos principais gases causadores de efeito estufa. Todavia, ao mesmo tempo que é uma das maiores fontes de emissão de GEE, o setor agrícola desempenha duplo papel no contexto das mudanças climáticas por possuir

potencial de sequestrar C da atmosfera e armazenar no solo (ADEWALE et al., 2018; LI et al., 2019). Logo, este setor oferece, também, opções diversas para mitigação das emissões, uma vez que as variações das emissões estão relacionadas a diversos fatores, tais como a espécie cultivada, as práticas agrícolas empregadas e fatores ambientais (HAYASHI et al., 2015). Devido a isto, o setor agrícola é visado como importante alvo com potencial de mitigar a emissão antropogênica de CH₄ e N₂O.

O arroz (*Oryza sativa* L) é um dos principais alimentos de grande parte da população mundial (GRISP, 2013). No Brasil, destaca-se o cultivo na região Sul do país, especialmente no estado do Rio Grande do Sul, onde em 59% da área são produzidos 70,5% da produção nacional do cereal (CONAB, 2019). Neste estado, são cultivados anualmente mais de 1 milhão de hectares de arroz irrigado preponderantemente no sistema irrigado por inundação contínua do solo (Reunião..., 2018).

O alagamento contínuo do solo forma um ambiente anaeróbico, que promove uma série de alterações no solo que são favoráveis à produção de arroz, porém, é condição fundamental para a produção e emissão de CH₄ (LE MER e ROGER, 2001). Por outro lado, as emissões de N₂O associadas ao cultivo de arroz irrigado por inundação contínua do solo são pouco representativas e, embora os sistemas de arroz também emitam N₂O, as emissões de CH₄ representam aproximadamente 90% do potencial de aquecimento global nos sistemas de arroz irrigado (LINQUIST et al., 2012).

Nas áreas de terras baixas do Rio Grande do Sul, o cultivo intensivo de arroz irrigado sob sistema convencional de preparo do solo acarretou em diversos problemas técnicos e econômicos, como a ocorrência de plantas daninhas, quedas de produtividade e aumento de custo de produção (ANDRES et al., 2001; BRYE, 2003). Há alguns anos, o preparo antecipado do solo (cultivo mínimo) vem sendo adotado, bem como a inserção de culturas de sequeiros em rotação ao arroz irrigado. A adoção de sistemas conservacionistas e a rotação de culturas nas lavouras de arroz irrigado, contribuem com a sustentabilidade dos sistemas de produção (BALBINO et al., 2012), pois aumentam os teores de matéria orgânica do solo (MOS), a estabilidade do solo (SIX et al., 2000; HILL et al., 2016), e reduzem o estabelecimento de plantas daninhas (ANDRES et al., 2001). Entretanto, os solos das terras baixas apresentam características de

drenagem natural deficiente, favorecendo a alternância entre períodos de secagem e umedecimento do solo que podem determinar comportamentos desconhecidos nas emissões de GEE e nos estoques de carbono do solo em sistemas com a inserção de culturas de sequeiros em rotação ao arroz irrigado.

Tendo em vista a importância socioeconômica da cultura do arroz e a necessidade de estabelecer manejos ambientalmente sustentáveis, o presente trabalho visou a avaliação do efeito de sistema de preparo do solo e de rotação de culturas sobre as emissões de CH_4 e N_2O e o estoque de carbono do solo em cultivo de arroz irrigado em terras baixas do Rio Grande do Sul.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Emissões de GEE e a agricultura

O “efeito estufa natural” é essencial para a vida no planeta, uma vez que os GEE mantêm a temperatura média na superfície terrestre em torno de 15°C (BAIRD, 2002). Os GEE são emitidos naturalmente pelos solos e encontrados naturalmente na atmosfera. A partir da revolução industrial, a emissão destes gases vem aumentando pela intensificação da atividade humana. Vários são os GEE, mas os mais importantes são CO₂, CH₄ e N₂O e estão diretamente relacionados com a agricultura (IPCC, 2014).

As concentrações de CO₂, CH₄ e N₂O aumentaram, mundialmente, cerca de 40%, 150% e 20%, respectivamente, de 1950 até 2011 (IPCC, 2013). A concentração atmosférica de CH₄ e N₂O, apresentavam, respectivamente, níveis pré-industriais de 722 e 270 ppb, evoluindo para 1.330 ppb de CH₄ e 324 ppb de N₂O (MYHRE et al., 2013). Em 2010 as emissões antrópicas de GEE atingiram 49 Gt CO₂ eq.ano⁻¹ e, apesar da atual busca em mitigar as emissões destes gases intensificadores do efeito estufa, verificou-se incremento de 2,2% de 2000 a 2010, em média 1 Gt CO₂ eq.ano⁻¹, quando entre 1970 e 2000 este incremento correspondia a apenas 1,3% (IPCC, 2014). Mundialmente, a agricultura juntamente com a mudança de uso da terra contribuem com aproximadamente 21% das emissões de GEE (4-5 Gt CO₂eq) (TUBIELLO et al., 2014).

Em nível nacional, a atividade agropecuária foi responsável por 24% das emissões de GEE do País em 2017 (SEEG, 2019). Dentre as atividades agropecuárias, o cultivo de arroz irrigado, associado à altas emissões de CH₄ (YAN et al., 2009), emite em torno de 2,5% das emissões do setor agropecuário (SEEG, 2019). Já a emissão de N₂O é favorecida, principalmente, pelo aporte de nitrogênio via adubação mineral e orgânica do solo (ADVIENTO-BORBE et al., 2013).

Segundo projeções da FAO (2009), em 2050 a população mundial atingirá 9 bilhões, estimando aumento necessário de 40% na produção de arroz até o ano de 2030 (FAO, 2009b). Visto que a oferta não atenderá à demanda com a taxa atual de aumento do rendimento dos grãos (GRASSINI et al., 2013), os investimentos feitos para alcançar esse aumento na produção de arroz, podem, infelizmente, acarretar num aumento nas emissões de CH₄ e N₂O. Importante

ressaltar também que, em 2009, o Governo Brasileiro assumiu o compromisso voluntário, através da instituição da Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC), de reduzir as emissões projetadas para 2020 entre 36,1% e 38,9% de GEE (MCTI, 2014).

No estado do Rio Grande do Sul cerca de 68% das emissões de GEE são provenientes do setor agropecuário (PACE RS, 2011) as quais contam principalmente com a contribuição do CH_4 e do N_2O . Na região, o cultivo de arroz é importante para a economia local e se emprega o regime de irrigação por alagamento contínuo do solo para o cultivo deste cereal (Reunião..., 2016). Este manejo é apontado como uma das maiores fontes produtoras e emissoras de CH_4 (SILVA et al., 2008) devido às condições anóxicas do solo. Já as emissões de N_2O nesse sistema de cultivo ocorrem em menor escala (LINQUIST et al., 2012). Entretanto, a aplicação de fertilizantes nitrogenados pode acarretar em picos de emissão de N_2O logo após o alagamento do solo, visto que ocorre a alteração das condições de oxirredução e estimulação dos processos produtores deste gás (LI et al., 2009).

Os GEE apresentam distintos efeitos no balanço energético da Terra e diferente tempo de permanência na atmosfera e, portanto, têm participações diferentes no que tange as mudanças climáticas. Utiliza-se, para efeitos de comparação, o Potencial de Aquecimento Global (PAG) como base métrica comum. O PAG é medido em equivalente de CO_2 e calculado, comumente, em horizonte temporal de 100 anos (MYHRE et al., 2013). Logo, se comparadas às emissões de CO_2 , as emissões de CH_4 e N_2O são relativamente menores, contudo, o PAG do CH_4 e do N_2O é maior do que o CO_2 (IPCC, 2013). O PAG é avaliado e atualizado regularmente pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC).

Nesse sentido, é de fundamental importância que a sociedade acadêmica desenvolva técnicas e manejos agrícolas com potencial de mitigar a emissão de GEE e capazes de atenuar impactos negativos sobre as condições climáticas e de ecossistemas, e, ao mesmo tempo, que não comprometam a produtividade.

2.2. Mecanismos de produção e emissão de GEE em arroz irrigado

Os gases CH_4 e N_2O são produzidos como resultado de processos microbianos que ocorrem nos solos e seus fluxos dependem de muitos fatores, tais como teor de água, temperatura ambiente, temperatura do solo, microbiota do solo, propriedades físicas do solo, práticas de manejo e características da planta de arroz (NEUE et al., 1997; SMITH et al., 2003; HAYASHI et al., 2015).

O arroz é uma planta adaptada ao ambiente aquático, devido à presença de aerênquimas que permitem a circulação de gases no interior da planta. Em consequência, as plantas de arroz servem como vias de liberação de gás para o meio ambiente (NOUCHI et al., 1990). Além disso, o cereal é um dos principais alimentos e fonte de energia de grande parte da população mundial, e o seu cultivo representa o maior uso de solo para alimentação (GRISP, 2013). Assim, a produção de arroz continua sendo a maior fonte de emissão de CH_4 em um único setor e representa 18% da emissão total provinda da agricultura (CIAIS et al., 2013).

Nas regiões de Terras Baixas, como as encontradas no Rio Grande do Sul, predominam solos com condições de hidromorfismo, combinadas a uma baixa fertilidade natural e limitações físicas (PINTO et al., 2004). Estas características dificultam a implementação de uma agricultura diversificada e tem, portanto, como principal atividade agrícola o cultivo de arroz irrigado por inundação contínua do solo (ANGHINONI et al., 2004; VEDELAGO et al. 2012).

O alagamento do solo para o cultivo de arroz, e a manutenção da lâmina de água provocam alterações químicas, físicas e biológicas no solo. Assim, o ambiente observado é distinto daquele anterior à inundação da área (SOUSA et al., 2009), e a emissão de CH_4 é favorecida (LE MER e ROGER, 2001).

Em lavouras de arroz irrigado, os fluxos de CH_4 e N_2O apresentam variações expressas pelo balanço entre produção, oxidação e transporte destes GEE para a atmosfera (NEUE et al., 1997; BRADFORD et al., 2001).

2.2.1. Metano (CH_4)

O CH_4 tem potencial de absorção de radiação 34 vezes maior que o CO_2 (IPCC, 2013), e é considerado, dentre os gases de origem antrópica, o segundo

em importância (IPCC, 2007). Suas emissões são estimadas entre 50 a 65% das emissões antropogênicas totais de GEE (IPCC, 2013).

De maneira geral, o CH_4 é produto final da decomposição de carbono orgânico em ambientes alagados (PONNAMPERUMA, 1972). Sua produção depende da condição do solo, pois este pode atuar como dreno em condições aeróbicas, através da oxidação do CH_4 a CO_2 (WANG e INESON, 2003), ou como fonte de CH_4 para atmosfera através da metanogênese em solos anaeróbicos (LE MER e ROGER, 2001).

Em ambientes que apresentam pouca ou nenhuma disponibilidade de oxigênio (O_2), torna-se favorável a proliferação de microrganismos anaeróbicos, que, em substituição ao O_2 , utilizam outros compostos inorgânicos oxidados do solo como receptores de elétron, resultando na redução do solo (PONNAMPERUMA, 1972). Esses microrganismos seguem uma ordem preferencial de substratos e utilizam inicialmente o N do NO_3^- , seguido do Mn^{4+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} e, por fim, reduzem o CO_2 à CH_4 (NEUE, 1977; SILVA et al., 2008; BINI et al., 2016).

Após, com aceptores inorgânicos menos disponíveis, a microbiota anaeróbica utiliza compostos orgânicos como receptores de elétrons. A metanogênese – produtora de CH_4 – envolve processos complexos e dinâmicos (STAMS e PLUGGE et al., 2010), que por meio da fermentação formam acetato, CO_2 e H_2 , utilizados como substrato por metanogênicos para a produção de CH_4 (REDDY e DELAUNE, 2008). Conforme se intensifica a decomposição anaeróbica mediada por metanogênicos, maior é a concentração de substâncias reduzidas no solo, menor o potencial redox (Eh), e mais favorável ainda se torna a emissão de CH_4 para atmosfera (PONNAMPERUMA, 1972).

Nesse sentido, as plantas de arroz desempenham papel decisivo tanto na produção de CH_4 , fornecendo substrato para os metanogênicos produtores deste GEE (WATANABE et al., 1999; TOKIDA et al., 2011), quanto na emissão dos gases para atmosfera (NOUCHI et al. 1990).

O CH_4 produzido a partir da metanogênese utiliza o C orgânico dos exsudatos radiculares, da palha remanescente e da própria matéria orgânica (WATANABE et al., 1999). Os restos vegetais do cultivo de arroz são importante fonte de C orgânico no início do período de desenvolvimento da planta, enquanto que os exsudatos, por outro lado, aumentam em importância conforme o avanço

do ciclo e a proximidade com a senescência da planta, quando aumenta a quantidade de C disponível (TOKIDA et al., 2011).

O regime hídrico e as alterações orgânicas são, portanto, os principais determinantes da magnitude das emissões de CH₄. Em consequência, uma das formas mais eficientes para mitigar a emissão deste GEE da lavoura de arroz é a diminuição do período de alagamento do solo, uma vez que a entrada de O₂ neste ecossistema estimula a oxidação de CH₄ e impede a sua produção (WASSMANN et al, 2000).

Há três meios de transporte para o CH₄ chegar a atmosfera. A principal delas é através dos aerênquimas da planta (WATANABE et al., 1994; DAS e BARUAH, 2008), que contribui com cerca de 80-90% dos fluxos de CH₄ em lavouras de arroz (CONRAD, 2009). O CH₄ também chega à atmosfera, através da difusão molecular, mas em menor proporção devido à baixa solubilidade em água, e pela ebulição do CH₄ em forma de bolhas (YAN et al., 2000; GREEN, 2013).

É importante ressaltar que em solos alagados existem duas zonas oxidadas: a camada superficial do solo e a rizosfera (LEE et al., 2014), onde atuam as metanotróficas que oxidam o CH₄ (EVANS et al., 2019). Assim, o CH₄ não está apenas sendo produzido, mas também consumido nas zonas aeróbicas antes de escapar para atmosfera (REDDY e DELAUNE, 2008). Logo, a emissão deste gás é resultado da diferença entre a produção pelos metanogênicos e o consumo pelas metanotróficas (HAYASHI et al., 2015).

2.2.2. Óxido Nitroso (N₂O)

O N₂O apresenta potencial de absorção de radiação 298 vezes maior que o CO₂ (IPCC, 2007). Embora suas emissões sejam numericamente menores que os outros GEE, ele é um dos principais contribuintes para o atual aquecimento global, sendo considerado um dos principais GEE. Estima-se que 65 a 80% das emissões totais de N₂O resultam direta ou indiretamente de atividades agrícolas (HOUGHTON et al., 2001), e sua concentração na atmosfera continua a crescer devido ao aumento no uso de fertilizantes nitrogenados (ADVIENTO-BORBE et al., 2013; BUTTERBACH-BAHL et al., 2013), demonstrando a importância de estudar o N₂O.

O N_2O do solo é principalmente um subproduto da nitrificação e um produto intermediário da desnitrificação. Estes processos estão associados e o N_2O é são produzidos em sua maioria por processos biológicos do solo (BREMNER, 1997), realizados por microrganismos heterotróficos que usam os compostos da matéria orgânica como fonte de energia (ROBERTSON e GROFFMAN, 2015). O início do processo ocorre com a mineralização do N orgânico à sua forma inorgânica amônio (NH_4^+) ou com a adição de fertilizante nitrogenados. O NH_4^+ pode ser prontamente absorvido pelas plantas ou então, em ambiente aeróbico, oxidado à nitrito (NO_2^-) por ação das *Nitrossomonas* sp., e convertido à nitrato (NO_3^-) pela ação das *Nitrobacter* sp. no processo de nitrificação do solo (BAGGS e PHILIPPOT, 2010). Após, em condições de anaerobiose, ocorre a desnitrificação em que o NO_3^- é reduzido à N_2 e, quando essa conversão não é completa (ROBERTSON e GROFFMAN, 2015), gera os gases NO e N_2O como produtos intermediários, que são perdidos para a atmosfera (VAHL e SOUSA, 2004). Em ambiente onde proliferam os organismos responsáveis pela desnitrificação, ou seja, em condições de baixa ou nula disponibilidade de O_2 e valores de Eh baixos, estudos mostram que a maior parte do N_2O produzido é reduzida imediatamente a N_2 (NISHIMURA et al., 2004; BUTTERBACH-BAHL et al., 2013).

Em terras agrícolas, a desnitrificação é de grande importância e a principal fonte de N_2O para atmosfera (BUTTERBACH-BAHL et al., 2013; ROBERTSON e GROFFMAN, 2015), além de ser etapa em que o N é retornado para atmosfera, fechando o ciclo global de N.

Assim, devido às condições de alagamentos do solo, lavouras de arroz irrigado praticamente não emitem N_2O (ADVIENTO-BORBE et al. 2013). Entretanto, quando há alternância entre secagem e umedecimento do solo (ZOU et al., 2005), devido a irrigação intermitente, eventos de chuvas intensas durante o período de entressafra (ZHENG et al., 2000), ou até mesmo no início de estabelecimento de lâmina da água, observam-se picos de emissão deste gás, assim como no final da safra devido à supressão da irrigação na lavoura (XIONG et al., 2007). Também, pelo fato de a água conter uma quantidade substancial de O_2 dissolvido, imediatamente após a irrigação, pode ocorrer o processo de nitrificação que gera uma quantidade significativa de nitrato. Posteriormente, em

condições anaeróbicas, o N_2O pode ser produzido como produto intermediário da desnitrificação (MAJUMDAR, 2005).

Em sistemas de cultivo de arroz irrigado por alagamento, a emissão de N_2O para atmosfera, assim como o CH_4 , pode ocorrer através dos aerênquimas das plantas de arroz (REDDY e DELAUNE, 2008).

2.3. Influência da rotação de culturas e do sistema de preparo do solo nas emissões de CH_4 e N_2O em arroz irrigado

O cultivo de arroz em terras baixas ocorre, tradicionalmente, associado à pecuária de corte, onde o cereal é cultivado em monocultura por até duas safras consecutivas e, após, dá lugar ao período de pousio, principalmente devido às limitações fitossanitárias. Durante o pousio, estabelece-se então, a pecuária extensiva. Este binômio arroz/pecuária é de grande importância para a segurança alimentar brasileira, entretanto, enfrenta problemas de preservação do solo, eficiência do uso de recurso, disseminação de plantas daninhas – principalmente o arroz vermelho -, emissão de GEE e queda de produtividade (SANTOS, 2015; CARLSON et al., 2016; THEISEN et al., 2017). Este sistema de monocultivo de arroz irrigado ao longo dos anos, e principalmente o período de pousio, têm despertado interesse dos produtores que almejam um maior aproveitamento do potencial agrícola das terras baixas, através da adoção de manejos como a implementação da diversificação de culturas. A rotação com cultivos de sequeiro tem possibilitado, inclusive, a adoção de preparo reduzido do solo como o cultivo mínimo e o plantio direto.

2.3.1. Sistemas de preparo do solo

Os sistemas de preparo do solo utilizados para o cultivo do arroz no Rio Grande do Sul são o cultivo mínimo, preparo convencional, pré-germinado e plantio direto (Reunião..., 2018). Tradicionalmente, nas terras baixas do Rio Grande do Sul, era utilizado o sistema convencional como manejo do solo na produção de arroz irrigado. Entretanto, a partir de 1980, esse sistema vem sendo substituído por outros em parte das lavouras do Estado, representando, apenas, 30% da área cultivada na safra de 2016/2017 (Reunião..., 2018).

No sistema convencional ocorre o revolvimento das camadas superficiais do solo, com objetivo de reduzir a compactação, incorporar corretivos, resíduos

vegetais, eliminar plantas daninhas e favorecer a emergência e o desenvolvimento inicial das plantas de arroz (Reunião..., 2018).

Por questões técnicas e econômicas, o sistema convencional de preparo do solo tem sido substancialmente substituído no estado do Rio Grande do Sul pelo cultivo mínimo, também conhecido como preparo antecipado do solo, onde há considerável redução na movimentação do solo. Este sistema fundamenta-se no preparo do solo logo após a colheita do arroz em condição de umidade do solo adequada, evitando a necessidade de várias operações de preparo. A movimentação do solo é reduzida e realizada imediatamente após a colheita do arroz ou durante o inverno, permitindo o estabelecimento de cobertura do solo (espontânea ou cultivada) durante o inverno. Esse manejo permite a semeadura da cultura do arroz ou de outras espécies estivais cultivadas em rotação em semeadura direta sobre a cobertura de solo na primavera seguinte (Reunião..., 2018).

Em decorrência das características de inundação contínua do solo para o cultivo de arroz irrigado, a colheita mecanizada do cereal é comumente realizada em condições de solo úmido, provocando distúrbios no solo e desmanche de taipas (Reunião..., 2016). Todavia, quando se insere rotação de culturas em terras baixas, o arroz é semeado sobre resteva de uma cultura de sequeiro que foi colhida em solo com pouco ou nenhuma umidade acarretando, conseqüentemente, em menor desestruturação do solo. Esse manejo proporciona ao sistema de plantio direto características mais semelhante as de terras altas. Destaca-se a semeadura direta do arroz sobre restos de culturas de verão como a soja, sorgo ou milho e as pastagens de inverno. Além disso, a adoção deste sistema é uma alternativa para elevar a sustentabilidade dos sistemas de produção em terras baixas, influenciar a produtividade de grãos, interferir nas emissões de CH_4 e N_2O e na dinâmica de C e N (WELLER et al. 2015).

No sistema Plantio Direto, a palha remanescente de cultivos anteriores e da vegetação espontânea é fonte de C orgânico disponível. Como a produção de CH_4 depende não apenas das condições de alagamento do solo, mas também da quantidade deste C orgânico disponível presente, as práticas de manejo e os sistemas de culturas adotados determinam o potencial de incorporação de C ao solo e de emissões de CH_4 (SCIVITTARO et al., 2015).

Em condições de solos aerados, predomina a oxidação do CH_4 sobre a metanogênese, que também pode ocorrer em microsítios aeróbicos (KHALIL et al., 2004). Entretanto, os resultados obtidos quanto a emissão de GEE nestes diferentes manejos do solo tem sido diversos.

Nayak et al. (2013) verificaram que a redução na perturbação do solo em sistemas de cultivo de arroz podem acarretar em menores emissões de GEE. Neste sentido, Bayer et al. (2014) concluíram que a incorporação do resíduo vegetal em sistemas de produção de arroz irrigado sob preparo convencional acarretou em acréscimos nas emissões de CH_4 . Os mesmos autores também verificaram que a manutenção de resíduos vegetais sobre a superfície do solo, em virtude da adoção do sistema de plantio direto, resulta em maior formação de CO_2 do que CH_4 durante a decomposição da biomassa vegetal. Diversos outros autores verificaram que o plantio direto tende a ser uma maneira eficiente de minimizar as perdas de C nas formas de CO_2 e CH_4 (COSTA et al., 2005; FANGUEIRO et al., 2017) e, inclusive, apresentam potencial de sequestrar C atmosférico (COSTA et al., 2005). Contrariamente, Conrad (2002) obteve resultado onde o cultivo de arroz irrigado em sistema de plantio direto sobre resteva de azevém potencializou as emissões de CH_4 do solo. Da mesma forma, Scivittaro et al. (2016) obtiveram 55% e 85% maiores emissões de CH_4 e N_2O , respectivamente, em plantio direto sobre resteva de azevém. Assim, as emissões de GEE determinadas decorrem da quantidade de material orgânico lábil, das características do resíduo vegetal, das condições do solo avaliado, umidade do solo, disponibilidade de O_2 , práticas de fertilização (MILLAR e BAGGS, 2004; CHEN et al., 2013; HAYASHI et al., 2015).

A adoção do plantio direto pode também proporcionar maior alternância nas condições de oxirredução do solo ocasionando aumento da atividade microbiana do solo e dos processos de nitrificação e desnitrificação (GRANLI e BOCKMAN, 1994) e acarretar em maiores emissões de N_2O (SMITH e CONEN 2004; ZHANG et al. 2011; FANGUEIRO et al. 2017). Podem, porém, em condições de umidade elevada e alagamento do solo, proporcionar que o N_2O produzido pela desnitrificação seja reduzido a N_2 . Neste sentido, alguns autores (SIX et al., 2004; LIANG et al. 2007; XIAO et al. 2007) obtiveram menores

emissões de N_2O em arroz irrigado cultivado em plantio direto, em relação ao sistema convencional, pela manutenção da umidade elevada do solo.

Verifica-se, portanto, divergências quanto à manutenção da palhada remanescente de culturas anteriores e dos sistemas de preparo do solo no potencial em mitigar as emissões de GEE. Logo, assume significativa importância o estabelecimento da influência do manejo das culturas agrícolas sobre as emissões de GEE e da dinâmica de C no solo (ZSCHORNACK, 2011) para identificação de alternativas com potencial mitigador de emissão desses gases intensificadores do efeito estufa nas terras baixas do Rio Grande do Sul.

2.3.2. Rotação de Culturas

A busca por alternativas capazes de elevar a sustentabilidade dos sistemas de produção em terras baixas tem despertado interesse de produtores e técnicos sobre a diversificação de culturas. Entretanto, a drenagem deficiente e alguns atributos limitantes dos solos de terras baixas apresentam restrição agrônômica, dificultando a expansão de culturas de sequeiro (ANGHINONI et al., 2004; VEDELAGO et al., 2012). Frente a isso, esforços da pesquisa buscaram adaptar culturas de sequeiro neste ambientes, aumentando de forma expressiva áreas com culturas de sequeiro em rotação ao arroz irrigado nas terras baixas do Rio Grande do Sul. Estima-se que atualmente cerca de 300 mil hectares de soja sejam cultivadas em terras de arroz no estado (Reunião..., 2016).

As mudanças ocasionadas no sistema de produção com a inserção de culturas de sequeiro em rotação com o arroz irrigado gera uma série de impactos, pois alteram o uso e manejo do solo, da água, da cobertura vegetal, influenciam a produtividade de grãos e a dinâmica do C e N do solo (WELLER et al., 2015).

Culturas de sequeiro exigem ambiente drenado para seu cultivo e, conseqüentemente, diminuem drasticamente o período de ocorrência de condições anaeróbicas no solo – necessário para produção de CH_4 - e, portanto, espera-se que haja mitigação deste gás. Todavia, a drenagem natural deficiente de ambientes de terras baixas (PAULETTO et al., 1993) pode provocar alternância nas condições de secagem e umedecimento do solo, principalmente quando associadas à intensidade e duração dos períodos de chuva, favorecendo os processos de nitrificação e desnitrificação, que têm o N_2O como produto

intermediário (ROBERTSON e GROFFMAN, 2014). Frente a isto, diferentes sistemas de rotação de culturas podem apresentar diferentes efeitos nas emissões de GEE (NISHIMURA et al., 2008; ZHOU et al., 2014).

2.4. Influência da rotação de culturas e do sistemas de preparo do solo nos estoques de carbono do solo das terras baixas

O conteúdo de C no solo, e as reservas de C orgânico total, são determinadas pelo balanço entre o aporte de C ao solo e pelas perdas através da decomposição microbiana da MOS (VAN GROENIGEN et al., 2014). Os diferentes usos e manejo do solo, as práticas agrícolas adotadas, assim como a conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas, promovem alterações nas taxas de sequestro de C atmosférico, no estoques de C e N do solo, e influenciam as emissões de GEE (BAYER et al., 2002; BUSARI et al., 2015; CHA-UN et al., 2017). Assim, as ciclagens de C e N são importantes determinantes para aumentar os estoques de carbono do solo e minimizar a participação da agricultura nas mudanças climáticas globais (PAUL e CLARK, 1996; WANG et al., 2013).

A MOS é componente básico da qualidade do solo por seu papel essencial em diversos processos químicos, físicos e biológicos do solo (MIELNICZUK, 2008), e é considerada um dos principais indicadores de sustentabilidade dos agroecossistemas por serem sensíveis a modificações impostas pelos diferentes usos e manejos de solos (ROSSI et al., 2012). Por diversos motivos, o estudo da MOS tem se baseado na quantificação de C (CARVALHO et al., 2014) e, em estudos relacionados as alterações dos estoques de C, a quantificação de C tem sido utilizado como indicativo de qualidade do solo.

O uso intensivo das áreas e a perturbação do solo resultam na redução da MOS e do C orgânico disponível, diminuindo, também, o sequestro de C atmosférico (SUNDERMEISER et al., 2005). No sistema convencional de preparo do solo, o C orgânico é incorporado ao solo intensificando a atividade microbiana, responsável pelo retorno do C para atmosfera. O revolvimento do solo implica em quebra mecânica de seus agregados e, conseqüentemente, aumenta a área de exposição da MOS antes protegida no interior dos agregados, à degradação microbiana (SAINJU et al., 2010; KHALIQ et al., 2013). Assim, o

preparo convencional do solo proporciona maiores taxas de decomposição da MOS e redução do estoque de C em solos agrícolas (ZINN et al., 2005).

A adoção de sistemas conservacionistas, como o plantio direto, por sua vez, resultam na melhoria significativa da qualidade física, química e biológica do solo (SIQUEIRA-NETO et al., 2010; VEZZANI e MIELNICZUK, 2011), apresentam potencial de conservar e proteger o C orgânico do solo (BAYER et al., 2000) e, portanto, maiores estoques de C são observados, em decorrência da menor decomposição da MOS (BAYER et al., 2000; NUNES et al., 2011; ABDALLA et al., 2013), especialmente quando há um suprimento alto e diversificado de C da biomassa pela diversificação de culturas (CONCEIÇÃO et al., 2013; TIVET et al., 2013). Nas áreas de terras baixas, devido ao hidromorfismo do solo e ao alagamento para o cultivo de arroz irrigado, a dinâmica da MOS pode ser completamente alterada (SOUSA et al., 2015).

Em virtude de ser o solo o maior reservatório de C da biosfera terrestre (STOCKMANN et al., 2013), a avaliação dos estoques desempenham papel essencial na busca de alternativas que visam mitigar as mudanças climáticas (MARTIN et al., 2016).

2.4.1. Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

O fracionamento da MOS, de maneira geral, procura separar em frações de natureza, dinâmica e função homogêneas, e que sejam suficientemente diferentes umas das outras para classificação (CHRISTENSEN, 2000). Neste sentido, o fracionamento físico tem sido mais adotado (CAMBARDELLA e ELLIOT, 1993) por ser considerado menos destrutivo e por apresentar maior relação com a estrutura e função da MOS *in situ*, em relação ao método de fracionamento químico (FELLER et al., 2000). Além disso, o fracionamento físico torna possível relacionar a MOS com a agregação e estabilidade dos agregados do solo, possibilitando melhor avaliação da qualidade do solo uma vez que apresentam diferentes taxas de degradação bioquímica e microbiana e diferentes acessibilidade aos microrganismos e interações com a fase mineral do solo (TAN et al., 2007).

A MOS possui tempos de ciclagem e formas de proteção diferentes, sendo constituída, essencialmente, por frações lábeis e estáveis (RANGEL e

SILVA, 2007). A curto prazo, a avaliação de frações lábeis da MOS permite monitorar o impacto de manejo do solo (CONTE et al., 2011), além de influenciarem a atividade biológica e química de solos alagados, o que pode impactar as emissões de GEE (NASCIMENTO et al., 2009).

O fracionamento físico granulométrico consiste na separação da MOS em frações de acordo com seu tamanho e interações com a fração mineral do solo (CAMBARDELLA e ELLIOT, 1993). O C orgânico particulado (COP), é a fração associada as partículas de areia ($>0,053$ mm), cuja permanência no solo está condicionada à proteção física desempenhada pelos agregados. Alterações da proporção das frações lábeis – COP –, podem fornecer importantes informações sobre a sustentabilidade ambiental e a qualidade do solo, possibilitando a obtenção de melhores estratégias de usos e manejo dos solos agrícolas (SANTOS et al., 2011). O C orgânico associado aos minerais (CAM), está relacionado ao material orgânico em estágio mais avançado de decomposição, correspondendo as frações silte e argila solo ($<0,053$ mm). Essa fração possui maior área superficial específica e interage com a superfície de partículas minerais, formando os complexos organominerais, estando protegida pelo mecanismo de proteção coloidal (LOSS et al., 2009; ROSSI et al., 2012) e, geralmente, é menos alterada pelas diferentes formas de manejo do solo adotadas, especialmente a curto prazo (BAYER et al., 2004).

Desta forma, a determinação de C nas frações da MOS pode fornecer informações importantes sobre a qualidade do solo e dos impactos dos sistemas de uso do solo.

3. HIPÓTESES

- a. A inserção de cultivos de sequeiro em rotação ao arroz irrigado reduz as emissões de metano e o potencial de aquecimento global parcial sazonal e anual em sistemas de produção de arroz irrigado em terras baixas.
- b. A adoção de sistema plantio direto mitiga as emissões de gases de efeito estufa e promove o aumento dos estoques de carbono no solo, em relação ao sistema convencional de preparo do solo, em sistemas de produção de arroz irrigado em terras baixas.

4. OBJETIVOS

4.1. Geral

Determinar a influência de sistemas de preparo do solo e de rotação de culturas sobre as emissões de gases de efeito estufa e os estoques de carbono do solo em sistemas de produção de arroz irrigado em terras baixas.

4.2. Específicos

- a. Avaliar a influência de sistemas de rotação de culturas sobre as emissões de metano e de óxido nitroso do solo, bem como a contribuição desses gases para o potencial de aquecimento global em sistemas de produção de arroz irrigado em terras baixas.
- b. Determinar o efeito do sistema de preparo do solo sobre as emissões de metano e de óxido nitroso do solo, bem como a contribuição desses gases para o potencial de aquecimento global em sistemas de produção de arroz irrigado em terras baixas.
- c. Avaliar o efeito de sistemas de rotação de culturas e de preparo do solo sobre os estoques de carbono em solo de terras baixas cultivado com arroz irrigado.

5. CAPÍTULO 1: EMISSÕES DE METANO E ÓXIDO NITROSO EM PLANOSSOLO CULTIVADO COM ARROZ IRRIGADO: INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE ROTAÇÃO DE CULTURAS E DE PREPARO DO SOLO

5.1. Introdução

Solos cultivados com arroz irrigado por inundação são fonte de emissão de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, particularmente metano (CH_4), devido às condições de anaerobiose estabelecida com o alagamento do solo. Nessas condições, proliferam-se microrganismos metanogênicos responsáveis pela formação de CH_4 a partir da redução do CO_2 ou da fermentação de produtos da decomposição anaeróbica (REDDY e DELAUNE, 2008). O óxido nitroso (N_2O), produto intermediário dos processos de nitrificação e desnitrificação, é produzido quando há mudança nas condições de oxirredução do solo, onde a nitrificação ocorre em meio aeróbico e a desnitrificação, por sua vez, em ambiente anaeróbico (BATEMAN e BAGGS, 2005).

Os fluxos de CH_4 e N_2O dependem de muitos fatores, particularmente aqueles que afetam a atividade dos microrganismos responsáveis pela produção destes gases (BREMNER, 1997), onde destacam-se as práticas culturais adotadas, incluindo adubação, manejo do solo e da água, preparo do solo, entre outros (SMITH et al., 2003).

O sistema comumente empregado nas áreas de terras baixas e o uso intensivo destas para o cultivo de arroz irrigado, utilizados por um vasto período de tempo, acarretaram em consequências indesejáveis para a cultura do arroz, tais como queda de rendimento da cultura, aumento do ataque de pragas e infestação de plantas daninhas (ANDRES et al., 2001), além de proporcionar aumento na emissão de GEE, principalmente o CH_4 (BAYER et al., 2014). Diante disto, tem-se buscado alternativas que visem minimizar esses impactos, focados em uma agricultura sustentável e que atendam a demanda da produção de grãos e de políticas públicas. Essas questões ambientais tem despertado interesse de instituições de pesquisa que tem buscado alternativas para mitigar a emissão de GEE pela agricultura.

Nas terras baixas do Rio Grande do Sul, os sistemas de preparo de solo com mecanização intensa, por questões técnicas e econômicas estão sendo substituído por sistemas de preparo reduzido como o cultivo mínimo e o plantio direto. Estes sistemas preconizam a semeadura do arroz diretamente sobre a

resteva da cultura anterior (GOMES et al., 1999), seja ela de inverno ou verão. Tem-se empregado também, a inserção de culturas de sequeiro – como a soja, o milho e o sorgo – em rotação ao arroz irrigado, em busca de um maior aproveitamento agrícola das áreas, inclusive durante o período de pousio. Como essas culturas são exigente em drenagem do solo, ocorre uma diminuição do período em que o solo permanece alagado (Reunião..., 2018). Características como o tempo de implantação do sistema plantio direto e a cultura utilizada na rotação, influenciam as emissões de CH_4 e N_2O do solo (NETO et al., 2009; ZHANG et al., 2013). Desta maneira, apesar de a rotação de culturas de sequeiro em lavouras de arroz irrigado aumentarem o potencial de utilização destas terras agrícolas, diferentes sistemas de rotação de culturas tem apresentado efeitos distintos nas emissões de GEE (ZHOU et al., 2014; NISHIMURA et al., 2008).

De maneira geral, a produção de N_2O é desfavorecida em condições de ambiente anóxico, uma vez que o N_2O pode ser rapidamente reduzido à N_2 (REDDY e DELAUNE, 2008; YAO et al., 2010), enquanto que a produção de CH_4 é favorecida pela condição de alagamento do solo (LE MER e ROGER, 2001). Por outro lado, a manutenção de resíduos vegetais sobre a superfície do solo, quando aliada a maiores concentrações de O_2 , como as que podem ocorrer quando adotados sistemas conservacionistas, tendem a favorecer a produção e emissão de N_2O , limitando a de CH_4 (MA et al., 2009). Ainda não há, entretanto, um consenso sobre o efeito do plantio direto e das diferentes culturas na emissão de GEE, e os resultados apresentados são muitas vezes contraditórios ou inconclusivos.

Frente a isto e aos diferentes fatores que influenciam as emissões de GEE, assim como as condições de hidromorfismo do Planossolo, faz-se necessária uma avaliação em nível regional dos sistemas agrícolas sobre as emissões de GEE.

5.2. Material e Métodos

5.2.1. Caracterização da área experimental e manejo da cultura do arroz

O experimento foi realizado sob condições de campo, na Estação Experimental Terras Baixas (ETB) da Embrapa Clima Temperado, localizada no município do Capão do Leão, RS, em um solo classificado como Planossolo Háplico (STRECK et al., 2008). Segundo Köppen (REISSER JÚNIOR et al., 2008), a região apresenta temperatura média anual de 17,8°C e precipitação média anual de 1367 mm, classificado como subtropical úmido ou temperado (Cfa).

As avaliações de emissões de GEE foram realizadas durante a entressafra 2018 (16 de maio à 16 de outubro de 2018), e o período de cultivo de arroz na safra 2018/2019 (1º de novembro de 2018 à 25 de março de 2019). Foram realizadas em área relativa a um experimento envolvendo sistemas de rotação de culturas e de preparo do solo, implantado no outono/inverno de 2015. Avaliaram-se oito tratamentos, incluindo quatro sistemas de rotação de culturas estabelecidos sob preparo convencional e plantio direto: arroz-arroz-arroz-arroz (T1 e T2); soja-soja-soja-arroz (T3 e T4); sorgo-sorgo-milho-arroz (T5 e T6) e soja-sorgo-soja-arroz (T7 e T8) (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição dos sistemas de rotação de culturas e de preparo do solo, destacando os tratamentos avaliados na safra 2018/2019

Trat.	Sistema preparo	Safra 2015/2016	Safra 2016/2017	Safra 2017/2018	Safra 2018/2019
T1	Convencional	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz
T2	Plantio Direto	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz
T3	Convencional	Soja	Soja	Soja	Arroz
T4	Plantio Direto	Soja	Soja	Soja	Arroz
T5	Convencional	Sorgo	Sorgo	Milho	Arroz
T6	Plantio Direto	Sorgo	Sorgo	Milho	Arroz
T7	Convencional	Soja	Sorgo	Soja	Arroz
T8	Plantio Direto	Soja	Sorgo	Soja	Arroz

O experimento foi implantado no período de outono/inverno de 2015, com a cultura de azevém em toda área experimental. No início da primavera de 2015, metade da área experimental foi preparada em sistema convencional (SC) de

cultivo e metade foi dessecada para o estabelecimento do primeiro ciclo de cultivos de verão sob sistema plantio direto (PD). As áreas sob SC e PD foram inicialmente divididas em três subparcelas, que foram cultivadas com soja, sorgo e arroz. Na safra 2015/2016, o estudo contava, portanto, com seis tratamentos. A partir da safra 2016/2017, as seis subparcelas existentes foram divididas na metade, para o estabelecimento dos sistemas de rotação de culturas planejados, totalizando 12 tratamentos. Destes, oito foram selecionados (Tabela 1) para a avaliação de emissões de GEE a partir do início da entressafra de 2018.

Os tratamentos foram distribuídos em delineamento de parcelas subdivididas com três repetições. Nas parcelas principais foram alocados os níveis do fator sistema de preparo do solo (SC e PD), e nas subparcelas, os níveis do fator sistema de rotação de culturas (arroz-arroz-arroz-arroz; soja-soja-soja-arroz; sorgo-sorgo-milho-arroz; soja-sorgo-soja-arroz).

Durante os períodos de entressafra de 2016, 2017 e 2018, toda a área experimental, independentemente do cultivo de verão e do sistema de preparo do solo, foi cultivada com azevém, simulando-se o pastejo mediante o corte e a remoção da biomassa vegetal produzida. Como práticas culturais ao azevém, realizou-se, anualmente, uma adubação nitrogenada em cobertura em dose correspondente a 50 kg/ha de N, como ureia. No início da primavera, a cobertura vegetal estabelecida na área sob sistema plantio direto foi dessecada e aquela da área sob sistema convencional, preparada com grades aradora e niveladora.

Especificamente na safra 2018/19, todas as parcelas experimentais foram cultivadas com arroz irrigado, metade em sistema convencional de preparo e metade em plantio direto. Os tratos culturais seguiram as recomendações técnicas para a cultura do arroz irrigado no Sul do Brasil (Reunião..., 2018). As informações básicas sobre o experimento e manejo da cultura do arroz são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Informações gerais do experimento com a descrição das principais práticas culturais e épocas de realização para a cultura de arroz irrigado

Dado do experimento	Safra 2018/2019
- Delineamento experimental	- Parcelas subdivididas com 3 repetições
- Dimensão parcelas experimentais (cultivos de sequeiro)	- Parcelas: 24 m x 40 m Subparcelas: 12 m x 20 m
- Dimensão parcelas experimentais (arroz irrigado)	- 12 m x 24 m
- Cultivar de arroz	- Puitá INTA CL
- Semeadura	- 25/10/2018
- Densidade de semeadura	- 100 kg/ha
- Adubação básica de semeadura	- 300 kg/ha de 5-25-25
- 1ª adubação nitrogenada em cobertura (26/11/2018)	- 60 kg/ha de N, como ureia
- Início da irrigação	- 27/11/2018
- 2ª adubação nitrogenada em cobertura (02/01/2020)	- 60 kg/ha de N, como ureia
- Colheita	- 06/03/2019

5.2.2. Coleta de amostras e avaliação de emissões de gases de efeito estufa

A coleta dos gases seguiu o método da câmara estática fechada (MOSIER, 1989), adaptado e padronizado pelo Comitê de Cultivo de Arroz e Fluxo de Gases, como parte do projeto “International Global Atmospheric Chemistry”. Em cada parcela, foram distribuídos três sistemas coletores de GEE (base + extensor(es) + câmara), os quais constituíram as repetições dos tratamentos (Figura 1).

As amostragens foram realizadas com periodicidade quinzenalmente durante o cultivo de azevém (entressafra 2018) e semanalmente no período de cultivo de arroz (safra 2018/2019), sempre entre 9:00 h e 11:00 h da manhã, período que melhor representa as emissões diárias de GEE na região Sul do Brasil (COSTA et al., 2008). Excepcionalmente, após as adubações

nitrogenadas em cobertura do arroz, aumentou-se a frequência de amostragem durante uma semana, sendo realizada a cada um ou dois dias.

As bases dos sistemas coletores (Figura 1a) foram instaladas por ocasião do início das avaliações no período de outono/inverno, sendo removidas apenas para a eventual realização de operações mecanizadas, sendo imediatamente após reinstaladas. A inserção das bases no solo foi feita em profundidade aproximada de 5 cm. Acima da superfície do solo, as bases apresentavam dois orifícios em duas laterais opostas para permitir a movimentação de água da área experimental para o interior dos sistemas coletores. Esses orifícios foram fechados com rolhas de borracha por ocasião das amostragens de ar. Para as coletas, acoplavam-se às bases câmaras metálicas (topos) (Figura 1b) e, um ou dois extensores (Figura 1c), quando necessários. O fechamento hermético do sistema para as coletas foi feito mediante a colocação de água em canaletas existentes na parte superior das bases e extensores (BAYER et al., 2014).

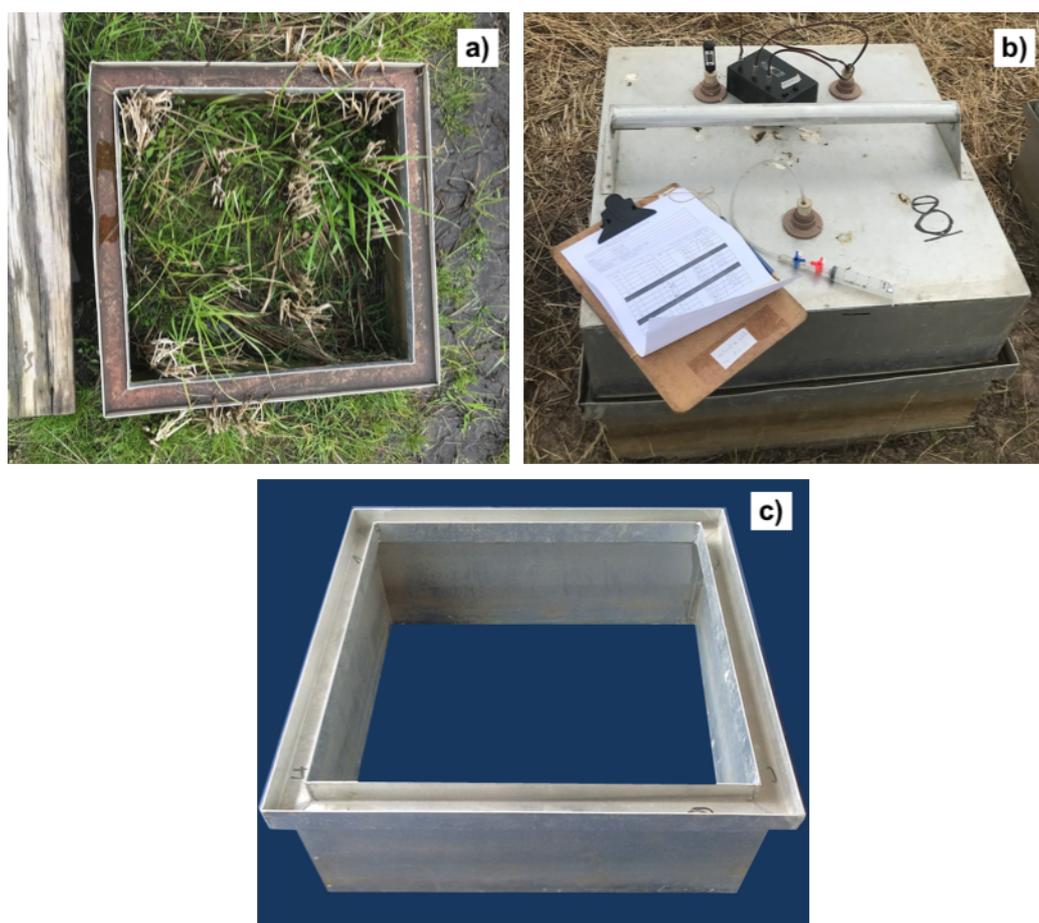


Figura 1. Sistema coletor de amostras de GEE do tipo câmara estática fechada, composto por base (a), câmara/topo (b) e extensor (c).

As amostras de ar foram tomadas manualmente com auxílio de seringas de polipropileno (20 mL) nos tempos zero, 5, 10 e 20 minutos após o fechamento das câmaras. Em cada tempo de coleta, termômetros digitais com haste e visor externo foram utilizados para monitorar a temperatura no interior de cada sistema coletor. Ventiladores localizados na parte superior interna das câmaras foram ligados 30 segundos antes de cada amostragem para homogeneizar o ar dentro da câmara. O ar coletado com as seringas foi transferido para frascos de vidro específicos dotados de vácuo. Estes frascos possuem tampa de borracha, que impede a dispersão das amostras para o ambiente (KHALIL et al., 2004).

As amostras de ar foram analisadas no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), localizado em Porto Alegre, RS, onde as concentrações de CH₄ e N₂O foram determinadas por cromatografia gasosa, em cromatógrafo Shimadzu 2014 (modelo “Greenhouse”). As concentrações foram calculadas pela média das três câmaras instaladas em cada tratamento.

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

$$f = \frac{\Delta Q}{\Delta t} + \frac{PV}{RT} + \frac{M}{A} \quad \text{Eq. 1}$$

onde: f é o fluxo de CH₄ e N₂O (μg m⁻² h⁻¹), Q é a quantidade do gás (μmol mol⁻¹) na câmara no momento da coleta, t é o tempo da amostragem (min), P é a pressão atmosférica (atm) no interior da câmara - 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).

As emissões totais de cada subperíodo foram determinadas pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de CH₄ e de N₂O do solo (BAYER et al., 2014).

Com base nas emissões totais de CH₄ e de N₂O, foi calculado o potencial de aquecimento global parcial (PAGp), que considera o potencial de

aquecimento de cada gás em relação ao CO₂ (34 vezes para o CH₄ e 298 para o N₂O), e que permite a análise conjunta das emissões, conforme a equação 2:

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

onde: PAGp é o Potencial de Aquecimento Global parcial (kg eq. CO₂ ha⁻¹), CH₄ e N₂O são as emissões totais desses gases por período (entressafra e safra) (kg ha⁻¹).

Quando as plantas de arroz atingiram o estágio de maturação de colheita (R9), realizou-se a colheita, em cada unidade experimental, de uma parcela útil constituída por 5 linhas de plantas de 4 m de comprimento, para a determinação do rendimento de grãos (RG). Posteriormente, o material colhido foi trilhado e seco. Corrigiu-se a umidade dos grãos para 130 g kg⁻¹ de umidade.

Os dados de PAGp foram relacionados aos de rendimento de grãos para o estabelecimento da relação PAGp/RG, que representa a intensidade de emissão associada ao cultivo do arroz, ou seja, a quantidade de GEE emitidos por quilograma de arroz produzido, sendo calculado pela equação 3:

$$\text{PAGp/RG} = \frac{\text{PAGp}}{\text{RG}} \quad \text{Eq. 3}$$

onde: PAGp/RG é o PAGp associado ao RG (kg eq. CO₂ kg⁻¹ grãos arroz), PAGp é o Potencial de Aquecimento Global parcial (kg eq. CO₂ ha⁻¹) e RG é o rendimento de grãos (kg ha⁻¹).

Os fluxos diários dos GEE foram analisados de maneira descritiva (média ± desvio padrão).

As variáveis rendimento de grãos, emissões totais de N₂O e CH₄, PAGp e PAGp/RG de arroz foram submetidas à análise de variância e, quando significativa, ao teste de Tukey ao nível de 5% de significância, através do software R (versão 3.6.3).

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1. Fluxos de N₂O do solo

No período de outono/inverno, para o sistema convencional de preparo do solo (Figura 2b), valores de fluxos mais elevados ocorreram nos três primeiros

dias após o início das avaliações (DAA) no sistema soja-soja-soja, atingindo valor máximo de 4.344,42 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹ ao primeiro DAA na entressafra, ou seja, logo após a incorporação dos resíduos de soja, correspondendo a período com elevada concentração de C lábil no solo (CIAMPITTI et al., 2005), sendo um dos fatores determinantes da magnitude do processo de desnitrificação no solo (BEAUCHAMP et al., 1989). A escassez do C orgânico lábil é capaz de restringir a desnitrificação, mesmo que o nitrato esteja presente no solo em quantidades satisfatórias (WEIER et al., 1993). Entretanto, este comportamento não foi verificado na rotação soja-sorgo-soja, tratamento que também teve soja como cultivo anterior, possivelmente devido à maior umidade verificada nessa parcela, limitando os processos produtores de N₂O.

No sistema precedido pela rotação de gramíneas de sequeiro (T5), determinaram-se fluxos elevados de N₂O com valores de 773,68, 749,37, 485,96 e 453,92 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹ no 1º, 139º, 56º e 83º DAA, respectivamente. Neste tratamento precedido pelo cultivo de milho, o solo não saturado associado a evento de precipitação, propiciaram maior variabilidade nas condições de secagem e umedecimento do solo, favorecendo fluxos de N₂O como produto intermediário dos processos de nitrificação e desnitrificação (LAVILLE et al., 2011). Além disso, a cultura de milho deixa elevada quantidade de restos vegetais, que foram incorporados ao solo no sistema de preparo convencional, intensificando a atividade microbiana, incluindo a de microrganismos produtores de N₂O, em decorrência da presença de matéria orgânica facilmente disponível.

De maneira geral, os fluxos de N₂O durante o cultivo de azevém no outono/inverno sob preparo convencional foram de baixa magnitude. Em relação a área cultivada anteriormente com arroz irrigado (T1), a ausência de picos de fluxos elevados pode ser devido à manutenção das taipas durante a entressafra nesta parcela, favorecendo a supressão da nitrificação e, conseqüentemente, a limitação do processo de desnitrificação (ZOU et al., 2005).

No que se refere aos fluxos de N₂O durante a entressafra nos tratamentos sob plantio direto (Figura 2c), os fluxos determinados foram, em geral, de baixa magnitude. Nos tratamentos cultivados anteriormente com soja, foram observados fluxos com padrões similares, embora com magnitudes diferentes, e que apresentaram fluxos com valores maiores. No cultivo sucessivo de soja (T4), o fluxo de maior magnitude atingiu 1.677,94 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹ e, na rotação soja-

sorgo-soja (T8), esse correspondeu a 1.514,55 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹, ambos ocorrendo no primeiro DAA da entressafra (16 maio 2018). Nesses tratamentos referentes a áreas previamente cultivadas com soja, os maiores fluxos de N₂O ocorrem nos três primeiros dias de avaliação da entressafra, estando relacionadas às maiores concentrações de C disponível no solo devido as restos vegetais da cultura, que são utilizados como substrato pelos microrganismos que atuam no processo de desnitrificação (CIAMPITTI et al., 2005). Para ambos os tratamentos em plantio direto antecidos pela cultura da soja, após o início do período de avaliações na entressafra, os fluxos de N₂O decaíram a valores próximos a 100 mg ha⁻¹ h⁻¹, alternados por eventos de influxo de N₂O de baixa intensidade. Nos demais tratamentos, T2 e T6, os fluxos também intercalaram entre valores baixos e influxos de N₂O. Exceção para a rotação com gramíneas de sequeiro (T6) que apresentou fluxo de 695,93 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹ ao 28º DAA.

As emissões de N₂O são dependentes de diversos fatores, tais como a umidade do solo (REDDY e DELAUNE, 2008), as condições de fertilidade do solo (ROCHETTE et al., 2004), a quantidade e o tipo de resíduos incorporados ao solo (AULAKH et al., 2001; ZSCHORNACH, 2011), as quantidades de N e de nitrato presentes (ROCHETTE et al., 2004; ZOU et al., 2005) e da disponibilidade de O₂ e de C orgânico (WEIER et al., 1993).

Nas terras baixas do Sul do Brasil, a baixa condutividade hidráulica dos solos favorece a variação rápida na condição de umidade do solo, alternando entre solo drenado e saturado, principalmente após eventos de precipitação intensa (SCIVITTARO et al., 2016). De maneira geral, os fluxos elevados de N₂O ocorreram em sucessão a eventos de precipitação pluviométrica elevada (Figura 2a e 2d), que aliados à drenagem natural deficiente dos solos hidromórficos das terras baixas e às altas concentrações de N mineral em alguns dos sistemas, contribuíram para a oscilação entre as condições de solo oxidado e reduzido, favoráveis à ocorrência dos processos de nitrificação/desnitrificação (ROBERTSON e GROFFMAN, 2015; LAVILLE et al, 2011).

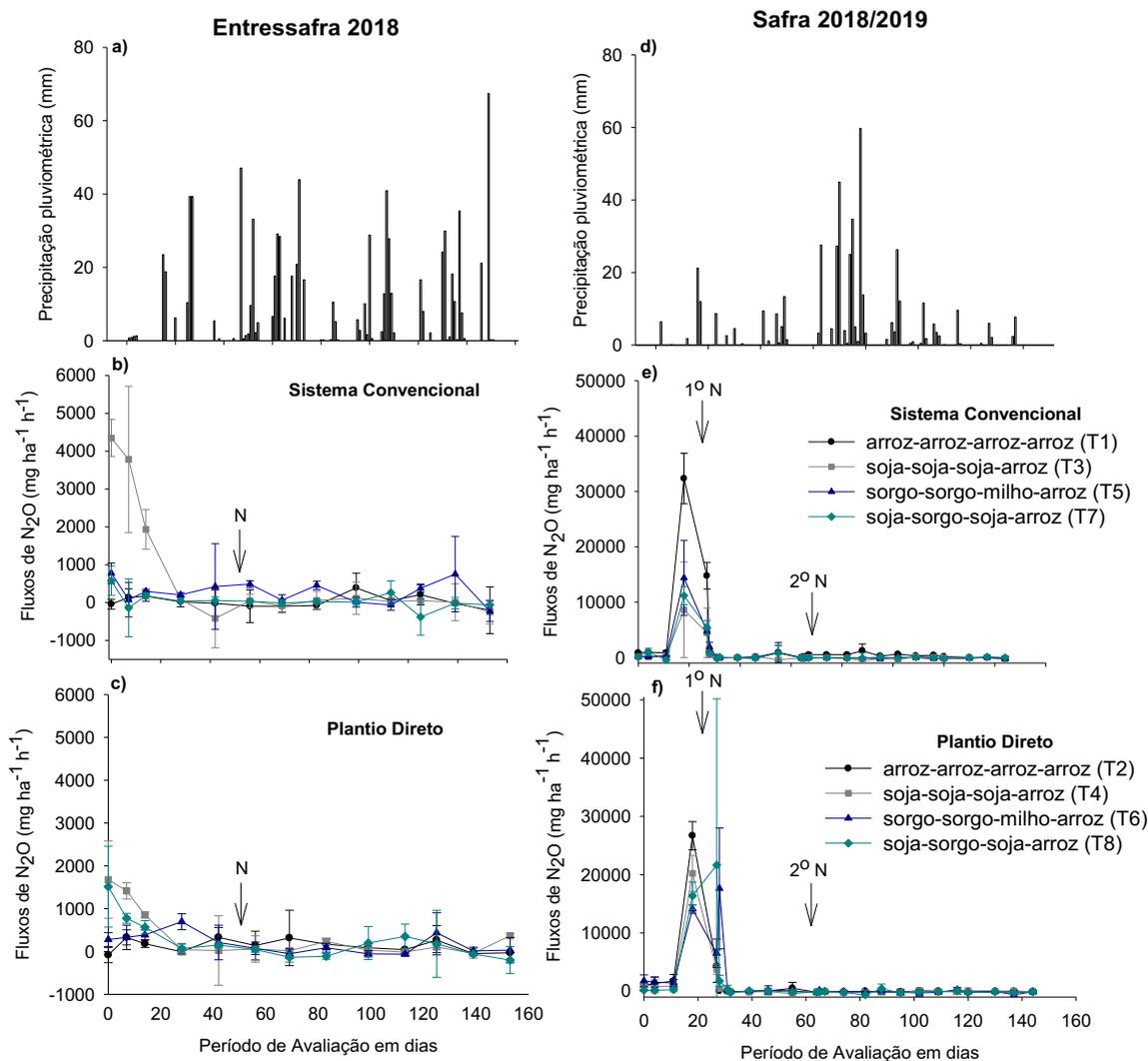


Figura 2. Precipitação pluviométrica e fluxos de N₂O em Planossolo na entressafra 2018 e safra 2018/2019, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. N = adubação nitrogenada na entressafra; 1º N = primeira aplicação de N em cobertura e entrada na água no sistema; 2º N = segunda aplicação de N em cobertura.

Durante o período de cultivo de arroz irrigado, ou seja, safra 2018/2019, o padrão dos fluxos de N₂O do solo foi semelhante para os tratamentos sob sistema convencional de preparo, embora apresentando magnitude distinta (Figura 2e). Em cultivos de arroz irrigado por inundação contínua do solo, os fluxos de N₂O do solo normalmente são pequenos, sendo que parte do N liberado do sistema ocorre na forma de N₂ (CHAPUIS-LARDY et al., 2007). As rotações de culturas sob preparo convencional do solo (T1, T3, T5 e T7) apresentaram um único pico elevado de fluxo de N₂O, no 18º DAA durante a safra de primavera/verão. Esses apresentaram os seguintes valores, respectivamente: 32.335,60; 8.612,39; 14.391,37 e 11.177,74 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹.

Estes picos ocorreram antes da primeira cobertura com N e entrada da água na lavoura de arroz irrigado. Portanto, atribui-se esse resultado à recente incorporação ao solo dos resíduos da cobertura vegetal estabelecida durante o período de outono/inverno, associada à umidade elevada do solo desses tratamentos decorrente de chuva ocorrida nos dias anteriores (33 mm), acarretando em alternância entre os processos de secagem e umedecimento do solo, favorecendo os processos de nitrificação/desnitrificação (REDDY e DELAUNE, 2008). Embora menores que os picos determinados no 18º DAA, valores elevados de fluxo de N_2O também foram observados no 27º DAA, ou seja, em sucessão à primeira adubação nitrogenada em cobertura. No restante do período de safra 2018/2019, os fluxos de N_2O foram baixos, com valores próximos ou iguais a zero. Esse comportamento foi verificado, inclusive, no período subsequente à segunda adubação nitrogenada em cobertura do arroz, realizada no 62º DAA.

Assim como verificado para o sistema de preparo convencional do solo, os tratamentos sob PD (Figura 2f) também apresentaram seu primeiro fluxo elevado de N_2O no 18º DAA, com valores de 26.685,80 mg N_2O ha⁻¹ h⁻¹, para o monocultivo de arroz; 20.218,54 mg N_2O ha⁻¹ h⁻¹, para arroz irrigado após o cultivo sucessivo de soja; 16.357,12 mg N_2O ha⁻¹ h⁻¹, para a rotação soja-sorgo-soja-arroz e 14.077,28 mg N_2O ha⁻¹ h⁻¹, para sorgo-sorgo-milho-arroz. Este último tratamento apresentou, ainda, um outro fluxo elevado de N_2O no 28º DAA, correspondente a 17.635,60 mg N_2O ha⁻¹ h⁻¹, assim como soja-sorgo-soja-arroz, no 27º DAA, de 21.641,18 mg N_2O ha⁻¹ h⁻¹. Esse comportamento foi verificado nos períodos subsequentes à primeira adubação nitrogenada em cobertura e à entrada da água na lavoura de arroz. Segundo Baggs et al. (2000), cerca de 80% do N_2O é emitido durante os primeiros 21 dias após a incorporação de resíduos ou adição de fontes nitrogenadas. Durante o restante da safra do arroz, os fluxos de N_2O foram de baixa magnitude e muito próximos a zero, devido à constância nas condições de anaerobiose do solo (LINQUIST et al., 2012).

De maneira geral, as emissões de N_2O associadas ao cultivo de arroz irrigado por inundação do solo são baixas; a maior parte das emissões ocorre durante os períodos de alternância das condições de oxirredução do solo (ADVIENTO-BORBE et al., 2013). Essas observações são justificadas pela manutenção contínua de lâmina da água após a primeira adubação com

nitrogênio, evitando-se ciclos de umedecimento e secagem do solo, que predisõem a ocorrência dos processos produtores de N_2O .

5.3.2. Fluxos de CH_4 do solo

Durante o período de entressafra, os fluxos de CH_4 do solo foram, de forma geral, baixos e com valores muito próximos de zero (Figura 3). Alguns picos de fluxo de CH_4 de baixa magnitude foram observados nas áreas previamente cultivadas com arroz irrigado no 1º e 139º DAA, com valores correspondentes, respectivamente, a 6,95 e 3,30 g CH_4 ha⁻¹ h⁻¹ na área sob preparo convencional (Figura 3b), e a 38,03 e 10,02 g CH_4 ha⁻¹h⁻¹, em plantio direto (Figura 3c). Esses picos ocorreram em períodos em que o solo se encontrava saturado, estimulando a atividade de microrganismos metanogênicos (LE MER e ROGER, 2001). O maior fluxo observado no início do período de entressafra, nos tratamentos precedidos pelo cultivo de arroz irrigado, esteve relacionado às condições de umidade da área experimental, visto que, mesmo após a supressão da irrigação para o arroz no final da safra anterior, o solo permaneceu com a umidade elevada ou até mesmo saturado, favorecendo o processo de metanogênese, que é estritamente anaeróbio (SILVA et al., 2008). Adicionalmente, após a supressão da irrigação ao final do período de cultivo de arroz irrigado, o CH_4 aprisionado no solo pela lâmina de irrigação pode ser liberado para a atmosfera na forma de bolhas (WASSMANN et al., 2000).

No restante do período de entressafra, independentemente do sistema de preparo do solo e de rotação de culturas, os fluxos de CH_4 determinados foram praticamente nulos, caracterizados pela alternância entre fluxos e influxos de CH_4 de baixíssima magnitude, resultantes das condições de solo predominantemente drenado, necessário para o estabelecimento da cobertura vegetal de inverno.

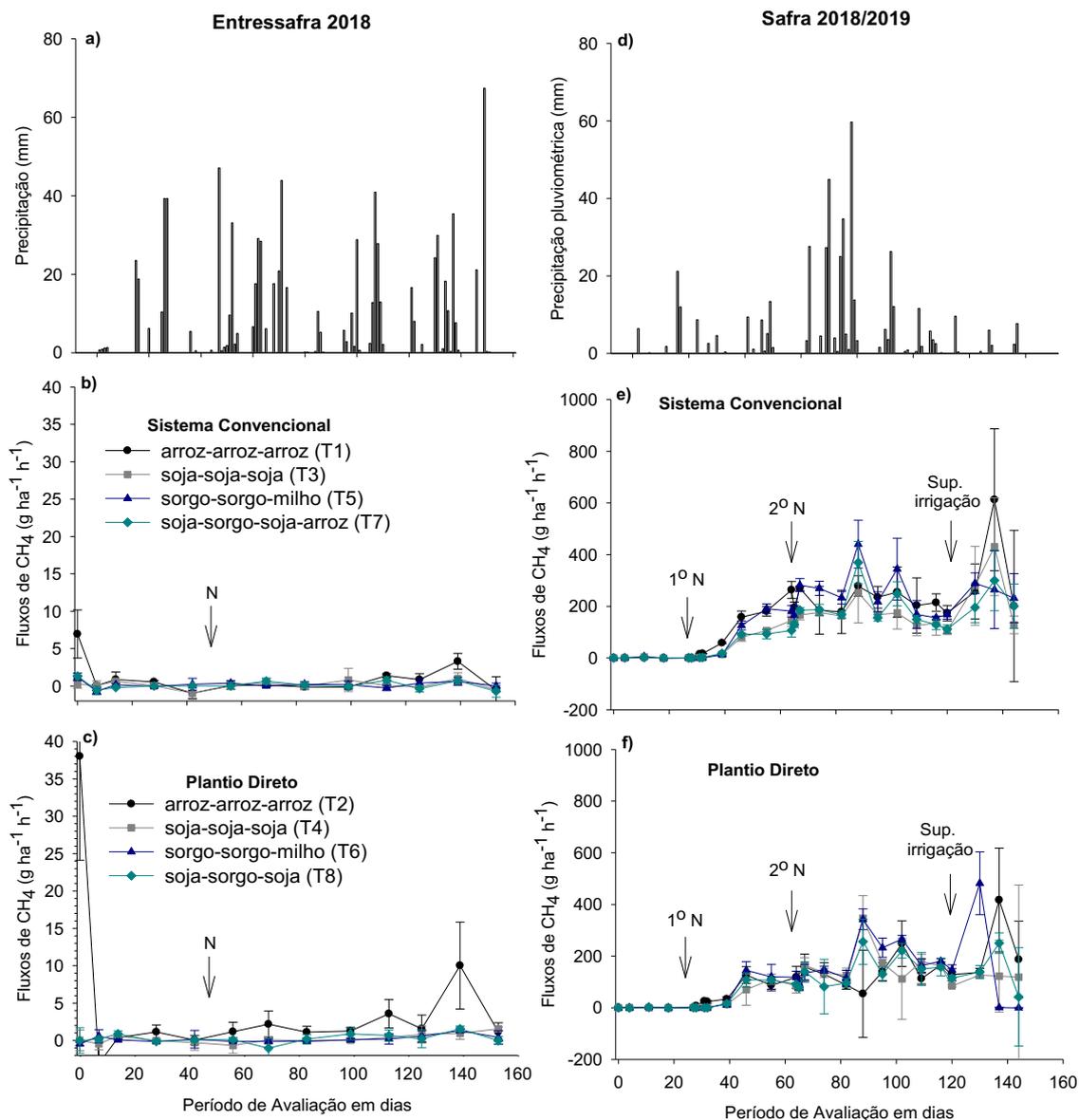


Figura 3. Precipitação pluviométrica e fluxos de CH_4 em Planossolo na entressafra 2018 e safra 2018/2019, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. N = adubação nitrogenada entressafra; 1° N = primeira aplicação de N em cobertura e entrada da água no sistema; 2° N = segunda adubação de N em cobertura; Sup. Irrigação = supressão da irrigação da lavoura de arroz e colheita de arroz.

Durante a safra 2018/2019, os fluxos de CH_4 do solo foram característicos do cultivo de arroz irrigado sob inundação contínua do solo (Figura 3e e 3f), inicialmente apresentando valores de baixa magnitude, que aumentaram até a fase reprodutiva e diminuíram a partir da floração até o final do ciclo da cultura (WANG et al., 2017). Em seguida à supressão da irrigação da lavoura de arroz, foram verificados, picos elevados de fluxo de CH_4 .

O comportamento dos fluxos de CH₄ observados sob os sistemas de preparo convencional e plantio direto foram semelhantes, diferindo, apenas, em magnitude, e iniciaram após o estabelecimento e a estabilização da lâmina da água na lavoura, devido a fermentação da matéria orgânica facilmente degradável presente (NEUE et al., 1997). Fluxos de valores baixos deste GEE ainda foram verificados no início do período de solo inundado, provavelmente devido à inibição da metanogênese e baixa produção de CH₄ durante a redução dos íons NO₃⁻, Mn₄⁺, Fe³⁺ e SO₄²⁻ (LE MER e ROGER, 2001), seguindo ordem que prevê que aceptores de elétrons com maior potencial redox sejam reduzidos primeiro (CHIDTHAISONG e CONRAD, 2000). Também, no início do período de desenvolvimento vegetativo da cultura, as plantas de arroz apresentavam volume de raízes limitado e, conseqüentemente, menor quantidade de substratos para a atividade metanogênica. A partir de então, os fluxos apresentaram tendência crescente, com algumas oscilações, possivelmente associadas à instabilidade temporária na manutenção da lâmina de irrigação para o arroz, promovendo períodos curtos de solo oxidado.

Durante o cultivo de arroz irrigado sob sistema convencional de preparo (Figura 3e), os quatro tratamentos: T1, T3, T5 e T7, apresentaram fluxo elevado de CH₄ no 88º dia de avaliação, atingindo, respectivamente, 278,20; 252,89; 440,44 e 369,61 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹. As rotações sorgo-sorgo-milho-arroz (T5) e soja-sorgo-soja-arroz (T7) apresentaram ainda, fluxos elevados de CH₄, correspondentes, respectivamente, a 344,16 e 248,73 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹ no 102º DAA. Esses fluxos elevados de CH₄ no 88º e 102º DAA ocorreram próximo ao período de florescimento do arroz, quando há maior quantidade de biomassa de raízes, propiciando maior quantidade de substratos para a atividade metanogênica (NEUE, 1993). Segundo Lee et al. (2014), a população de metanogênicos que reduzem o CO₂ a CH₄, é elevada entre os 60 e 90 dias de cultivo com arroz irrigado. Além disso, no 67º DAA foi realizada a segunda adubação nitrogenada em cobertura do arroz, estimulando o crescimento das plantas e, conseqüentemente, das raízes (REDDY e DELAUNE, 2008). Nessa fase, a planta de arroz encontrava-se bem desenvolvida e com maior volume de aerênquima (AULAKH et al., 2001), que é responsável por cerca de 90% do CH₄ transportado do solo para atmosfera (YAN et al., 2000). Não foram observados

fluxos elevados de CH₄ imediatamente após a segunda adubação nitrogenada em cobertura, que ocorreu no 67º DAA da safra 2018/2019.

Os maiores fluxos de CH₄ são observados após a supressão da irrigação ao final do período de cultivo do arroz, com valores correspondentes a 612,55; 430,41; 300,09 e 289,06 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹, para os tratamentos com monocultivo de arroz irrigado, arroz irrigado após cultivo sucessivo de soja, rotação soja-sorgo-soja-arroz e rotação sorgo-sorgo-milho-arroz, respectivamente. Estudos mostram que fluxos elevados de CH₄ são observados ao final do período de cultivo, após a secagem da área para a colheita do arroz, pois libera o CH₄ já produzido que estava aprisionado no solo pela presença da lâmina de água (WASSMANN et al., 2000; LIANG et al., 2013).

Durante o cultivo de arroz irrigado, os tratamentos sob PD (Figura 3f) começaram a apresentar fluxos de CH₄ a partir do 46º DAA, ou seja, 20 dias após a primeira adubação em cobertura e estabilização da lâmina da água na lavoura de arroz irrigado. Segundo Bayer et al. (2015), os fluxos de CH₄ começam a apresentar valores de emissão mais elevados cerca de 20-40 dias após a inundação do solo, coincidindo com o início da fase reprodutiva, quando os compostos inorgânicos já estão em grande parte reduzidos, favorecendo a metanogênese.

Em relação aos sistemas de rotação de culturas, sob PD, apesar de não coincidirem entre todos os tratamentos, fluxos elevados de CH₄ foram observados em todos os tratamentos. O monocultivo de arroz irrigado apresentou elevado fluxo de CH₄ no 102º DAA atingindo valor de 248,43 CH₄ ha⁻¹ h⁻¹. As rotações soja-soja-soja-arroz, sorgo-sorgo-milho-arroz e soja-sorgo-soja-arroz apresentaram pico no 88º DAA, atingindo, respectivamente 346,75; 342,25 e 255,78 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹. Após a supressão da irrigação do arroz, magnitudes maiores de fluxos de CH₄ de 417,26; 250,34 e 481,90 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹ foram observados para monocultivo de arroz irrigado, para rotação soja-sorgo-soja-arroz e para rotação de gramíneas sorgo-sorgo-milho-arroz, respectivamente. Por outro lado, não se observou fluxo de CH₄ após a supressão da irrigação para o tratamento com arroz irrigado após o cultivo sucessivo de soja (T3). Setyanto et al. (2000) também não encontraram picos de emissão CH₄ após a supressão da irrigação para o arroz, associando à provável menor concentração de CH₄ no solo anteriormente ao evento de drenagem da lavoura

(WASSMANN et al., 2000). Esse comportamento é corroborado por resultados de estudo de Adviento-Borbe et al. (2015), que determinaram correlação significativa entre as emissões de CH₄ após a drenagem da área e a quantidade de CH₄ dissolvido nos poros de água antes da secagem da lavoura de arroz.

5.3.3. Emissões totais de N₂O do solo

As emissões totais de N₂O do solo durante a entressafra 2018 foram de baixa magnitude e não apresentaram interação estatística entre os sistemas de preparo do solo. Verificou-se, entretanto, que as emissões desse GEE foram influenciadas pelo sistema de rotação de culturas (Tabela 3). Três cultivos sucessivos de soja proporcionou as maiores emissões de N₂O entre os sistemas avaliados, sendo equiparadas, apenas, pela rotação sorgo-sorgo-milho, com desempenho intermediário, cujas emissões de N₂O não diferiram, também, daquelas proporcionadas pelas rotações soja-sorgo-soja e monocultivo de arroz, que apresentaram menores emissões de N₂O. Maior variabilidade na umidade do solo foi observada nas parcelas com três cultivo sucessivos de soja e a com cultivo prévio de milho, favorecendo a alternância dos processos de nitrificação e desnitrificação. Por outro lado, as rotações soja-sorgo-soja e arroz-arroz-arroz, apresentavam parcelas com umidade elevada, limitando os processos produtores de N₂O (REDDY e DELAUNE, 2008).

Tabela 3. Emissões totais de N₂O de Planossolo na entressafra 2018, em função do sistema de preparo do solo e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS

Rotação de culturas	Média N ₂ O (kg ha ⁻¹)
Arroz-arroz-arroz	0,33 B
Soja-soja-soja	1,11 A
Sorgo-sorgo-milho	0,82 AB
Soja-sorgo-soja	0,33 B

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

Durante a safra 2018/2019, o tratamento com monocultivo de arroz sob sistema convencional de preparo proporcionou maior emissão total de N₂O, relativamente ao sistema plantio direto (Tabela 4). Possivelmente, a

incorporação do resíduo vegetal da pastagem de inverno intensificou a atividade microbiana, inclusive a de microrganismos produtores de N_2O (REDDY e DELAUNE, 2008). Além disso, as áreas com cultivo sucessivo de arroz irrigado, em decorrência da manutenção das taipas utilizadas para a irrigação do arroz, inclusive durante o outono/inverno, favoreceram que a umidade do solo permanecesse elevada. No plantio direto, a manutenção do resíduo vegetal em superfície, pode ter favorecido que esta umidade permanecesse elevada, diminuindo a nitrificação e posteriormente a desnitrificação (ZOU et al., 2005), bem como que parte do N liberado do sistema pode ter sido reduzido à N_2 (HOU et al., 2000). Contrariamente, no tratamento em que o cultivo de arroz sucedeu a rotação soja-soja-soja, maior emissão de N_2O foi verificada sob plantio direto. Neste caso, visto que a soja é cultura de sequeiro, suas áreas encontravam-se em condições oxidadas para seu cultivo nos anos anteriores. Portanto, os resíduos em superfície no plantio direto, associado as condições de má drenagem dos solos das terras baixas e aos períodos de precipitação, favoreceram para alternância nas condições de oxirredução do solo (ADVIENTO-BORBE et al., 2013). Para os demais sistemas de rotação de culturas, não houve diferença nas emissões de N_2O entre os sistemas de preparo do solo (Tabela 4).

Por sua vez, a comparação entre os sistemas de rotação de culturas mostrou que apenas sob preparo convencional houve diferença entre os tratamentos, sendo que o monocultivo de arroz propiciou maior emissão de N_2O que os demais sistemas de culturas. Esse comportamento esteve relacionado à ocorrência de pico elevado de emissão de N_2O no início do período de cultivo de arroz (Figura 2e). Segundo Millar e Baggs (2004), 94% das emissões de N_2O ocorrem na primeira semana após a incorporação de resíduos vegetais ao solo. Já sob o sistema plantio direto, não houve diferenças entre os sistemas de culturas quanto à emissão acumulada de N_2O durante o cultivo de arroz. Provavelmente, a manutenção da cobertura vegetal em superfície tenha contribuído para que a umidade do solo fosse mantida estável, impedindo a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação (ZOU et al., 2005), produtores de N_2O (REDDY e DELAUNE, 2008).

Tabela 4. Emissões totais de N₂O em Planossolo cultivado com arroz irrigado, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2018/2019

Rotação de culturas	Convencional	Plantio direto
	----- N ₂ O (kg ha ⁻¹) -----	
Arroz-arroz-arroz-arroz	9,16 a A	6,09 b A
Soja-soja-soja-arroz	2,05 b B	4,40 a A
Sorgo-sorgo-milho-arroz	3,49 a B	4,57 a A
Soja-sorgo-soja-arroz	2,92 a B	5,57 a A

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

Na tabela 5 são apresentados as emissões anuais de N₂O, que correspondem ao somatório das emissões determinadas nos períodos de entressafra e safra. Os resultados obtidos acompanharam aqueles determinados no período de safra 2018/2019, ou seja, as emissões de N₂O durante a entressafra pouco contribuíram para as emissões anuais. Sob sistema convencional de cultivo, o monocultivo de arroz irrigado proporcionou maior emissão total anual de N₂O, relativamente ao sistema plantio direto, possivelmente relacionada à incorporação da palha da pastagem de inverno, intensificando a atividade microbiana, inclusive a de microrganismos produtores de N₂O (REDDY e DELAUNE, 2008). Em contraposto, o cultivo de arroz irrigado após a rotação soja-soja-soja, apresentou mais emissão deste GEE sob plantio direto. Nesse sentido, vários autores observaram aumento nas emissões deste GEE em sistemas mais conservacionistas (MA et al., 2013; ROCHETTE et al., 2008), pois a palha em superfície mantém a umidade do solo e, em presença de oxigênio, estimulam o processo de nitrificação, repercutindo no aumento das emissões de N₂O do solo, devido ao maior teor de nitrato (SOUZA, 2013; MA et al., 2009). Além disso, a dessecação da pastagem de inverno e sua manutenção em cobertura do solo, possivelmente contribuiu para o conteúdo de N do solo e, associada as condições de oxirredução do solo, favoreceram a produção e emissão de N₂O.

Quanto a comparação entre os sistemas de rotação de culturas houve diferença entre os tratamentos apenas sob preparo convencional do solo, onde

o monocultivo de arroz irrigado apresentou maior emissão de N₂O que os demais sistemas de rotação de culturas. Este comportamento está relacionado ao elevado pico de emissão desse GEE no início das avaliações da safra 2018/2019, contribuindo majoritariamente para o valor de emissão total anual. Vale lembrar que, a produção deste GEE no solo são governadas por inúmeros fatores ambientais e práticas de manejo, como precipitação, tipo de solo, conteúdo de água no solo, temperatura, capacidade de redução de N₂O, bem como a quantidade e tipo de fornecimento de fertilizantes nitrogenados (HAYASHI et al., 2015).

Tabela 5. Emissões anuais de N₂O em Planossolo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Entressafra 2018 e Safra 2018/2019

Rotação de culturas	Convencional	Plantio direto
	----- N ₂ O (kg ha ⁻¹) -----	
Arroz-arroz-arroz-arroz	9,30 a A	6,60 b A
Soja-soja-soja-arroz	3,45 b B	5,21 a A
Sorgo-sorgo-milho-arroz	4,50 a B	5,20 a A
Soja-sorgo-soja-arroz	2,99 a B	6,16 a A

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

5.3.4. Emissões totais de CH₄ do solo

Houve significância da interação entre os fatores sistema de preparo do solo e cultura antecedente sobre as emissões totais de CH₄ durante o período de entressafra (Tabela 6). Entretanto, as diferenças observadas apresentam pouca importância em decorrência das emissões de baixa magnitude de CH₄ deste período. Maior emissão acumulada de CH₄ foi verificada para o tratamento com monocultivo de arroz em sistema plantio direto, comparativamente ao sistema convencional de preparo. Atribui-se a diferença em emissões entre os sistemas de preparo do solo, principalmente, à quantidade elevada de resíduos orgânicos derivados da resteva de arroz em cobertura, mantendo a umidade do solo mais elevada, favorecendo a atividade metanogênica (LE MER e ROGER, 2001). Para os demais sistemas de culturas, não houve efeito do sistema de

preparo do solo sobre as emissões de CH₄ do solo durante o período de entressafra. Em relação aos sistemas de rotação de culturas, as diferenças estiveram restritas ao sistema plantio direto, sendo que o monocultivo de arroz proporcionou maior emissão total de CH₄ na entressafra, relativamente aos sistemas com rotações de cultivos de sequeiro, que não diferiram entre si. Grande parte das emissões de CH₄ ocorreram no início do período de entressafra (Figura 3), quando o solo ainda se encontrava saturado. Este resultado é obtido em decorrência da manutenção das taipas utilizadas para a irrigação do arroz na safra 2017/2018, mantendo a umidade do solo desta área elevada. Devido a isso, o solo permaneceu em condições anaeróbicas por maior período de tempo, propiciando a proliferação de microrganismos metanogênicos, produtores de CH₄ (PONNAMPERUMA, 1972).

No que se refere às emissões acumuladas de CH₄ durante o cultivo de arroz na safra 2018/2019, houve efeito da interação entre os fatores sistema de preparo do solo e de rotação de culturas (Tabela 6). Apenas na rotação sorgo-sorgo-milho-arroz não houve diferença entre as emissões totais de CH₄ em relação aos sistemas de preparo do solo. Para os demais sistemas de culturas, as emissões medidas sob sistema convencional de preparo foram superiores às determinadas sob plantio direto. O revolvimento do solo, proporcionado pelas operações de preparo, e a incorporação da matéria orgânica ao solo expõem o material orgânico lábil ao ataque de microrganismos metanogênicos, favorecendo assim a produção de CH₄ (KHALIQ et al., 2013). Para ambos os sistemas de preparo do solo, os quatro sistemas de rotação de culturas não apresentaram diferença nas emissões de CH₄ durante o cultivo de arroz irrigado.

Tabela 6. Emissões totais de CH₄ em Planossolo na entressafra 2018 e na Safra 2018/2019, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS.

Rotação de culturas	Entressafra 2018		Safra 2018/2019	
	Convencional	Plantio direto	Convencional	Plantio direto
----- CH ₄ (kg ha ⁻¹) -----				
Arroz-arroz-arroz-arroz	2,33 b A	10,28 a A	602,66 a A	376,61 b A
Soja-soja-soja-arroz	0,55 a A	0,77 a B	434,94 a A	340,75 b A
Sorgo-sorgo-milho-arroz	0,59 a A	0,76 a B	577,33 a A	446,46 a A
Soja-sorgo-soja-arroz	0,46 a A	1,14 a B	434,65 a A	345,22 b A

Médias seguidas de mesma letra minúscula, nas linhas, e maiúsculas, nas colunas, dentro da mesma época (entressafra ou safra) não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

As emissões anuais de CH₄, que correspondem ao somatório das emissões determinadas nos períodos de safra e entressafra, são apresentadas na tabela 7. Houve efeito da interação entre os fatores sistema de preparo do solo e de rotações de culturas e os resultados obtidos foram semelhantes aos do período da safra 2018/2019. Outros estudos também verificaram que a maior parte da emissão de CH₄ ocorreu durante a safra 2018/2019 quando o solo encontrava-se alagado para o estabelecimento do cultivo de arroz irrigado (SILVA, 2014; SILVEIRA, 2018). Com exceção da rotação sorgo-sorgo-milho-arroz, para a qual não houve diferença nas emissões anuais de CH₄ entre os sistemas de preparo do solo, os demais sistemas de rotação de culturas apresentaram maiores emissões anuais deste GEE sob sistema convencional de preparo, em relação àquelas medidas sob plantio direto. Portanto, atribui-se esse comportamento ao revolvimento do solo que expõe o material orgânico lábil ao ataque de metanogênicos (KHALIQ et al., 2013). As diferenças entre os sistemas de rotação de culturas ocorreram apenas sob plantio direto, onde a rotação de gramíneas (sorgo-sorgo-milho-arroz) proporcionou maior emissão anual de CH₄ entre os sistemas avaliados. A maior emissão de CH₄ determinada neste sistema de cultura, podem ser atribuídas à maior entrada de carbono do solo, proveniente da maior quantidade de resteva vegetal gerada pelo cultivo de milho. Estatisticamente, estas emissões foram equiparadas ao cultivo sucessivo de arroz irrigado e a rotação soja-sorgo-soja-arroz, com desempenho

intermediário, cujas emissões não diferiram daquelas verificadas no cultivo de arroz irrigado após três cultivos sucessivos de soja.

Tabela 7. Emissões anuais totais de CH₄ em Planossolo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado, RS. Entressafra 2018 e Safra 2018/2019

Rotação de culturas	Convencional	Plantio direto
	----- CH ₄ (kg ha ⁻¹) -----	
Arroz-arroz-arroz-arroz	604,99 a A	386,88 b AB
Soja-soja-soja-arroz	435, 49 a A	341,52 b B
Sorgo-sorgo-milho-arroz	577,92 a A	447,22 a A
Soja-sorgo-soja-arroz	435,11 a A	346,36 b AB

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

5.3.5. Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) e relação PAGp/rendimento de grãos (PAGp/RG)

Na entressafra 2018 houve interação significativa entre os fatores sistema de preparo do solo e de rotação de culturas sobre o PAGp (Tabela 8). As diferenças associadas às rotações de culturas ocorreram, apenas, sob sistema convencional de preparo. O sistema com três cultivos sucessivos de soja apresentou maior PAGp, sendo equiparado, porém, pelos sistemas sorgo-sorgo-milho e monocultivo de arroz, que apresentaram desempenho intermediário e não diferiram também do sistema soja-sorgo-soja, com menor PAGp. O maior PAGp verificado no cultivo sucessivo de soja é constituído, principalmente, por emissões de N₂O (≈ 72%), que tem potencial de aquecimento global 298 vezes maior, em relação ao CH₄ que é apenas 34 vezes superior (IPCC, 2007). A incorporação de resíduos de soja com baixa relação C:N e a alta concentração de C lábil (CIAMPITTI et al., 2005), associadas a variação na umidade do solo decorrente de eventos de precipitação durante o outono/inverno, provavelmente contribuíram para as maiores emissões de N₂O, e conseqüentemente para o maior PAGp neste tratamento. Ademais, nos cultivos de sequeiro, a necessidade de solo drenado para a implantação da pastagem de inverno, associado as oscilações nas condições de oxirredução do solo devido a eventos de

precipitação e as características de drenagem deficiente dos solos das terras baixas, contribuíram para as emissões de N_2O , que corresponderam a maior parte do PAGp nesses sistemas.

O efeito do sistema de preparo do solo manifestou-se, exclusivamente, para a rotação arroz-arroz-arroz, para a qual maior PAGp foi determinada sob sistema plantio direto, relativamente ao preparo convencional. Este resultado decorre do fato da maior emissão de CH_4 determinada nestes ambientes (Tabela 6). Além das condições de solo com umidade elevada ou até mesmo saturado nas áreas precedidas pelo cultivo de arroz irrigado, em decorrência da manutenção das taipas utilizadas para a irrigação do cereal na safra anterior, no sistema plantio direto, a manutenção dos resíduos de arroz em superfície contribuem para que a umidade elevada do solo seja mantida por maior período de tempo, criando condições de ambiente reduzido, necessárias para a atividade metanogênica (AULAKH et al., 2001). Essas características associadas ao inverno chuvoso, contribuem para maiores emissões de CH_4 deste sistema, em relação ao preparo convencional.

No período de outono/inverno, independentemente do sistema de preparo do solo, o N_2O foi responsável por mais de 50% do PAGp, com exceção dos tratamentos sobre resteva de arroz irrigado onde esse GEE representou cerca de 35% do PAGp (Figura 4a). Durante o outono/inverno, para o estabelecimento e desenvolvimento de forrageiras de estação fria é importante manter o solo drenado, condição em que a produção de CH_4 é inibida. A eficiência da drenagem foi maior nas áreas precedidas por cultivos de sequeiro, reduzindo a contribuição do CH_4 para o PAGp. Contrariamente, o inverno chuvoso, associado a drenagem deficiente do Planossolo, é favorável à alternância nas condições de oxirredução do solo e, portanto, aos processos de nitrificação e desnitrificação, com a liberação de N_2O . Já nas áreas que tiveram arroz como cultivo antecedente, o solo permaneceu por maior período de tempo com umidade elevada, apesar da supressão da irrigação ao final do período de cultivo do arroz, favorecendo a produção e emissão de CH_4 (ADVIENTO-BORBE et al, 2015).

Tabela 8. Potencial de aquecimento global parcial de Planossolo na entressafra 2018 e na Safra 2018/2019, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS

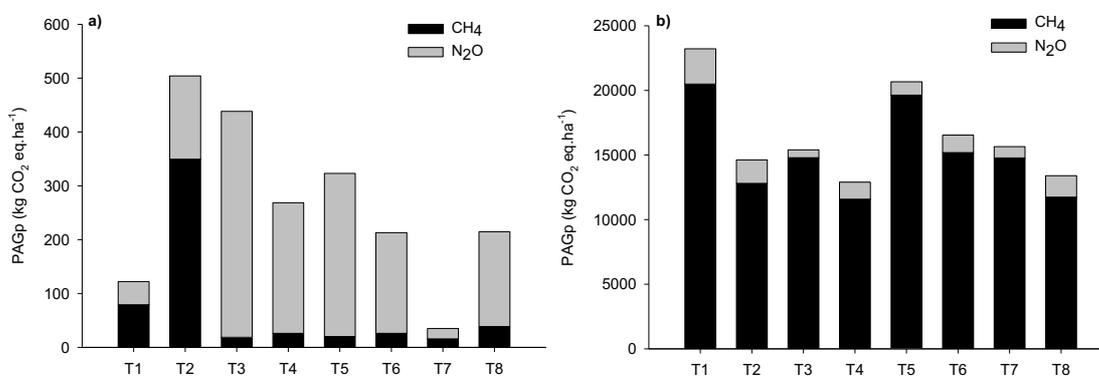
Rotação de culturas	Entressafra 2018		Safra 2018/2019	
	Convencional	Plantio direto	Convencional	Plantio direto
	----- kg CO ₂ eq.ha ⁻¹ -----			
Arroz-arroz-arroz-arroz	122,16 b AB	504,14 a A	23220,65 a A	14618,54 b A
Soja-soja-soja-arroz	438,22 a A	268,50 a A	15398,33 a B	12896,76 a A
Sorgo-sorgo-milho-arroz	323,01 a AB	212,92 a A	20667,97 a AB	16542,13 a A
Soja-sorgo-soja-arroz	34,99 a B	214,72 a A	15648,32 a B	13397,93 a A

Médias seguidas de mesma letra minúscula, nas linhas, e maiúsculas, nas colunas, dentro da mesma época (entressafra ou safra) não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Também durante a safra de primavera/verão houve interação significativa entre os sistemas de preparo do solo e de rotação de culturas sobre o PAGp. O efeito do sistema de preparo do solo restringiu-se à rotação com monocultivo de arroz, para a qual, ao contrário do que foi observado na entressafra, o sistema convencional de preparo do solo proporcionou maior PAGp durante o cultivo de arroz, relativamente ao plantio direto (Tabela 8). Explica-se esse comportamento pela incorporação recente ao solo da palha do arroz remanescente da safra anterior, bem como da cobertura vegetal estabelecida durante o outono/inverno, estando sujeitas à decomposição anaeróbica quando da inundação do solo para o arroz (BAYER et al., 2014). Em consonância, outros estudos também reportaram emissões de CH₄ significativamente menores em cultivo de arroz irrigado sob plantio direto, em comparação a sistemas que acarretam em distúrbio do solo e incorporação de resíduos (ZSCHORNACK et al., 2011; PANDEY et al., 2012; LI et al., 2013; FENG et al., 2013). Quanto ao efeito do sistema de rotação de culturas sobre o PAGp do cultivo de arroz irrigado, esse ocorreu, apenas, sob sistema convencional de preparo do solo. O monocultivo de arroz proporcionou maior PAGp, sendo equiparado, apenas, pelo sistema com rotação de gramíneas sorgo-sorgo-milho-arroz, que apresentou desempenho intermediário, pois não diferiu também das duas rotações que incluíram a cultura da soja (Tabela 8). O estabelecimento de culturas de sequeiro requer um ambiente drenado para o cultivo e, por isso, apresentam potencial de

mitigar as emissões de CH₄ do solo em rotação ao arroz irrigado (BAYER et al., 2013). O menor PAGp observado nas duas rotações que incluíram a cultura da soja, pode ser justificado pela menor relação C:N da cultura (AULAKH et al., 2001; KHOSA et al., 2010) e menor quantidade de resíduo vegetal gerado pela cultura da soja e, portanto, menor quantidade de C disponível (NASER et al., 2007), além de apresentar potencial em mitigar as emissões de N₂O do solo, uma vez que a soja ao crescer N via fixação biológica, reduz ou elimina a necessidade de aporte de N via adubação nitrogenada (JANTALIA et al., 2008).

Durante o cultivo de arroz irrigado sob irrigação contínua do solo, as emissões de CH₄ foram responsáveis por mais de 90% do PAGp do período, independente da cultura antecedente (Figura 4b). Resultados similares foram obtidos por Veçozzi (2019), nos quais o CH₄ respondeu por quase a totalidade das emissões (90%) do solo cultivado com arroz irrigado durante a primavera/verão em estudo sobre o uso de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada, bem como os encontrados por Scivittaro et al. (2016) no cultivo de arroz irrigado em Planossolo (99%).



T1- arroz-arroz-arroz-arroz/SC; T2- arroz-arroz-arroz-arroz/PD; T3- soja-soja-soja-arroz/SC; T4- soja-soja-soja-arroz/PD; T5- sorgo-sorgo-milho-arroz/SC; T6- sorgo-sorgo-milho-arroz/PD; T7- soja-sorgo-soja-arroz/SC; T8- soja-sorgo-soja-arroz/PD

Figura 4. Potencial de aquecimento global parcial em Planossolo na (a) entressafra 2018 e na (b) safra 2018/2019, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS.

O PAGp anual, que corresponde ao somatório do PAGp nos períodos de entressafra e safra, apresentou significância de interação entre os fatores sistemas de preparo do solo e sistema de rotação de culturas (Tabela 9). Os valores de PAGp anual variaram de 13.165,26 kg CO₂ eq. ha⁻¹ a 23.342,81 kg

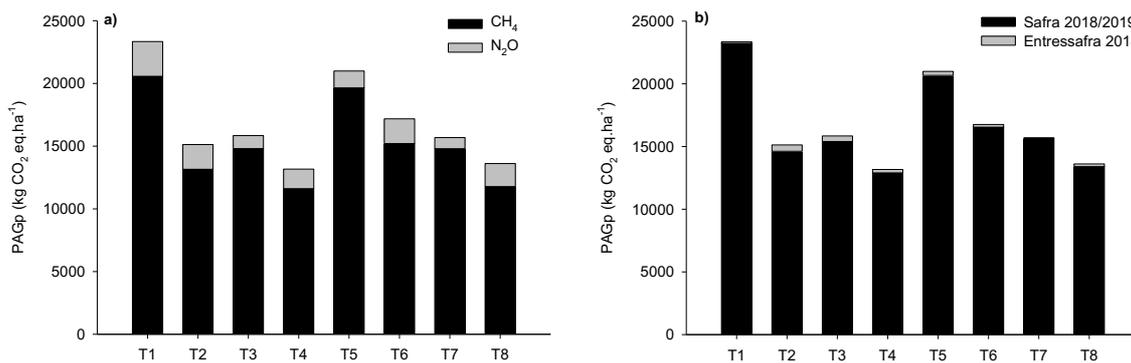
CO₂ eq.ha⁻¹. Maior PAGp foi verificado no cultivo sucessivo de arroz irrigado sob preparo convencional do solo, comparativamente ao sistema de plantio direto. Para os demais sistemas de culturas, não se observou efeito do sistema de preparo do solo em kg de CO₂ eq.ha⁻¹. Neste sistema de preparo do solo, o revolvimento do solo expõe o material orgânico prontamente disponível, ou seja, os resíduos vegetais do cultivo de arroz e da pastagem de estação fria, ao ataque de microrganismos, quando comparado aos sistemas mais conservacionista como o plantio direto (KHALIQ et al., 2013). Entre os sistemas de culturas, as diferenças foram observadas apenas no sistema convencional de preparo do solo, onde o cultivo sucessivo de arroz irrigado apresentou maior PAGp, sendo equiparado pela rotação sorgo-sorgo-milho-arroz, apresentando desempenho intermediário, pois não diferiu das duas rotações que incluíam a cultura da soja. A introdução de culturas de sequeiro, como a soja e o milho, reduzem drasticamente o período de ocorrência de ambiente anóxico, favorável à produção de CH₄. Entretanto, para o estabelecimento da cultura do milho, elevado aporte de N via adubação nitrogenada se faz necessário (JANTALIA et al., 2008). A elevada demanda de N, associada as condições de má drenagem dos solos das terras baixas e a eventos de precipitação intensa, potencializa as emissões de N₂O (ROLSTON, 1981; ROBERTSON e GROFFMAN, 2014). A qualidade e quantidade do material orgânico também influenciam as emissões de GEE do solo (LE MER e ROGER, 2001; NASER et al., 2007). Neste sentido, o menor PAGp das duas rotações incluindo a cultura da soja, pode ser justificado pela menor relação C:N (KHOSA et al, 2010), assim como pela menor quantidade de resíduo vegetal gerado pela cultura da soja (WANG et al., 1999; NASER et al., 2007). Além disso, a soja ao disponibilizar N via fixação simbiótica, reduz ou elimina a necessidade de aplicação de fertilizantes nitrogenados, apresentando potencial de mitigar as emissões de N₂O (JANTALIA et al., 2008).

Tabela 9. Potencial de aquecimento global parcial anual de Planossolo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Entressafra 2018 e safra 2018/2019

Rotação de culturas	Convencional	Plantio direto
	----- kg CO ₂ eq.ha ⁻¹ -----	
Arroz-arroz-arroz-arroz	23342,81 a A	15122,68 b A
Soja-soja-soja-arroz	15836,56 a B	13165,26 a A
Sorgo-sorgo-milho-arroz	20990,98 a AB	16775,05 a A
Soja-sorgo-soja-arroz	15683,31 a B	13612,65 a A

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

O período da safra 2018/2019 cultivada com arroz irrigado foi o maior responsável pelo PAGp anual com cerca de 98% das emissões de GEE (Figura 5b), onde o CH₄ contribuiu com aproximadamente de 90% do PAGp anual (Figura 5a), de maneira que nem mesmo o maior PAGp do N₂O em relação ao CH₄ (N₂O x 298, CH₄ x 34) foi capaz de elevar a participação deste gás na composição do PAGp em sistemas de cultivo de arroz irrigado nas terras baixas do Rio Grande do Sul. Resultados similares foram obtidos por Silveira (2019), nos quais o CH₄ respondeu por cerca de 80% do PAGp anual em Planossolo cultivado com arroz irrigado, bem como os encontrados por Zschornack et al. (2018) em Gleissolo cultivado com arroz irrigado (98%). Maior PAGp anual foi obtido no cultivo sucessivo de arroz irrigado sob SC. Esse resultado indica que a inserção de culturas de sequeiro em rotação ao arroz irrigado, assim como a adoção do sistema plantio direto, apresenta potencial de mitigar as emissões de GEE em terras baixas cultivadas com arroz irrigado.



T1- arroz-arroz-arroz-arroz/SC; T2- arroz-arroz-arroz-arroz/PD; T3- soja-soja-soja-arroz/SC; T4- soja-soja-soja-arroz/PD; T5- sorgo-sorgo-milho-arroz/SC; T6- sorgo-sorgo-milho-arroz/PD; T7- soja-sorgo-soja-arroz/SC; T8- soja-sorgo-soja-arroz/PD

Figura 5. (a) Contribuição dos gases CH₄ e N₂O e dos (b) períodos de entressafra 2018 e safra 2018/2019 para o Potencial de Aquecimento Global parcial anual (Entressafra 2018 + Safra 2018/2019) de Planossolo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS.

O rendimento de grãos (RG) foi influenciado pelo sistema de preparo do solo e pelo sistema de rotação de culturas de verão (Tabela 10). Apenas a rotação soja-sorgo-soja-arroz não manifestou efeito em relação ao sistema de preparo do solo. O cultivo sucessivo de arroz irrigado, assim como três cultivos sucessivos de soja anteriores ao arroz irrigado, apresentaram maior rendimento de grãos em plantio direto. Contrariamente, a rotação de gramíneas com arroz irrigado (sorgo-sorgo-milho-arroz) apresentou maior rendimento de grãos em preparo convencional do solo.

A comparação entre os sistemas de rotação de culturas, por sua vez, mostrou que sob preparo convencional do solo as rotações sorgo-sorgo-milho-arroz e soja-soja-soja-arroz propiciou maior produtividade de grãos que os demais sistemas de culturas. O menor rendimento verificado no monocultivo de arroz pode ser devido ao cultivo contínuo de arroz em condições de solo inundado, o que pode resultar em baixa fertilidade do solo (CASSMA e PINGALI, 1995), degradação física e competição com plantas daninhas (ANDRES et al., 2001). Já no plantio direto, maior rendimento de grãos foi observado no cultivo de arroz irrigado após o cultivo de três safras consecutivas de soja, com média de 10.399 kg grãos de arroz.ha⁻¹, superando a média do estado (Reunião..., 2018). Resultado similar foi encontrado por Cha-un et al. (2017), em que o monocultivo de arroz irrigado apresentou redução na produtividade de grãos em relação a tratamentos que envolviam a rotação de culturas soja-arroz.

Tabela 10. Rendimento de Grãos (RG) de arroz e relação entre o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) e RG, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Safra 2018/2019

Rotação de culturas	Rendimento de Grãos		PAGp/RG	
	Convencional	Plantio direto	Convencional	Plantio direto
	Grãos de arroz (kg.ha ⁻¹)		kg CO ₂ eq. kg ⁻¹ grãos arroz	
Arroz-arroz-arroz-arroz	7222 b B	8190 a B	3,22 a A	1,78 b AB
Soja-soja-soja-arroz	9013 b A	10399 a A	1,71 a B	1,24 b B
Sorgo-sorgo-milho-arroz	8842 a A	7987 b B	2,34 a B	2,07 a A
Soja-sorgo-soja-arroz	7478 a B	7731 a B	2,09 a B	1,73 a AB

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

A relação PAGp em função do RG do arroz apresentou interação significativa entre os fatores sistemas de preparo do solo e cultura antecedente (Tabela 10). O índice PAGp/RG apresentou resultados que variaram entre 3,22 e 1,24 kg CO₂ eq. kg⁻¹ de grãos de arroz. Diferença no PAGp/RG em relação ao sistema de preparo do solo foi verificado apenas no monocultivo de arroz irrigado e no cultivo de arroz irrigado antecedido pelo cultivo sucessivo de soja, que apresentaram maior PAGp/RG sob sistema convencional, em relação ao plantio direto. Estudo realizado por Bayer et al. (2014), também encontrou menor PAGp/RG em cultivo de arroz irrigado sob plantio direto. Entretanto, não verificaram diferenças significativas entre o rendimento de grãos de arroz entre sistema convencional e plantio direto. No monocultivo de arroz irrigado nas terras baixas, o preparo convencional do solo emitiu cerca de duas vezes mais GEE por kg de grão de arroz produzido por hectare, em relação ao sistema plantio direto. As diferenças entre os sistemas de rotação de culturas mostraram que, sob sistema convencional de preparo do solo, o monocultivo de arroz irrigado apresenta maior emissão de GEE por kg de grãos de arroz produzido. Já sob plantio direto, essa maior emissão foi determinada pela rotação sorgo-sorgo-milho-arroz, sendo equiparado ao monocultivo de arroz irrigado e a rotação soja-sorgo-soja-arroz, que apresentaram desempenho intermediário, pois não diferiram do cultivo de arroz irrigado em sucessão a três cultivos de soja.

5.4. Conclusões

A inserção de cultivos de sequeiro em rotação ao arroz irrigado reduz as emissões de CH₄ e o PAGp do cultivo de arroz irrigado em terras baixas, embora potencialize as emissões de N₂O e o PAGp do período de outono/inverno.

A adoção de plantio direto reduz as emissões de CH₄ e a contribuição do cultivo de arroz irrigado para o PAGp anual, em relação ao sistema convencional de preparo, independentemente do sistema de rotação de culturas.

O período de cultivo de arroz irrigado (safra de verão) responde pela maior parte das emissões de GEE e do PAGp anual (90%) de terras baixas. Portanto, as estratégias de mitigação de GEE em cultivo de arroz irrigado devem focar no período de cultivo de arroz e, mais especificadamente, nas emissões de CH₄.

A utilização de soja em rotação com o arroz irrigado cultivado nas terras baixas eleva o rendimento de grãos de arroz e reduz o PAGp em escala de rendimento de grãos, relativamente ao monocultivo de arroz irrigado.

6. CAPÍTULO 2: ESTOQUES DE CARBONO EM SOLO CULTIVADO COM ARROZ IRRIGADO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E DE ROTAÇÃO DE CULTURAS

6.1. Introdução

O carbono (C) contido na matéria orgânica do solo (MOS) representa cerca de 80% do total de C da biosfera terrestre, de forma que o solo é considerado um importante dreno de C atmosférico, apresentando elevado potencial para mitigar o efeito estufa de origem antrópica (BOLIN e SUKUMAR, 2000).

O C orgânico do solo, por sua vez, é um importante indicador da qualidade e produtividade dos agroecossistemas (MIELNICZUK, 1999), sendo influenciado pelas mudanças no uso da terra e pelas práticas de manejo adotadas (LANG et al, 2016; HAUNG et al., 2020). A atividade agrícola proporciona decréscimo nos estoques de C orgânico total do solo (COT), comparativamente ao solo na condição natural (POEPLAU et al., 2011). Portanto, a recuperação dos estoques de COT dos solos requer a adoção de práticas de manejo conservacionistas. Dessa forma, sistemas agrícolas que aumentam as reservas de COT são fundamentais para a sustentabilidade da produção agrícola.

As plantas, por meio de seus resíduos e exsudatos radiculares, são a principal fonte de C para o solo (CLEMMENSEN et al., 2013). Neste sentido, estudos sugerem que a conversão de áreas sob sistema convencional (SC) de preparo do solo para o sistema plantio direto (PD) ocasionam aumento no conteúdo de C do solo (SIX et al., 2002; LUO et al., 2010) e acúmulo de MOS, refletindo-se em melhoria na qualidade do solo e estabilização do C (SINGH et al, 2015). Isto porque, em geral, as práticas de manejo que diminuem o revolvimento e a perturbação do solo são determinantes para o acúmulo de C no solo (BAYER et al., 1997), além de reduzirem os custos, pela diminuição das operações agrícolas, prevenirem a erosão do solo e melhorarem a qualidade e conservação de água (YANG et al., 2013).

Frente a isso, no Brasil, especificamente no Plano de Ação para o estabelecimento de Agricultura de Baixo Carbono, lançado em 2010, o Governo Federal definiu meta de aumentar a área nacional sob sistema plantio direto de 32 para 40 milhões de hectares até 2020 (MAPA, 2012).

Nesta meta também estão incluídas as áreas de cultivo de arroz irrigado nas áreas de terras baixas do Rio Grande do Sul, a drenagem natural deficiente dos solos (PINTO et al., 2004) favorece o cultivo de arroz irrigado por inundação do solo. Nesse sistema de produção, o solo é mantido sob alagamento por um período de 3 a 4 meses ao longo do ano, alterando a dinâmica do C do solo em relação à condição de solo drenado (SOUSA et al., 2004), tanto em relação aos produtos da decomposição da MOS quanto à velocidade de decomposição que, sob anaerobiose e/ou baixas temperaturas (regiões de clima temperado), contribuem para uma menor taxa de decomposição (KUKAL et al., 2009).

Durante o período de solo alagado, as alterações químicas, físicas e biológicas do solo diferem daquelas que ocorrem em condições de solo drenado e influenciam, conseqüentemente, a dinâmica da MOS (SOUSA et al., 2004). No solo inundado, os poros são ocupados por água e uma lâmina d'água é estabelecida sobre sua superfície. Em decorrência da ausência de O₂, a microbiota do solo passa a ser predominantemente anaeróbica (SOUSA et al., 2009).

Determinadas frações da MOS têm se mostrado mais eficazes em demonstrar rapidamente as mudanças no conteúdo de C no solo decorrentes do manejo e, por isso, têm sido utilizadas como indicadoras sensíveis às práticas de manejo (ROSA, 2010).

O fracionamento físico da MOS possibilita relacionar cada compartimento da matéria orgânica com as suas funções no sistema, sendo considerado menos destrutivo em relação à estrutura e composição (CHRISTENSEN, 2001). Por sua vez, o fracionamento físico granulométrico possibilita separar as frações de acordo com o tamanho e suas respectivas interações com a fração mineral do solo. Frações com tamanho inferior a 0,053 mm (Carbono Associado aos Minerais - CAM) são constituídas por material orgânico em estágio mais avançado de decomposição, apresentam área superficial específica maior e estão relacionadas à maior recalcitrância. Já as frações com diâmetro superior a 0,053 mm (Carbono Orgânico Particulado - COP) apresentam pouca associação organo-mineral, sendo mais sensíveis que as demais quanto ao manejo do solo (CAMBARDELLA e ELLIOTT, 1992) e, normalmente, ocorrem em quantidades reduzidas em sistemas de manejo com revolvimento intensivo do solo (PILLON, 2000; PINHEIRO et al., 2015). Trata-se da fração mais lábil,

dado ser mais acessível à decomposição pelos microrganismos e possuir, portanto, maior potencial para indicar as mudanças no C do solo (SIX et al., 2002). A análise de ambas as frações, COP e CAM, contribui para explicar as mudanças nos teores de C do solo já nos momentos iniciais de alterações de manejo (GONG et al., 2009).

Este estudo teve por objetivo avaliar a influência dos sistemas de preparo do solo e da rotação de culturas nos estoques de carbono do solo em Planossolo cultivado com arroz irrigado.

6.2. Material e Métodos

O experimento foi realizado na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão-RS, em um solo classificado como Planossolo Háplico (STRECK et al., 2008). De acordo com Köppen, o clima da região é classificado como subtropical úmido ou temperado (Cfa) e apresenta temperatura média anual de 17,8°C e precipitação média anual de 1367 mm (REISSER JÚNIOR et al., 2008).

Para o estudo, aproveitou-se a estrutura experimental de experimento instalado no outono/inverno de 2015, envolvendo quatro combinações de quatro sistemas de rotação de culturas (arroz-arroz-arroz-arroz, sorgo-sorgo-milho-arroz, soja-sorgo-soja-arroz e soja-soja-soja-arroz) implantados em dois sistemas de preparo do solo (convencional – SC e plantio direto – PD).

As avaliações foram realizadas por ocasião da implementação da quarta fase de dois dos sistemas de culturas referidos, sendo eles: arroz-arroz-arroz-arroz e sorgo-sorgo-milho-arroz, estabelecidos em sistema convencional de preparo e plantio direto. Na safra 2018/2019, ambos os sistemas de cultura selecionados foram cultivados com arroz irrigado. Os tratamentos encontravam-se dispostos em delineamento de blocos ao acaso em parcelas subdivididas com três repetições.

Em cada tratamento, foram realizadas duas coletas de solo para a determinação da densidade do solo (Ds) e do teor de carbono no solo. A primeira coleta ocorreu em outubro de 2018, antecedendo a semeadura da cultura de arroz irrigado (pré-semeadura), e a segunda coleta foi realizada em março de 2019, posteriormente a colheita do arroz (pós-colheita). As amostragens de solo

foram feitas em quatro profundidades: camadas de 0,00-0,025 m; 0,025-0,05 m; 0,05-0,10 m; e 0,10-0,20 m. Adicionalmente, realizou-se a mesma avaliação em uma área de referência (campo nativo) de mesmo solo, para fins de correção dos cálculos dos estoques de C.

Amostras de solo indeformadas (Figura 6) foram coletadas, em triplicata em cada profundidade, utilizando-se anéis volumétricos de 0,025 m x 0,048 m, nas duas camadas mais superficiais, e anéis de 0,05m x 0,048 m, nas demais profundidades, para determinação da densidade do solo (D_s), conforme metodologia descrita em Embrapa (2011).



Figura 6. Coleta de amostras de solo indeformadas com auxílio de anéis volumétricos para a determinação da densidade do solo.

Nas mesmas ocasiões, amostras deformadas de solo (Figura 7) foram coletadas com auxílio de pá de corte, nas profundidades 0,00-0,025 m; 0,025-0,05 m; 0,05-0,10 m; e 0,10-0,20 m, acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao laboratório para o preparo, que consistiu em sua abertura em bandejas para a secagem à sombra. Na sequência, as amostras foram destorroadas manualmente nas linhas de fraqueza. As amostras preparadas foram submetidas ao fracionamento físico granulométrico, seguindo método descrito por Cambardella e Elliot (1992). Foram utilizados 20 g de solo seco ao ar e 60 mL de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}). O carbono contido no material retido na peneira com 0,053 mm de abertura de malha corresponde ao carbono orgânico particulado (COP), enquanto o carbono na forma não lábil (CAM) foi obtido por diferença entre o carbono orgânico total (COT) e o COP. Os teores de

carbono orgânico total e particulado foram determinados por oxidação a seco em analisador elementar Leco TruSpec CHN.



Figura 7. Coleta de amostras de solo deformadas com auxílio de pá de corte para determinação dos conteúdos do carbono orgânico total e do carbono orgânico particulado.

Os resultados de estoque de carbono foram calculados considerando-se a D_s , o teor de carbono total e de cada fração, e a espessura de cada camada de solo amostrada, seguindo a equação proposta por Veldkamp (1994):

$$ECS = (C \times D_s \times p) / 10 \quad \text{Eq. 4}$$

onde: ECS = estoque de carbono do solo ou fração ($Mg \text{ ha}^{-1}$); C = teor de carbono do solo ou fração ($g \text{ kg}^{-1}$); D_s = densidade do solo ($g \text{ cm}^{-3}$) e p = espessura da camada do solo (m).

Entretanto, para evitar interpretações equivocadas dos resultados em função da influência do manejo na D_s , os estoques foram calculados em massa equivalente, para cada camada estudada, corrigindo-se a espessura da mesma em relação à área de referência, através da fórmula matemática proposta por Carvalho et al. (2009) e descrita detalhadamente por Fernandes e Fernandes (2013):

$$ECS = (C_s \times D_s \times (D_{ref}/D_s \times e)) / 10 \quad \text{Eq. 5}$$

onde: ECS = estoque de C orgânico do solo em determinada profundidade ($Mg \text{ ha}^{-1}$); C_s = teor de C orgânico total na profundidade amostrada ($g \text{ kg}^{-1}$); D_s = densidade do solo na profundidade amostrada ($kg \text{ dm}^{-3}$); D_{ref} = densidade do

solo para a profundidade amostrada na área de referência (kg dm^{-3}); e e = espessura da camada considerada (cm).

Os estoques de carbono totais do solo e das frações granulométricas dos tratamentos foram submetidos à análise de variância e ao teste de Tukey ao nível de 5%, utilizando-se o software R (versão 3.6.3). A área de referência não foi incluída na análise estatística, pois suas condições não representam a realidade do solo da área experimental.

6.3. Resultados e Discussão

Na Tabela 11, são apresentados os resultados de densidade do solo (D_s) relativos às amostragens realizadas previamente à semeadura e posteriormente à colheita do arroz.

Previamente à semeadura do arroz (pré-semeadura), diferença estatística foi observada na camada mais profunda amostrada (0,10 a 0,20 m), onde sob dentro do plantio direto, a rotação sorgo-sorgo-milho apresentou maior densidade em relação ao monocultivo de arroz irrigado. Na avaliação realizada após a colheita do arroz, houve diferença estatística entre os sistemas de rotação de culturas em plantio direto nas camadas 0 a 0,025m; 0,025 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m, sendo que o monocultivo de arroz irrigado apresentou densidade do solo maior, em relação a rotação sorgo-sorgo-milho-arroz. Nessa avaliação, observou-se, ainda, que na camada mais superficial de solo (0 a 0,025 m), a rotação sorgo-sorgo-milho-arroz em sistema convencional apresentou densidade do solo maior, em comparação ao plantio direto. Por outro lado, na camada de 0,05 a 0,10 m, houve diferença estatística apenas no monocultivo de arroz irrigado, onde o plantio direto proporcionou densidade do solo maior em relação ao sistema convencional de preparo. Observou-se, ainda, tendência de elevação nos estoques de C do solo com o aumento da profundidade de amostragem (Tabela 12 e 13). Convém salientar que as espessuras das camadas de solo coletadas variaram de 0,025 m a 0,10 m, o que explica o fato de maiores estoques de C terem ocorrido na camada mais profunda, por apresentar maior espessura.

Tabela 11. Densidade do solo (Ds) de Planossolo em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado, RS. Dados relativos a avaliações realizadas em pré-semeadura (outubro/2018) e pós-colheita (março/2019) da quarta fase do sistema de rotação de culturas.

Densidade Pré-semeadura (Mg m⁻³)								
	0 a 0,025 m		0,025 a 0,05 m		0,05 a 0,10 m		0,10 a 0,20 m	
	Convencional	Plantio direto	Convencional	Plantio direto	Convencional	Plantio direto	Convencional	Plantio direto
Arroz-arroz-arroz	1,31 a A	1,27 a A	1,56 a A	1,58 a A	1,57 a A	1,69 a A	1,69 a A	1,67 a B
Sorgo-sorgo-milho	1,40 a A	1,29 a A	1,53 a A	1,54 a A	1,71 a A	1,71 a A	1,79 a A	1,81 a A
Densidade Pós-colheita (Mg m⁻³)								
	0 a 0,025 m		0,025 a 0,05 m		0,05 a 0,10 m		0,10 a 0,20 m	
	Convencional	Plantio direto	Convencional	Plantio direto	Convencional	Plantio direto	Convencional	Plantio direto
Arroz-arroz-arroz-arroz	1,43 a A	1,46 a A	1,40 a A	1,72 a A	1,48 b A	1,71 a A	1,61 a A	1,60 a A
Sorgo-sorgo-milho-arroz	1,44 a A	1,12 b B	1,50 a A	1,42 a B	1,59 a A	1,56 a B	1,70 a A	1,68 a A

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

O estoque de COT medido anteriormente à semeadura de arroz, na camada de 0,0 a 0,20 m de profundidade, foi de 52,02 e 51,61 Mg ha⁻¹ para o sistema com monocultivo de arroz, nos sistemas plantio direto e convencional de preparo do solo, respectivamente, enquanto que para a rotação com cultivos de sequeiro (sorgo-sorgo-milho), os valores de COT foram de 47,95 e 40,94 Mg ha⁻¹ nos sistemas PD e SC, respectivamente (Tabela 12). Já na amostragem realizada após a colheita do arroz, os estoques totais de COT na mesma camada de solo alcançaram 53,39 Mg ha⁻¹, no sistema convencional, e 52,74 Mg ha⁻¹, em plantio direto, para o sistema com monocultivo de arroz. Para a rotação sorgo-sorgo-milho-arroz, por sua vez, os valores totalizaram 46,18 e 40,05 Mg ha⁻¹ em PD e SC, respectivamente (Tabela 13). O arroz irrigado sob inundação contínua do solo apresenta perdas menores de C orgânico do solo devido   decomposi o mais lenta de matéria orgânica em solo inundado (OLK et al., 1996; KUKAL et al., 2009) o que favoreceu as maiores reservas de COT observadas no monocultivo de arroz irrigado.

Maiores estoques de COT em todo perfil de solo avaliado (0,00-0,20 m) foram, de maneira geral, obtidos no plantio direto em ambos períodos de avalia o. Com exce o do sistema arroz-arroz-arroz-arroz/SC (pós-colheita) que, apesar de diferença pequena, apresentou valor levemente maior de estoque de C em preparo convencional do solo. Independentemente do sistema de cultura e de preparo do solo considerado, os valores de estoque de COT determinados foram superiores aos determinados por Rosa (2011) para um Planossolo Háplico da mesma região, que também determinou maiores estoque de COT em cultivo de arroz irrigado sob plantio direto (43,27 Mg ha⁻¹), em rela o ao preparo convencional (33,75 Mg ha⁻¹). A intensidade e a frequência do revolvimento do solo em decorrência do preparo convencional favorecem a quebra de agregados e estimulam a atividade microbiana pela exposi o do material orgânico, aumentando a taxa de decomposi o do C orgânico (PILLON et al., 2000). Logo, por promoverem a manuten o da estrutura do solo e seus agregados, maiores estoques de COT tendem a ser observados em sistemas conservacionistas, como o plantio direto, pois protegem os resíduos orgânicos do solo e contribuem para a redu o da taxa de decomposi o (HASSINK e WHITMORE, 1997; DIEKOW et al., 2005).

Tabela 12. Estoques de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono associado aos minerais (CAM) em massa equivalente de diferentes camadas de solo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Dados relativos a avaliação realizada em pré-semeadura (outubro/2018) da quarta fase do sistema de rotação de culturas.

	C lábil COP			C não lábil CAM Mg ha ⁻¹			COT		
	<i>Camada 0 a 0,025 m</i>								
	SC	PD	média	SC	PD	média	SC	PD	média
Arroz-arroz-arroz	1,82	2,98	2,40 A	3,45	4,48	3,97 A	5,27	7,45	6,36 A
Sorgo-sorgo-milho	1,40	2,00	1,70 B	3,39	4,48	3,31 A	4,79	5,24	5,01 A
Média	1,60 b	2,49 a		3,90 a	3,42 a		5,03 a	6,34 a	
	<i>Camada 0,025 a 0,05 m</i>								
	SC	PD	média	SC	PD	média	SC	PD	média
Arroz-arroz-arroz	1,78	1,74	1,76 A	3,88	3,62	3,75 A	5,66	5,36	5,51 A
Sorgo-sorgo-milho	1,58	1,79	1,69 A	3,70	6,21	4,96 A	5,28	8,00	6,65 A
Média	1,68 a	1,77 a		3,80 a	4,91 a		5,48 a	6,68 a	
	<i>Camada 0,05 a 0,10 m</i>								
	SC	PD	média	SC	PD	média	SC	PD	média
Arroz-arroz-arroz	3,79	3,25	3,52 A	10,05 a A	8,20 b A	9,13	13,84 a A	11,45 b A	12,65
Sorgo-sorgo-milho	3,21	3,26	3,23 A	7,80 a B	9,15 a A	8,48	11,01 a B	12,41 a A	11,71
Média	3,50 a	3,25 b		8,93	8,68		12,43	11,93	
	<i>Camada 0,10 a 0,20 m</i>								
	SC	PD	média	SC	PD	média	SC	PD	média
Arroz-arroz-arroz	6,87	6,08	6,48 A	19,97	21,68	20,83 A	26,84	27,76	27,30 A
Sorgo-sorgo-milho	6,18	6,01	6,09 A	13,69	16,29	14,99 B	19,86	22,3	21,08 B
Média	6,53 a	6,05 a		16,83 a	18,99 A		23,35 a	25,02 a	
	<i>Camada 0 a 0,20 m</i>								
	SC	PD	média	SC	PD	média	SC	PD	média
Arroz-arroz-arroz	14,26	14,05	14,16	37,35	37,98	37,67	51,61	52,02	51,82
Sorgo-sorgo-milho	12,37	13,06	12,72	28,58	36,16	32,37	40,94	47,95	44,45
Média	13,32	13,56		32,97	37,07		46,28	49,99	

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

Dos totais de COT obtidos, em média, cerca de 70% foram compostos por C na forma não lábil (CAM) e o restante, ou seja, aproximadamente 30%, corresponderam por C lábil (COP), tanto na amostragem realizada em pré-semeadura, quanto em pós-colheita. Em regiões de clima temperado e em solos de terras altas, ou seja, em presença de oxigênio, a fração COP normalmente corresponde a aproximadamente 10-20% da MOS (CHRISTENSEN, 2001; BAYER et al., 2004). O aumento nos teores da fração lábil do carbono (COP) pode ser explicada pela condição anaeróbica dos solos das terras baixas, em decorrência da drenagem natural deficiente e do alagamento do solo para o cultivo de arroz irrigado que reduz a atividade microbiana e, conseqüentemente, mantém maiores quantidade de frações mais facilmente passíveis de perdas (COP) (NASCIMENTO et al., 2009).

No que diz respeito à amostragem em pré-semeadura do arroz (Tabela 12), período em que o solo se encontrava cultivado com forrageira de inverno e, portanto, drenado, verifica-se, de forma geral, que o sistema conservacionista de preparo do solo (plantio direto), favoreceu o acúmulo dos estoques de COT do solo e das reservas de CAM (fração relacionada à maior recalcitrância). Diversos estudos mostram benefícios decorrentes da redução da intensidade e frequência de distúrbios causados ao solo pela atividade agrícola, favorecendo a manutenção dos estoques de COT, por reduzir sua mineralização (SIX et al., 2000), melhorando a qualidade do solo e a sustentabilidade do sistema (SINGH et al., 2015; GUIMIRE et al., 2017), além de demonstrar grande eficiência em recuperar o conteúdo de MOS e aumentar a agregação do solo. Esses benefícios ocorrem inicialmente na camada superficial, elevando os níveis de qualidade do solo ao longo do tempo (PINHEIRO et al., 2015). Portanto, a adoção de sistema conservacionista de preparo, em que há redução do revolvimento do solo associado à adição de resíduos vegetais em superfície, é normalmente benéfica, favorecendo o acúmulo de nutrientes e propiciando aumento de produtividade e maior resiliência do agroecossistema (ALAM et al., 2014).

Especificamente quanto aos estoques de COP, associado às frações mais grosseiras do solo e comumente mais representativo da qualidade do solo (PINHEIRO et al., 2015), esses foram similares entre os sistemas de preparo do solo para as camadas de 0,025 a 0,05m e de 0,10 a 0,20 m de profundidade. Na

camada mais superficial do solo, independentemente do sistema de rotação de culturas, maior estoque de COP foi determinado sob PD, enquanto que na camada de 0,05 a 0,10 m, o comportamento foi contrário, ou seja, o estoque de COP foi superior sob sistema convencional de preparo (Tabela 12).

O COP corresponde às frações lábeis da MOS, ou seja, mais disponíveis à ação dos microrganismos do solo e, conseqüentemente, mais facilmente passíveis de perdas (SINGH et al, 2015; PINHEIRO et al., 2015). A MOS recuperada da fração areia (COP) apresenta baixa ou nula associação organo-mineral e, por isso, sistemas de manejo baseados em intenso revolvimento do solo apresentam reservas menores dessa fração (PILLON, 2000)

Com relação à comparação dos sistema de culturas, nas profundidades de 0,0 a 0,025 m e de 0,025 a 0,05 m, não houve efeito dos tratamentos sobre os estoques de COT, COP e CAM. Exceção a esse comportamento foi determinada para a camada mais superficial, para a qual o monocultivo de arroz irrigado proporcionou maior estoque de COP, relativamente ao sistema com cultivos de sequeiro (Tabela 12). Na camada de 0,05 a 0,10 m, por sua vez, apenas a fração COP não foi influenciada pelo sistema de rotação de culturas. Tanto a fração CAM como o COT foram similares entre os sistemas de rotação de culturas sob plantio direto de cultivo, mas sob SC, os valores determinados foram superiores para o sistema sob monocultivo de arroz irrigado. Também na camada mais profunda amostrada, efeito do sistema de rotação de culturas foi determinado apenas para a fração CAM e o COT; para ambos, o monocultivo de arroz favoreceu os estoques de carbono no solo em comparação aos cultivos de sequeiro (Tabela 12).

A análise desses resultados indica, de forma geral, tendência de maior acúmulo de C nas áreas sob monocultivo de arroz irrigado. Uma possível explicação para esse resultado é o fato de as taipas construídas para a irrigação do arroz serem mantidas durante o período de outono/inverno, favorecendo a condição de solo saturado por período prolongado de tempo. Menores perdas de C são verificadas em solos sujeitos ao alagamento, devido à baixa taxa de decomposição da MOS (OLK et al., 1996; KUKAL et al., 2009). Além disso, a maior alternância entre condições de solo drenado e saturado verificada nas áreas precedidas por cultivos de sequeiro, favorece o aumento no conteúdo de

C lábil no solo, fração que é mais facilmente perdida quando da ocorrência de perturbações frequentes do solo (SHRESTHA et al., 2002).

Na segunda época de avaliação, correspondendo ao período de pós-colheita do arroz (4ª fase dos sistemas de rotação de culturas avaliados), para as variáveis COT, COP e CAM, significância da interação entre os sistemas de preparo do solo e de culturas foi observada apenas nas duas camadas mais superficiais de solo (Tabela 13). O conteúdo de COT na camada de 0 a 0,025 m variou entre os sistemas de culturas apenas na ausência de preparo do solo (PD), havendo maior acúmulo de COT no sistema incluindo rotações de espécies de sequeiro com arroz irrigado, em relação ao cultivo de arroz contínuo. Por sua vez, as diferenças no CAM estiveram restritas ao sistema convencional de preparo, no qual o monocultivo de arroz favoreceu o acúmulo de C na fração, em relação à rotação sorgo-sorgo-milho-arroz. Para a fração COP, o efeito dos tratamentos esteve restrito ao sistema de preparo do solo, sendo que maior acúmulo ocorreu sob plantio direto em relação ao sistema convencional.

Na camada subsequente (0,025 a 0,05 m), o monocultivo de arroz irrigado apresentou maior conteúdo de COT em relação à rotação de espécies de sequeiro com arroz irrigado, apenas sob sistema convencional de preparo, sendo similares sob plantio direto. Este último resultado reflete o comportamento verificado para a variável CAM, na mesma camada de solo. A fração COP não sofreu influência dos sistemas de rotação de culturas, mas maior acúmulo foi verificado no monocultivo de arroz em sistema convencional de preparo, em relação ao plantio direto (Tabela 13)

Na camada de 0,05 a 0,10 m, não se verificou efeito dos tratamentos sobre os estoques de COT, COP e CAM. Já na camada de solo mais profunda (0,10 a 0,20 m), observou-se, apenas, efeito do sistema de rotação de culturas, exclusivamente para as variáveis COT e CAM. Para estas, a rotação arroz-arroz-arroz-arroz proporcionou maiores estoques de C, relativamente ao sistema sorgo-sorgo-milho-arroz (Tabela 13).

Tabela 13. Estoques de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico partícula (COP) e carbono associado aos minerais (CAM) em massa equivalente de diferentes camadas de solo, em função do sistema de preparo do solo: convencional (SC) e plantio direto (PD) e de rotação de culturas. Embrapa Clima Temperado. Capão do Leão, RS. Dados relativos a avaliação realizada em pós-colheita (março/2019) da quarta fase do sistema de rotação de culturas.

	C lábil			C não lábil			COT		
	COP			CAM					
	Mg ha ⁻¹								
<i>Camada 0 a 0,025 m</i>									
	SC	PD	média	SC	PD	média	SC	PD	média
Arroz-arroz-arroz-arroz	1,42	1,88	1,65 A	3,73 a A	3,17 a A	3,45	5,15 a A	5,05 a B	5,10
Sorgo-sorgo-milho-arroz	1,31	2,62	1,97 A	3,07 a B	3,57 a A	3,32	4,39 b A	6,31 a A	5,35
Média	1,37 b	2,25 a		3,4	3,37		4,77	5,68	
<i>Camada 0,025 a 0,05 m</i>									
	SC	PD	média	SC	PD	média	SC	PD	média
Arroz-arroz-arroz-arroz	1,87 a A	1,56 a A	1,72	4,45 a A	3,93 b A	4,19	6,32 a A	5,49 b A	5,91
Sorgo-sorgo-milho-arroz	1,45 b A	1,89 a A	1,67	3,87 a B	4,09 a A	3,98	5,32 a B	5,98 a A	5,65
Média	1,66	1,74		4,16	4,01		5,81	5,74	
<i>Camada 0,05 a 0,10 m</i>									
	SC	PD	média	SC	PD	média	SC	PD	média
Arroz-arroz-arroz-arroz	3,54	3,29	3,42 A	10,24	9,27	9,76 A	13,78	12,55	13,17 A
Sorgo-sorgo-milho-arroz	3,16	3,09	3,12 A	7,82	8,4	8,11 A	10,98	11,49	11,24 A
Média	3,35 a	3,19 a		9,03 a	8,84 a		12,38 a	12,03 a	
<i>Camada 0,10 a 0,20 m</i>									
	SC	PD	média	SC	PD	média	SC	PD	média
Arroz-arroz-arroz-arroz	7,43	5,79	6,61 A	20,7	23,87	22,29 A	28,14	29,65	28,89 A
Sorgo-sorgo-milho-arroz	6,16	6,71	6,44 A	13,2	15,68	14,44 B	19,36	22,4	20,88 B
Média	6,80 a	6,25 a		16,95 a	19,78 a		23,75 a	26,03 a	
<i>Camada 0 a 0,20 m</i>									
	SC	PD	média	SC	PD	média	SC	PD	média
Arroz-arroz-arroz-arroz	14,26	12,52	13,39	39,12	40,24	39,68	53,39	52,74	53,07
Sorgo-sorgo-milho-arroz	12,08	14,31	13,20	27,96	31,74	29,85	40,05	46,18	43,12
Média	13,17	13,42		33,54	35,99		46,72	49,46	

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

Considerando-se todo o perfil amostrado, maiores estoques de C foram verificados no monocultivo de arroz irrigado. Nos solos de terras baixas, principalmente em áreas cultivadas com arroz irrigado por inundação contínua do solo, as alterações químicas são bastante distintas dos solos oxidados. Em condições de alagamento do solo, a taxa de decomposição de materiais orgânicos é considerada lenta devido à condição de anaerobiose, promovendo maior acúmulo de C no solo (KUKAL et al., 2009).

No sistema com monocultivo de arroz irrigado, o alagamento do solo após o período de entressafra, propicia aumento nos estoques de COT do solo. Já no sistema sorgo-sorgo-milho-arroz, a mudança de condições de solo aerado para solo alagado favoreceu a perda de carbono do solo. Resultados semelhante foram encontrados por Saree et al. (2012) que, em estudo realizado avaliando os estoques de C sob diferentes sistemas de culturas, observaram que o monocultivo de arroz irrigado promove o aumento nas reservas de C do solo, relativamente ao monocultivo de milho e à rotação milho-arroz.

Durante o período de outono/inverno, quando o solo se encontrava predominantemente drenado, as áreas relativas ao sistema com monocultivo de arroz irrigado apresentaram maior potencial de conservação dos estoques de C no solo sob sistema PD, ao passo que, após a inundação do solo para a irrigação do arroz (período pós-cultivo de arroz), maiores reservas de C estiveram associadas ao sistema convencional de cultivo. Por outro lado, independente do período de avaliação, a adoção do sistema plantio direto nas áreas sob a rotação sorgo-sorgo-milho-arroz apresentaram maior estoque de COT, quando comparadas ao sistema convencional.

Independente da cultura anterior, o cultivo de arroz irrigado favoreceu o acúmulo de C na fração COP. Esta fração de C é mais facilmente mineralizável e, portanto, mais dinâmica (SIX et al., 2000), sendo a fração de C mais sensível às mudanças de manejo. O alagamento do solo nos tratamentos com monocultivo de arroz irrigado promoveu aumento nos estoques de CAM, mas diminuiu as reservas desta fração nos tratamentos precedidos por rotação de culturas de sequeiro. O C da fração CAM está protegido fisicamente e, por isso, é bioquimicamente mais recalcitrante (CAMBARDELLA e ELLIOT, 1992).

Os resultados obtidos são indicativos da possibilidade de promover aumento nos estoques de C no solo, mediante a adoção de distintos sistemas

de preparo do solo e/ou de culturas em terras baixas. É importante ressaltar, entretanto, que os resultados deste estudo derivam de um experimento de curto prazo, sendo conveniente sua reprodução em estudos de longa duração, que permitem que o solo atinja uma nova condição de equilíbrio no que se refere ao conteúdo de matéria orgânica do solo.

6.4. Conclusões

O monocultivo de arroz irrigado em terras baixas promove maior acúmulo de carbono em Planossolo, comparativamente à rotação sorgo-sorgo-milho-arroz irrigado.

No início da primavera, após um período de solo drenado, a adoção de sistema plantio direto promove aumento nos estoques de carbono de Planossolo, independentemente do sistema de rotação de culturas, relativamente ao sistema convencional de preparo.

Após o cultivo de arroz irrigado, a adoção de sistema plantio direto promove redução nos estoques de carbono do solo no monocultivo de arroz irrigado, ao passo que incrementa os valores em sistema de culturas onde o arroz irrigado é precedido por cultivos de sequeiro.

A adoção de plantio direto propicia maior estabilidade no conteúdo de carbono do solo por incrementar os estoques da fração não lábil (CAM) do solo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, M.; SAUNDERS, M.; HASTINGS, A.; WILLIAMS, M.; SMITH, P.; OSBORNE, B.; LANIGAN, G.; JONES, M.B. Simulating the impacts of land use in Northwest Europe on net ecosystem exchange (NEE): the role of arable ecosystems, grasslands and forest plantations in climate change mitigation. **Science Total Environment**, v.465, p.325–336, 2013.

ADEWALE, C.; REGANOLD, J.P.; HIGGINS, S.; EVANS, R.D.; CARPENTER-BOGGS, L. Improving carbon footprint of agricultural systems: Boundaries, tiers, and organic farming. **Environmental Impact Assessment Review**, v.71, p. 41-48, 2018.

ADVIENTO-BORBE, M. A.; PITTELKOW, C. M.; ANDERS, M.; KESSEL, C. V.; HILL, J.E.; McCLUNG, A.M.; SIX, J.; LINQUIST, B.A. Optimal Fertilizer Nitrogen Rates and Yield-Scaled Global Warming Potential in Drill Seeded Rice. **Journal of Environmental Quality**, v. 42, p. 1623-1634, 2013.

ADVIENTO-BORBE, M. A. A.; PADILLA, N. G.; PITTELKOW, C. M.; SIMMONDS, M.; van KESSEL, C.; LINQUIST, B. Methane and Nitrous Oxide Emissions from Flooded Rice Systems following the End-of-Season Drain. **Journal of Environmental Quality**, v. 44, n. 4, p. 1071-1079, 2015.

ALAM, M. K., ISLAM, M. M.; SALAHIN, N., HASANUZZAM, M. Effect of tillage practices on soil properties and crop productivity in wheat-mungbean-rice cropping system under Subtropical climatic conditions. **The Scientific World Journal**, p,1–15, 2014.

ANDRES, A.; AVILA, L. A. de; MARCHEZAN, E.; MENEZES, V. G. Rotação de Culturas e Pousio do Solo na Redução do Banco de Sementes de Arroz Vermelho em Solo de Várzea. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.7, n.2, p. 85-88, 2001.

ANGHINONI, I.; GENRO JUNIOR, S. A.; SILV, L. S. da; BOHNEN, H.; RHEINHEIMER, D. S.; OSORIO FILHO, B. D.; MACEDO, V. R. M. **Fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA. Divisão de Pesquisa, 2004. 52 p. (Boletim Técnico, 1).

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

BAGGS, E.M.; REES, R.M.; SMITH, K.A.; VINTEN, A.J.A. Nitrous oxide emission from soils after incorporating crop residues. **Soil Use and Management**, v.16, p.82-87, 2000.

BAGGS, E.; PHILIPPOT, L. Microbial Terrestrial Pathways to Nitrous Oxide. IN: Smith, K. **Nitrous Oxide and Climate Change**, London – Washington, DC. 2010, 240p.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. Porto Alegre: Bookman, 2002. 622p. Cap 4: O efeito Estufa e o Aquecimento Global.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P. R.; VILELA, L. Agricultura sustentável por meio da Integração Lavoura Pecuária-Floresta (ILPF). **International Plant Nutrition Institute**, v. 9, n. 138, p. 1-18, 2012.

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 Soil**, v. 41, p. 379-388, 2005.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 105-112, 1997.

BAYER C.; MIELNICZUCK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.54, p. 101-109, 2000.

BAYER, C.; DICK, D. P.; RIBEIRO, G. M.; SCHEUERMANN, K. K. Carbon stocks in organic matter fractions as affected by land use and soil management, with emphasis on no-tillage effect. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.3, p.401-406, 2002.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 7, p. 677-683. 2004.

BAYER, C.; DIECKOW, J.; AMADO, T.J.C.; ELTZ, F.L.F.; VIEIRA, F.C.B. Cover crop effects increasing carbon storage in subtropical no-till sandy Acrisol. *Commun. Soil Science and Plant Analysis*, v.40, p. 1499–1511, 2009.

BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C. E. C.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; NICOLOSO, R. da S. Estabilização do Carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos Ciência Solo**, v.7, p.55-118, 2011.

BAYER, C.; COSTA, F. S.; PEDROSO, G. M.; ZSCHORNACK, T.; CAMARGO, E. S.; LIMA, M. A.; FRIGHETO, R. T. S.; GOMES, J.; MARCOLIN, E.; 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.

BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; PEDROSO, G. M.; ROSA, C. M.; CAMARGO, E. S.; BOENI, M.; MARCOLIN, E.; REIS, C. E. S.; SANTOS, D. C. A seven-year study on the effects of fall soil tillage on yield-scaled greenhouse gas emission from flood irrigated rice in a humid subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, v. 145, p. 118-125, 2015.

BEAUCHAMP, E. G.; TREVORS, J. T.; PAUL, J. W. Carbon sources for bacterial denitrification. **Advances in Soil Science**, v. 10, p. 113-142. 1989.

BINI, D.; LOPEZ, M. V.; CARDOSO, E. JBN. Metabolismo microbiano. In: CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do Solo**. 2 ed. Piracicaba - SP: ESALQ, 2016. p. 61 - 78.

BLANCO-MOURE, N.; GRACIA, R.; BIELSA, A. C.; LÓPEZ, M. V. Soil organic matter fractions as affected by tillage and soil texture under semiarid Mediterranean conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 381-389, 2016.

BOLIN, B.; SUKUMAR, R., 2000. Global perspective. In: Watson, R.T., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D.J., Dokken, D.J. (Eds.), **Land Use, Land-Use Change, and Forestry. A Special Report of the IPCC**. Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 23–51

BRADFORD, M. A.; INESON, P.; WOOKEY, P. A.; LAPPIN-SCOTT, H. M. Role of CH₄ oxidation, production, and transportation in forest soil CH₄ flux. **Soil Biology Biochemistry**, v. 33, p.1625–1631, 2001.

BREMNER, J.M. Sources of nitrous oxide in soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 49, p. 7-26, 1997.

BRYE, K.R. Long-term effects of cultivation on particle size and water- retention characteristics determined using wetting curves. **Soil Science**, v. 168, p.459–468, 2003.

BUSARI, M. A., KUKAL, S.S., KAUR, A., BHATT, R., DULAZI, A. A., Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. **International Soil and Water Conservation Research**, v.3, p.119-129, 2015.

BUTTERBACH-BAHL, K.; BAGGS, E. M.; DANNENMANN, M.; KIESE, R.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the process and their controls? **Philosophical Transaction of The Royal Society B**, v. 368, 2013.

CALEGARI, A.; COSTA, A. Sistemas conservacionistas de uso do solo. In: PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. de.(Org.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. 1 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p. 279 – 302.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic-mat- ter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 777–783, 1992.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. **Geoderma**, v. 56, p. 449-457, 1993.

CARLSON, K.M.; GERBER, J.S.; MUELLER, N.D.; HERRERO, M.; MACDONALD, G. K.; BRAUMAM, 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, p. 63-71, 2016.

CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; FEIGEL, B.J.; PICCOLO, M.C.; GODINHO, V.P.; CERRI, C.C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazil Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p.342-349, 2009.

CARVALHO, J.L.N.; RAUCCI, G.S.; FRAZÃO, L.A.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C. Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 183, p. 167-175, 2014.

CASSMAN, K.G.; PINGALI, P.L. Extrapolating Trends from Long-term Experiments to Farmers' Fields: The Case of Irrigated Rice Systems in Asia.

Agricultural Sustainability in Economic, Environmental, and Statistical Terms. John Wiley & Sons, London. 1995.

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

CHA-UN, N.; CHIDTHAISONG, A.; YAGI, K.; SUDO, S.; TOWPRAYOON, S. Greenhouse gas emissions, soil carbon sequestration and crop yields in a rain-fed rice field with crop rotation management. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.237, p.109-120, 2017.

CHEN, H.H.; LI, X.C.; HU, F.; SHI, W. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: a meta-analysis. **Global Change Biology**, v.19, p. 2956–2964, 2013.

CHIDTHAISONG, A.; CONRAD, R. Turnover of glucose and acetate coupled to reduction of nitrate, ferric iron and sulfate and to methanogenesis in anoxic rice field soil. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 31, p. 73-86, 2000.

CHRISTENSEN, B.T. Organic matter in soil: Structure, function and turnover. In: **Plant production**, Tjele, 2000. p. 95. (DIAS Report, 30)

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. **European Journal of Soil Science**, v.52, p.345-353, 2001.

CIAIS, P.; SABINE, C et al. Carbon and other biogeochemical cycles. In: T.F. Stocker et al., editors, **Climate Change 2013: The physical science basis**. Contribution of Working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York, 2013.

CIAMPITTI, I.A.; CIARLO, E.A.; CONTI, M.E. Nitrous oxide emission during soybean culture: inoculation and nitrogen fertilization effects. **Ciencia del Suelo**, n. 23, p. 123-131, 2005.

CLEMMENSEN, K.; BAHR, A.; OVASKAINEN, O.; DAHLBERG, A.; EKBLAD, A.; WALLANDER, H.; STENLID, J.; FINLAY, R.; WARLE, D.; LINDAHL, B. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. **Science**, v. 339, p. 1615–1618, 2013.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: grão safra 2017/2018. Oitavo levantamento. Maio de 2019. Online. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>> . Acesso em: 27 maio 2019.

CONCEIÇÃO, P.C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, v.129, p. 40–47, 2013.

CONCEIÇÃO, P.C.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; SANTOS, D. C. dos. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, v. 44, p. 794-800, 2014.

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

CONRAD, R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved. **Environmental Microbiology Reports**, v. 1, n. 5, p. 285-292, 2009.

CONTE, O.; WESP, C. de L.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C. de F.; LEVIEN, R.; NABINGER, C. Densidade, agregação e frações de carbono de um Argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 579-587, 2011.

COSTA, F de. S. **Estoques de carbono orgânico e efluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtropical brasileiro**. 2005. 145 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; 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. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 7, p. 2049-2053, 2008.

DAS, K.; BARUAH, K.K.; Methane emission associated with anatomical and morphophysiological characteristics of rice (*Oryza sativa*) plant. **Physiologia Plantarum**. v. 134, p. 303–312, 2008.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P.; KOGEL-KNABER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 81, n. 1, p. 87–95, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2011. 230 p.

EVANS, P.N.; BOYD, J. A.; LEU, A. N. O.; WOODCROFT, B.J.; PARKS, D. H.; HUGENHOLTZ, P.; TYSON, G. W. An evolving view of methane metabolism in the Archaea. **Nature**, v. 17, p. 219 -232, 2019.

FANGUEIRO, D.; BECERRA, D.; ALBARRÁN, Á.; PEÑA, D.; SANCHES-LLERENA, J.; RATO-NUNES, J. M.; LÓPEZ-PIÑERO, A. Effect of tillage and water management on GHG emissions from Mediterranean rice growing ecosystems. **Atmospheric Environment**, v.150, n.9, p. 303-312, 2017.

FELLER, C.; BALESSENT, J.; NICOLARDOT, B.; CERRI, C. Approaching "functional" soil organic matter pools through particle-size fractionation. Examples for tropical soils. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLETR, R. F.; STEWART, B. (Ed.). **Assessment methods for soil carbon pools**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 102-132. (Advances in Soil Science).

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

FERNANDES, F.A.; FERNANDES, A.H.B.M. Atualização dos Métodos de Cálculo dos Estoques de Carbono do Solo sob Diferentes condições de manejo. **Comunicado Técnico**. Embrapa Pantanal, n.95, Corumbá, MS, 2013, 5p., ISSN 1981-7231.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **High-Level Expert Forum: How to Feed the World in 2050**. Agricultural Development Economics Division, Economic and Social Development Department, Roma, Italia, 2009. 4 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **Agricultural Outlook 2011-2030**. OECD-FAO. 2009b.

GAO, S.; TANJI, K.K.; SCARDACI, S.C.; CHOW, A.T. Comparison of redox indicators in a paddy soil during rice-growing season. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.66, n.3, p.805-817, 2002.

GLOBAL RICE SCIENCE PARTNERSHIP - GRISP. **Rice Almanac**. 4 ed. International Rice Research Institute, Phillipines, 2013. 283 p.

GOMES, A de S.; PAULETTO, E.A.; PETRINI, J.A.; PARFITT, J.M.B.; VERNETTI JR., F. de J. **Manejo de solo sem arroz irrigado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. 15p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 53).

GONG, W.; YAN, X.; WANG, J.; HU, T.; GONG, Y. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat–maize cropping system in North China Plain. **Plant Soil**, v.149, p. 318–324, 2009.

GRANLI, T.; BOCKMAN, O.C. Nitrogen oxide from agriculture. **Norwegian J. Agr. Sci**, v. 12, p.7-16, 1994.

GRASSINI, P., ESKRIDGE, K.M., CASSMAN, K.G. Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. **Nature Communications**, v. 4, 2918p, 2013.

GREEN, S.M. Ebullition of methane from rice paddies: the importance of furthering understanding. **Plant and Soil**, v.370, p.31–34, 2013.

GUIMIRE, R.; LAMICHHNE, S.; ACHARYA, B.S.; BISTA, P.; SAINJU, U.M. Tillage, crop residue, and nutrient management effects on soil organic carbon in rice-based cropping systems: A review. **ScienceDirect**, v.16, n.1, p. 1-15, 2017.

GURGEL, A. C.; PALTSEV, S. Costs of reducing GHG emissions in Brazil. **Climate Policy**. v.14, p. 209–223, 2014.

HASSINK, J; WHITMORE, A.P. A model of the physical protection of organic matter in soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p. 131-139, 1997.

HAYASHI K.; TOKIDA, T.; KAIJURA, M.; YANAI, Y.; YANO, M. Cropland soil-plant systems control production and consumption of methane and nitrous oxide and their emission to the atmosphere. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.61, p. 2-33, 2015.

HILL, Erin C. et al. Cover Crop Impact on Weed Dynamics in an Organic Dry Bean System. **Weed Science**, Champaign, v. 64, n. 2, p. 261–275, 20 Jun 2016.

HOUGHTON, Y.; DING, D.J.; GRIGGS, M.; NOGUER, P. J.; VAN DER LINDEN; J. T. AND D. XIAOSU (Eds.). **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. United King: IPCC, 2001.

HUANG, X.; SONG, Z.; GROENIGEN, K.J.V.; XU, Z.; HUANG, B.; ZHANG, Y.; HANG, X.; TAN, S.; ZHANG, D.; ZHANG, W. Grassland conversion along a climate gradient in northwest China: implications for soil carbon and nutrients. **Soil Use and Management**, 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007, 996 p.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. STOCKER, T.F.; D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX and P.M. MIDGLEY (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, 1535 p.

IPCC. **Mitigation of Climate Change**, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (eds) EDENHOFER, O., R. PICHES-MADRUGA, Y. SOKONA, E. FARAHANI, S. KADNER, K. SEYBOTH, A. ADLER, I. BAUM, S. BRUNNER, P. EICKEMEIER, B. KRIEMANN, J. SAVOLAINEN, S. SCHLÖMER, C. VON STECHOW, T. ZWICKEL AND J.C. MINX. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014, 1435 p.

JANTALIA, C.P.; SANTOS, H.P. dos; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R. Fluxes of nitrous from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. **Nutrient and Cycling Agroecosystems**, v.8, p. 161-173, 2008.

KAEWPRADIT, W.; TOOMSAN, B.; VITYAKON, P.; LIMPINUNTANA, V.; SAENJAN, P.; JOGLOY, S.; PATANOTHAI, A.; CADISCH, G. Regulating mineral N release and greenhouse gas emissions by mixing groundnut residues and rice straw under field conditions. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 59, p. 640-652, 2008.

KAISER, E. A.; KOHRS, K.; KICKE, M.; SCHNUG, E.; HEINEMEYER, O.; MUNCH, J. C. Nitrous oxide release from arable soil: Importance of N-fertilization, crop and temporal variation. **Soil Biology and Biochemistry**, v.30, p.1553-1563, 1998.

KHALIL, K.; MARY, B.; RENAULT, P. Nitrous oxide production by nitrification and denitrification in soil aggregates as affected by O₂ concentration. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, p. 687-699, 2004.

KHALIQ, A.; GONDAL, M.R.; MATLOOB, A.; ULLAH, E., HUSSAIN, S.; MURTAZA, G. Chemical weed control in wheat under different rice residue management options. **Pakistan Journal of Weed Science Research**, v.19, p.1–14, 2013.

KHOSA, M.K.; SIDHU, B.S.; BENBI, D.K. Effect of organic materials and rice cultivars on methane emission from rice field. **Journal of Environmental Biology**. Lucknow, v. 31, n. 3, p. 281-285, 2010.

KUKAL, S.S.; REHANA, R.; BENBI, D.K. Soil organic carbon sequestration in relation to organic and inorganic fertilization in rice-wheat and maize-wheat systems. **Soil and Tillage Research**, v.102, p. 87–92, 2009.

LANG, M.; LI, P.; HAN, X.; QIAO, Y.; MIAO, S. Gross nitrogen transformations in black soil under different land uses and management systems. **Biology and Fertility of Soils**, V.52, P.233-241, 2016.

LAVILLE, P. ; LEHUGER, S. ; LOUBET, B. ; et al. Effect of management, climate and soil conditions on N₂O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, p.228-240, 2011.

LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. **European Journal of Soil Biology**, v.37, p. 25–5, 2001.

LEE, H.J.; KIM, S.Y.; KIM, P.J.; MADSEN, E. L. JEON, C. O. Methane emission and dynamics of methanotrophic and methanogenic communities in a flooded rice field ecosystem. **Federation of European Microbiological Societies**, v. 88, p. 195-212, 2014.

LI, J.; LI, H.; ZHANG, Q.; SHAO, H.; GAO, C.; ZHANG, X. Effects of fertilization and straw return methods on the soil carbon pool and CO₂ emission in a

reclaimed mine spoil in Shanci Province, China. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 1-12, 2019.

LIANG, W.; SHI, Y.; ZHANG, H.; YUE, J.; HUANG, G.H. Greenhouse gas emissions from northeast China rice fields in fallow season. **Pedosphere**, v.17, p. 630–638, 2007.

LIANG, X. Q.; LI, H.; WANG, S. X.; YE, Y. S.; JI, Y. J.; TIAN, G. M. van KESSEL, C.; LINQUIST, B. A. Nitrogen management to reduce yield-scaled global warming potential in rice. **Field Crops Research**, v. 146, p. 66-74, 2013.

LIMA, C.L.R. de; PAULETTO, E.A.; GOMES, A. da S.; HARTWIG, M.P.; PASSIANOTO, C.C. Compactação de um Planossolo em função de sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrocência**, v.12, n.2, p. 179-182, 2006.

LINQUIST, B.; GROENIGEN K.J.; ADVIENTO-BORBE, M.A.; PITTELKOW, C.; KESSEL, C. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops. **Global Change Biology**, v.18, p. 194-209, 2012.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, E. M. R. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural**, v.39, p.1067-1072, 2009.

LUO, Z.; WANG, E; SUN, O. J. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.139, p.224–231, 2010.

MA, J.; MA, E.; XU, H.; YAGI, K.; CAI, Z. Wheat straw management affects CH₄ and N₂O emissions from rice fields. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 41, p. 1022-1028, 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura : Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, Coordenação da Casa Civil da Presidência da República, Brasília, 173 p (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.

MARTIN, J.A.R.; ALVARO-FUENTES, J.; GONZALO, J.; GIL, C.; RAMOS-MIRAS, J.J.; CORBÍ, J.M.G.; BOLUDA, R. Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. **Geoderma**, v.264, p. 117-125, 2016.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.1-8.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; SILVA L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2Ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.1-4.

MILLAR, N.; BAGGS, E.M. Chemical composition, or quality, of agroforestry residues influences N₂O emissions after their addition to soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.36, n.6, p.935-943, 2004.

MILLAR, N.; NDUFA, J.K.; CADISCH, G.; BAGGS, E.M., Nitrous oxide emissions following incorporation of improved-fallow residues in the humid tropics. **Global Biogeochemical Cycles**, v.18, GB1032. 2004.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÃO - MCTI. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2. ed. Brasília: MCTI, 2014.

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

MYHRE, G.; SHINDELL, D.; BRE'ON, F.M.; COLLINS, W.; FUGLESTVEDT, J.; HUANG, J. et al. (2013) Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. pp 714

NASCIMENTO, P.C.; BAYER, C.; NETTO, L.F.S.; VIAN, A.C.; VIEIRO, F.; MACEDO, V.C.M.; MARCOLIN, E. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1821-1827, 2009.

NASER, H. M.; NAGATA, O.; TAMURA, S.; HATANO, R. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tóquio, v. 53, n. 1, p. 95-101, 2007.

NAYAK, D.; CHENG, K.; WANG, W.; KOSLOWSKI, F.; YAN, X.; GUO, M.; NEWBOLD, J.; MORAN, D.; CARDENAS, L.; PAN, G.; SMITH, P. Technical options to reduce greenhouse gas emissions from croplands and grasslands in China. **UK-China Sustainable Agriculture Innovation Network-SAIN**, Policy brief No. 9, October, 2013.

NETO, M. S.; VENZKE FILHO, S. de. P.; PICOLLO, M. de. C.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). I – sequestro de carbono no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa - MG, v.33, n.4, p.1013-1022, 2009.

NEUE, H. U. Methane emission from rice fields: wetland rice fields may make a major contribution to global warming. **BioScience**, v. 43, n. 7, p. 466-73, 1993.

NEUE, H. U.; WASSMANN, R.; KLUDZER, H. K.; BUJUN, W.; LANTIN, R.S. Factors and processes controlling methane emissions from rice fields. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1-3, p. 111-117, 1997.

NISHIMURA, S.; SAWAMOTO, T.; AKIYAMA, H.; SUDO, S. YAGI, K. Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 18, p. 1-10, 2004.

NISHIMURA, S.; YONEMURA, S.; SAWAMOTO, T.; SHIRATO, Y.; AKIYAMA, H.; SUDO, S.; YAGI, K. Effect of land use change from paddy rice cultivation to upland crop cultivation on soil carbon budget of a cropland in Japan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 125, 9–20, 2008.

NOUCHI, I.; MARIKO, S.; AOKI, K. Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. **Plant Physiology**, v.94, p. 59–66, 1990.

NUNES, R.S.; LOPES, A.A.C.; SOUZA, D.M.G.; MENDES, I.C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo de cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p. 1407–1419, 2011.

OLIVEIRA, G.C. de; DIAS JUNIOR, M. S.; RESK, D. V. S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de uma Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.2, p. 291-299, 2003.

OLK, D. C.; CASSMAN, K. G.; RANDALL, E.W.; KINCHESCH, P.; SANGER, L., J.; ANDERSON, J. M. Changes in chemical properties of organic matter with intensified rice cropping in tropical lowland soil. **European Journal of Soil Science**, v.47, p.293–303, 1996.

PACE RS, 2011. **Plano, ar, clima e energia do Rio Grande do Sul: Relatório final**. [Porto Alegre]: Secretaria do Meio Ambiente. FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental. ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, 2011. p. 106-115.

PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; BOHRA, J.S. Greenhouse gas emissions from rice crop with different tillage permutations in rice-wheat system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.159, p. 133-144, 2012.

PAUL, E. A.; CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1996. 340p.

PAULETTO, E. A. et al. Produtividade do arroz irrigado num Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo durante sete anos. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 20, 1993, Pelotas. **Anais...** Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1993. p.132-134.

PILLON, C.N. **Alterações no conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo, induzidas por sistemas de cultura em plantio direto, 2000**. 232p. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS

PINHEIRO, É. F. M., CAMPOS, D. V. B. de, BALIEIRO, F. de C., ANJOS, L. H. C. dos, PERIERA, M. G. Tillage systems effects on soil carbon stock and physical fractions of soil organic matter, **Agricultural Systems**, v.132, p.35-39, 2015.

PINTO, L. F. S.; NETO, J. A. L.; PAULETTO, E. A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: Gomes, A.S., et, al. (Eds.), **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, DF, p. 75–95, 2004.

POEPLAU, C.; DON, A.; VESTERDAL, L.; LEIFELD, J.; VANWESEMAEL, B.; SCHUMACHER, I. J.; GENSIOR, A. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone — carbon response functions as a model approach. **Global Change Biology**, v.17, n.7, p. 2415-2427, 2011.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, v.24, p. 58-65, 1972

RAPHAEL, J.P.A.; CALONEGO, J.C.; MILORI, D.M.B.P.; ROSOLEM, C.A. Soil Organic matter in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, v.155, p. 45-53, 2016.

RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1609-1623, 2007.

REDDY, K. R.; DELAUNE, R. D. Wetlands and global climate change. In: _____. **Biogeochemistry of wetlands: science and applications**. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 599 - 621.

REISSER JÚNIOR, C.; TIMM, L. C.; TAVARES, V. E. Q. **Características do cultivo de pêssegos da região de Pelotas-RS, relacionadas à disponibilidade de água para as plantas**. Pelotas: EMBRAPA Clima Temperado. Dezembro, 2008. Documentos 240.

REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, SOSBAI, 2016. 200 p.

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

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

ROCHETTE, P.; ANGER, D.A.; BELANGER, G.; CHANTIGNY, M.H.; PREVOST, D.; LEVESQUE, G. Emissions of N₂O from alfalfa and soybean crops in eastern Canada. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.93–506, 2004.

ROLSTON, D. E. Nitrous oxide and nitrogen gas production in fertilizer loss. Pages 127–149. In C. C. Delwiche, eds. **Denitrification, nitrification, and atmospheric oxide**. John Wiley, New York, NY, 1981.

ROSA, Carla Machado. **Matéria orgânica e Planossolo Háplico sob sistemas de manejo no cultivo do arroz irrigado no Sul do Brasil**. 2010. 94f. Tese (Doutorado em Ciências - Solos). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

ROSSI, C.Q.; PEREIRA, M.G.; GIÁCOMO, S.G.; BETTA, M.; POLIDORO, J.C. Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em Latossolo Vermelho sob plantio de soja no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 2, p. 233-241, 2012.

SAINJU U.M.; JABRO, J.D.; CAESAR-TONTHAT, T. Tillage, cropping sequence, and nitrogen fertilization effects on dry land soil carbon dioxide emission and carbon content. **Journal of Environment Quality**, v.39, p.935–945, 2010.

SANTOS, D.C. dos; PILLON, C.N.; FLORES, C.A.; LIMA, C.L.R. de; CARDOSO, E.M.C.; PERREIRA, B.F.; MANGRICH, A.S. Agregação e frações físicas da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso no bioma Pampa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1735-1744, 2011.

SANTOS, C. E. Revolução na várzea. **AgroRS**, Santa Cruz do Sul, p. 14-18, fev. 2015.

SAREE, S.; PONPHANGNGA, P.; SAROBOL, E.; LIMTONG, P.; CHIDTHAISONG, A. Soil carbon sequestration affected by cropping changes from upland maize to flooded rice cultivation. **Journal of Sustainable Energy and Environment**, v.3, p. 147-152, 2012.

SCHLESINGER, W.H. Carbon sequestration in soils. **Science**, v. 284, n. 5423 p. 2095,1999.

SCIVITTARO, W. B.; SILVEIRA, A. D.; LACERDA, C. L.; FARIAS, M. O.; SOUSA, R. O. Sazonalidade das emissões de gases de efeito estufa em terras baixas: efeito do manejo do solo e do cultivo de verão. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Embrapa Clima Temperado, n.231, Pelotas, RS, 2015, p. 1-33, ISSN 1678-2518.

SCIVITTARO, W.B., SILVEIRA, A. D., SOUSA, R. O. de, ANDRES, A., JARDIM, T.M. Diversificação de Culturas como Estratégia Mitigadora de Emissões de

Gases de Efeito Estufa em Terras Baixas. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Embrapa Clima Temperado, n.249, Pelotas, RS, 2016, pag-1-38, ISSN 1678-2518.

SETYANTO, P., MAKARIM, A.K.; FAGI, A.M.; WASSMANN, R., BURENDIA, L.V.; Crop management affecting methane emissions from irrigated and rainfed rice in Central Java (Indonesia). **Nutrient Cycling Agroecosystems**, v.58, p. 85–93, 2000.

SHRESTHA, R. K.; LADHA, J. K.; LEFROY, R. D. B. Carbon management for sustainability of an intensively managed rice-based cropping system. **Biology and Fertility of Soils**, v.36, p. 215–223, 2002.

SILVA, J. T. da. **Emissões de metano e de óxido nitroso em área de arroz irrigado influenciadas por sistemas de preparo do solo**. 2014. 72f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

SILVA, L. S.; SOUSA, R. O.; POCOJESKI, E. Dinamica da materia organica em ambientes alagados. In: SANTOS, G. S.; SILVA, L. G.; CANELLAS, L. P; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo**. Porto Alegre: Metropole, Cap. 27, p. 525-544, 2008.

SILVEIRA, A. D. **Emissões de metano e óxido nitroso em sistemas de rotação de culturas em um Planossolo do Rio Grande do Sul**. 2018. 83f. Dissertação (mestrado) Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

SINGH, P.; HEIKKINEN, J.; KEJOTA, E.; NUUTINEN, V.; PALOJARVI, A.; SHEEHY, J.; ESALA, M.; MITRA, S.; ALAKUKKU, L.; REGINA, K. Tillage and crop residue management methods had minor effects on the stock and stabilization of topsoil carbon in a 30-year field experiment. **Science of the Total Environment**, v.518-519, p.337,344, 2015.

SIQUEIRA-NETO, M.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; CARDOSO, A.N.; DOUZET, J.-M.; FELLER, C.; PICCOLO, M. de C.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Soil carbon stocks under no tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. **Soil and Tillage Research**, v.110, p.187-195, 2010.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (SEEG). **Emissões Totais**. 2019. Disponível em: <<http://plataforma.seeg.eco.br>>. Acesso em 19 agosto 2019.

SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology Biochemistry**, v.32, p. 2099–2103, 2000.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.; SA, J. C. de M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effect of no-tillage. **Agronomie**. v.22, p.755–775, 2002.

SIX, J.; OGLE, S. M.; BREIDT, F. J.; CONANT, R.T.; MOSIER, A. R.; PAUSTIAN, K. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. **Global Change Biology**, v. 10, n. 2, p. 155-160, 2004.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J. A.; 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, p. 779-791, 2003.

SMITH, A.; CONEN, S. Impact of land management on fluxes of trace greenhouse gases. **Soil Use and Management**, v.20, p.255-263, 2004.

SOUSA, R.O. de; CAMARGO, F.A.O.; VAHL, L. Solos alagados (reações de redox). In: MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 2a ed. Porto Alegre, RS, 2004.

SOUSA, R.O. de; VAHL, L.C.; OTERO, X.L. Química de solo alagado. In: MELO, V. DE F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e Mineralogia do Solo. Parte II – Aplicações**. Viçosa, MG, 2009. p. 485-528.

SOUSA, R.F. de; BRASIL, E.P.F.; FIGUEIREDO, C.C.; LEANDRO, W.M. Soil organic matter fractions in preserved and disturbed wetlands of the Cerrado biome. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 222-231, 2015.

SOUZA, E. L. de. **Emissão de óxido nitroso e metano em área de cultivo com arroz irrigado com diferentes manejos da palha pós-colheita**. 2013. 139f. Tese (Doutor em Ciência do Solo). Centro de Ciências Rurais. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

STAMS, A. J. M.; PLUGGE, C. M. The Microbiology of Methanogenesis. In: Reay, D., Smith, P. e Amstels. A.V. **Methane and Climate Change**. London, Wshington, DC. 2010. p. 14-27.

STOCKMANN, U.; ADAMS, M.A.; CRAWFORD, J.W.; FIELD, D.J.; HENAKKARCHCHI, N.; JENKINS, M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; COURCELLES, V.; SINGH, K. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.164, p.80–99, 2013.

STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. As principais classes de solos identificadas no Rio Grande do Sul. In: **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. revista e ampliada. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR. 222 p., 2008.

SUNDERMEISER, A.R.; REEDER, R.; LAL, R. **Soil carbon sequestration: Fundamentals**. Extension Factsheet. <http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0510.html> (accessed 2 April 2011). Ohio State Univ., Columbus, 2005.

TAN, Z.; LAL, R.; OWENS, L.; IZAURRALDE R.C. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. **Soil Tillage Research**, v. 92 p.53-59, 2007.

THEISEN, G.; SILVA, J. J. C.; SILVA, J.S.; ANDRES, A.; ANTEN, N.P.R.; BASTIAANS, L. The birth of a new cropping system: towards sustainability in the sub-tropical lowland agriculture. **Field Crops Research**, v.212, p. 82-94, 2017.

TIVET, F.; SÁ, J.C.M.; LAL, R.; BORSZORWSKEI, P.R.; BRIEDIS, C.; SÁNTOS, J.B.; SÁ, M.F.M.; HARTMAN, D.C.; EURICH, G.; FARIAS, A.; BOUZINAC, S.; SÉGUY, L. Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma**, v.209–210, p.214–225, 2013.

TOKIDA, T.; ADACHI, M.; CHENG, W.; NAKAJIMA, Y.; FUMOTO, T.; MATSUSHIMA, M.; NAKAMURA, H.; OKADA, M.; SAMESHIMA, R.; HASEGAWA, T. Methane and soil CO₂ production from current-season photosynthates in a rice paddy exposed to elevated CO₂ concentration and soil temperature. **Global Change Biology**, v17, p.3327–3337, 2011.

TUBIELLO, F. N.; CÓNDROR GOLEC, R.D.; FERRARA, A.; ROSSI, S.; BIANCALANI, R.; FEDERICI, S.; JACOBS, H.; FLAMMINI, A. Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by sources and Removals by Sinks. Rome: **FAO**, 2014. (FAO STATISTICS DIVISION – Working Paper Series)

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

VAN GROENIGEN, K. J.; QI, X.; OSENBURG, C. W.; LUO, Y.; HUNGATE, B. A. Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil carbon storage. **Science**, v. 344, n.6183, p. 508-509, 2014.

VEDELAGO, A.; CARMONA, F. de C.; BOENI, M.; LANGE, C. E.; ANGHINONI, I. **Fertilidade e aptidão de uso dos solos para o cultivo da soja nas regiões arrozeiras do Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA, 2012, 48 p. (Boletim Técnico, 12).

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.175-180, 1994.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223, 2011.

VEÇOZZI, T. A. **Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada em arroz irrigado: rendimento de grãos, eficiência no uso do nitrogênio e emissão de gases de efeito estufa**. 2019. 131 f. Tese doutorado. Programa de Pós Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2019.

WANG, Z.; INESON, P. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.35, n.3, p.427-433, 2003.

WANG, Y.Y.; HU, C.S.; MING, H.; ZHANG, Y.M.; LI, X.X.; DONG, W.X.; OENEMA, O. Concentration profiles of CH₄, CO₂ and N₂O in soils of a wheat-maize rotation ecosystem in North China Plain, measured weekly over a whole year. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.164, p. 260–272, 2013.

WANG, C.; LAI, D. Y. F.; SARDANS, J.; WANG, W.; ZENG, C.; PEÑUELAS, J. Factors related with CH₄ and N₂O emissions from a paddy field: clues for management implications. **PLoS ONE**, v. 12, n. 1, p. 1-23, 2017.

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.

WATANABE, A.; KIMURA, M.; KASUYA, M.; KOTAKE, M.; KATOH, T. Methane in groundwater used for Japanese agriculture: its relationship to other physico-chemical properties and possible tropospheric source strength. **Geophysical Research Letters** v.21, p.41–44, 1994.

WATANABE, A.; TAKEDA, T.; KIMURA, M. Evaluation of origins of CH₄ carbon emitted from rice paddies. **Journal of Geophysical Research**, v.104, p.23623–23629, 1999.

WEIER, K.L.; DORAN, J.W.; POWER, J.F.; WALTERS, D.T. Denitrification and the dinitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.66–72, 1993.

WELLER, S.; KRAUS, D.; AYANG, K. R. P.; WASSMANN, R.; ALBERTO, M. C. R.; BUTTERBACH-BAHL, K.; KIESE, R. Methane and nitrous oxide emissions from rice and maize production in diversified rice cropping systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.101, pg. 37-53, 2015.

XIAO, X.P.; WU, F.L.; HUANG, F.Q.; LI, Y.; SUN, G.F.; HU, Q.; HE, Y.Y.; CHEN, F.; YANG, G.L. Greenhouse air emission under different pattern of rice- straw returned to field in double rice area. **Res Agr Mod**. v.28, p.629–632, 2007.

XIONG Z.; XING G.; ZHU Z. Nitrous Oxide and Methane Emissions as Affected by Water, Soil and Nitrogen. **Pedosphere**, v. 17, n. 2, p. 146-155, 2007.

YAN, X.; SHI, S.; DU, L.; XING, G. Pathways of N₂O emission from rice paddy soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, p. 437-440, 2000.

YAN, X.; AKIYAMA, H.; YAGI, K.; AKIMOTO, H. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 intergovernmental panel on climate change guidelines. **Global Biogeochemical Cycles**, local, v. 23, GB2002, 2009.

YANG, X.; DRURY, C.F.; WANDER, M.M. A wide view of no-tillage practices and soil organic carbon sequestration. *Acta Agric. Scand. Sect. B* **Soil and Plant Science**, v.63, p. 523–530, 2013.

ZHANG, H.; BAI, X.; XUE, J.; CHEN, Z.; TANG, H.; CHEN, F. Emissions of CH₄ and N₂O under Different Tillage Systems from Double-Cropped Paddy Fields in Southern China. **Plos One**, College Park, v. 8, n. 6, p. e65277, 2013.

ZHENG, X.; WANG, M.; WANG, Y.; SHEN, R.; GOU, J.; LI, J.; JIN, J.; LI, L. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: A case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China. **Chemosphere**. v..2, p.207–224, 2000.

ZHOU, W.; LV, T.-F.; CHEN, Y.; WESTBY, A.P.; REN, W.-J. Soil physicochemical and biological properties of paddy-upland rotation: a review. **The Scientific World Journal**, v.2014, 8p, 2014.

ZINN, Y.L.; LAL, R.; RESCK, D.V.S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 84, p. 28-40, 2005.

ZOU, J.; HUANG, Y.; JIANG, J.; ZHENG, X.; SASS, R.L. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application. **Global Biogeochemical Cycles**, v.19:GB2021, 2005.

ZSCHORNACK, T. **Emissões de metano e de óxido nitroso em sistemas de produção de arroz irrigado no sul do Brasil e potencial de mitigação por práticas de manejo**. 2011. 101f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ZSCHORNACK, T.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A.; VIEIRA, F.C.B.; ANGHINONI, I. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from flood-irrigated rice by no incorporation of winter crop residues into the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.623-634, 2011.

ZSCHORNACK, T.; ROSA, C.M. da; REIS, C. E. S. dos; PEDROSO, G. M.; CAMARGO, E.S.; SANTOS, D.C. dos; BOEI, M.; BAYER, C. Soil CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields in Southern Brazil as affected by crop management levels: a three-year field study. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.42, p. e0170306, 2018.