

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E METANO EM ÁREA  
DE CULTIVO COM ARROZ IRRIGADO COM  
DIFERENTES MANEJOS DA PALHA PÓS-COLHEITA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Eduardo Lorensi de Souza**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2013**



**EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E METANO EM ÁREA DE  
CULTIVO COM ARROZ IRRIGADO COM DIFERENTES  
MANEJOS DA PALHA PÓS-COLHEITA**

**Eduardo Lorensi de Souza**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Biodinâmica e Manejo do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciência do Solo.**

**Orientador: Prof. Dr. Sandro José Giacomini**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2013**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Souza, Eduardo Lorensi de

Emissão de óxido nitroso e metano em área de cultivo com arroz irrigado com diferentes manejos da palha pós-colheita / Eduardo Lorensi de Souza.-2013.

139 p. ; 30cm

Orientador: Sandro José Giacomini

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2013

1. Gases de efeito estufa 2. Potencial de aquecimento global 3. Sistemas de preparo 4. Manejo do solo pós-colheita I. Giacomini, Sandro José II. Título.

---

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Eduardo Lorensi de Souza. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: [elorensi@yahoo.com.br](mailto:elorensi@yahoo.com.br)

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado

**EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E METANO EM ÁREA DE CULTIVO  
COM ARROZ IRRIGADO COM DIFERENTES MANEJOS DA PALHA  
PÓS-COLHEITA**

elaborada por  
**Eduardo Lorensi de Souza**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutor em Ciência do Solo**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Prof. Dr. Sandro José Giacomini**  
(Presidente/Orientador)

---

**Celso Aita, Prof. Dr. (UFSM)**

---

**Telmo Amado, Prof. Dr. (UFSM)**

---

**Leandro Souza da Silva, Prof. Dr. (UFSM)**

---

**Enio Marchesan, Prof. Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 15 de fevereiro de 2013.



***“Escolha um trabalho que tu ames,  
e não terás que trabalhar um único dia em tua vida.”***  
(Confúcio)

***“O que eu ouço, eu esqueço.  
O que eu vejo eu lembro.  
O que eu faço eu entendo.”***  
(Confúcio)

***“Não importa que você vá devagar,  
contanto que você não pare.”***  
(Confúcio)

***“A melhor maneira de ser feliz é contribuir para a felicidade dos outros.”***  
(Confúcio)



## **DEDICATÓRIA**

**Aos meus pais queridos  
Claudio e Dalcinda**

**Ao meu irmão  
João Antônio**

**À minha vó  
Celuta**



## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar forças para seguir sempre em frente nessa caminhada, superando todos os obstáculos e crescendo sempre como pessoa e como profissional.

À UFSM, ao PPGCS e ao Departamento de Solos e os seus professores, pelo conhecimento adquirido.

À CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Aos meus pais Claudio e Dalcinda e ao meu irmão João Antônio pelo apoio que sempre me foi dado, pelo amor e carinho incondicionais, pela confiança depositada em mim e por serem pessoas simples e felizes.

À toda a minha família pelo incentivo e apoio, em especial a minha avó paterna pelo carinho e amor.

Ao professor Sandro José Giacomini, pela orientação, amizade, ensinamentos e pela oportunidade para crescer e aprender.

Ao professor Enio Marchesan pelo empréstimo da área e de todo seu material disponível para realização desse trabalho, pela amizade, pelos ensinamentos e convívio.

Aos bolsistas e ex-bolsistas do grupo do Prof. Sandro: Alex, Guilherme, Isaias, Raquel, Bruno, Luana, Leonardo, Getúlio, Vaner, Ismael, Frederico, Cledir, José, Ricardo, Ailson, Pedro e Willian; vocês mais que bolsistas, são meus amigos, e com certeza foi somente com a ajuda de vocês que eu cheguei até aqui.

Aos bolsistas e ex-bolsistas do grupo do Prof. Aita pela amizade, e momentos de descontração.

Ao Grupo de Pesquisa em Arroz Irrigado pela amizade, ajuda e pelo convívio, em especial ao Paulo, Mara, Bruck e Gilmar.

Ao Douglas Adams pelo companheirismo e auxílio sempre que foi necessário.

Aos colegas e amigos do LABCEN: Maiara, Doneda, Stafen, Vagner, Cantú, Ricardo, Redin, Gonzatto, Pedro, Mariângela, Rosângela, Keko, e demais amigos que passaram por aqui, pelos momentos de trabalho, amizade e diversão.

À banca examinadora deste trabalho, composta pelos professores Leandro Souza da Silva, Telmo Amado, Enio Marchesan e Celso Aita, pelas considerações e sugestões.

Aos amigos de curso pela amizade e convívio.

Aos amigos, de longe e de perto, pelo ombro amigo, apoio, companheirismo e incentivo.

Aos funcionários do Departamento de Solos e do PPGCS, Vargas, Héverton, Rose e Flávio, pela ajuda nos momentos de dificuldade, pela amizade e pelos momentos de descontração.

Agradeço as demais pessoas que, mesmo não citadas, contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho.

Por fim, agradeço a todos que tiveram ao meu lado durante essa caminhada, me incentivando e me dando forças, pois se consegui chegar aqui, com certeza foi com a ajuda de todos vocês.

***Muito obrigado a todos vocês!***

## RESUMO

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Universidade Federal de Santa Maria, RS.

### **EMIÇÃO DE ÓXIDO NITROSO E METANO EM ÁREA DE CULTIVO COM ARROZ IRRIGADO COM DIFERENTES MANEJOS DA PALHA PÓS-COLHEITA**

AUTOR: EDUARDO LORENSI DE SOUZA

ORIENTADOR: Dr. SANDRO JOSÉ GIACOMINI

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 15 de fevereiro de 2013.

O tipo de manejo aplicado à palha pós-colheita do arroz pode afetar as emissões de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  e o potencial de aquecimento global (PAG) anual em áreas de várzea cultivadas com arroz irrigado por inundação. Para testar essa hipótese foi realizado o presente trabalho com o objetivo de quantificar as emissões anuais de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ , o PAG anual e avaliar o rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado sob diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita, em uma área de várzea no sul do Brasil. O experimento foi realizado em um Planossolo. Os tratamentos avaliados foram compostos por diferentes manejos da palha, como segue: Sem manejo da palha (**Sm**); Rolo-faca pós-colheita (**RFpc**); Grade pós-colheita (**Gpc**); Retirada da palha pós-colheita (**RPpc**); Sm + Azevém (**Sm + Az**); Grade em agosto (**Gas**); Gpc + grade em agosto (**Gpc + Gas**) e RPpc + grade em agosto (**RFpc + Gas**). A quantidade de palha de arroz adicionada na superfície do solo nas parcelas pós-colheita em todos os tratamentos foi ajustada para  $6,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  em abril de 2010 e para  $11,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  em março de 2011. As emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  foram avaliadas por dois anos consecutivos durante os períodos de entressafra e de cultivo do arroz. Em diferentes datas de avaliação dos gases foram realizadas coletas de solo para quantificar os teores de N mineral e umidade do solo. Com base nos dados de C no solo no início e ao final do experimento, das emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ , e, dos gastos em  $\text{CO}_2$  dos manejos agrícolas foi calculado o PAG de cada sistema de preparo. Esse estudo demonstrou que mais de 98% do  $\text{N}_2\text{O}$  emitido em área de várzea sob cultivo do arroz ocorre no período de entressafra da cultura. Já para o  $\text{CH}_4$  a quase totalidade desse gás é emitida durante o cultivo do arroz no período de alagamento do solo. A antecipação do preparo do solo, com incorporação da palha do arroz pós-colheita com grade ou cultivo de azevém pós-colheita promove as menores emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  durante o período de entressafra. As menores emissões de  $\text{CH}_4$  foram observadas nos tratamentos com a antecipação do preparo do solo, com incorporação da palha do arroz pós-colheita com rolo-faca e grade. Esses tipos de manejo da palha reduzem o PAG sem diminuir o rendimento de grãos, em relação aos sistemas que não incorporam a palha de arroz ao solo. Sistemas que se assemelham ao SPD, mantendo a palha sob a superfície do solo durante toda a entressafra, apresentam maiores emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ , ou ainda aqueles sistemas que recebem gradagem antes da semeadura (no mês de agosto), perdem grandes quantidades de C do solo, resultando em um PAG elevado nesses sistemas, mostrando-se menos eficientes e de baixa sustentabilidade.

**Palavras-chave:** Gases de efeito estufa. Potencial de aquecimento global. Sistemas de preparo. Manejo do solo pós-colheita.



## ABSTRACT

Doctoral Thesis in Soil Science  
Graduate Program in Soil Science  
Federal University of Santa Maria, Brazil

### **NITROUS OXIDE AND METHANE EMISSIONS FROM RICE FIELD UNDER DIFFERENT POST-HARVEST STRAW MANagements**

AUTHOR: EDUARDO LORENSI DE SOUZA  
ADVISOR: SANDRO JOSÉ GIACOMINI

Date and Place of Defense: Santa Maria, February 15, 2013.

Post-harvest rice straw managements can alter CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and global warming potential (GWP) in lowland areas cultivated with rice. In order to test this hypothesis, the present study was planned to quantify annual N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions, GWP and grain yield of rice subjected to different post-harvest straw managements on a lowland area at Southern Brazil. The soil was a Planossol. The treatments were as follows: No management (NM); Post-harvest Roll-knife (RKPH); Post-harvest Disc harrowing (PHDH); Without straw (WS); NM + Ryegrass (NM + RG); Disc harrowing in August (DH); Post-harvest Disc harrowing + Disc harrowing in August (DHPH + DH) and Without straw + Disc harrowing in August (WS + DH). The amount of rice straw returned to the soil in all plots after harvest was adjusted to 6.5 Mg ha<sup>-1</sup> in April 2010 and to 11.3 Mg ha<sup>-1</sup> in March 2011. Emissions of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> were evaluated for two consecutive years during the periods between harvests and rice cultivation. At each gas sampling time soil samples were also collected to evaluate soil mineral N and moisture contents. GWP of each management system was calculated from soil C contents (at the start of the experiment and at the end of experiment), N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions and CO<sub>2</sub> cost during all managements. The results showed that more than 98% of the emitted N<sub>2</sub>O in lowland rice cultivation occurs during fallow period. Nearly whole CH<sub>4</sub> emissions were recorded during rice cultivation. Incorporation of rice straw with tillage management after harvest with disc harrowing or growing of ryegrass after harvest lowered N<sub>2</sub>O emissions during fallow period. The lower CH<sub>4</sub> emissions were observed in the treatments where rice straw was incorporated after harvest with disk harrowing and roller knife. These straw management practices also reduced GWP without reducing grain yield, compared to managements that do not incorporate rice straw. Management systems that resemble NT or zero tillage, where straw was left on soil surface during the fallow period resulted in higher N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions. Similarly, those management systems where soil was harrowed before planting resulted in soil C loss and contributed towards higher GWP, being less efficient and unsustainable.

**Keywords:** Greenhouse gases. Global warming potential. Tillage systems. Post-harvest soil management.



## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

- FIGURA 1 - Vista esquemática da disposição dos tratamentos em um dos quatro blocos que constituem o experimento na entressafra da cultura do arroz irrigado, sob diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita, Santa Maria, RS.....36
- FIGURA 2 - Vista geral do experimento durante o período de cultivo do arroz irrigado, nos diferentes estádios de desenvolvimento durante a safra, segundo Counce et al. (2000): a) estágio de desenvolvimento vegetativo (V2/V3); b) estágio de desenvolvimento vegetativo (V5/V6); c) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R3); d) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R9); Santa Maria, RS .....39
- FIGURA 3 - Temperatura do ar e precipitação pluviométrica ocorridas nas entressafras da cultura do arroz irrigado em 2010 (a) e 2011 (b) .....42
- FIGURA 4 - Teores de  $\text{NO}_3^-$  (a e b) e  $\text{NH}_4^+$  (c e d), EPSA no solo na camada de 0-10 cm e precipitação diária (e e f) durante os períodos de entressafra em 2010 e 2011 .....43
- FIGURA 5 - Fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  nas entressafras da cultura do arroz irrigado em 2010 (a) e 2011 (b), sob diferentes sistemas de manejo pós-colheita, e precipitação pluviométrica ocorrida. RF= manejo com rolo-faca pós-colheita. G= manejo com grade pós-colheita. A= plantas de azevém emergidas .....44
- FIGURA 6 - Fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  na cultura do arroz irrigado, nas safras 2010/11 (a) e 2011/12 (b), sob diferentes sistemas de manejo após a colheita. E= emergência das plantas de arroz. N1 + I= 1ª adubação nitrogenada de cobertura ( $50 \text{ kg de N ha}^{-1}$ ) e início da irrigação permanente. N2= 2ª adubação nitrogenada de cobertura ( $35 \text{ kg de N ha}^{-1}$ ). N3= 3ª adubação nitrogenada de cobertura ( $35 \text{ kg de N ha}^{-1}$ ). S= drenagem das parcelas.....46

### CAPÍTULO II

- FIGURA 1 - Vista esquemática da disposição dos tratamentos em um dos quatro blocos que constituem o experimento na entressafra da cultura do arroz irrigado, sob diferentes sistemas de manejo da palha após a colheita, Santa Maria, RS.....63
- FIGURA 2 - Vista geral do experimento durante o período de cultivo do arroz irrigado, nos diferentes estádios de desenvolvimento durante a safra, segundo Counce et al. (2000): a) estágio de desenvolvimento

vegetativo (V2/V3); b) estágio de desenvolvimento vegetativo (V5/V6); c) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R3); d) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R9); Santa Maria, RS..... 68

FIGURA 3 - Temperatura do ar e precipitação pluviométrica ocorridas nas entressafras da cultura do arroz irrigado em 2010 (a) e 2011 (b)..... 70

FIGURA 4 - Fluxos de CH<sub>4</sub> nas entressafras da cultura do arroz irrigado em 2010 (a) e 2011 (b), sob diferentes sistemas de manejo pós-colheita, e precipitação pluviométrica durante o período. RF= manejo com rolo-faca após a colheita. G= manejo com grade após a colheita. A= plantas de azevém emergidas ..... 71

FIGURA 5 - Fluxos de CH<sub>4</sub> na cultura do arroz irrigado, nas safras 2010/11 (a) e 2011/12 (b), sob diferentes sistemas de manejo pós-colheita. N1 + I= 1<sup>a</sup> adubação nitrogenada de cobertura (50 kg de N ha<sup>-1</sup>) e início da irrigação permanente. N2= 2<sup>a</sup> adubação nitrogenada de cobertura (35 kg de N ha<sup>-1</sup>). N3= 3<sup>a</sup> adubação nitrogenada de cobertura (35 kg de N ha<sup>-1</sup>). E= emergência das plantas de arroz. L= Lâmina de água com profundidade abaixo dos 3 cm. S= drenagem das parcelas ..... 73

### CAPÍTULO III

FIGURA 1 - Vista geral da área experimental durante o período de entressafra da cultura do arroz irrigado, sob diferentes sistemas de manejo da palha após a colheita, Santa Maria, RS..... 91

FIGURA 2 - Vista geral do experimento durante o período de cultivo do arroz irrigado, nos diferentes estádios de desenvolvimento durante a safra, segundo Counce et al. (2000): a) estágio de desenvolvimento vegetativo (V2/V3); b) estágio de desenvolvimento vegetativo (V5/V6); c) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R3); d) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R9); Santa Maria, RS..... 97

FIGURA 3 - Rendimento de grãos na cultura do arroz irrigado, sob diferentes sistemas de manejo pós-colheita, nos anos agrícolas de 2010/11 (a) e 2011/12 (b). Letras iguais nas barras não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância..... 99

FIGURA 4 - Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) na entressafra da cultura do arroz irrigado, em CO<sub>2</sub> eq. das emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> na entressafra e dos gastos em CO<sub>2</sub> eq. referentes aos manejos com grade e rolo-faca e, a aplicação de N-uréia em cobertura no azevém, em diferentes sistemas de manejo pós-colheita. Os valores do PAGp são a média de 2 anos de avaliações. Letras iguais nas barras não diferem entre si pelo teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de significância ..... 100

FIGURA 5 - Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) durante o período de cultivo do arroz irrigado, em CO<sub>2</sub> eq. das emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> durante o cultivo do arroz, dos gastos em CO<sub>2</sub> eq. referentes aos manejo de semeadura e aplicação de N-uréia em cobertura no arroz, em diferentes sistemas de manejo pós-colheita. Os valores de PAGp são a média de 2 anos de avaliações. Letras iguais nas barras não diferem entre si pelo teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de significância..... 102

FIGURA 6 - Potencial de aquecimento global total (PAGt) anual, em CO<sub>2</sub> eq. das emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, gastos com semeadura e manejos com grade e rolo-faca, perdas ou ganhos de C no solo ( $\Delta C$ ) e, fabricação e aplicação de N-uréia na cultura do arroz irrigado, em diferentes sistemas de manejo pós-colheita. Os valores de PAGt são a média de 2 anos de avaliações. Letras iguais nas barras não diferem entre si pelo teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de significância ..... 104



## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

- TABELA 1 – Descrição dos tratamentos avaliados nos dois anos de estudo .....35
- TABELA 2 – Cronograma das principais operações de campo realizadas no período de avaliações de N<sub>2</sub>O.....37
- TABELA 3 – Emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O nas entressafras dos anos de 2010 e 2011 e nos períodos de cultivo do arroz em 2010/2011 e 2011/2012, para oito sistemas de manejos das áreas na entressafra, antes do cultivo do arroz irrigado .....47

### CAPÍTULO II

- TABELA 1 – Tratamentos compostos por oito sistemas diferentes de manejo da palha pós-colheita em 2010 e 2011 .....64
- TABELA 2 – Cronograma das principais operações de campo realizadas no período de avaliação de CH<sub>4</sub> .....66
- TABELA 3 – Emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> nas entressafras dos anos de 2010 e 2011 e nos períodos de cultivo do arroz em 2010/2011 e 2011/2012, para oito sistemas de manejos das áreas na entressafra, antes do cultivo do arroz irrigado .....75

### CAPÍTULO III

- TABELA 1 – Tratamentos compostos por oito sistemas diferentes de manejo da palha pós-colheita em 2010 e 2011 .....92
- TABELA 2 – Cronograma das principais operações de campo realizadas no período de avaliações de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O .....95
- TABELA 3 – Contribuição das emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, dos manejos com grade e rolo-faca e aplicação de N em cobertura no azevém, para o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) durante o período de entressafra ..... 101
- TABELA 4 – Contribuição das emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, dos manejos com grade e rolo-faca e aplicação de N em cobertura no azevém, para o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) durante o período de cultivo do arroz irrigado ..... 103

- TABELA 5 – CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> eq.) dos manejos com grade e rolo-faca, do  $\Delta C$  do solo, dos custos com a semeadura do arroz e com as aplicações de N em cobertura, dos valores de potencial de aquecimento global parcial (PAGp) na entressafra e durante o período de cultivo do arroz, do potencial de aquecimento global total (PAGt) anual e, índice PAGt/rendimento de grãos (PAGt/rend. grãos) médios para oito sistemas de manejo pós-colheita na cultura do arroz irrigado, nas entressafras de 2010 e 2011 e durante o período de cultivo do arroz em 2010/11 e 2011/12..... 105
- TABELA 6 – Contribuição das emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, dos manejos com grade e rolo-faca e aplicação de N em cobertura no azevém, para o potencial de aquecimento global total (PAGt) anual..... 105

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A –	Croqui do experimento .....	135
Anexo B –	Esquema mostrando a distribuição das bases para coleta de GEE, coletores de solução do solo, das microparcelas com aplicação de <sup>15</sup> N e das plantas de arroz, dentro de uma das parcelas .....	136
Anexo C –	Vista aérea da área experimental .....	137
Anexo D –	Diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita do arroz irrigado .....	138
Anexo E –	Coletas de gases durante a entressafra (flechas vermelhas) e durante o cultivo do arroz irrigado (flechas amarelas) .....	139



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>27</b>
<b>1.1</b>	<b>Hipóteses .....</b>	<b>30</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>31</b>
1.2.1	<i>Objetivo geral .....</i>	<i>31</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>31</i>
<b>2.</b>	<b>CAPÍTULO I – EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO NA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DA PALHA PÓS-COLHEITA .....</b>	<b>33</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2</b>	<b>Material e métodos .....</b>	<b>35</b>
2.2.1	<i>Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental .....</i>	<i>35</i>
2.2.2	<i>Condução do experimento.....</i>	<i>37</i>
2.2.3	<i>Coletas e avaliações das emissões de N<sub>2</sub>O .....</i>	<i>39</i>
2.2.4	<i>Análises de solo.....</i>	<i>40</i>
2.2.5	<i>Análises estatísticas .....</i>	<i>41</i>
<b>2.3</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>41</b>
2.3.1	<i>Período de entressafra .....</i>	<i>41</i>
2.3.1.1	<i>Temperatura média do ar e precipitação .....</i>	<i>41</i>
2.3.1.2	<i>N mineral e EPSA do solo .....</i>	<i>42</i>
2.3.1.3	<i>Fluxos de N<sub>2</sub>O .....</i>	<i>43</i>
2.3.2	<i>Período de cultivo .....</i>	<i>46</i>
2.3.2.1	<i>Fluxos de N<sub>2</sub>O .....</i>	<i>46</i>
2.3.3	<i>Emissão acumulada de N<sub>2</sub>O.....</i>	<i>47</i>
<b>2.4</b>	<b>Discussão.....</b>	<b>49</b>
2.4.1	<i>Fluxos de N<sub>2</sub>O na entressafra.....</i>	<i>49</i>
2.4.2	<i>Fluxos de N<sub>2</sub>O durante o cultivo do arroz irrigado .....</i>	<i>53</i>
2.4.3	<i>Emissão acumulada de N<sub>2</sub>O.....</i>	<i>56</i>
<b>2.5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>59</b>
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO II – EMISSÃO DE METANO NA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DA PALHA PÓS-COLHEITA.....</b>	<b>61</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>61</b>
<b>3.2</b>	<b>Material e métodos .....</b>	<b>63</b>
3.2.1	<i>Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental .....</i>	<i>63</i>
3.2.2	<i>Coletas e avaliações das emissões de CH<sub>4</sub> .....</i>	<i>65</i>
3.2.3	<i>Condução do experimento.....</i>	<i>66</i>
3.2.4	<i>Análises estatísticas .....</i>	<i>68</i>
<b>3.3</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>69</b>
3.3.1	<i>Período de entressafra .....</i>	<i>69</i>
3.3.1.1	<i>Temperatura do ar e precipitação.....</i>	<i>69</i>
3.3.1.2	<i>Fluxos de CH<sub>4</sub>.....</i>	<i>70</i>
3.3.2	<i>Período de cultivo .....</i>	<i>72</i>
3.3.2.1	<i>Fluxos de CH<sub>4</sub>.....</i>	<i>72</i>
3.3.2.2	<i>Emissão acumulada de CH<sub>4</sub>.....</i>	<i>74</i>
<b>3.4</b>	<b>Discussão.....</b>	<b>76</b>

3.4.1	<i>Fluxos de CH<sub>4</sub> na entressafra</i> .....	76
3.4.2	<i>Fluxos de CH<sub>4</sub> durante o cultivo do arroz irrigado</i> .....	80
3.4.3	<i>Emissão acumulada de CH<sub>4</sub></i> .....	86
<b>3.5</b>	<b>Conclusões</b> .....	<b>88</b>
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO III – POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL E RENDIMENTO DE GRÃOS NA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DA PALHA PÓS-COLHEITA</b> .....	<b>89</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>89</b>
<b>4.2</b>	<b>Material e métodos</b> .....	<b>91</b>
4.2.1	<i>Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental</i> .....	91
4.2.2	<i>Coletas e avaliações das emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O</i> .....	93
4.2.3	<i>Avaliações dos estoques de C no solo e rendimento de grãos</i> .....	94
4.2.4	<i>Condução do experimento</i> .....	95
4.2.5	<i>PAG</i> .....	97
4.2.6	<i>Análise estatística</i> .....	98
<b>4.3</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>98</b>
4.3.1	<i>Rendimento de grãos</i> .....	98
4.3.2	<i>PAGp na entressafra</i> .....	100
4.3.3	<i>PAGp durante o cultivo do arroz</i> .....	102
4.3.4	<i>PAGt e relação PAGt/rendimento de grãos</i> .....	103
<b>4.4</b>	<b>Discussão</b> .....	<b>106</b>
4.4.1	<i>Rendimento de grãos</i> .....	106
4.4.2	<i>PAGp na entressafra</i> .....	108
4.4.3	<i>PAGp durante o cultivo do arroz</i> .....	109
4.4.4	<i>PAGt e relação PAGt/rendimento de grãos</i> .....	110
<b>4.5</b>	<b>Conclusões</b> .....	<b>114</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>115</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>117</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>133</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O aquecimento global, que é causado pelo aumento do efeito estufa, é uma das principais preocupações ambientais atuais. Os três principais gases que causam o efeito estufa são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (IPCC, 2007), sendo os dois últimos os mais potentes. A presença desses gases mantém a temperatura média na superfície terrestre ao redor dos  $15^\circ\text{C}$ , por meio do chamado efeito estufa natural. Todavia, a atividade humana tem elevado a concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera durante as últimas décadas, principalmente após o início da revolução industrial, repercutindo no aumento da temperatura do ar (Zschornack, 2011). É muito provável que a maior parte do aumento observado na temperatura média global se deva ao aumento das concentrações antrópicas de GEE, que é causado devido a queima de combustíveis fósseis, ao desmatamento, as queimadas e a própria atividade agropecuária, entre outras (IPCC, 2007). Dentre as atividades geradoras de GEE, mundialmente, a estimativa é de que a agricultura contribua com aproximadamente 22% das emissões totais de GEE (IPCC, 2007).

O  $\text{N}_2\text{O}$  é um potente GEE, que têm um potencial de aquecimento global (PAG) 296 vezes maior em relação ao  $\text{CO}_2$ , para um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (Forster et al., 2007). Com um incremento de aproximadamente 0,22% na taxa de emissão anual, o  $\text{N}_2\text{O}$  atingiu 319 ppb de concentração na atmosfera (IPCC, 2007). A principal fonte de  $\text{N}_2\text{O}$  são os solos agrícolas, sendo que mundialmente estima-se que a agricultura é responsável por aproximadamente 80% das emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  (IPCC, 2007). Já no Brasil, estima-se que 94% das emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  sejam oriundas de atividades agrícolas (EMBRAPA e CNPMA, 2006; Cerri e Cerri, 2007; Smith et al., 2007). Entre as práticas agrícolas com maior efeito sobre a emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  estão a fertilização nitrogenada e o manejo do solo (IPCC, 2005). O  $\text{N}_2\text{O}$  é gerado nos processos de nitrificação e desnitrificação, sendo esses fortemente influenciados pela temperatura do solo, umidade, pH e carbono (C) disponível aos microrganismos (Bouwman, 1990). A nitrificação é favorecida em condições aeróbicas e de disponibilidade de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) no solo, sendo que em condições de espaço poroso ocupado por água

(EPSA) na faixa de 30 a 60%, o nitrogênio (N) pode ser perdido tanto na forma de NO como de N<sub>2</sub>O. Já a desnitrificação é favorecida por condições anaeróbicas, presença de C e nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) disponível no solo (Moreira e Siqueira, 2006).

O CH<sub>4</sub> é outro importante GEE, que têm um PAG 23 vezes maior em relação ao CO<sub>2</sub>, para um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (Forster et al., 2007). Com um incremento de aproximadamente 3% na taxa de emissão anual (Prinn, 1995), o CH<sub>4</sub> atingiu a concentração na atmosfera de aproximadamente 1774 ppb (IPCC, 2007). O CH<sub>4</sub> é produzido principalmente a partir da decomposição de matéria orgânica em condições estritamente anaeróbicas e sob condições extremamente reduzidas (Garcia et al., 2000). As emissões de CH<sub>4</sub> são controladas por vários fatores em condições de campo, incluindo o tipo e quantidade de aplicação de fertilizantes (Huang et al., 2004; Cai et al., 2007), o regime hídrico (Zou et al., 2005; Yan et al., 2009) e as características do solo (Yan et al., 2005; Xiong et al., 2007). A principal fonte de CH<sub>4</sub> são os solos agrícolas, sendo que mundialmente estima-se que a agricultura é responsável por aproximadamente 55% das emissões de CH<sub>4</sub> (IPCC, 2007). Já no Brasil, estima-se que 91% das emissões de CH<sub>4</sub> sejam oriundas de atividades agrícolas (EMBRAPA e CNPMA, 2006; Cerri e Cerri, 2007; Smith et al., 2007). No Brasil, a criação de bovinos é a atividade agrícola que apresenta o maior efluxo de CH<sub>4</sub> para a atmosfera devido à fermentação entérica, a qual responde por 63% do efluxo total antrópico (MCT, 2009). Depois da criação de bovinos, destaca-se o cultivo de arroz por alagamento como atividade geradora de CH<sub>4</sub> (Agostinetto, 2002). Os solos naturalmente inundados e de lavouras de arroz são fontes emissoras de CH<sub>4</sub> (IPCC, 2007), o qual é o produto final da decomposição anaeróbica de compostos orgânicos.

O arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo, ocupando uma área de aproximadamente 158 milhões de hectares. A produção mundial é cerca de 662 milhões de toneladas de grãos em casca, que corresponde a 20% das calorias consumidas na alimentação humana (SOSBAI, 2012). Mundialmente, 55% do cultivo de arroz, cerca de 80 milhões de hectares, são produzidos sob regime de alagamento (IRRI, 2004). O Brasil, 9º produtor mundial, é o maior produtor e consumidor mundial de arroz fora da Ásia (USDA, 2010) e tem no Rio Grande do Sul (RS) o seu principal estado produtor, que responde por 82% da produção de arroz no Mercosul. Além disso, 70% do cultivo de arroz irrigado na região sul está localizada nos estados de Santa Catarina (SC) e RS, sendo este último responsável

por 61% da produção nacional de arroz (SOSBAI, 2012), o que torna-o um importante produtor potencial de CH<sub>4</sub>. Em solos alagados são observados elevados fluxos de CH<sub>4</sub> para a atmosfera, e nesse sistema a cultura do arroz, que é predominante na região sul do Brasil, tem papel importante na contribuição dessas emissões no período de cultivo (Costa, 2005; Moterle, 2011).

Em 2005, a região sul contribuiu com 82% do total das emissões de CH<sub>4</sub> em áreas de cultivo de arroz no Brasil (EMBRAPA, 2010). O cultivo do arroz irrigado é responsável pelo efluxo de 269 Gg de CH<sub>4</sub>, contribuindo com 1,4% do efluxo total antrópico brasileiro (MCT, 2009). Este valor é baixo comparado com a região Asiática, tradicional no cultivo do arroz irrigado, cuja contribuição no efluxo de CH<sub>4</sub> atinge 82% do efluxo total antrópico (Zschornack, 2011). No entanto, o cultivo de arroz irrigado por alagamento tem papel de destaque em função de que a produção brasileira está concentrada nos estados do RS e SC, com uma área anual cultivada de aproximadamente 1,1 milhão de hectares (SOSBAI, 2012). O arroz é cultivado sob uma grande variedade de solo, clima, e as condições hidrológicas. Isso torna essa cultura muito importante no que diz respeito às mudanças nos padrões de emissões de GEE, já que o arroz é uma das poucas culturas onde é possível mudar o padrão das emissões (Agostinetto, 2002; Yu e Patrick, 2004). Dentre outros fatores, principalmente as práticas de manejo de solo afetam as emissões de GEE (Gomes, 2006), e poderão ser utilizadas para a mitigação das emissões de GEE em áreas de arroz.

No estado do RS, em regiões de várzea, onde existe predomínio da monocultura do arroz, os resíduos culturais são manejados em duas épocas: após a colheita ou antecedendo a semeadura da cultura. Essas formas de manejo dos resíduos culturais podem ter implicações diferentes sobre as emissões de GEE. Considerando que o RS é o maior produtor nacional de arroz, e onde diferentes sistemas de manejo e práticas agrícolas são implementados (SOSBAI, 2010), a definição de estratégias que minimizem a emissão de gases nas áreas cultivadas com arroz alagado, sem afetar a produtividade do mesmo, pode representar uma parcela importante na redução das emissões de GEE (Zschornack, 2011).

Para as condições de cultivo de arroz irrigado no Brasil, há carência de estudos que relacionem as práticas utilizadas no cultivo de arroz irrigado com a influência destas sobre as emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> na entressafra, e suas consequências durante o período de cultivo do arroz irrigado. Espera-se que alguns

sistemas de manejo pós-colheita da palha de arroz possibilitem uma diminuição das emissões anuais desses gases em áreas com cultivo de arroz irrigado, e, mantenham as produtividades da cultura.

Nesse contexto, o objetivo desse estudo foi de quantificar as emissões anuais de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  em diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita do arroz irrigado e calcular o PAG nesses sistemas de manejo, além de avaliar o rendimento de grãos da cultura do arroz.

## 1.1 Hipóteses

- a) A incorporação da palha de arroz ao solo pós-colheita aumenta as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  no período de entressafra e diminui as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  durante o período de cultivo do arroz irrigado.
- b) A contribuição do  $\text{CH}_4$  para o PAG é menor em sistemas de manejo que promovem a incorporação da palha de arroz pós-colheita, em relação aos manejos que não incorporam.
- c) O PAG anual de áreas de várzea com cultivo de arroz irrigado é menor em sistemas de manejo que incorporam a palha de arroz pós-colheita.
- d) Em áreas de várzea com monocultivo da cultura do arroz, a produtividade de grãos desta cultura é afetada pelos diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita do arroz.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Quantificar as emissões anuais de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, calcular o PAG e avaliar o rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado sob diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita em uma área de várzea no sul do Brasil.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Quantificar as emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> no período de entressafra e de cultivo do arroz irrigado sob diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita.
- Determinar o PAG para os diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita.
- Avaliar o rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado sob diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita.



## **2. CAPÍTULO I – EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO NA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DA PALHA PÓS-COLHEITA**

### **2.1 Introdução**

O óxido nitroso ( $N_2O$ ) é considerado um potente gás de efeito estufa (GEE), com poder de aquecimento 296 vezes maior do que o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (IPCC, 2007). Com um incremento de aproximadamente 0,22% na taxa de emissão anual (Machida et al., 1995), desde a era pré-industrial a concentração de  $N_2O$  na atmosfera aumentou de 270 para 319 ppb (IPCC, 2007). Esse aumento está relacionado com a atividade industrial e ao uso agrícola dos solos, e o  $N_2O$  tem sido em parte, responsável pelo aquecimento global e seus impactos negativos na agricultura e na sociedade em geral (IPCC, 2007). A principal fonte de  $N_2O$  são os solos agrícolas, sendo que mundialmente estima-se que a agricultura é responsável entre 60% (Zou et al., 2004) e 80% (IPCC, 2007) das emissões totais de  $N_2O$ . No Brasil, estima-se que 480 Gg de  $N_2O$  por ano são emitidos (EMBRAPA e CNPMA, 2006), sendo a agricultura contribui com 94% das emissões totais de  $N_2O$  (Smith et al., 2007; Cerri e Cerri, 2007; Cerri et al., 2009). A região sul emite 107 Gg de  $N_2O$  por ano (22% das emissões nacionais), sendo que o estado do Rio Grande do Sul (RS) é responsável por 45% dessas emissões. Entre as práticas agrícolas com maior efeito sobre a emissão de  $N_2O$  estão a fertilização nitrogenada e o manejo do solo (IPCC, 2005).

O  $N_2O$  é gerado nos processos de nitrificação e desnitrificação, sendo esses fortemente influenciados pela temperatura do solo, umidade, pH e carbono (C) disponível aos microrganismos (Bouwman, 1990). A nitrificação é favorecida em condições aeróbicas e de disponibilidade de amônio ( $NH_4^+$ ) no solo. A produção de  $N_2O$  durante a nitrificação pode ocorrer quando as condições de espaço poroso ocupado por água (EPSA) estiverem na faixa de 30 a 60%. Já a desnitrificação é favorecida por condições anaeróbicas e presença de C e nitrato ( $NO_3^-$ ) disponíveis no solo. Esse processo é estimulado no solo quando o mesmo se encontra com valores de EPSA acima de 60%.

Dentre as culturas anuais mais importantes, o arroz se destaca, pois é o segundo cereal mais cultivado no mundo, ocupando uma área de aproximadamente 158 milhões de hectares, com uma produção mundial de cerca de 662 milhões de toneladas de grãos em casca, que corresponde a 20% das calorias consumidas na alimentação humana (SOSBAI, 2012). O arroz é cultivado sob uma grande variedade de solos, climas e condições hidrológicas. No Brasil, a produção anual de arroz nas últimas safras variou entre 11 e 13 milhões de toneladas, sendo o RS o maior produtor nacional, com uma área de cultivo de aproximadamente 1,1 milhão de hectares, com o uso de irrigação por alagamento (IRGA, 2010).

As emissões de  $N_2O$  em áreas cultivadas com arroz irrigado ocorrem principalmente durante o período de entressafra (Cai et al., 1997; Ghosh, 2003), quando os solos de várzeas intercalam ciclos de umedecimento e secagem, onde os microrganismos atuam realizando os processos sequenciais de mineralização-nitrificação-desnitrificação. De acordo com a estimativa de Xing (1998) e Liang et al. (2007), entre 40 e 60% do total anual das emissões de  $N_2O$  em ecossistemas à base de arroz na China ocorreram na estação de inverno, durante a entressafra.

Em regiões de várzea no RS, onde existe predomínio da monocultura do arroz, os resíduos culturais são manejados principalmente em duas épocas no período de entressafra: pós-colheita ou antecedendo a semeadura da cultura. Essas duas formas de manejo dos resíduos culturais podem ter implicações diferentes sobre as emissões de  $N_2O$ , principalmente se há incorporação dos resíduos de arroz ao solo na entressafra. Tais aspectos ainda são muito poucos estudados no Brasil, principalmente no período de entressafra da cultura do arroz. Acredita-se que o manejo dos resíduos culturais do arroz pós-colheita afetem as emissões de  $N_2O$ , principalmente na entressafra, sendo necessária a seleção daqueles manejos que apresentem maior potencial para a mitigação das emissões anuais de  $N_2O$ . Dessa forma, espera-se que manejos que promovam a incorporação dos resíduos culturais do arroz pós-colheita, possam ter potencial para mitigar as emissões de  $N_2O$  tanto no período de entressafra quanto no período de cultivo do arroz em áreas de várzea no RS, pois após a incorporação, a palha de arroz poderá ser decomposta na entressafra, não ficando disponível para a metanogênese durante o período de cultivo do arroz, reduzindo os fluxos de  $CH_4$  para a atmosfera.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita do arroz irrigado sobre as emissões anuais de N<sub>2</sub>O.

## 2.2 Material e métodos

### 2.2.1 Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM (29° 45’S, 53° 42’W; cerca de 95 metros de altitude), Rio Grande do Sul, Brasil. O clima do local é subtropical húmido (tipo Cfa2 na classificação de Köppen) com precipitação média anual de 1.686 mm e temperatura média anual de 19,3°C. O solo foi classificado como Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico (EMBRAPA, 2006). As características do solo na camada de 0-0,1 m no início das avaliações foram as seguintes: carbono orgânico 0,6%; pH – 5,3; densidade – 1,42 g cm<sup>-3</sup>; areia – 21%; silte – 57%; argila – 22%; 21,7 mg kg<sup>-1</sup> de P e 96,5 mg kg<sup>-1</sup> de K extraído por Mehlich-1. Anteriormente a implantação do experimento, o solo da área foi revolvido com grade de discos e depois cultivado com arroz irrigado.

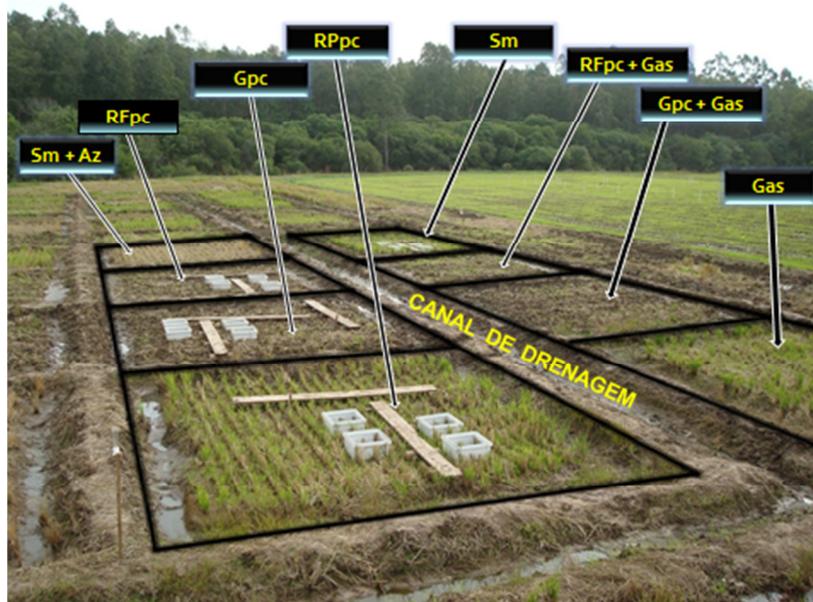
Os tratamentos avaliados foram compostos por diferentes sistemas de manejo da palha no período de entressafra da cultura do arroz irrigado (Tabela 1).

**Tabela 1**

Descrição dos tratamentos avaliados nos dois anos de estudo.

Detalhes dos tratamentos	
T1 – (Sm)	Sem manejo da palha
T2 – (RFpc)	Incorporação da palha com rolo-faca pós-colheita
T3 – (Gpc)	Incorporação da palha com grade pós-colheita
T4 – (RPpc)	Retirada da palha pós-colheita
T5 – (Sm + Az)	Cultivo de azevém 30 dias pós-colheita
T6 – (Gas)	Sem manejo da palha, com grade em agosto
T7 – (Gpc + Gas)	Incorporação da palha com grade pós-colheita e grade em agosto
T8 – (RFpc + Gas)	Incorporação da palha com rolo-faca pós-colheita e grade em agosto

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com quatro repetições em parcelas de 12 m<sup>2</sup> (3 m x 4 m) (Fig. 1).



**Fig. 1.** Vista esquemática da disposição dos tratamentos em um dos quatro blocos que constituem o experimento na entressafra da cultura do arroz irrigado, sob diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita, Santa Maria, RS.

As parcelas dos tratamentos foram delimitadas em 17 de abril de 2010, um dia após a colheita dos grãos de arroz da cultivar Puitá Inta-CL<sup>®</sup>. A quantidade de palha de arroz que foi devolvida/distribuída na superfície do solo nas parcelas de todos os tratamentos no início do experimento foi ajustada para 6,5 Mg ha<sup>-1</sup> em 2010 e 11,3 Mg ha<sup>-1</sup> em 2011, com exceção do tratamento RPpc, onde a palha foi retirada das parcelas. No tratamento RPpc permaneceram na parcela apenas uma pequena parte dos colmos das plantas que não foram cortados pela colhedora no momento da colheita.

No tratamento Sm a palha não sofreu nenhum manejo na entressafra, sendo que a semeadura do arroz em outubro foi realizada sobre a palha que ainda permanecia na superfície do solo (1,5 Mg ha<sup>-1</sup> na semeadura em 2010 e 1,1 Mg ha<sup>-1</sup> na semeadura em 2011). Nos tratamentos RFpc e Gpc a palha que estava na superfície do solo foi manejada com rolo-faca e com grade pós-colheita, respectivamente. No tratamento Sm + Az a palha não sofreu nenhum manejo e aos

30 dias após a colheita do arroz foi semeado azevém a lanço. Durante o cultivo do azevém a cultura recebeu 1 corte na entressafra de 2010 e 2 cortes na entressafra de 2011, para simular o efeito do pastejo dos animais. A matéria seca (MS) colhida de azevém foi de 3,1 e 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> nas entressafras em 2010 e 2011, respectivamente. Nesse tratamento a semeadura do arroz em outubro foi realizada sobre a palha do arroz mais a palha restante de azevém (2,1 Mg ha<sup>-1</sup> na semeadura em 2010 e 1,1 Mg ha<sup>-1</sup> na semeadura em 2011) remanescentes após a entressafra. No Gas a palha que estava na superfície do solo foi incorporada com grade de discos em agosto de 2010 e 2011. Nos tratamentos Gpc + Gas e RFpc + Gas a palha foi manejada com grade e rolo-faca pós-colheita, respectivamente, e com grade de disco também em agosto (Tabela 2). No momento da passagem do rolo-faca (RFpc e RFpc + Gas) as parcelas apresentavam uma lâmina de água de aproximadamente 10 cm. Já na passagem da grade em agosto o solo encontrava-se úmido.

### 2.2.2 Condução do experimento

Na tabela 2 são apresentadas em ordem cronológica as principais operações realizadas durante o período de avaliações.

**Tabela 2**

Cronograma das principais operações de campo realizadas no período de avaliações de N<sub>2</sub>O.

Operação de campo	Ano agrícola	
	2010/11	2011/12
Aplicação da palha nas parcelas	17 abril 2010	14 março 2011
Início das amostragens de N <sub>2</sub> O na entressafra	18 abril 2010	15 março 2011
Manejo da palha com rolo-faca pós-colheita (tratamentos RFpc e RFpc + Gas)	24 abril 2010	19 março 2011
1º manejo da palha com grade (tratamento Gpc)	03 maio 2010	05 abril 2011
Semeadura do azevém (60 kg ha <sup>-1</sup> sementes) no tratamento Sm + Az	17 maio 2010	07 maio 2011
Adubação nitrogenada no azevém (30 kg N ha <sup>-1</sup> )	16 julho 2010	01 julho 2011
Dessecação do azevém	28 setembro 2010	
Cortes do azevém (simulação de pastejo)	08 outubro 2010	11 agosto e 07 outubro 2011
2º manejo da palha com grade (tratamentos Gpc + Gas,	11 agosto 2010	18 agosto

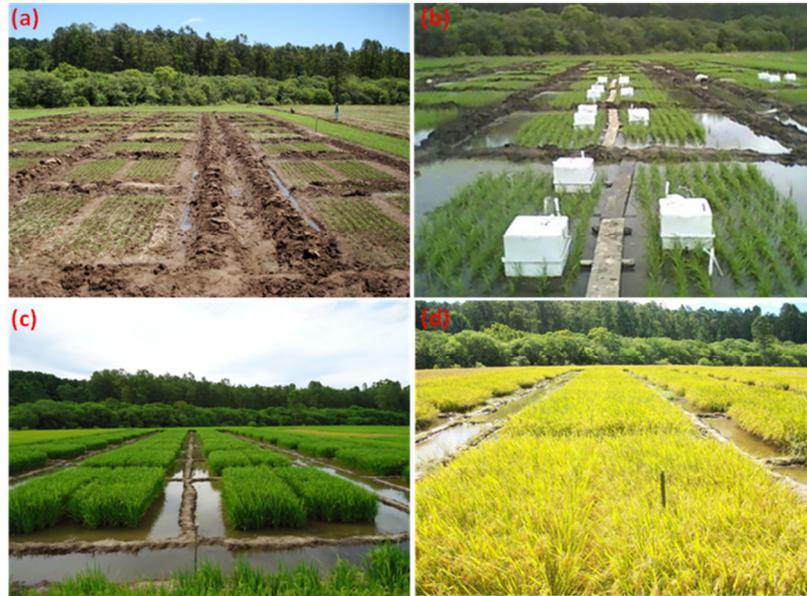
RFpc + Gas e Gas)			2011
Última amostragem de N <sub>2</sub> O na entressafra	01 outubro 2010	10	outubro 2011
Semeadura do arroz (90 kg ha <sup>-1</sup> de sementes)	22 outubro 2010	18	outubro 2011
Início das amostragens de N <sub>2</sub> O no período de cultivo do arroz irrigado	12 novembro 2010	19	novembro 2011
Início da irrigação permanente em todas as parcelas	20 novembro 2010	21	novembro 2011
1 <sup>a</sup> adubação nitrogenada de cobertura (50 kg N ha <sup>-1</sup> ) em todas as parcelas e início da irrigação permanente	20 novembro 2010	21	novembro 2011
2 <sup>a</sup> adubação nitrogenada de cobertura (35 kg N ha <sup>-1</sup> ) em todas as parcelas	22 dezembro	22	dezembro 2011
3 <sup>a</sup> adubação nitrogenada de cobertura (35 kg N ha <sup>-1</sup> ) em todas as parcelas	15 janeiro 2011	11	janeiro 2012
Suspensão da irrigação permanente nas parcelas	03 março 2011	07	março 2012
Última amostragem de N <sub>2</sub> O no período de cultivo do arroz irrigado	10 março 2011	08	março 2012
Colheita	10 março 2011	12	março 2012

A semeadura do arroz na safra 2010/11 foi realizada em 22/10/2010, e na safra 2011/12 em 18/10/2011, ambas dentro da época recomendada de semeadura na Depressão Central do RS, utilizando-se 90 kg ha<sup>-1</sup> de sementes da cultivar Puitá Inta-CL<sup>®</sup> e 300 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula NPK 5-20-20 em adubação de base, num total de 18 linhas em cada parcela. A população de plantas foi ajustada para 250 plantas por metro quadrado, seguindo as recomendações para o cultivo de arroz irrigado no RS.

Antes da semeadura do arroz, as parcelas dos tratamentos Sm, RPpc e Sm + Az não sofreram nenhum tipo de manejo por ocasião da semeadura, apenas no primeiro ano de cultivo, o solo dos demais tratamentos sofreu um nivelamento superficial com uma lâmina hidráulica niveladora a fim de melhorar as condições para a semeadura do arroz. No primeiro e segundo ano de cultivo, em 20/11/2010 e 21/11/2011, respectivamente, foi iniciada a irrigação permanente, em torno de 20 dias após a emergência das plantas, conforme a tabela 2. Após o início da irrigação se manteve a altura da lâmina de água com 10 cm de profundidade na safra 2010/11 e 7 cm na safra 2011/12.

A adubação de cobertura com N foi realizada em três épocas: 1<sup>a</sup> aplicação anterior ao início da irrigação (50 kg de N ha<sup>-1</sup>); 2<sup>a</sup> aplicação no início do perfilhamento (35 kg de N ha<sup>-1</sup>); e a 3<sup>a</sup> aplicação no início da diferenciação da panícula (IP) (35 kg de N ha<sup>-1</sup>), totalizando 135 kg de N ha<sup>-1</sup> (15 kg na semeadura e

120 kg parcelados em cobertura). Os demais tratos culturais utilizados seguiram as recomendações técnicas para o cultivo de arroz irrigado no RS. Na figura 2 está apresentada a vista geral do experimento durante o cultivo do arroz irrigado, em diferentes estádios de desenvolvimento.



**Fig. 2.** Vista geral do experimento durante o período de cultivo do arroz irrigado, nos diferentes estádios de desenvolvimento durante a safra, segundo Counce et al. (2000): a) estágio de desenvolvimento vegetativo (V2/V3); b) estágio de desenvolvimento vegetativo (V5/V6); c) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R3); d) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R9); Santa Maria, RS.

### **2.2.3 Coletas e avaliações das emissões de $N_2O$**

Na tabela 2 são apresentadas as datas de início e término das avaliações de  $N_2O$  nas entressafras e durante o período de cultivo do primeiro e segundo ano, respectivamente. As avaliações foram realizadas com auxílio de um sistema composto por uma base e uma câmara conforme método da câmara estática fechada, proposto por Mosier (1989). A base quadrada em aço galvanizado ficou permanentemente no campo, inserida no solo até 0,12 m de profundidade, deixando exposta uma calha para encaixe da câmara, no momento das amostragens. As câmaras quadradas também em aço galvanizado apresentavam 0,20 m de altura e 0,40 m de largura. Para as avaliações realizadas durante o período de cultivo do arroz foram utilizados extensores para adequar a altura da câmara às plantas de arroz. Durante o período de avaliações de  $N_2O$  na entressafra e safra nos dois anos

de experimento, as bases foram alocadas nas parcelas, de modo que duas linhas de plantio do arroz passassem no interior de cada base.

Cada câmara possuía um ventilador tipo “cooler” no seu interior, o qual foi conectado e ligado a uma bateria de 12 V durante 30 segundos para homogeneização da atmosfera interna, imediatamente antes das coletas de ar. Termômetros digitais foram utilizados para monitorar a temperatura do ar no interior das câmaras a cada amostragem e no solo. Na parte superior da câmara existia uma válvula de três vias, pela qual foram retiradas as amostras de ar durante as coletas. No momento das amostragens, cada câmara foi encaixada à calha da base metálica, e em seguida foi adicionada água na calha para selar a câmara, buscando-se impedir trocas gasosas entre o interior da câmara e o ambiente externo durante as coletas.

As amostras de ar do interior das câmaras foram coletadas com seringas de polipropileno, em três tempos após a colocação da câmara sobre a base: 0, 20 e 40 minutos na entressafra e em quatro tempos: 0, 8, 16 e 24 minutos durante o período de cultivo do arroz,. Após cada coleta, as amostras foram transportadas imediatamente ao laboratório e analisadas dentro do período máximo de 24 horas após a coleta de campo.

A determinação da concentração de  $N_2O$  na safra e entressafra foi realizada por cromatografia gasosa (Shimadzu GC – 2014 modelo Greenhouse) equipado com um detector com captura de elétrons ECD (Electron Capture Detection) utilizado para quantificar a concentração de  $N_2O$  nas amostras de ar coletadas no campo. Os dados climáticos foram obtidos da Estação Automática de Meteorologia do Departamento de Fitotecnia (UFSM), distante 0,5 km do local do experimento.

#### **2.2.4 Análises de solo**

Durante as avaliações de  $N_2O$  realizadas no período de entressafra foram coletadas amostras de solo da camada 0-0,10 m para avaliar os teores de N mineral do solo ( $N-NH_4^+$  e  $N-NO_2^- + N-NO_3^-$ ). O N mineral de cada amostra foi extraído e determinado conforme metodologias descritas em Tedesco et al. (1995). No solo coletado, foi determinada a umidade gravimétrica através da secagem do solo a 105 °C por 24 horas. Com base nos valores de umidade do solo e dos valores de densidade do solo, em cada coleta foi calculado os valores de EPSA do solo.

### **2.2.5 Análises estatísticas**

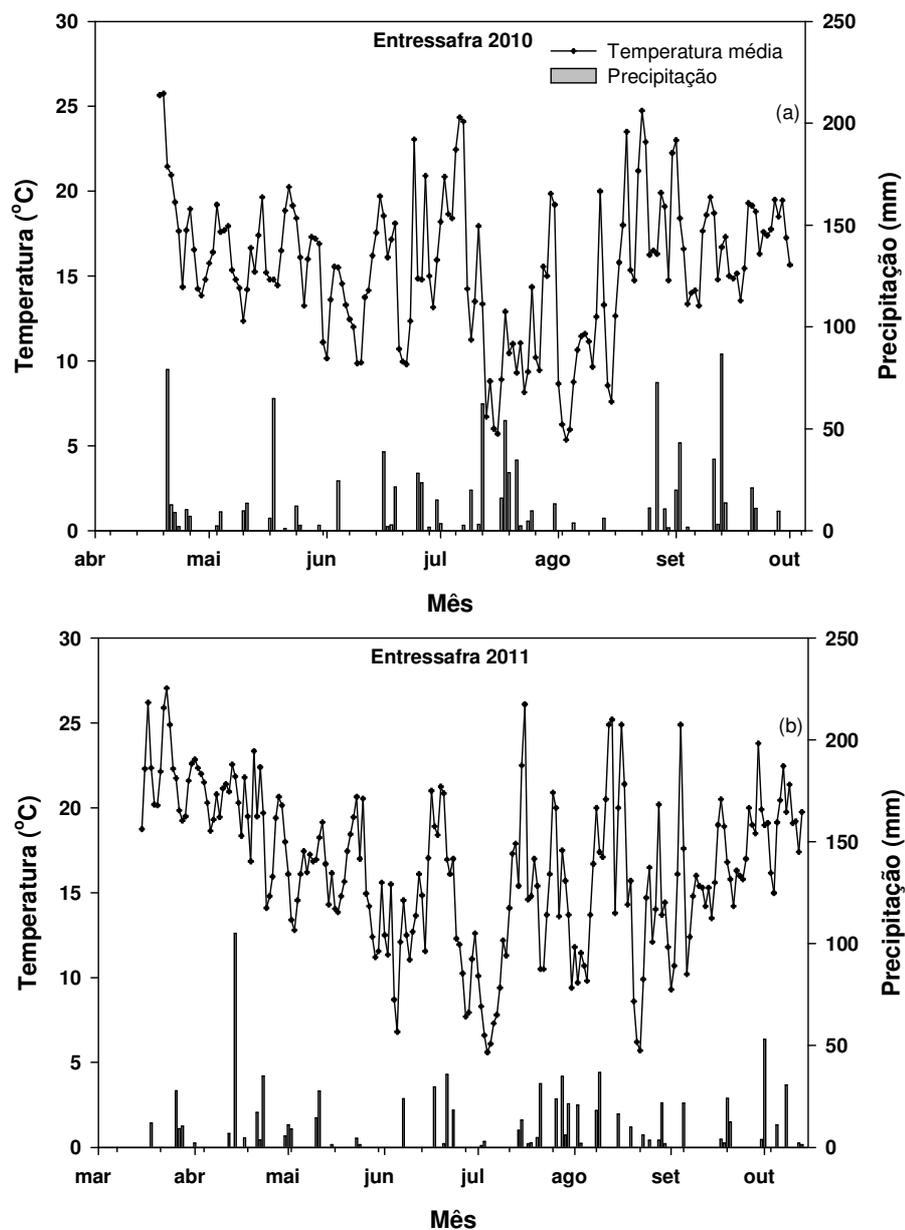
Os fluxos diários de N<sub>2</sub>O foram calculados por interpolação linear e a emissão acumulada de N<sub>2</sub>O foi calculada somando-se as quantidades emitidas em cada intervalo de coleta. Para isso, foi calculada a média dos fluxos de N<sub>2</sub>O entre duas coletas consecutivas, multiplicando-se o valor resultante pelo intervalo de tempo decorrido entre as referidas coletas, somando-se o valor acumulado da coleta anterior. Os dados referentes à emissão acumulada de N<sub>2</sub>O foram submetidos ao teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de probabilidade para a comparação de médias, sem transformação dos dados, utilizando-se dos procedimentos disponíveis no programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2000).

## **2.3 Resultados**

### **2.3.1 Período de entressafra**

#### **2.3.1.1 Temperatura média do ar e precipitação**

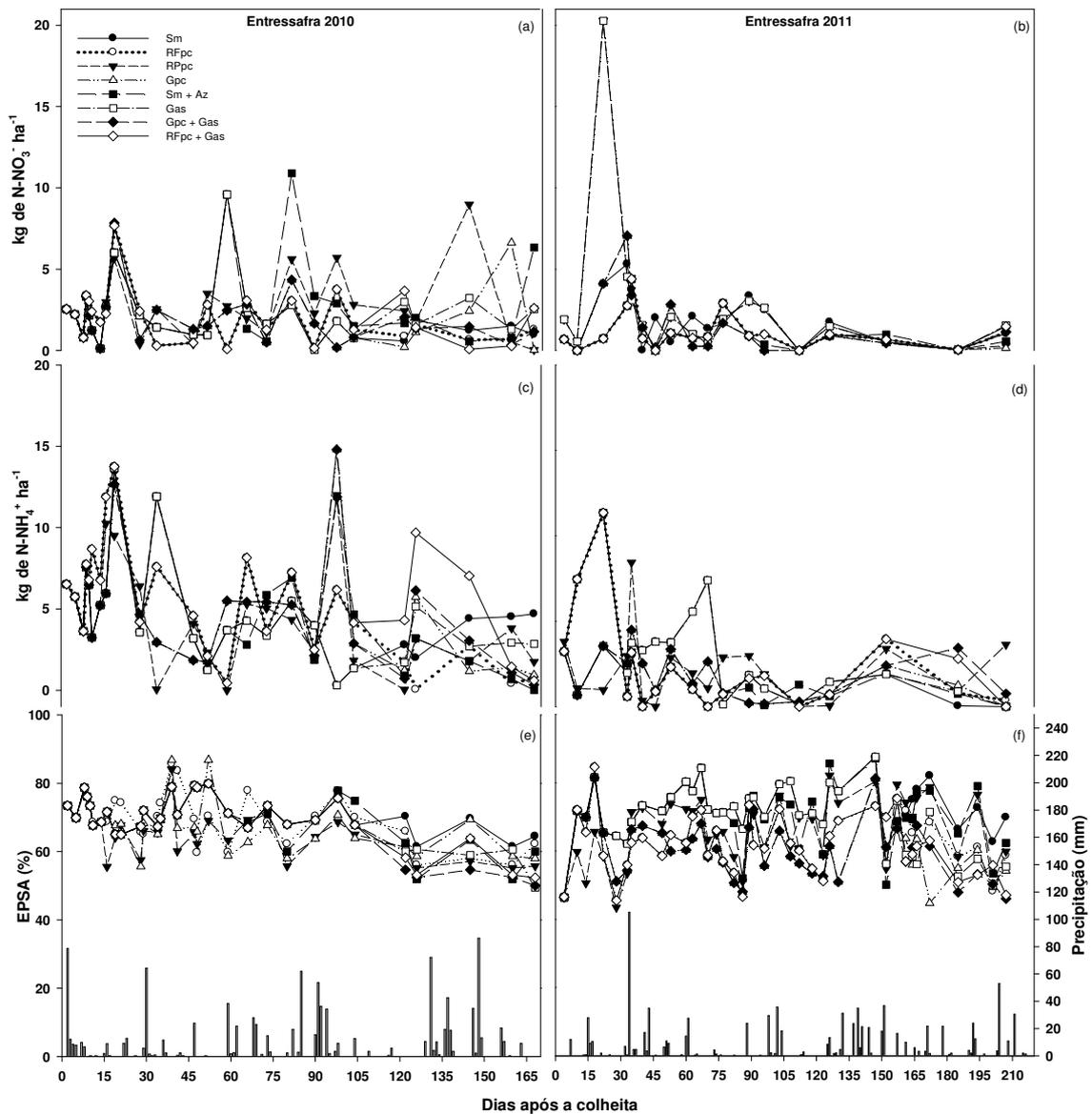
As temperaturas do ar variaram de 26 (em abril) a 5 °C (em agosto) em 2010 (Fig. 3a), e, de 27 (em março) a 6 °C (em julho) em 2011, tendo em média 15 °C em 2010 e 17 °C em 2011 (Fig. 3b). Na entressafra de 2010 o volume total de chuvas durante os 168 dias de avaliação foi de 1.056 mm (Fig. 3a), enquanto que na entressafra de 2011 esse volume foi de 900 mm em 216 dias (Fig. 3b).



**Fig. 3.** Temperatura do ar e precipitação pluviométrica ocorridas nas entressafra da cultura do arroz irrigado em 2010 (a) e 2011 (b).

### 2.3.1.2 N mineral e EPSA do solo

Na entressafra de 2010 os teores de  $\text{NO}_3^-$  variaram de zero a  $11 \text{ kg ha}^{-1}$  (Fig. 4a), e, na entressafra de 2011, de zero a  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  (Fig. 4b). Já os teores de  $\text{NH}_4^+$  variaram de zero a  $15 \text{ kg ha}^{-1}$  na entressafra de 2010 (Fig. 4c), e, de zero a  $11 \text{ kg ha}^{-1}$  na entressafra de 2011 (Fig. 4d).

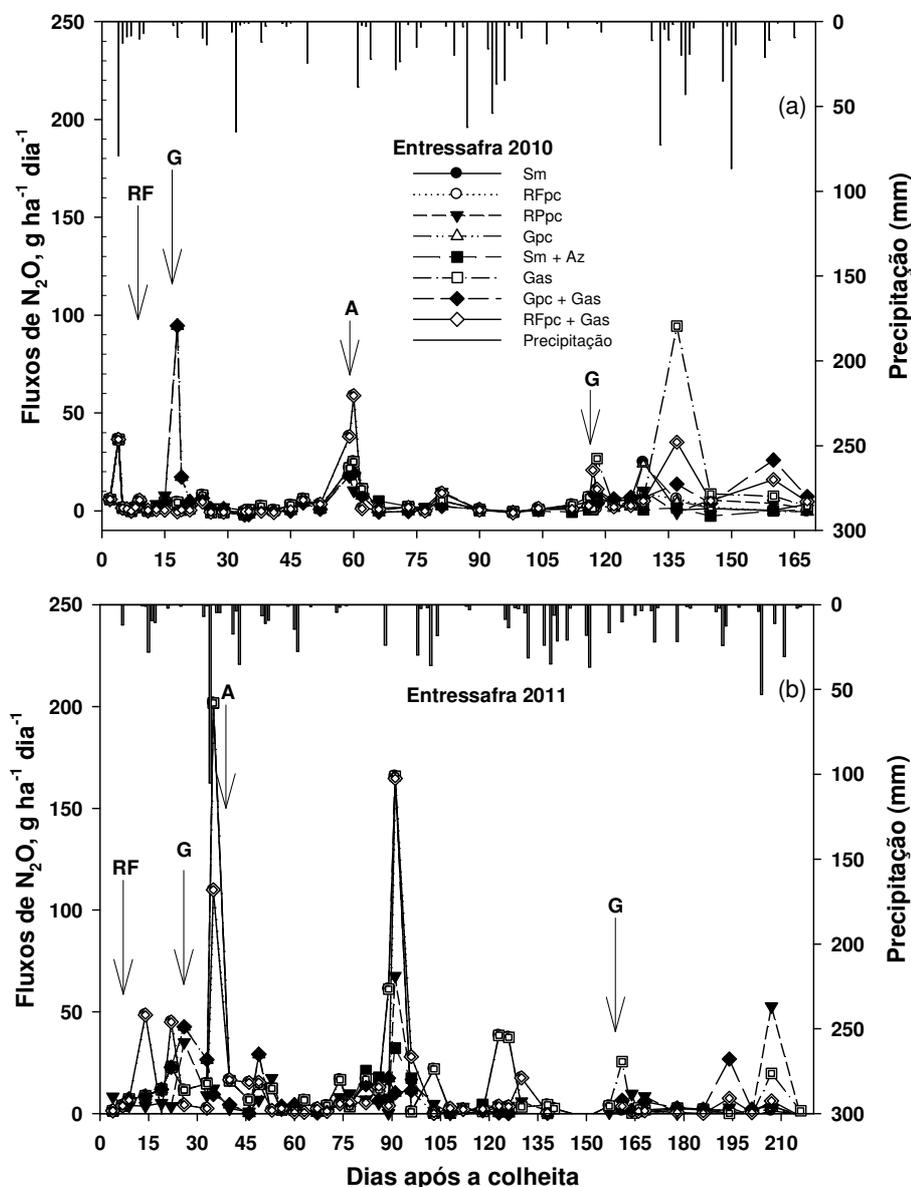


**Fig. 4.** Teores de  $\text{NO}_3^-$  (a e b) e  $\text{NH}_4^+$  (c e d), EPSA no solo na camada de 0-10 cm e precipitação diária (e e f) durante os períodos de entressafra em 2010 e 2011.

Os valores de EPSA do solo variaram de 49 a 87% na entressafra de 2010 (Fig. 4e), e, de 43 a 88% na entressafra de 2011 (Fig. 4f). Em 2010, das 31 avaliações realizadas, em 29 delas os valores de EPSA foram acima de 60%, e, em 2011, das 40 avaliações realizadas, 35 delas apresentaram valores de EPSA acima de 60%.

### 2.3.1.3 Fluxos de $\text{N}_2\text{O}$

Os fluxos de  $N_2O$  variaram de  $-3$  a  $95 \text{ g ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  na entressafra de 2010 (Fig. 5a), e, de  $-3$  a  $202 \text{ g ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  na entressafra de 2011 (Fig. 5b).



**Fig. 5.** Fluxos de  $N_2O$  nas entressafra da cultura do arroz irrigado em 2010 (a) e 2011 (b), sob diferentes sistemas de manejo pós-colheita, e precipitação pluviométrica ocorrida. RF= manejo com rolo-faca pós-colheita. G= manejo com grade pós-colheita. A= plantas de azevém emergidas.

Durante os períodos de entressafra nos anos de 2010 e 2011 vários picos de  $N_2O$  foram observados, em especial após a adição de palha de arroz ao solo, após a ocorrência de chuvas e após a realização dos manejos que incorporaram a palha ao solo.

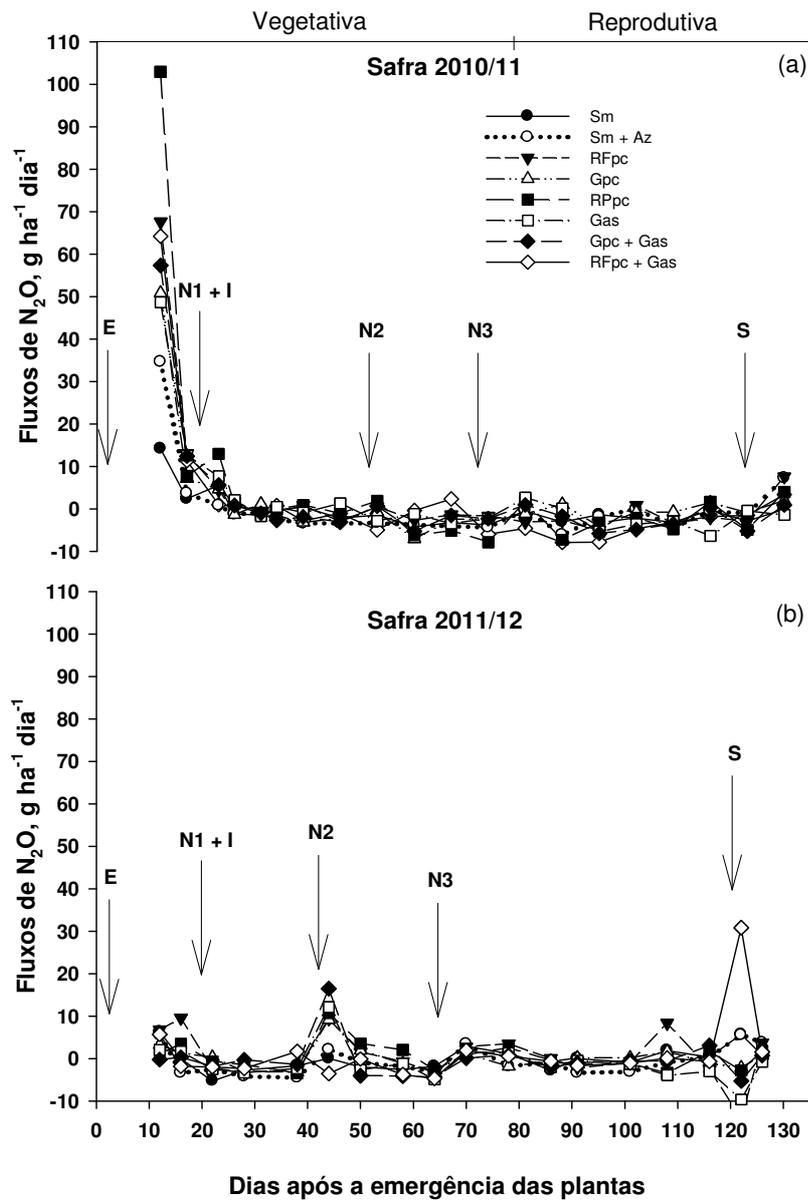
Os fluxos de N<sub>2</sub>O foram elevados em seis (aos 4, 18, 59, 117, 137 e 160 dias pós-colheita), das 44 avaliações realizadas em 2010. Aos quatro dias pós-colheita foi observado o primeiro pico de N<sub>2</sub>O em todos os tratamentos, atingindo 36 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Aos 18 dias, após a gradagem pós-colheita, ocorreram os maiores picos de N<sub>2</sub>O durante a entressafra de 2010, nos tratamentos Gpc e Gpc + Gas (95 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> em ambos), sendo 21 vezes superiores ao tratamento Sm. Dos 19 até os 58 dias os fluxos decresceram e foram semelhantes entre os tratamentos; entretanto, aos 59 dias ocorreu um novo aumento em todos os tratamentos, e, entre esses, os tratamentos RFpc e RFpc + Gas obtiveram os maiores valores (38 g de N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> em ambos), sendo 2 vezes superior ao tratamento RPpc. Outro pico de N<sub>2</sub>O ocorreu aos 117 dias pós-colheita, após o manejo com grade em agosto, no tratamento RFpc + Gas, que obteve 21 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, sendo 30 vezes superior ao tratamento Sm + Az; e, aos 137 dias pós-colheita, nos tratamentos Gas, Gpc + Gas e RFpc + Gas, que foram 236, 34 e 88 vezes superiores ao tratamento Sm. Aos 160 dias ocorreu outro aumento nos fluxos de N<sub>2</sub>O nos tratamentos Gas, Gpc + Gas e RFpc + Gas, que atingiram 7, 26 e 16 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo 7, 26 e 16 vezes superiores ao tratamento Sm.

Na entressafra de 2011 os fluxos de N<sub>2</sub>O foram elevados em oito (aos 14, 22, 35, 91, 123, 161, 194 e 207 dias pós-colheita), das 47 avaliações realizadas. Aos 14 dias pós-colheita foi observado o primeiro pico de N<sub>2</sub>O nos tratamentos RFpc e RFpc + Gas (48 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> em ambos), sendo 6 vezes superiores ao tratamento Sm. Em torno de 22 dias pós-colheita foram observados novos picos de N<sub>2</sub>O nos tratamentos RFpc e RFpc + Gas (45 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> em ambos), sendo 2 vezes superiores em relação ao tratamento Sm. Na entressafra de 2010, os maiores picos de N<sub>2</sub>O ocorreram aos 35 dias pós-colheita (202 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>), nos tratamentos Sm, Sm + Az e Gas, sendo 2 vezes superiores aos tratamentos RFpc e RFpc + Gas. Já aos 91 dias pós-colheita foram observados os segundos maiores picos de N<sub>2</sub>O, nos tratamentos Sm, Gas, RFpc e RFpc + Gas, com 166 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> no Sm e Gas, e, 165 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> no RFpc e RFpc + Gas, sendo 156 e 154 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> superiores ao Gpc. Após a gradagem em agosto (Gas), aos 161 dias pós-colheita, foi observado um pico de N<sub>2</sub>O no tratamento Gas (25 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>), e, aos 194 e 207 dias pós-colheita foram observados picos de N<sub>2</sub>O nos tratamentos Gpc + Gas e Rppc (27 e 20 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente).

## 2.3.2 Período de cultivo

### 2.3.2.1 Fluxos de $N_2O$

Os fluxos de  $N_2O$  variaram de  $-8$  a  $103 \text{ g ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  na safra 2010/11 (Fig. 6a), e, de  $-14$  a  $31 \text{ g ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  na safra 2011/12 (Fig. 6b).



**Fig. 6.** Fluxos de  $N_2O$  na cultura do arroz irrigado, nas safras 2010/11 (a) e 2011/12 (b), sob diferentes sistemas de manejo após a colheita. E= emergência das plantas de arroz. N1 + I= 1ª adubação nitrogenada de cobertura ( $50 \text{ kg de N ha}^{-1}$ ) e início da irrigação permanente. N2= 2ª

adubação nitrogenada de cobertura (35 kg de N ha<sup>-1</sup>). N3= 3ª adubação nitrogenada de cobertura (35 kg de N ha<sup>-1</sup>). S= drenagem das parcelas.

Na safra 2010/11 os maiores picos de emissão de N<sub>2</sub>O em todos os tratamentos ocorreram antes do início do alagamento do solo. Já na safra 2011/12 os maiores picos de N<sub>2</sub>O ocorreram aos 44 dias após a emergência das plantas (DAE), após a drenagem do solo das parcelas.

Nas duas primeiras avaliações de N<sub>2</sub>O realizadas na safra de 2010/11, anteriores ao início do alagamento, os fluxos de N<sub>2</sub>O foram positivos. Após o alagamento do solo os fluxos de N<sub>2</sub>O apresentaram valores próximos de zero, alternando-se com valores positivos e negativos até o final do ciclo do arroz. Essa mesma dinâmica dos fluxos de N<sub>2</sub>O foi observada na safra 2011/12. Em relação às adubações de N-uréia em cobertura, apenas a 2ª adubação na safra de 2011/12 foi capaz de elevar as emissões de N<sub>2</sub>O durante cultivo do arroz.

Os fluxos de N<sub>2</sub>O observados durante o período de cultivo do arroz irrigado foram inferiores aqueles observados durante os períodos de entressafras.

### 2.3.3 Emissão acumulada de N<sub>2</sub>O

Na entressafra de 2010 as emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O variaram de 455 a 1.511 g ha<sup>-1</sup>, e, na entressafra de 2011, de 1.027 a 2.816 g ha<sup>-1</sup> (Tabela 3). As emissões médias de N<sub>2</sub>O foram 45% inferiores na entressafra de 2010 do que na entressafra de 2011. As emissões médias acumuladas de N<sub>2</sub>O, nos dois anos de estudo, foram menores nos tratamentos Gpc (872 g ha<sup>-1</sup>) e Sm + Az (996 g ha<sup>-1</sup>), e, maiores, nos tratamentos Gas (2.164 g ha<sup>-1</sup>) e RF + Gas (1.789 g ha<sup>-1</sup>). As emissões médias anuais de N<sub>2</sub>O das entressafras seguiram na seguinte ordem decrescente: Gas > RFpc + Gas > Sm > RFpc > Gpc + Gas > RPpc > Sm + Az > Gpc.

**Tabela 3**

Emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O nas entressafras dos anos de 2010 e 2011 e nos períodos de cultivo do arroz em 2010/2011 e 2011/2012, para oito sistemas de manejos das áreas na entressafra, antes do cultivo do arroz irrigado<sup>(1)</sup>.

Tratamentos	Entressafra		Safra
	Ano de 2010		
	N <sub>2</sub> O (g ha <sup>-1</sup> )		
Sm	667 ± 47	bc	-134 ± 59 a

RFpc	565 ± 163	bc	106 ± 119	a
Gpc	716 ± 20	bc	27 ± 34	a
RPpc	648 ± 91	bc	117 ± 56	a
Sm + Az	455 ± 36	c	-136 ± 29	a
Gas	1511 ± 77	a	47 ± 102	a
Gpc + Gas	1087 ± 154	ab	-2 ± 62	a
RFpc + Gas	1053 ± 203	abc	-62 ± 70	a
Ano de 2011				
Sm	2577 ± 434	a	-43 ± 91	a
RFpc	2427 ± 388	a	49 ± 85	a
Gpc	1027 ± 229	a	-3 ± 24	a
RPpc	1638 ± 389	a	44 ± 101	a
Sm + Az	1537 ± 400	a	-133 ± 6	a
Gas	2816 ± 360	a	-137 ± 37	a
Gpc + Gas	1357 ± 279	a	-31 ± 273	a
RFpc + Gas	2525 ± 436	a	56 ± 179	a

<sup>(1)</sup> Médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de probabilidade.

Observando-se separadamente os valores acumulados de N<sub>2</sub>O das entressafras, verifica-se que o tratamento Gas apresentou a maior quantidade de N<sub>2</sub>O acumulado nas entressafras (1.511 e 2.816 g ha<sup>-1</sup>, em 2010 e 2011, respectivamente) (Tabela 3). Já a menor quantidade acumulada de N<sub>2</sub>O ocorreu no tratamento Sm + Az (455 g ha<sup>-1</sup>) na entressafra de 2010, e, no tratamento Gpc (1027 g ha<sup>-1</sup>) na entressafra 2011. Na entressafra de 2010 foram observadas diferenças estatísticas significativas entre o tratamento Gas e os tratamentos Sm, RFpc, Gpc, RPpc e Sm + Az (Tabela 3). Na entressafra de 2011 não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos avaliados.

No período de cultivo do arroz irrigado as quantidades acumuladas de N<sub>2</sub>O variaram de -136 a 117 g ha<sup>-1</sup> na safra 2010/11, e, de -137 a 56 g ha<sup>-1</sup> na safra 2011/12. Na média das duas safras, as maiores quantidades acumuladas de N<sub>2</sub>O foram observadas nos tratamentos RPpc e RFpc (80 e 77 g ha<sup>-1</sup>, respectivamente) e menores nos tratamentos Sm + Az e Sm (-135 e -89 g ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos nas duas safras (Tabela 3).

Observando-se separadamente os valores de N<sub>2</sub>O das safras, verifica-se que na safra 2010/11 os tratamentos RPpc e RFpc acumularam as maiores quantidades de N<sub>2</sub>O (117 e 106 g ha<sup>-1</sup>, respectivamente), enquanto que as menores quantidades de N<sub>2</sub>O acumuladas foram observadas nos tratamentos Sm + Az e Sm (-136 e -134 g ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Na safra 2011/12 o tratamento RFpc acumulou a maior quantidade de N<sub>2</sub>O (49 g ha<sup>-1</sup>), e, os tratamentos Sm + Az e Sm, acumularam as

menores quantidades de  $N_2O$  (-133 e -43 g  $ha^{-1}$ , respectivamente). As emissões médias anuais de  $N_2O$  das safras seguiram na seguinte ordem decrescente: RPpc > RFpc > RFpc + Gas > Gpc > Gpc + Gas > Gas > Sm > Sm + Az.

Anualmente, somando-se as emissões das entressafras com a das safras, verificou-se que os tratamentos Sm + Az e Gpc tiveram as menores emissões anuais de  $N_2O$  (862 e 883 g  $ha^{-1}$ , respectivamente) e os tratamentos Gas e RFpc + Gas tiveram as maiores emissões anuais de  $N_2O$  (2.118 e 1.786 g  $ha^{-1}$ , respectivamente). Praticamente todo o  $N_2O$  anual foi emitido durante a entressafra da cultura do arroz irrigado, nos meses de março até outubro.

## 2.4 Discussão

### 2.4.1 Fluxos de $N_2O$ na entressafra

O óxido nitroso é emitido como resultado dos processos de desnitrificação e nitrificação, sendo a produção contribuição da desnitrificação a mais importante (Mkhabela et al., 2008). A desnitrificação é afetada por fatores como a disponibilidade de  $NO_3^-$  e C no solo, densidade do solo, tamanho de agregados (Six et al., 2002; Oorts et al., 2007). Sendo assim, as práticas de cultivo e de manejo que causam alguma perturbação no solo podem afetar as suas propriedades químicas, físicas e biológicas, e, portanto, influenciar na liberação de GEE (Baggs e Blum, 2004; Oorts et al., 2007), bem como as precipitações e frequência, e a temperatura do solo (Zanatta, 2009).

No presente estudo, os sistemas de manejo influenciaram significativamente nas emissões de  $N_2O$  durante o período de entressafra da cultura do arroz irrigado em 2010, e, na entressafra de 2011, não houve influência significativa, embora alguns sistemas de manejo apresentassem maiores emissões de  $N_2O$  que outros. As emissões de  $N_2O$  aumentaram após a adição e/ou incorporação da palha de arroz ao solo, e os maiores fluxos de  $N_2O$  ocorreram na entressafra de 2011, em relação à entressafra de 2010 (Fig. 5). Isso se deve principalmente a maior quantidade de palha adicionada ao solo pós-colheita na entressafra de 2011 (6,5 Mg e 11,3 Mg  $ha^{-1}$ , em 2010 e 2011, respectivamente), que é um fator que pode influenciar nas emissões de gases no solo (Aulakh et al., 2001a). A palha de arroz é fonte de C e N para a microbiota do solo, que os utiliza como fonte de energia e para

aumento da sua biomassa. A adição de palha de arroz em maior quantidade promove um possível aumento do consumo de oxigênio ( $O_2$ ) no solo, promovendo condições de anaerobiose, e criando condições favoráveis para a desnitrificação através de conteúdos de umidade maiores e constantes no solo, e, do fornecimento de C lábil, favorecendo a geração de  $N_2O$  por desnitrificação (Baggs et al., 2003). A disponibilidade de substrato para os processos microbianos juntamente com a dinâmica da umidade do solo, controla a variabilidade temporal das emissões de  $N_2O$  em solos agrícolas (Pinto et al., 2004). Além disso, a menor quantidade e melhor distribuição das chuvas em 2011 favoreceram com que ciclos de umedecimento e drenagem do solo ocorressem um maior número de vezes, favorecendo a nitrificação e, após, a desnitrificação, produzindo maior quantidade de  $N_2O$ . Essas maiores oscilações nesses ciclos podem ser vistas quando se observam os valores de EPSA, que tiveram maiores variações em 2011, como resultado da menor quantidade e melhor distribuição das chuvas.

Os fluxos de  $N_2O$  observados no presente estudo são superiores aos encontrados por Liang et al. (2007), que verificaram que variações nas emissões de  $N_2O$  durante o período de entressafra em uma área cultivada com arroz irrigado foi de 0 a  $4 \text{ g ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . Os resultados desse autor são inferiores provavelmente devido às condições climáticas, em que o solo tinha temperaturas muito baixas e chegava a congelar por certo período, enquanto que no solo do presente estudo as temperaturas eram mais elevadas (média de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  em 2010 e  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  em 2011). Essas temperaturas médias mais elevadas possivelmente favoreceram a atividade microbiana e a decomposição dos restos culturais do arroz nesse estudo, produzindo maior quantidade de  $N_2O$ . Em outro estudo (Mei et al., 2009), que avaliaram as emissões de  $N_2O$  em cultivos de hortícolas por 4 anos, em solos anteriormente cultivados com arroz irrigado, esses autores verificaram que o solo que permanecia em pousio, a média dos fluxos foi de  $5 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ , sendo que em seu estudo, a temperatura média do ar era de  $16 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $919 \text{ mm}$  de precipitação média. O valor médio do fluxo de  $N_2O$  desse autor é idêntico ao valor encontrado no presente estudo, no tratamento Sm, em que o solo permaneceu em pousio durante todo o período de entressafra em 2010 e a temperatura média do ar foi de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , e precipitação acumulada de  $1.056 \text{ mm}$ .

Os maiores fluxos médios de  $N_2O$  foram observados nos tratamentos em que os resíduos culturais do arroz irrigado permaneceram sob a superfície do solo por

quase todo o período de entressafra e foram incorporados ao solo com grade somente em agosto (tratamento Gas). Já os menores fluxos médios de  $N_2O$  ocorreram quando a palha foi incorporada ao solo pós-colheita com grade (tratamento Gpc). Os maiores fluxos médios de  $N_2O$  ocorreram no tratamento Gas são resultados de uma combinação de fatores como: manutenção da umidade do solo e temperatura pela palha de arroz, C e N disponíveis para uso pelos microrganismos, valores adequados de EPSA do solo para a desnitrificação, condições de anaerobiose do solo, ocorrência de precipitações e ciclos de umedecimento e drenagem do solo, que favoreceram com que os processos de nitrificação e desnitrificação ocorressem, produzindo o  $N_2O$ . A desnitrificação microbiana é provavelmente maior em solos bem drenados e que formam  $NO_3^-$  ativamente, tornando-se parcialmente anaeróbicos durante períodos chuvosos ou após a adição de fontes orgânicas de C (Passianoto et al., 2003). Além disso, altos valores de EPSA favorecem o processo completo de desnitrificação, formando  $N_2$ , e reduzindo os fluxos de  $N_2O$  (Zanatta, 2009). Em ambientes úmidos a fração de N perdida como  $N_2O$  deve ser menor que a perdida como  $N_2$ , pois é provável que nessa condição a desnitrificação seja conduzida até  $N_2$  (Liu et al., 2007). Isso pode explicar as baixas emissões encontradas no presente estudo na entressafra, quando comparado com os resultados observados em solos de sequeiro, pois o solo desse estudo tem condições de má drenagem e apresentou valores de EPSA acima de 60% na maior parte das avaliações, reduzindo a formação de  $NO_3^-$  por nitrificação e aumentando a desnitrificação até  $N_2$ .

Nesse estudo o sistema de manejo Gas, que se assemelha em parte ao sistema de plantio direto (SPD) teve as maiores emissões de  $N_2O$ , quando comparado sistema de manejo Gpc, que se assemelha ao sistema de plantio convencional (SPC). O SPD tem sido apontado como uma prática que aumenta as emissões de  $N_2O$ , quando comparado a solos revolvidos (Zanatta, 2009), e tem sido relacionado a maior população desnitrificadora no SPD (Linn e Doran, 1984), maior adensamento do solo (Ball et al., 1999), maior conservação da água (Baggs et al., 2006), fatores estes que favoreciam a desnitrificação no SPD (Bhandral et al., 2007). Os resultados desse estudo são semelhantes aos de outros estudos (Smith et al., 2001; Vinten et al., 2002; Six et al., 2004; Liu et al., 2006; Gomes, 2006; Escobar, 2008), que apontam para maiores emissão de  $N_2O$  em solos sob SPD, devido à compactação, porosidade reduzida, aumento do EPSA e aumento da desnitrificação,

quando comparado aos solos sob SPC. A dinâmica dos fluxos de  $N_2O$  do nosso estudo também é semelhante às observadas em outros estudos (Xing, 1998; Liang et al., 2007; Mei et al., 2009; Zanatta et al., 2010), que avaliaram solos que ocorrem em regiões de várzea, ou áreas no período de entressafra de arroz, e, a maior parte do  $N_2O$  emitido anualmente ocorreu na entressafra da cultura.

Os maiores fluxos diários de  $N_2O$  ocorreram principalmente após os manejos com rolo-faca e grade, que permitem um melhor contato da palha com o solo, disponibilizando uma quantidade maior e imediata de C e N lábil, e após precipitações (Gomes, 2006). Com os manejos e as precipitações ocorre a elevação do EPSS e redução da disponibilidade de  $O_2$ , surgindo zonas de anaerobiose que favorecem a redução de  $NO_3^-$  via respiração anaeróbica, favorecendo as emissões de  $N_2O$  (Smith et al., 2003; Weiler, 2010). Em estudo trabalhando com doses de N em solo orgânico, Rochette et al. (2010) verificaram que as emissões de  $N_2O$  foram positivamente correlacionadas com algumas variáveis, tais como a concentração de  $O_2$  no solo, precipitação e a altura do lençol freático do solo, o que indica que umidade do solo/aeração e disponibilidade de C foram os principais controladores das emissões de  $N_2O$ .

Nos dois anos de condução desse estudo os maiores fluxos de  $N_2O$  ocorreram após a adição de resíduos ao solo, corroborando com os resultados observados em outros estudos (Escobar, 2008; Gomes, 2009; Weiler, 2010) e após eventos de chuvas, em que ciclos de umedecimento e secagem do solo causado pelas precipitações, que estimularam à atividade de bactérias desnitrificadoras produtoras de  $N_2O$ , semelhantes aos resultados observados por Gomes (2006). Majumdar et al. (2000) também verificaram que as emissões de  $N_2O$  foram elevadas durante os ciclos de secagem em solos com cultivo de arroz, que aumentaram as emissões de  $N_2O$  devido a nitrificação e desnitrificação e a maior facilidade de difusão de  $N_2O$  para a atmosfera. Alternância entre ciclos aeróbicos e anaeróbicos também incrementam as emissões de  $N_2O$  (Xing et al., 2002) e intensivas emissões de  $N_2O$  ocorreram durante período não alagado quando drenou-se o solo durante o cultivo de arroz (Zou et al., 2004).

Semelhante aos cultivos de sequeiro e também em regiões de várzea, sistemas de manejo que mantém a palhada na superfície do solo no período de entressafra da cultura do arroz irrigado, em que ciclos de umedecimento e secagem ocorrem devido às precipitações, foram aqueles que tiveram as maiores emissões

de  $N_2O$  no solo, enquanto que quando a palha foi incorporada pós-colheita com grade, as emissões foram diminuídas. Zanatta (2009) ressalta que a disposição dos resíduos em SPD deve aumentar as emissões de  $N_2O$  em relação aos resíduos incorporados em SPC. Isso acontece porque os resíduos depositados na superfície do solo, além de manter a umidade, fornecem uma grande quantidade de C e N lábil em um pequeno volume de solo. Isso aumenta sensivelmente a atividade biológica na superfície do solo, que consome  $O_2$  e produz sítios anaeróbicos, que em presença de  $NO_3^-$  produz  $N_2O$  por desnitrificação. No entanto, em SPC esse efeito é diluído na camada de solo revolvida de solo, resultando possivelmente na não exaustão do  $O_2$  e apesar da maior taxa de mineralização dos resíduos vegetais e da matéria orgânica do solo (MOS), devido ao revolvimento, as emissões de  $N_2O$  são menores que em SPD (Baggs, 2006; Gomes, 2006).

Portanto, quando da escolha de sistemas de manejo que sejam capazes de mitigar as emissões de  $N_2O$  em áreas de várzea, além do efeito dos manejos sobre as emissões de  $N_2O$ , também devem ser considerados os efeitos que os manejos proporcionam sobre as emissões de metano ( $CH_4$ ), que é outro GEE importante, e que ocorre principalmente durante o período de cultivo do arroz em regiões de várzea, sob condições anaeróbicas do solo.

#### ***2.4.2 Fluxos de $N_2O$ durante o cultivo do arroz irrigado***

Os maiores picos de  $N_2O$  que foram observados na safra 2010/11 em todos os tratamentos, aos 12 DAE, anterior ao início da irrigação, em especial nos tratamentos Sm e Sm + Az, são devidos à precipitação ocorrida no dia anterior, que elevou os valores de EPSA, e desnitrificou o  $NO_3^-$  até  $N_2O$ . Já na safra de 2011/12, na avaliação anterior ao início do alagamento os fluxos de  $N_2O$  foram baixos, próximos de zero, o que é resultado de baixos valores de EPSA do solo e da ausência de precipitações e presença de grandes quantidades de  $O_2$  no solo, que inibem o processo de desnitrificação e produção de  $N_2O$ . O  $N_2O$  emitido é resultado da nitrificação no solo aeróbico com a produção anaeróbica (Mkhabela et al., 2008), e depende de variáveis como volume e densidade do solo, tamanho dos agregados, N mineral do solo e C disponível (Oorts et al., 2007). Esse efeito em solo ainda seco e sob condições assemelhadas ao SPD, que mantém a palhada na superfície do solo, foi bem discutido por Zanatta (2009), que relata que a palha em superfície,

além de manter a umidade do solo, também fornece C e N lábeis em maior quantidade que no SPC, aumentando a desnitrificação e as emissões de  $N_2O$ .

Após o alagamento, aos 20 DAE, os fluxos de  $N_2O$  decresceram rapidamente para valores próximos de zero, ora positivos, ora negativos, resultado da redução dos teores de  $NO_3^-$  no solo (Fig. 6a). As baixas emissões ou ainda a absorção verificadas durante o período em que o solo se encontra alagado, em parte, podem estar associadas à sua redução à  $N_2$  sob condições reduzidas (Iida et al., 2007; Reddy e DeLaune, 2008) e ao declínio da concentração do  $NO_3^-$  no solo promovido pelos microrganismos desnitrificadores após o alagamento do solo, atenuando o processo de desnitrificação (Zschornack, 2011). A nitrificação e a desnitrificação são os dois processos principais responsáveis pelas emissões de  $N_2O$  de solos de arroz irrigado, onde a desnitrificação atua como produtora de  $N_2O$ , especialmente nas condições submersas do solo inundado em cultivo de arroz. Embora a nitrificação seja um processo aeróbio e desnitrificação é um processo anaeróbico, ambos os processos podem ocorrer simultaneamente em solos de arroz irrigado (Bhattacharyya, 2012).

Os fluxos de  $N_2O$  em solos alagados normalmente ocorrem a taxas muito baixas (Iida et al., 2007; Liu et al., 2010), podendo haver inclusive fluxos negativos (absorção) deste gás em determinados momentos (Cai et al., 1997; Hou et al., 2000). A absorção de  $N_2O$  pode ocorrer pela ação das bactérias desnitrificadoras, que reduzem o  $N_2O$  a  $N_2$  sob condições anóxicas (Chapuis-Lardy et al., 2007). Em um ambiente anaeróbico, como é caso do solo com arroz irrigado, a baixa concentração de  $NO_3^-$  pode induzir as bactérias desnitrificadoras a utilizarem o N reduzido na forma de  $N_2O$ , resultando no consumo deste gás. Além disso, a absorção de  $N_2O$  é observada principalmente em casos onde a concentração de N mineral no solo é baixa (Chapuis-Lardy et al., 2007), que é o caso do presente estudo. A manutenção de uma lâmina de água durante o ciclo do arroz tende a suprimir as emissões de  $N_2O$  (Harada et al., 2007; Iida et al., 2007; Liu et al., 2010), pois sob condições limitantes de  $O_2$ , o  $N_2O$  presente no solo pode ser reduzido à  $N_2$  (Reddy e DeLaune, 2008; Ahmad et al., 2009).

Inúmeros fatores estão envolvidos na produção e na emissão de ambos os gases em solos cultivados com arroz irrigado (Le Mer e Roger, 2001; Dalal et al., 2008), entre eles as diferentes práticas de manejo (Costa, 2005; Ahmad et al., 2009; Ma et al., 2009; Liu et al., 2010). Ao contrário do que é observado para o  $CH_4$ , a

aplicação de resíduos orgânicos ao solo inibe as emissões de  $N_2O$  durante o alagamento em solos cultivados com arroz, principalmente quando a adição é aumentada (Ma et al., 2009). A aplicação de resíduos com alta relação C/N, como a palha de arroz, poderia estimular a imobilização microbiana do N, e por consequência reduzir a disponibilidade de N para os processos envolvidos na produção de  $N_2O$  no solo (Ma et al., 2009; Yao et al., 2010).

Os resultados do presente estudo se assemelham aos de Bhatia et al. (2005), que trabalhando com diferentes fontes de adubação na cultura do arroz na Índia, verificaram que quando a adubação utilizada foi somente NPK, as emissões de  $N_2O$  foram sempre próximas de zero, com exceção dos períodos logo após a aplicação de N via uréia em cobertura. Ghosh et al. (2003) também observaram que os fluxos de  $N_2O$  em cultivo de arroz irrigado foram aumentados após a aplicação de fertilizantes nitrogenados, e, logo após, decresceram para valores próximos de zero. Na ocasião do alagamento esse autor relata ainda que os fluxos reduziram drasticamente, devido à redução de  $N_2O$  a  $N_2$  e a menor disponibilidade de  $NO_3^-$  para a desnitrificação.

Durante o cultivo do arroz irrigado na safra de 2010/11 as adubações nitrogenadas de cobertura (via uréia) não exerceram influencia sobre as emissões de  $N_2O$  nos tratamentos avaliados. Isso possivelmente ocorreu devido a baixa disponibilidade de  $NO_3^-$  para a desnitrificação. Já na safra de 2011/12, na segunda adubação nitrogenada de cobertura, se observou um pequeno aumento nos fluxos de  $N_2O$  no solo cultivado com arroz irrigado. Isso pode ter sido efeito da menor altura da lâmina de água de irrigação na safra 2011/12 e nessa avaliação, que favoreceu a difusão do  $NH_4^+$  para a camada superior da lâmina de água, que é mais oxidada, permitindo a nitrificação do  $NH_4^+$  até  $NO_3^-$ , e, após a desnitrificação até  $N_2O$ , originando esse aumento.

No trabalho de Zschornack (2011) as aplicações de N (uréia) realizadas durante o ciclo do arroz não foram capazes de elevar consideravelmente as emissões de  $N_2O$ . Efeitos semelhantes foram observados em outros estudos (Zou et al., 2004; Ahmad et al., 2009), que também verificaram que as fertilizações nitrogenadas não exerceram influencia sob as emissões de  $N_2O$ . Porém, em outros estudos (Cai et al., 1997; Ghosh, 2003; Bhatia et al., 2005; Ahmad et al., 2009; Bhattacharyya, 2012) as adubações nitrogenadas repercutiram em aumentos nos fluxos de  $N_2O$ .

Ao final do período de cultivo do arroz, após a drenagem das parcelas, um pequeno aumento nos fluxos de  $N_2O$  foi observado. A drenagem da água de irrigação com vistas à colheita do arroz normalmente implica no aumento das emissões de  $N_2O$  do solo (Cai et al., 1997; Liu et al., 2010), o que não foi verificado nas duas safras avaliadas no trabalho de Zschornack (2011), anterior a colheita. Porém quando trabalhou com sistemas de irrigação intermitente, o fluxo de  $N_2O$  foi intensificado logo após os eventos de drenagem (Zschornack, 2011). A drenagem do solo durante o cultivo do arroz é uma prática de manejo que estimula os processos de nitrificação e desnitrificação, promovendo a produção de  $N_2O$  do solo (Yu e Patrick, 2004).

Como as emissões de  $N_2O$  foram irrelevantes durante o período de cultivo do arroz irrigado, no momento de se tentar selecionar manejos que tenham potencial de mitigar as emissões de  $N_2O$ , é necessário, elencar manejos que reduzam essas emissões de  $N_2O$  na entressafra da cultura do arroz, já que praticamente 100% das emissões anuais de  $N_2O$  ocorreram nesse período. Porém, devem ser levados em consideração os efeitos que essas práticas de manejo de entressafra terão sobre as emissões de outro importante GEE, que é o  $CH_4$ , e, que é emitido durante o período de cultivo do arroz irrigado.

### **2.4.3 Emissão acumulada de $N_2O$**

Na entressafra de 2010 as emissões acumuladas de  $N_2O$  no tratamento Gas teve diferença significativa na emissão acumulada de  $N_2O$  em relação aos tratamentos Sm, RFpc, Gpc, Sm + Az (Tabela 3). O Gas emitiu 3,3 e 2,1 vezes mais  $N_2O$  que os tratamentos Sm + Az e Gpc, respectivamente. Na entressafra de 2011 não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos em relação as emissões acumuladas de  $N_2O$ . Embora isso, no Gas novamente foi observada a maior quantidade de  $N_2O$  acumulado e no Gpc foi observada a menor quantidade de  $N_2O$  acumulado. A maior emissão de  $N_2O$  no sistema de manejo Gas é reflexo da manutenção da palha sob a superfície do solo durante quase toda a entressafra, e após o revolvimento do solo e incorporação dos resíduos remanescentes sob a superfície do solo. Trabalhando com SPD e SPC, Oorts et al. (2007) também não verificaram diferenças significativas entre esses sistemas.

Durante os períodos de entressafra as menores emissões médias anuais acumuladas de  $N_2O$  foram observadas nos tratamentos Gpc e Sm + Az. Já as maiores emissões ocorreram no tratamento Gas nas duas entressafras. Esses resultados são devidos à adição e incorporação de palha de arroz ao solo, que no tratamento Gpc se assemelha ao SPC. Como já discutido anteriormente, no SPC possivelmente não ocorre o esgotamento do  $O_2$  no solo, diminuindo os sítios de anaerobiose e conseqüentemente reduzindo a desnitrificação. Já as maiores emissões que ocorreram no tratamento Gas, que foi semelhante ao SPD até agosto, e após, recebeu uma mobilização com grade, são devidos as condições de maior fornecimento de C e N lábeis da palha, e da manutenção de maior umidade e temperatura, que potencializam a desnitrificação e as emissões de  $N_2O$  com a palhada na superfície do solo. Os resultados desse estudo são semelhantes aos de outros estudos (Smith et al., 2001; Vinten et al., 2002; Six et al., 2004; Liu et al., 2006; Gomes, 2006; Escobar, 2008; Zanatta, 2009), que indicam para maiores emissão de  $N_2O$  em solos sob SPD, devido as condições desse sistema.

Durante o período de cultivo do arroz irrigado as menores emissões médias anuais acumuladas de  $N_2O$  foram observadas no tratamento Sm + Az e Sm. Já as maiores emissões ocorreram nos tratamentos RPpc e RFpc. Esses resultados são devido à existência de substrato (palha) anterior ao momento do alagamento do solo nos tratamentos Sm e Sm + Az, que inibe a produção de  $N_2O$ . A aplicação de resíduos orgânicos ao solo inibe as emissões de  $N_2O$  durante o alagamento em solos cultivados com arroz, principalmente quando a adição é aumentada (Ma et al., 2009). A aplicação de resíduos com alta relação C/N causa imobilização microbiana de N em solo com baixos teores de N mineral, reduzindo a desnitrificação (Ma et al., 2009; Yao et al., 2010).

Os fluxos, bem como os valores acumulados de  $N_2O$  observados durante o cultivo do arroz irrigado são inferiores aos valores acumulados verificados durante o período de entressafra, corroborando com outros autores (Zheng et al., 2000; Pathak et al., 2002; Bhatia, 2005; Costa, 2005), que relatam baixos valores nos fluxos de  $N_2O$  no período de cultivo de arroz, e que são muitas vezes inferiores aos observados durante o período de entressafra (Costa, 2005). Com base nos resultados observados no presente estudo, se os resíduos de arroz forem depositados na superfície do solo pós-colheita sem manejo algum, parece ser a estratégia que menos vai contribuir para a mitigação das emissões de  $N_2O$  nesse

ambiente. Em contrapartida, esses valores dos fluxos anuais de  $N_2O$  poderão ser menores se a palha for incorporada ao solo ou se a área for cultivada com azevém no inverno, favorecendo a mitigação das emissões de  $N_2O$ . Esses resultados corroboram com os de outros estudos (Smith et al., 2001; Vinten et al., 2002; Six et al., 2004; Baggs, 2006; Gomes, 2006; Liu et al., 2006; Escobar, 2008), que apontam para maiores emissão de  $N_2O$  em solos sob SPD, quando comparado aos solos sob SPC.

Quando estudou a incorporação de palha de trigo, Ma et al. (2009) verificaram que na presença de palha antes da semeadura do arroz, ao longo de 3 anos de cultivo, as emissões de  $N_2O$  não apresentaram diferença no primeiro ano, e eram menores onde a palha foi incorporada ao solo, do que sem a presença de palha. Isso se confirma em parte nesse estudo quando isolamos os tratamentos com incorporação com grade (Gpc e Gpc + Gas) e o sem incorporação (Sm), pois onde a palha de arroz foi incorporada pós-colheita e decomposta na entressafra, resultou em menores emissões de  $N_2O$  durante o cultivo do arroz, no tratamento Gpc. O SPD induz formação de agregados maiores em solos de arroz (Xu et al., 2000), e, portanto, maior produção de  $N_2O$ . Isso está relacionado com os sítios de anaerobiose no interior dos agregados, onde a desnitrificação é potencializada. Além disso, a maior quantidade de resíduos sob a superfície do solo em áreas cultivadas com arroz proporciona mais C disponível, que pode sustentar o potencial de desnitrificação (Rochette et al., 2000; Liu et al., 2006; Ahmad et al., 2009).

Dessa forma, é importante selecionar sistemas de manejo que tenham potencial de mitigar as emissões de  $N_2O$  durante a entressafra de cultivo do arroz, no intuito de reduzir a contribuição do  $N_2O$  para o potencial de aquecimento global (PAG). De maneira geral, do total de emissões anuais médias de  $N_2O$  no experimento nos dois anos (safra + entressafra), praticamente 100% do  $N_2O$  foi emitido no período de entressafra. Esses resultados são devido às condições de oxigenação no solo e temperatura, que contribuíram para a produção de  $N_2O$  nesse período, enquanto que durante o cultivo do arroz irrigado, com solo alagado, não se verificaram grandes quantidades de  $N_2O$  emitidos. Avaliando as emissões de  $N_2O$  durante a época de pousio, em um solo cultivado com arroz irrigado no verão na China, Liang et al. (2007) verificaram que do total anual de  $N_2O$  emitido, 40 a 50% do  $N_2O$  foi emitido no período de pousio/entressafra, sendo o restante do  $N_2O$  emitido durante o cultivo do arroz. No presente estudo, Xing (1998) observou que

60% do  $N_2O$  anual foram emitidos durante a entressafra. Esses resultados são inferiores aos observados em nosso estudo, provavelmente devido a baixa temperatura nas regiões chinesas onde foram conduzidos esses trabalhos, em que pode ocorrer até mesmo o congelamento do solo. Para as nossas condições de período de entressafra, as temperaturas médias diárias são mais altas, o que pode favorecer a decomposição dos restos culturais e potencializar a produção de  $N_2O$ , já que à medida que a temperatura aumenta a atividade microbiana também é aumentada (Rochette et al., 2010).

Nesse contexto, é necessária a seleção e adoção de técnicas que possam ter potencial para mitigar as emissões de  $N_2O$  no período de entressafra, e, que eliminem os restos culturais do arroz pós-colheita, para que esses não sirvam de substrato para a metanogênese durante o cultivo do arroz irrigado, e que, além disso, mantenham as produtividades. A seleção e adoção dessas técnicas devem permitir ainda que ocorram as semeaduras do arroz nas épocas adequadas, distribuição das atividades ao longo do ano, manutenção das produtividades e sustentabilidade nas áreas. Além dessas vantagens, essas técnicas também devem permitir a mitigação das emissões anuais de  $N_2O$  em áreas de várzea com cultivo de arroz irrigado.

## **2.5 Conclusões**

Em áreas cultivadas com arroz irrigado, a antecipação do preparo do solo, com incorporação da palha do arroz pós-colheita com grade ou cultivo de azevém pós-colheita promove as menores emissões de  $N_2O$  durante o período de entressafra, que nesse estudo foi responsável por praticamente 100% das emissões de  $N_2O$  comparado ao período de cultivo do arroz.

A manutenção da palha sobre a superfície do solo pós-colheita até o mês de agosto, e após a incorporação dessa palha remanescente antes da semeadura do arroz, promove as maiores emissões de  $N_2O$  na entressafra.



### **3. CAPÍTULO II – EMISSÃO DE METANO NA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DA PALHA PÓS-COLHEITA**

#### **3.1 Introdução**

As mudanças climáticas que vêm ocorrendo no planeta nas últimas décadas são decorrentes principalmente do aumento na emissão de gases do efeito estufa (GEE). Dentre eles, o metano ( $\text{CH}_4$ ) é um importante GEE, que teve sua concentração aumentada na atmosfera de 715 para 1774 ppb desde a era pré-industrial, com um incremento de aproximadamente 3% na taxa de emissão anual (IPCC, 2007). Além disso, o  $\text{CH}_4$  tem um potencial de aquecimento global 23 vezes maior do que o  $\text{CO}_2$ , considerando um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (IPCC, 2007), o que o torna um potente GEE.

Depois da fermentação entérica, os solos naturalmente inundados ou cultivados com arroz sob alagamento são uma das principais fontes antropogênicas atmosféricas de  $\text{CH}_4$  (IPCC, 2007). De todas as fontes emissoras de  $\text{CH}_4$ , a agricultura contribui com aproximadamente 55% das emissões de  $\text{CH}_4$  (IPCC, 2007), sendo que em solos alagados, fluxos elevados de  $\text{CH}_4$  são observados para a atmosfera, e, nesse sistema, a cultura do arroz, tem papel importante na contribuição dessas emissões no período de cultivo (Costa, 2005; Moterle, 2011).

O solo é uma das importantes fontes e drenos de GEE que causam aquecimento global e alterações climáticas (Janseens et al., 2003). Em solos aerados o  $\text{CH}_4$  pode ser oxidado a  $\text{CO}_2$  por metanotrofia, podendo atuar como um dreno deste gás, enquanto que quando os solos sofrem processos de degradação essa capacidade de absorção é diminuída (Kessavalou et al., 1998). As emissões de  $\text{CH}_4$  são controlados por vários fatores, em condições de campo, incluindo as condições climáticas locais, o tipo e quantidade de aplicação de fertilizantes (Huang et al., 2004; Cai et al., 2007), o regime hídrico (Zou et al., 2005; Yan et al., 2009), as características do solo (Yan et al., 2005; Xiong et al., 2007), a variedade do arroz (Moterle, 2011) e o manejo adotado (Gomes, 2006; Zschornack, 2011). O  $\text{CH}_4$  é produzido principalmente a partir da decomposição de matéria orgânica por condições estritamente anaeróbicas e extremamente reduzidas (Garcia et al., 2000).

As maiores fontes de CH<sub>4</sub> no solo são a matéria orgânica natural, exsudatos das raízes das plantas e a matéria orgânica incorporada como fitomassa das plantas infestantes e restos culturais (Neue, 1993).

Mundialmente, são cultivados 158 milhões de hectares de arroz (SOSBAI, 2012), onde 55%, cerca de 80 milhões de hectares, são cultivados sob alagamento (IRRI, 2004). O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de arroz fora da Ásia (USDA, 2010), e, responde por 82% da produção de arroz no Mercosul. No Brasil, 70% do cultivo de arroz irrigado é feito na região sul, nos estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS), sendo este último responsável por 61% da produção nacional de arroz (SOSBAI, 2012), o que o torna um produtor importante de CH<sub>4</sub>. As emissões de CH<sub>4</sub> proveniente do cultivo de arroz no Brasil foram estimadas em 426 Gg de CH<sub>4</sub>, e a região sul contribuiu com 82% do total das emissões (EMBRAPA, 2010).

No RS, em regiões de várzea, onde existe predomínio da monocultura do arroz, os resíduos culturais são manejados em duas épocas: pós-colheita ou antecedendo a semeadura da cultura do arroz. Essas formas de manejo dos resíduos culturais podem ter implicações diferentes sobre as emissões de CH<sub>4</sub>. Embora a lavoura de arroz cultivado sob inundação represente, globalmente, menos de 20% do total de CH<sub>4</sub> emitido, seu papel de destaque, dentre as fontes produtoras, deve-se ao fato da cultura do arroz ser uma das poucas fontes de CH<sub>4</sub> onde é possível modificar o padrão de emissão (Agostinetto, 2002). Dentre outros fatores, as práticas de manejo de solo afetam as emissões de CH<sub>4</sub> (Gomes, 2006), sendo que o preparo do solo associado à incorporação de resíduos tende a alocar esses resíduos em sítios menos oxigenados, favorecendo a produção de CH<sub>4</sub> (Gomes, 2010).

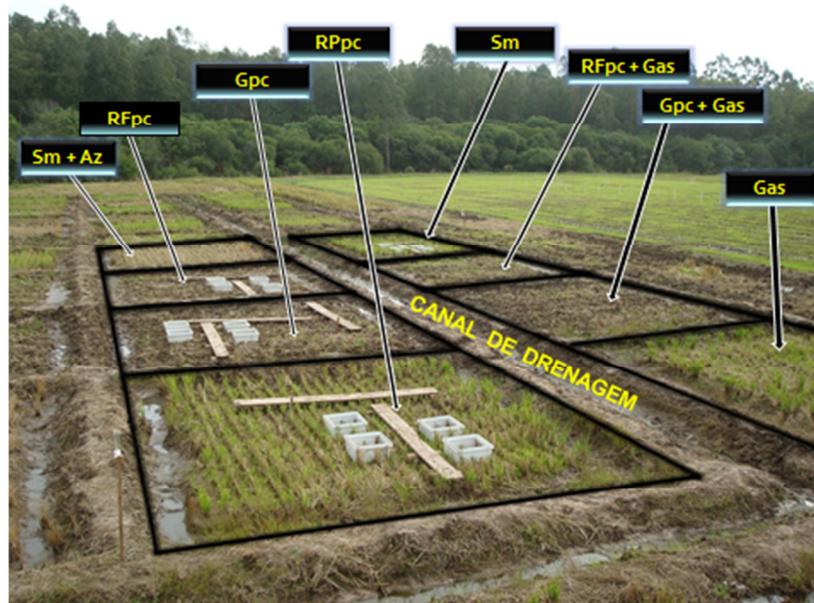
Vários estudos de emissão de GEE têm focado os sistemas de preparo do solo, como plantio direto e preparo convencional (Pavei, 2005; Gomes, 2006; Jantalia et al., 2008), e geralmente em sistemas de produção de grãos. Porém, para o cultivo do arroz irrigado no sul do Brasil, não existem estudos que avaliaram as emissões de CH<sub>4</sub> durante o ano inteiro e, envolvendo sistemas de manejo pós-colheita do arroz em áreas de várzea. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita do arroz irrigado sobre as emissões anuais de CH<sub>4</sub> em uma área de várzea no sul do Brasil.

## 3.2 Material e métodos

### 3.2.1 Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM (29° 45'S, 53° 42'W; cerca de 95 metros de altitude), Rio Grande do Sul, Brasil. O clima do local é subtropical húmido (tipo Cfa2 na classificação de Köppen) com precipitação média anual de 1.686 mm e temperatura média anual de 19,3°C. O solo foi classificado como Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico (EMBRAPA, 2006). As características do solo na camada de 0-0,1 m no início das avaliações foram as seguintes: carbono orgânico 0,6%; pH – 5,3; densidade – 1,42 g cm<sup>-3</sup>; areia – 21%; silte – 57%; argila – 22%; 21,7 mg kg<sup>-1</sup> de P e 96,5 mg kg<sup>-1</sup> de K extraído por Mehlich-1. Anteriormente a implantação do experimento, o solo da área foi revolvido com grade de discos e depois cultivado com arroz irrigado.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com quatro repetições em parcelas de 12 m<sup>2</sup> (3 m x 4 m) (Fig. 1).



**Fig. 1.** Vista esquemática da disposição dos tratamentos em um dos quatro blocos que constituem o experimento na entressafra da cultura do arroz irrigado, sob diferentes sistemas de manejo da palha após a colheita, Santa Maria, RS.

Os tratamentos avaliados foram compostos por diferentes sistemas de manejo da palha no período de entressafra da cultura do arroz irrigado, conforme segue na tabela 1:

**Tabela 1.**

Tratamentos compostos por oito sistemas diferentes de manejo da palha pós-colheita em 2010 e 2011

Detalhes dos tratamentos	
T1 – (Sm)	Sem manejo da palha
T2 – (RFpc)	Incorporação da palha com rolo-faca pós-colheita
T3 – (Gpc)	Incorporação da palha com grade pós-colheita
T4 – (RPpc)	Retirada da palha pós-colheita
T5 – (Sm + Az)	Cultivo de azevém 30 dias pós-colheita
T6 – (Gas)	Sem manejo da palha, com grade em agosto
T7 – (Gpc + Gas)	Incorporação da palha com grade pós-colheita e grade em agosto
T8 – (RFpc + Gas)	Incorporação da palha com rolo-faca pós-colheita e grade em agosto

As parcelas dos tratamentos foram delimitadas em 17 de abril de 2010, um dia após a colheita dos grãos de arroz da cultivar Puitá Inta-CL<sup>®</sup>. A quantidade de palha de arroz que foi devolvida/distribuída na superfície do solo nas parcelas de todos os tratamentos no início do experimento foi ajustada para 6,5 Mg ha<sup>-1</sup> pós-colheita em 2010, e 11,3 Mg ha<sup>-1</sup> pós-colheita em 2011, com exceção do tratamento RPpc, onde a palha foi retirada das parcelas, permanecendo apenas uma pequena parte dos colmos das plantas que não foram cortados pela colhedora no momento da colheita.

No tratamento Sm a palha não sofreu nenhum manejo na entressafra, sendo que a semeadura do arroz em outubro foi realizada sobre a palha que ainda permanecia na superfície do solo (1,5 Mg ha<sup>-1</sup> na semeadura em 2010 e 1,1 Mg ha<sup>-1</sup> na semeadura em 2011). Nos tratamentos RFpc e Gpc a palha que estava na superfície do solo foi manejada com rolo-faca e com grade pós-colheita, respectivamente. No tratamento Sm + Az a palha não sofreu nenhum manejo e aos 31 dias após a colheita do arroz foi semeado azevém a lanço. Nesse tratamento a

semeadura do arroz em outubro foi realizada sobre a palha do arroz mais a palha restante de azevém ( $2,1 \text{ Mg ha}^{-1}$  na semeadura em 2010 e  $1,1 \text{ Mg ha}^{-1}$  na semeadura em 2011) após a entressafra. No Gas a palha que estava na superfície do solo foi incorporada com grade de discos em agosto de 2010 e 2011. Nos tratamentos Gpc + Gas e RFpc + Gas a palha foi manejada com grade e rolo-faca pós-colheita, respectivamente, e com grade de disco também em agosto (Tabela 2). No momento da passagem do rolo-faca (RFpc e RFpc + Gas) a parcela apresentava uma lâmina de água de aproximadamente 10 cm. Já na passagem da grade em agosto o solo encontrava-se úmido.

### ***3.2.2 Coletas e avaliações das emissões de CH<sub>4</sub>***

Na tabela 2 são apresentadas as datas de início e término das avaliações de CH<sub>4</sub> nas entressafras e safras do primeiro e segundo ano, respectivamente. Na entressafra, as avaliações foram realizadas com auxílio de um sistema composto por uma base e uma câmara conforme método da câmara estática fechada, proposto por Mosier (1989). A base quadrada em aço galvanizado ficou permanentemente no campo, inserida no solo até 0,12 m de profundidade, deixando exposta uma calha para encaixe da câmara, no momento das amostragens. As câmaras estáticas quadradas também em aço galvanizado apresentavam 0,20 m de altura e 0,40 m de largura.

Durante o período de avaliações de CH<sub>4</sub> na entressafra e safra nos dois anos de experimento, as bases foram alocadas nas parcelas, de modo que duas linhas de plantio do arroz passassem no interior de cada base. As metodologias empregadas foram as mesmas utilizadas nos experimentos realizados em condições de sequeiro, com exceção da coleta das amostras de ar para as análises de CH<sub>4</sub>, nas quais foram utilizadas câmaras especiais.

Cada câmara possuía um ventilador tipo “cooler” no seu interior, o qual foi conectado e ligado a uma bateria de 12 V durante 30 segundos para homogeneização da atmosfera interna, imediatamente antes das coletas de ar. Termômetros digitais foram utilizados para monitorar a temperatura do ar no interior das câmaras a cada amostragem e no solo. Na parte superior da câmara existia uma válvula de três vias, pela qual foram retiradas as amostras de ar durante as

coletas. No momento das amostragens, cada câmara foi encaixada à calha da base metálica, e em seguida foi adicionada água na calha para selar a câmara, buscando-se impedir trocas gasosas entre o interior da câmara e o ambiente externo durante as coletas.

As amostras de ar do interior das câmaras foram coletadas com seringas de polipropileno, em três tempos: 0, 20 e 40 minutos na entressafra e em quatro tempos: 0, 8, 16 e 24 minutos durante o período de cultivo do arroz, esses tempos contados sempre após o fechamento das câmaras. Após cada coleta, as amostras foram transportadas imediatamente ao laboratório e analisadas dentro do período máximo de 24 horas após a coleta de campo.

A determinação da concentração de CH<sub>4</sub> na safra e entressafra foi realizada por cromatografia gasosa (Shimadzu GC – 2014 modelo Greenhouse) equipado com um detector de ionização de chama (FID) utilizado para quantificar a concentração de CH<sub>4</sub> nas amostras de ar coletadas no campo. Os dados climáticos foram obtidos da Estação Automática de Meteorologia do Departamento de Fitotecnia (UFSM), distante 0,5 km do local do experimento.

### 3.2.3 Condução do experimento

Na tabela 2 são apresentadas em ordem cronológica as principais operações realizadas durante o período de avaliações.

**Tabela 2.**

Cronograma das principais operações de campo realizadas no período de avaliação de CH<sub>4</sub>.

Operação de campo	Ano agrícola	
	2010/11	2011/12
Aplicação da palha nas parcelas	17 abril 2010	14 março 2011
Início das amostragens de CH <sub>4</sub> na entressafra	18 abril 2010	15 março 2011
Manejo da palha com rolo-faca pós-colheita (tratamentos RFpc e RFpc + Gas)	24 abril 2010	19 março 2011
1º manejo da palha com grade (tratamento Gpc)	03 maio 2010	05 abril 2011
Semeadura do azevém (60 kg ha <sup>-1</sup> sementes) no tratamento Sm + Az	17 maio 2010	07 maio 2011
Adubação nitrogenada no azevém (30 kg N ha <sup>-1</sup> )	16 julho 2010	01 julho 2011
Dessecação do azevém	28 setembro 2010	

Cortes do azevém (simulação de pastejo)		11 agosto e 07 outubro 2011
2º manejo da palha com grade (tratamentos Gpc + Gas, RFpc + Gas e Gas)	11 agosto 2010	18 agosto 2011
Última amostragem de CH <sub>4</sub> na entressafra	01 outubro 2010	10 outubro 2011
Semeadura do arroz (90 kg ha <sup>-1</sup> de sementes)	22 outubro 2010	18 outubro 2011
Início das amostragens de CH <sub>4</sub> no período de cultivo do arroz irrigado	12 novembro 2010	19 novembro 2011
Início da irrigação permanente em todas as parcelas	20 novembro 2010	21 novembro 2011
1ª adubação nitrogenada de cobertura (50 kg N ha <sup>-1</sup> ) em todas as parcelas e início da irrigação permanente	20 novembro 2010	21 novembro 2011
2ª adubação nitrogenada de cobertura (35 kg N ha <sup>-1</sup> ) em todas as parcelas	22 dezembro	22 dezembro 2011
3ª adubação nitrogenada de cobertura (35 kg N ha <sup>-1</sup> ) em todas as parcelas	15 janeiro 2011	11 janeiro 2012
Suspensão da irrigação permanente nas parcelas	03 março 2011	07 março 2012
Última amostragem de CH <sub>4</sub> no período de cultivo do arroz irrigado	10 março 2011	08 março 2012
Colheita	10 março 2011	12 março 2012

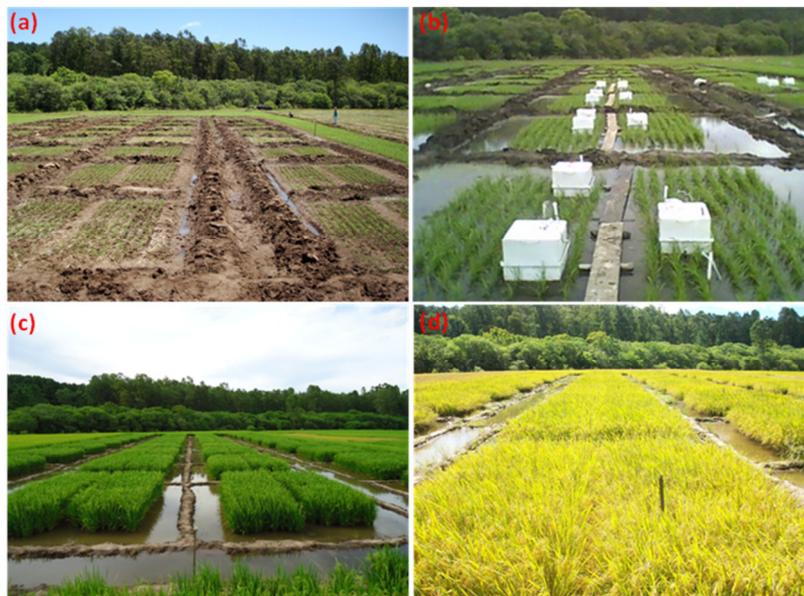
A produção de matéria seca (MS) no tratamento com azevém foi de 3,1 e 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> nas entressafras em 2010 e 2011, respectivamente.

A semeadura do arroz na safra 2010-2011 foi realizada em 22/10/2010, e na safra 2011-2012 em 18/10/2011, ambas dentro da época recomendada de semeadura na Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, utilizando-se 90 kg ha<sup>-1</sup> de sementes da cultivar Puitá Inta-CL<sup>®</sup> e 300 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula NPK 5-20-20 em adubação de base, num total de 18 linhas em cada parcela. A população de plantas foi ajustada para 250 plantas por metro quadrado, seguindo as recomendações para o cultivo de arroz irrigado no RS.

Antes da semeadura do arroz, as parcelas dos tratamentos Sm, RPpc e Sm + Az não sofreram nenhum tipo de manejo por ocasião da semeadura, apenas no primeiro ano de cultivo, o solo dos demais tratamentos sofreu um nivelamento superficial com uma lâmina hidráulica niveladora a fim de melhorar as condições para a semeadura do arroz. No primeiro e segundo ano de cultivo, em 20/11/2010 e 21/11/2011, respectivamente, foi iniciada a irrigação permanente, em torno de 20 dias após a emergência das plantas, conforme a tabela 2. Após o início da irrigação

se manteve a altura da lâmina de água com 10 cm de profundidade na safra 2010/11 e 7 cm na safra 2011/12.

A adubação de cobertura com N foi realizada em três épocas: 1ª aplicação anterior ao no início da irrigação ( $50 \text{ kg de N ha}^{-1}$ ); 2ª aplicação no início do perfilhamento ( $35 \text{ kg de N ha}^{-1}$ ); e a 3ª aplicação no início da diferenciação da panícula (IP) ( $35 \text{ kg de N ha}^{-1}$ ), totalizando  $135 \text{ kg de N}$  ( $15 \text{ kg}$  na semeadura e  $120 \text{ kg}$  parcelados em cobertura). Os demais tratos culturais utilizados foram semelhantes aos utilizados nas áreas de cultivo de arroz irrigado no RS. Na Fig. 2 pode ser vista a disposição geral do experimento durante o cultivo do arroz irrigado, em diferentes estádios de desenvolvimento.



**Fig. 2.** Vista geral do experimento durante o período de cultivo do arroz irrigado, nos diferentes estádios de desenvolvimento durante a safra, segundo Counce et al. (2000): a) estágio de desenvolvimento vegetativo (V2/V3); b) estágio de desenvolvimento vegetativo (V5/V6); c) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R3); d) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R9); Santa Maria, RS.

### **3.2.4 Análises estatísticas**

Os fluxos diários de  $\text{CH}_4$  foram calculados por interpolação linear e a emissão acumulada de  $\text{CH}_4$  foi calculada somando-se as quantidades emitidas em cada intervalo de coleta. Para isso, foi calculada a média dos fluxos de  $\text{CH}_4$  entre duas coletas consecutivas, multiplicando-se o valor resultante pelo intervalo de tempo

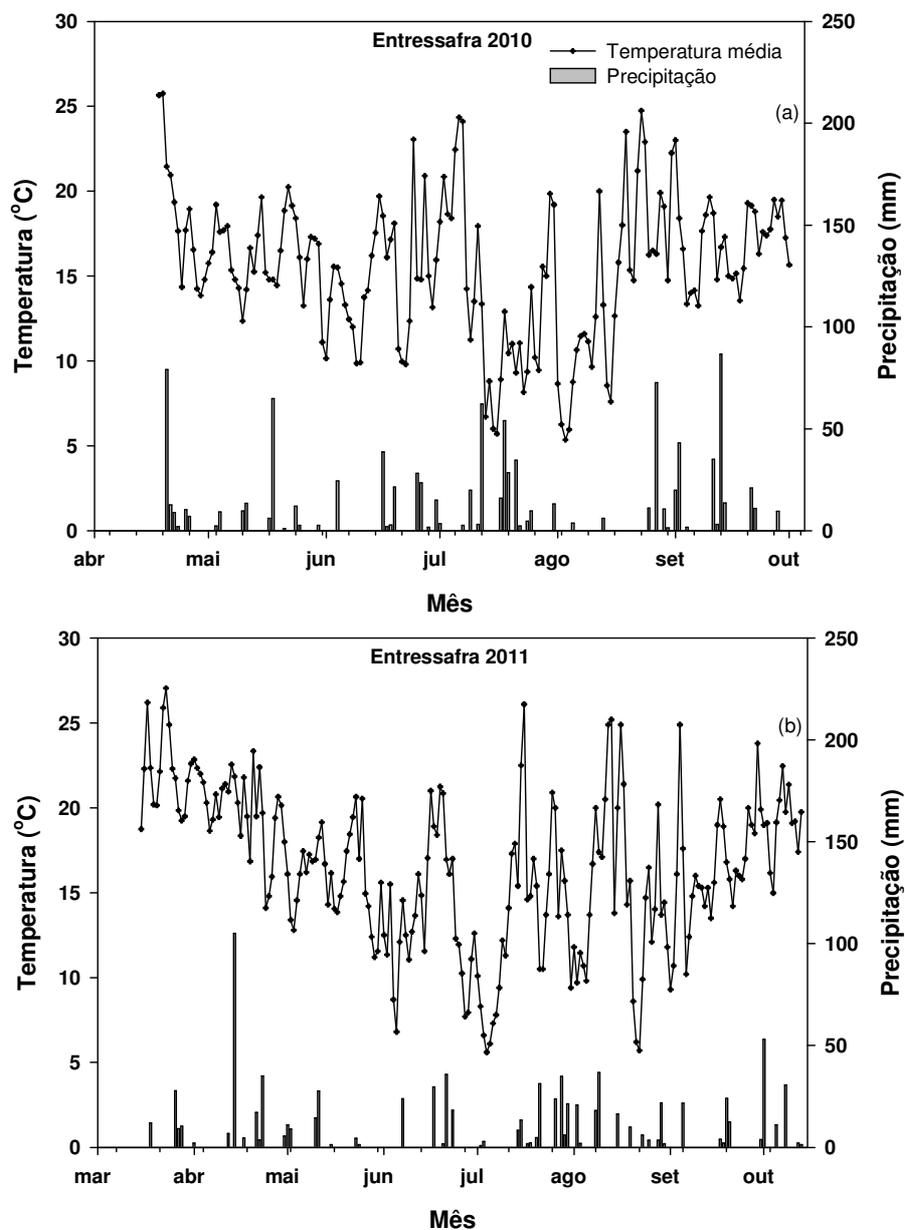
decorrido entre as referidas coletas. Os dados referentes à emissão acumulada de CH<sub>4</sub> foram submetidos ao teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de probabilidade para a comparação de médias, sem transformação dos dados, utilizando-se dos procedimentos disponíveis no programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2000).

### **3.3 Resultados**

#### ***3.3.1 Período de entressafra***

##### ***3.3.1.1 Temperatura do ar e precipitação***

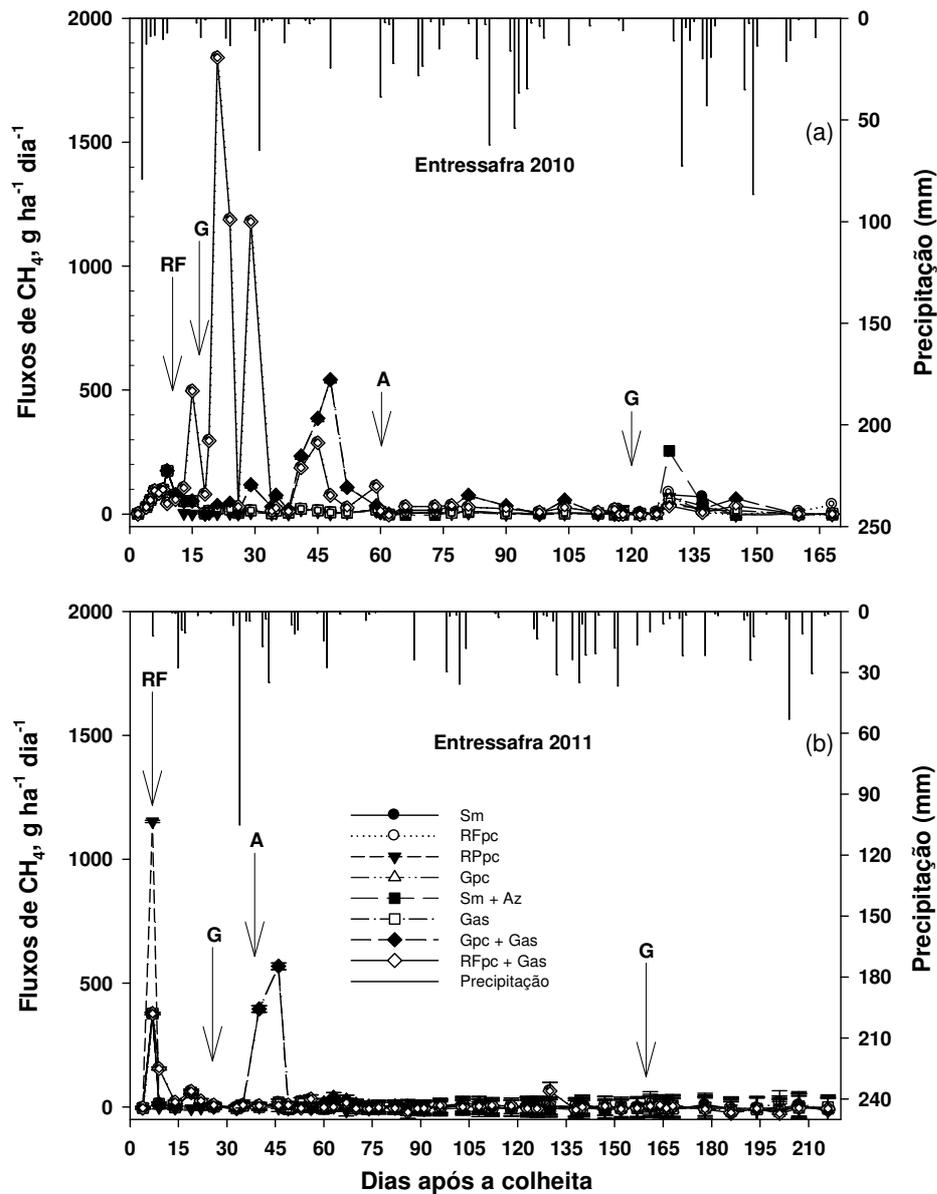
As temperaturas médias do ar variaram de 26 (em abril) a 5 °C (em agosto) no ano de 2010 (Fig. 3a) e de 27 (em março) a 6 °C (em julho) no ano de 2011 (Fig. 3b). Na entressafra de 2010 o volume total de chuvas durante os 168 dias de avaliação foi de 1.056 mm (Fig. 3a), enquanto que na entressafra de 2011 esse volume foi de 900 mm em 216 dias (Fig. 3b).



**Fig. 3.** Temperatura do ar nas entressafas da cultura do arroz irrigado em 2010 (a) e 2011 (b) e precipitação pluviométrica ocorrida.

### 3.3.1.2 Fluxos de $CH_4$

Nas entressafas de 2010 e 2011 os maiores fluxos de  $CH_4$  ocorreram nos primeiros 50 dias pós-colheita, onde foram emitidos 85% do total de  $CH_4$  nas entressafas, nos tratamentos em que a palha foi incorporada ao solo (Fig. 4a e 4b). Após esse período os fluxos foram baixos.



**Fig. 4.** Fluxos de CH<sub>4</sub> nas entressafras da cultura do arroz irrigado em 2010 (a) e 2011 (b), sob diferentes sistemas de manejo pós-colheita, e precipitação pluviométrica durante o período. RF= manejo com rolo-faca após a colheita. G= manejo com grade após a colheita. A= plantas de azevém emergidas.

Na entressafra de 2010, aos 21 e 24 dias pós-colheita foram observados os maiores picos de CH<sub>4</sub> no tratamento RFpc, com 1.842 e 1.188 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, sendo 85 e 61 vezes superior ao tratamento Sm (Fig. 3a). Aos 45 e 48 dias foram observados os maiores picos de CH<sub>4</sub> no tratamento Gpc, com 387 e 541 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, sendo 27 e 83 vezes superior ao tratamento Sm. Na entressafra de 2011, os maiores picos de CH<sub>4</sub> foram observados aos 7, 40 e 46 dias pós-colheita, atingindo 1.152, 396 e 568 g

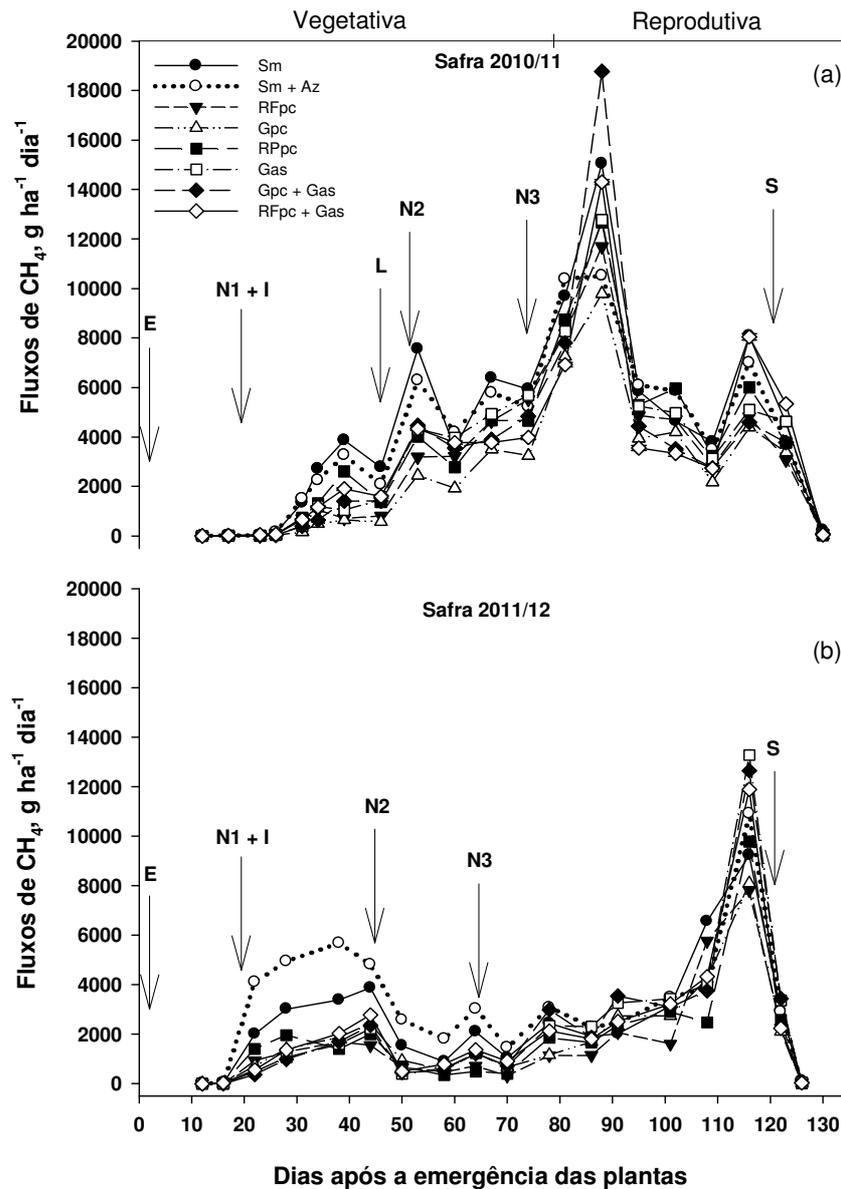
ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>, nos tratamentos RPpc, Gpc e Gpc + Gas, respectivamente, sendo 3, 396 e 31 vezes superiores ao Sm (Fig. 3b). De maneira geral os fluxos médios de CH<sub>4</sub> foram mais elevados em 2010 do que 2011. Na entressafra de 2010 o fluxo médio geral de CH<sub>4</sub> foi 3,7 vezes superior que aquele observado na entressafra de 2011 (65 e 18 g de CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> em 2010 e 2011, respectivamente). Em 2010 as emissões de CH<sub>4</sub> decresceram na seguinte ordem: RFpc = RFpc + Gas > Gpc = Gpc + Gas > Sm = RPpc = Sm + Az = Sm + Gas. Já em 2011 os fluxos médios foram maiores nos tratamentos Gpc e Gpc + Gas seguidos pelos demais tratamentos que foram semelhantes entre si.

### **3.3.2 Período de cultivo**

#### **3.3.2.1 Fluxos de CH<sub>4</sub>**

Nos dois anos de cultivo do arroz irrigado os fluxos de CH<sub>4</sub> tiveram dinâmica semelhante. Os menores fluxos foram observados anteriores ao início da irrigação permanente, e, no final do ciclo do arroz, posterior a drenagem das parcelas. Já os maiores fluxos de CH<sub>4</sub> foram observados com solo alagado, no estágio reprodutivo das plantas. No período de cultivo do arroz, os fluxos de CH<sub>4</sub> variaram de -3 a 18.768 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2010/11, e de -10 a 13.271 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> na safra 2011/12 (Fig. 5a e 5b).

Os fluxos médios de CH<sub>4</sub> durante a safra de 2010/11 foram de 4,5; 4,1; 3,2; 2,6; 3,6; 3,6; 3,5 e 3,5 kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> nos tratamentos Sm, Sm + Az, RFpc, Gpc, RPpc, Gas, Gpc + Gas e RFpc + Gas, respectivamente. Os fluxos de CH<sub>4</sub> foram baixos até os 26 DAE, com média de 25 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, aumentando dos 26 até 88 DAE, sobretudo no Sm e no Sm + Az, que apresentaram os maiores fluxos médios de CH<sub>4</sub> durante o período de cultivo do arroz irrigado na safra 2010/11 (Fig. 5a).



**Fig. 5.** Fluxos de CH<sub>4</sub> na cultura do arroz irrigado, nas safras 2010/11 (a) e 2011/12 (b), sob diferentes sistemas de manejo pós-colheita. N1 + I= 1ª adubação nitrogenada de cobertura (50 kg de N ha<sup>-1</sup>) e início da irrigação permanente. N2= 2ª adubação nitrogenada de cobertura (35 kg de N ha<sup>-1</sup>). N3= 3ª adubação nitrogenada de cobertura (35 kg de N ha<sup>-1</sup>). E= emergência das plantas de arroz. L= Lâmina de água com profundidade abaixo dos 3 cm. S= drenagem das parcelas.

Os maiores picos de CH<sub>4</sub> foram verificados aos 53, 88 e 116 DAE. Na fase vegetativa os maiores fluxos de CH<sub>4</sub> ocorreram aos 53 DAE nos tratamentos Sm e Sm + Az, que alcançaram 7.555 e 6.291 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo 3 vezes superior ao Gpc, que obteve 2.443 g ha<sup>-1</sup>. No estágio reprodutivo, aos 88 DAE foram observados os maiores fluxos de CH<sub>4</sub> nos tratamentos Sm e Gpc + Gas, alcançando

15.042 e 18.768 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>, respectivamente, sendo 1 e 2 vezes superiores em relação ao Gpc, que obteve 9.788 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> (Fig. 5a). E, aos 116 DAE, também no estágio reprodutivo, foram observados aumentos nos fluxos de CH<sub>4</sub>, com valores de 8.081; 8.044 e 7.001 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> nos tratamentos Sm, RFpc + Gas e no Sm + Az, respectivamente, sendo 2 vezes superior ao Gpc, que obteve 4.385 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Após esse período as parcelas foram drenadas e os fluxos de CH<sub>4</sub> decresceram para 75 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> aos 130 DAE.

Os fluxos médios de CH<sub>4</sub> durante a safra de 2011/12 foram de 2,2; 2,8; 1,3; 1,5; 1,7; 1,7 e 1,7 kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> nos tratamentos Sm, Sm + Az, RFpc, Gpc, RPpc, Gas, Gpc + Gas e RFpc + Gas, respectivamente. Na safra 2011/12 a dinâmica das emissões de CH<sub>4</sub> foi semelhante à observada no primeiro ano de cultivo do arroz irrigado (Fig. 5b). Os fluxos de CH<sub>4</sub> foram baixos até os 16 DAE, com valores próximos de zero. Após o início da irrigação permanente os fluxos de CH<sub>4</sub> aumentaram dos 16 até 44 DAE, com valor médio no experimento de 2.747 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>, aos 44 DAE. Após os fluxos decresceram até 58 DAE, com valor médio de 750 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>, e em seguida aumentaram novamente até 116 DAE, sobretudo no Sm e no Sm + Az onde se observaram os maiores picos de CH<sub>4</sub>, com 13.272 e 12.641 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> nos tratamentos Gas e Gpc + Gas, respectivamente. Estes dois tratamentos foram os que apresentaram os maiores fluxos médios de CH<sub>4</sub> durante o período de cultivo do arroz irrigado na safra 2011/12. Após esse período os fluxos de CH<sub>4</sub> decresceram.

Os maiores picos de CH<sub>4</sub> foram verificados aos 38 e 116 DAE. Na fase vegetativa os maiores picos de CH<sub>4</sub> ocorreram aos 38 DAE em todos os tratamentos, com destaque para os tratamentos Sm e Sm + Az, que alcançaram 3.380 e 5.675 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo 2 e 3 vezes superiores ao Gpc, que obteve 1.871 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> (Fig. 5b). Aos 116 DAE, no estágio reprodutivo, foram observados os maiores picos de CH<sub>4</sub> na safra 2011/12, nos tratamentos Gas e Gpc + Gas, alcançando 13.218 e 12.641 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo 2 vezes superiores em relação ao Gpc, que obteve 8.102 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> (Fig. 5b). Após esse período os fluxos de CH<sub>4</sub> decresceram para 37 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> em média, aos 126 DAE.

### **3.3.2.2 Emissão acumulada de CH<sub>4</sub>**

As maiores emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> foram observadas no tratamento RFpc na entressafra de 2010 (19,6 kg ha<sup>-1</sup>) e no tratamento Gpc na entressafra de 2011 (6,1 kg ha<sup>-1</sup>) (Tabela 3).

**Tabela 3.**

Emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> nas entressafras dos anos de 2010 e 2011 e nos períodos de cultivo do arroz em 2010/2011 e 2011/2012, para oito sistemas de manejos das áreas na entressafra, antes do cultivo do arroz irrigado<sup>(1)</sup>.

Tratamentos	Entressafra		Safra
	Ano de 2010		
	CH <sub>4</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		
Sm	2,7 ± 0,7 b		586,0 ± 13,6 a
RFpc	19,6 ± 2,8 a		414,6 ± 12,7 bc
Gpc	8,7 ± 3,4 b		334,5 ± 17,9 c
RPpc	1,8 ± 0,6 b		466,6 ± 17,4 abc
Sm + Az	3,3 ± 0,6 b		530,0 ± 27,3 ab
Gas	2,4 ± 0,7 b		464,4 ± 28,3 abc
Gpc + Gas	9,4 ± 3,3 b		459,6 ± 57,8 abc
RFpc + Gas	19,4 ± 2,9 a		451,1 ± 5,4 abc
	Ano de 2011		
Sm	1,3 ± 0,5 a		276,5 ± 1,7 ab
RFpc	2,4 ± 0,5 a		165,8 ± 1,8 c
Gpc	6,1 ± 0,6 a		187,3 ± 1,3 c
RPpc	2,4 ± 0,2 a		175,7 ± 0,1 c
Sm + Az	0,9 ± 0,1 a		346,5 ± 1,0 a
Gas	1,1 ± 0,6 a		213,1 ± 1,1 bc
Gpc + Gas	6,0 ± 0,5 a		212,1 ± 1,2 bc
RFpc + Gas	1,9 ± 0,3 a		209,0 ± 0,5 bc

<sup>(1)</sup>Médias seguidas das mesmas letras nas colunas de cada ano não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de probabilidade.

Já as menores emissões acumuladas foram observadas no tratamento RPpc na entressafra de 2010 (1,8 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>) e no tratamento Sm + Az na entressafra de 2011 (0,9 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>). Nas entressafras de 2010 e 2011, as emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> nos tratamentos com incorporação da palha ao solo pós-colheita com rolo-faca e grade, superaram aquelas dos tratamentos em que a palha não foi incorporada ao solo ou onde a palha foi retirada das parcelas.

A dinâmica das emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> na entressafra da cultura do arroz em 2010 e 2011 seguiu um mesmo padrão nesses dois anos de avaliações (dados não mostrados), sendo os fluxos iniciais os responsáveis pela maior parte das emissões de CH<sub>4</sub>. Nos primeiros 60 dias pós-colheita, após a adição da palha de arroz ao solo, no tratamento RFpc foram emitidos aproximadamente 90% do total de CH<sub>4</sub> acumulado na entressafra de 2010, enquanto que em 2011 nos primeiros 60 dias foram emitidos aproximadamente 98% do total de CH<sub>4</sub> acumulado, no

tratamento Gpc. Nesse mesmo período na entressafra de 2010 nos tratamentos Sm e RPpc foram emitidos 55% do total de CH<sub>4</sub>, enquanto que na entressafra de 2011, aproximadamente 100% do total de CH<sub>4</sub> já havia sido emitido em todos os tratamentos.

Durante os períodos de cultivo do arroz, nas safras de 2010/11 e 2011/12 os fluxos iniciais foram baixos, aumentando da fase vegetativa até o estágio reprodutivo, sendo este o responsável pela maior parte das emissões de CH<sub>4</sub>. Na safra 2010/11, aproximadamente 70% do total de CH<sub>4</sub> foi emitido no estágio reprodutivo, enquanto que na safra 2011/12 esse valor foi de 58%. Nos dois anos de cultivo as maiores emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> foram observadas nos tratamentos Sm e Sm + Az (586 e 530 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) na safra 2010/11, e, de 276 e 346 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2011/12 (Tabela 3). Já as menores emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> na safra 2010/11 foram observadas nos tratamentos Gpc e RFpc (334 e 415 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) e na safra 2011/12 nos tratamentos RFpc, RPpc e Gpc (166, 176 e 187 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>, respectivamente).

No período de avaliações de CH<sub>4</sub> as menores emissões médias acumuladas nas entressafras foram observadas naqueles tratamentos em que a palha não foi incorporada ao solo, retirada das parcelas, ou foi incorporada somente antes da semeadura no mês de agosto (tratamentos Sm, Sm + Az, RPpc e Gas), enquanto que as maiores emissões ocorreram nos tratamentos com incorporação da palha com rolo-faca e com grade pós-colheita (RFpc, RFpc + Gas, Gpc + Gas e Gpc). Já no período de cultivo do arroz irrigado as maiores emissões médias foram observadas nos dois tratamentos que mantiveram a palha sob a superfície do solo durante as entressafras (Sm e Sm + Az), enquanto que as menores emissões foram observadas nos tratamentos que incorporaram a palha pós-colheita (Gas e Gpc, RFpc + Gas, RFpc e Gpc) ou que a palha foi retirada das parcelas (RPpc).

Do total de emissões anuais médias de CH<sub>4</sub> no experimento nos dois anos (safra + entressafra) 98% do CH<sub>4</sub> foi emitido na safra e apenas 2% do total de CH<sub>4</sub> foi emitido na entressafra.

### **3.4 Discussão**

#### **3.4.1 Fluxos de CH<sub>4</sub> na entressafra**

Os fluxos de  $\text{CH}_4$  aumentaram logo após a adição da palha de arroz ao solo pós-colheita e aos manejos com rolo-faca e grade nas primeiras semanas (Fig. 4a e 4b). Isso está relacionado ao efeito de rompimento da estrutura do solo causada pelo preparo, liberando então o  $\text{CH}_4$  eventualmente contido no espaço poroso (Piva, 2010). Além desse efeito físico direto, a alteração na estrutura do solo pelo preparo diminui a capacidade das bactérias em oxidar  $\text{CH}_4$  (Ball et al., 1999) em função da diminuição das condições físicas, químicas e biológicas do solo que são ideais ao estabelecimento das bactérias metanotróficas (Smith et al., 2000), que pode aumentar os fluxos de  $\text{CH}_4$  no solo. E, o efeito mais importante, é o da adição e incorporação da palha de arroz ao solo, que, provavelmente, causaram a estimulação da biomassa microbiana, resultantes das entradas de C e N (Bayer, 2012), o que originou maiores fluxos de  $\text{CH}_4$  nos tratamentos que incorporaram a palha ao solo. Maiores oscilações nos fluxos iniciais de  $\text{CH}_4$  também foram observados por Bayer (2012), nos primeiros 90 dias após o manejo e adição de resíduos na superfície do solo, num estudo conduzido com diferentes sistemas de cultivo e de culturas sob condições de sequeiro em um Argissolo. Os resultados observados são diferentes dos observados nos estudos de Omonode et al. (2007) em clima temperado, e Jacinte e Lal (2005) no estado de Ohio nos Estados Unidos, que verificaram que não houve diferenças sobre as emissões de  $\text{CH}_4$  em diferentes sistemas de preparo do solo em condições de sequeiro, e onde o solo atuou como dreno de  $\text{CH}_4$ . Já para os resultados observados nesse estudo, verificou-se que o solo, na maior parte das avaliações não atuou como dreno de  $\text{CH}_4$ , principalmente devido às condições de maior EPSA. Em seu estudo, em condições de sequeiro, Piva (2010) também observou que picos de  $\text{CH}_4$  foram observados quando os valores de umidade do solo aumentaram.

No presente estudo, os maiores fluxos de  $\text{CH}_4$  foram observados quando a palha foi incorporada ao solo (tratamentos RFpc, Gpc, RFpc + Gas e Gpc + Gas). Já os menores fluxos ocorreram quando a palha não foi manejada (tratamentos Sm, Sm + Az e Gas) ou onde esta foi retirada das parcelas (tratamento RPpc). Temperaturas mais elevadas pós-colheita, junto a incorporação da palha e ocorrência de precipitações, resultaram nas maiores emissões de  $\text{CH}_4$  nesses tratamentos. As maiores emissões de  $\text{CH}_4$  nas entressafras, nos tratamentos onde a palha foi manejada com grade ou rolo-faca, são o resultado da combinação da adição e incorporação de palha de arroz ao solo, com sequências de precipitações

ocorridas, que mantiveram os valores de EPISA elevados ocasionando condições de anaerobiose, acrescido de temperaturas mais elevadas no período inicial pós-colheita até pouco antes do início do inverno. Temperaturas abaixo de 15°C e menor precipitação podem diminuir a produção de CH<sub>4</sub> pela inibição da metanogênese (Le Mer e Roger, 2001) e aumentar a atividade metanotrófica, enquanto que condições de umidade e temperaturas mais elevadas proporcionam ambientes favoráveis para que a metanogênese seja maximizada devido a uma maior adaptação da população metanogênica no ambiente (Le Mer e Roger, 2001). Ussiri et al. (2009), avaliando a emissão de CH<sub>4</sub> em diferentes sistemas de preparo do solo no estado de Ohio nos Estados Unidos, atribuíram as maiores emissões de CH<sub>4</sub> em sistema de preparo convencional à diminuição da população metanotrófica, devido a perturbação física, o que causaria uma diminuição da oxidação do CH<sub>4</sub> e aumento nos fluxos desse gás.

Os solos agrícolas podem atuar como dreno ou fonte de GEE, dependendo do sistema de manejo a que forem submetidos (IPCC, 2001), e solos degradados e compactados, quando sujeitos a eventos de chuva, podem apresentar expressiva condição de anaerobiose, o que determina em emissão de CH<sub>4</sub> para a atmosfera decorrente da atividade da microbiota metanogênicas (Gomes, 2006). Processo semelhante provavelmente ocorreu nesse estudo nas entressafras, em que as maiores emissões de CH<sub>4</sub> foram observadas no solo que foi submetido aos manejos com rolo-faca e grade.

Os fluxos de CH<sub>4</sub> foram maiores na entressafra de 2010 quando comparadas às de 2011, mesmo sendo um período menor de avaliações em 2010. Isso ocorreu porque em 2010 teve um maior volume de chuvas mesmo em um período menor de avaliações. As precipitações sequenciais e de maior intensidade que ocorreram em 2010 mantiveram o EPISA do solo elevado em alguns períodos, sempre com média entre 60 e 80%, que combinado à presença de substrato (palha) em melhor contato com o solo nos tratamentos com incorporação, foram fatores que estimularam os maiores fluxos de CH<sub>4</sub>. Essa condição manteve o solo saturado, inclusive com lâmina de água por alguns períodos, que conseqüentemente propiciou condições de baixa concentração e difusão de O<sub>2</sub> para o espaço poroso do solo, já que a difusão dos gases é cerca de 10 mil vezes menor na água do que no ar (Agostinetto, 2002).

Condições de umidade e temperaturas mais elevadas proporcionam ambientes favoráveis para que a metanogênese seja maximizada devido a uma

maior adaptação da população metanogênica nesse ambiente (Le Mer e Roger, 2001). Piva (2010) as maiores emissões de  $\text{CH}_4$  ocorridas no período parecem estar muito mais associadas ao EPSA, que é controlado pelas chuvas, do que ao sistema de preparo em si. O aumento do EPSA acima de 50% reduz a difusividade do oxigênio nos agregados e, aliado a respiração do solo e a palha presente, incrementa rapidamente a fração de solo sob condições de anaerobiose (Dobbie e Smith, 2001), permitindo que o processo de metanogênese possa ocorrer. Liu et al. (2006) verificaram em seu estudo que aqueles sistemas de manejo que tinham maior EPSA e densidade do solo também foram os que proporcionaram maiores fluxos de  $\text{CH}_4$ . Na China, Yang e Chang (1998) determinaram que valores inferiores a 23% de água no solo, o efluxo de  $\text{CH}_4$  foi insignificante, enquanto que as taxas máximas de emissão de  $\text{CH}_4$  ocorreram com umidades superiores a 67%.

O adensamento do solo causado pelos equipamentos usados para incorporar a palha contribuíram para a criação e manutenção de sítios anaeróbicos, principalmente após as precipitações, potencializando a metanogênese. Além disso, a quantidade e a qualidade do material orgânico aportado também estão intimamente associados com a produção e a emissão de  $\text{CH}_4$  no solo (Yao et al., 2010) e a quantidade de resíduo aplicado pode exercer maior controle sobre os fluxos (Aulakh et al., 2001a).

Nesse estudo, além de EPSA com valores mais elevados, a maior densidade aparente do solo na camada de 0-10 cm foi observada nos tratamentos com incorporação da palha de arroz ( $1,4 \text{ g cm}^3$ ) em relação aos demais tratamentos ( $1,3 \text{ g cm}^3$ ). Essa condição proporcionou menor oxigenação no solo, favorecendo a manutenção de sítios de anaerobiose. Além disso, o não revolvimento do solo ainda pode favorecer a atividade microbiana pelas alterações no microclima do solo e o aumento da quantidade de matéria orgânica (MO) e de nutrientes promovendo a absorção de  $\text{CH}_4$ , enquanto o adensamento do solo associado ao acúmulo superficial de C lábil pode determinar microsítios anaeróbicos no solo e podem promover a emissão de  $\text{CH}_4$  para atmosfera (Gomes, 2006).

Os resultados dos fluxos de  $\text{CH}_4$  observados para esse solo de várzea, que apresenta características como proximidade ao lençol freático e com más condições de drenagem (SOSBAI, 2012) são superiores aos resultados observados em solos com melhores condições de drenagem. Em solos bem drenados as condições de anaerobiose ficam mais restritas ao interior dos agregados do solo, local em que o

CH<sub>4</sub> pode ser produzido em um primeiro momento (Moreira e Siqueira, 2006), e, após, ser consumido pela oxidação realizada por bactérias aeróbicas (Smith et al., 2003).

Nos sistemas de manejo pós-colheita do arroz irrigado, em especial naqueles que incorporaram a palha com rolo-faca e grade pós-colheita, os efeitos de incorporação da palha, que é substrato para a utilização pela microbiota do solo, aliado à desagregação do solo e à ocorrência de precipitações sequenciais, proporcionaram melhores condições para o estabelecimento do processo de metanogênese, e, resultaram em maiores emissões de CH<sub>4</sub> no período de entressafra, quando comparado aos sistemas sem manejo da palha. Mesmo sendo observados picos de CH<sub>4</sub> nas entressafras, os fluxos desse gás têm valores muito abaixo daqueles que são observados durante o período de cultivo do arroz irrigado.

### **3.4.2 Fluxos de CH<sub>4</sub> durante o cultivo do arroz irrigado**

Os valores dos fluxos de CH<sub>4</sub> observados neste estudo variaram de -10 a 18.768 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, e estão próximos aos observados em outros estudos realizados na região sul do Brasil. Zschornack (2011) verificou que os fluxos variaram de 26 a 7.411 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> quando foi utilizada a cultivar IRGA 424 e de -2 a 15.108 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> para a cultivar Puitá Inta-CL<sup>®</sup>. No trabalho de Moterle (2011), em uma área adjacente daquela do presente estudo, esse autor verificou que os fluxos de CH<sub>4</sub> variaram de valores próximos a zero até 7.464 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> para a cultivar IRGA 422 CL. Mitsch e Wu, (1995) relatam que os fluxos de CH<sub>4</sub> em solos cultivados por inundação contínua são de 620 a 6.480 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, enquanto Le Mer e Roger (2001) citam que os fluxos variam de 0 a 19.200 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Tais variações nos fluxos de CH<sub>4</sub> observadas entre diferentes estudos podem estar relacionadas a fatores edafoclimáticos, aos tipos de solo, manejos adotados e a cultivar de arroz utilizada.

No presente estudo, as diferenças observadas nos fluxos de CH<sub>4</sub> entre as duas safras podem ser devido às condições climáticas, como volume de chuvas e temperatura (safra de 2010/11 com maior volume de chuvas e safra 2011/12 mais quente e seca), e radiação solar (2.553 e 2.533 MJ m<sup>-2</sup> nas safras 2010/11 e 2011/12, respectivamente). Esses fatores podem influenciar o desenvolvimento da planta, como no número de perfilhos, estatura e biomassa das plantas, que interferem diretamente na produção de exsudatos pelas raízes das plantas de arroz,

causando mudanças nos fluxos de CH<sub>4</sub> (Watanabe et al., 1999; Aulakh et al., 2001; 2003; Gogoi et al., 2005; Kim, 2012).

Na safra 2010/11 as plantas de arroz também apresentavam maior porte e biomassa do que na safra 2011/12, sendo possivelmente o fator que mais influenciou na produção de CH<sub>4</sub>. A produção de MS da parte aérea das plantas de arroz na safra 2010/11 foi de 11,3 Mg ha<sup>-1</sup>, enquanto que na safra 2011/12 foi de 9,1 Mg ha<sup>-1</sup>. Em outros estudos (Mitra et al., 1999; Bharati, 2001, Kim, 2012), as cultivares de arroz com as maiores emissões de CH<sub>4</sub> foram as que apresentam maior produção de fitomassa, e existiu correlações positivas entre a biomassa de plantas e as emissões de CH<sub>4</sub>. No presente estudo, o maior porte e biomassa de plantas na safra 2010/11 pode ter favorecido uma maior produção de exsudatos radiculares do que na safra 2011/12, que são fonte de substrato para a metanogênese (Aulakh, 2001), e, potencializando, a maior produção e emissão de CH<sub>4</sub> na safra 2010/11 do que na safra 2011/12.

Além disso, a altura da lâmina de água de irrigação foi em média de 0,10 m na safra 2010/11 e de 0,07 m na safra de 2011/12, o que também pode ter contribuído para os menores fluxos de CH<sub>4</sub> no segundo ano de estudos. Como exemplo, na safra de 2010/11, aos 46 DAE houve um rebaixamento da lâmina de água de irrigação, que reduziu os fluxos de CH<sub>4</sub> em todos os tratamentos (Fig. 5a). Em um estudo conduzido por Moore e Dalva (1993) foi observado que a produção de CH<sub>4</sub> aumentou com o aumento da submersão do solo até 10 cm, devido ao estímulo da anaerobiose, e diminuiu com maiores alturas da lâmina de água devido ao aumento da oxidação do CH<sub>4</sub>.

No decorrer das duas safras de cultivo do arroz os fluxos de CH<sub>4</sub> tiveram dinâmicas semelhantes entre os tratamentos, iniciando com influxo de CH<sub>4</sub> ou valores muito próximos de zero antes do alagamento, como constatado em outros estudos realizados no sul do Brasil (Zschornack, 2011; Moterle, 2011), e em estudos realizados em outros países (Bharati, 2001; Boeckx, 2001; Ma et al., 2012). Em solos aeróbicos pode ocorrer a oxidação do CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub> por metanotrofia, com o solo atuando como um dreno (Wang Ineson, 2003), originando influxo de CH<sub>4</sub> ou valores próximos de zero. Por outro lado, em solos anaeróbicos, ocorre a produção de CH<sub>4</sub>, como resultado final da decomposição anaeróbica de materiais orgânicos (da matéria orgânica do solo ou de resíduos vegetais), com o solo atuando como fonte

de CH<sub>4</sub> (Yoshida, 1978; Le Mer e Roger, 2001), originando efluxo de CH<sub>4</sub> para a atmosfera.

Após o início da irrigação permanente (20 DAE) os fluxos aumentaram gradativamente em todos os tratamentos até o período reprodutivo do arroz. Essa dinâmica está relacionada com o desenvolvimento da planta, que no estágio reprodutivo apresenta o número máximo de perfilhos, o que facilita e aumenta o transporte do CH<sub>4</sub> (Cicerone et al., 1983), pois nessa fase também ocorre o máximo desenvolvimento dos aerênquimas (Aulakh, 2000b, 2001). Os aerênquimas são estruturas responsáveis pelo transporte de gases nas plantas em sistemas alagados, fazendo com que a planta de arroz seja responsável entre 60 e 90% do CH<sub>4</sub> emitido (Wassmann et al., 1996). Segundo Mariko et al. (1991), a condutividade de CH<sub>4</sub> é reforçada através dos aerênquimas e aumenta gradativamente as emissões de CH<sub>4</sub> com o desenvolvimento da planta. Para a maioria das cultivares, a maior taxa de emissão de CH<sub>4</sub> é verificada no estágio reprodutivo, entre 60 a 80 dias após a semeadura (Ruschel, 1992), estando ainda relacionada com o aumento de exsudatos liberados pelas raízes que servem como substrato para as bactérias metanogênicas (Aulakh, 2001).

Essa dinâmica dos fluxos de CH<sub>4</sub> difere da observada por Costa (2005), que verificou que a maior parte do total de CH<sub>4</sub> emitido ocorreu na fase vegetativa do arroz. A diferença em relação a este estudo é que na área em que esse autor quantificou as emissões de CH<sub>4</sub>, foram adicionadas 3,5 Mg de matéria seca de azevém ao solo, em superfície no sistema de plantio direto (SPD) e incorporado no sistema de plantio convencional (SPC), logo antes da semeadura do arroz. Logo, a decomposição anaeróbica desse material deu origem a esses maiores picos de CH<sub>4</sub> na fase vegetativa do arroz no trabalho desse autor, e, em outros estudos (Cai et al., 1997; Bhatia et al., 2005; Kim, 2012). No entanto, no presente estudo a quantidade de material remanescente no início do alagamento foi menor (média anual de 1,29 Mg ha<sup>-1</sup> no tratamento Sm, e, 1,58 Mg ha<sup>-1</sup> no tratamento Sm + Az) e já havia sido parcialmente decomposta durante a entressafra, portanto, os menores fluxos iniciais quando comparados com os estudos citados. Mesmo assim, também ocorreram picos iniciais de CH<sub>4</sub> nos tratamentos que apresentava resíduos culturais após o alagamento, mas os maiores fluxos foram observados no estágio reprodutivo das plantas, como observado em outros estudos (Bossio, 1999; Zschornack; Moterle,

2011; Bhattacharyya, 2012; Ma et al., 2012), em que os maiores fluxos de CH<sub>4</sub> também ocorreram no estágio reprodutivo das plantas.

Após os maiores picos de CH<sub>4</sub>, os fluxos diminuíram em todos os tratamentos, o que é resultado da redução da atividade fotossintética e senescência das plantas, dificultando a difusão e transporte do CH<sub>4</sub> até a atmosfera (Cai et al., 1997). Ao final do ciclo de cultivo as parcelas foram drenadas, e os fluxos de CH<sub>4</sub> decresceram para 75 g ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> em média no experimento. Nesta fase, em que ocorre a supressão da irrigação, ocorre também o aumento do suprimento de oxigênio no solo, inibindo a atividade das bactérias metanogênicas e diminuindo a produção de CH<sub>4</sub> (Moterle, 2011).

Em ambas as safras, os fluxos de CH<sub>4</sub> nos sistemas de cultivo com incorporação da palha ao solo na entressafra, se mantiveram abaixo de 2600 g CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> durante as três primeiras semanas após o início da irrigação permanente, sendo superiores apenas nos tratamentos Sm e Sm + Az, que ainda apresentavam resíduos vegetais sob a superfície do solo. Resultados semelhantes foram observados por Zschornack (2011), que avaliando os fluxos de CH<sub>4</sub> em arroz irrigado em três sistemas de cultivo (SPD, SPC e cultivo mínimo), verificou que durante as três primeiras semanas após o alagamento do solo os fluxos se mantiveram abaixo de 2400 g CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>.

Os fluxos iniciais após o alagamento, especialmente nos tratamentos Sm e Sm + Az estão associados a utilização da palha de arroz e azevém remanescentes da entressafra, que servem como fonte de C para a metanogênese. No estudo de Costa (2005), que avaliou fluxos de CH<sub>4</sub> em cultivo de arroz irrigado no sul do Brasil sob SPD e SPC, foi verificado que os maiores fluxos de CH<sub>4</sub> em um dado período foram observados no solo cultivado com arroz irrigado sob SPD, que também apresentou as maiores concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD) e de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> na solução do solo. Segundo Singh (2001) e Tanji et al. (2003), em solos alagados as maiores concentrações de COD são indicadores diretos de maior metanogênese e a maior concentração de COD no SPD pode estar associada a manutenção de resíduos de azevém na superfície do solo, ou parte deles. Em outro estudo realizado por Sousa (2001), as maiores concentrações de ácidos orgânicos, foram produzidas quando os resíduos não foram incorporados ao solo, sendo que o ácido acético foi o composto que apresentou a maior concentração na solução do solo, sendo esse o produto final da decomposição anaeróbica de resíduos

orgânicos, e que está prontamente utilizável pela metanogênese (Wassmann et al., 1998), o que originaria maiores potenciais de produção de  $\text{CH}_4$  em sistemas com adição de resíduos culturais ou adubos verdes sob a superfície do solo.

Os maiores fluxos de  $\text{CH}_4$  observados nos tratamentos Sm e Sm + Az, principalmente na fase vegetativa do arroz quando comparados com os demais sistemas, são devidos a existência de resíduos culturais de arroz e azevém sob a superfície do solo no momento do alagamento, pois esses resíduos são fonte de C para a metanogênese (Ma et al., 2012). Esses maiores fluxos médios nos tratamentos Sm e Sm + Az, podem ser atribuídos ainda ao aumento da disponibilidade de matéria orgânica lábil (Wassmann et al., 1993; Inubushi et al., 2003), fonte de C para a metanogênese. No estudo de Kim (2012), as taxas de emissão de  $\text{CH}_4$  também foram aumentadas na fase inicial de crescimento vegetativo das plantas de arroz, nas parcelas que receberam adubação verde anterior a semeadura. Em trabalho desenvolvido por Bharati et al. (2001), os autores observaram que em condição de inundação contínua, os níveis de carbono mineralizável diminuíram durante o estágio reprodutivo da cultura, com concomitante aumento da emissão de  $\text{CH}_4$ . Isso sugere, segundo os autores, que o carbono mineralizável disponível foi utilizado para a produção de  $\text{CH}_4$ . A adição de adubação verde também aumentou a taxa de emissão de  $\text{CH}_4$  em 1,6 e 4,2 vezes, em comparação à adubação química, respectivamente para o primeiro e segundo ano, em um estudo conduzido por Yang e Chang (2001). Os resultados observados aqui são semelhantes aos de outros estudos (Bhatia, 2005; Bhattacharya, 2012), que trabalhando com adição de resíduos antes do alagamento, verificaram aumentos nos fluxos de  $\text{CH}_4$ .

Nesses mesmos dois sistemas de manejo (Sm e Sm + Az) onde ocorreram os maiores fluxos de  $\text{CH}_4$ , também foram observados os maiores teores de C orgânico na camada de 0,10 m ao término do período experimental (1,62 e 1,65% de C no Sm e Sm + Az, respectivamente), enquanto que nos tratamentos com incorporação da palha o teor de C ao final do período experimental foi de 1,52%. Na camada e 0,05 m os teores de C foram mais contrastantes (1,93 e 1,95% no Sm e Sm + Az, e 1,72 em média nos demais tratamentos). Em solos agrícolas, a matéria orgânica do solo (MOS) e os resíduos orgânicos (vegetais ou animais) aplicados ao solo e, o manejo desses resíduos é um dos principais fatores que altera a atividade microbiana sobre o solo e, por conseguinte os fluxos de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera

(Watanabe et al., 1999; Costa, 2005). A MOS está relacionada aos fluxos de  $\text{CH}_4$ , o qual pode ser em solo agrícola, em função das práticas de manejo utilizadas, uma importante fonte (IPCC, 2001).

O aporte de resíduos vegetais em solos cultivados com arroz irrigado normalmente repercute no aumento das emissões de  $\text{CH}_4$  do solo (Yu e Patrick, 2004; Naser et al., 2007; Ma et al., 2009), o que é decorrente da entrada de C lábil no sistema pelos resíduos e também e pelo favorecimento do processo de redução do solo (Shan et al., 2008). A quantidade de  $\text{CH}_4$  produzida é altamente dependente da quantidade de carbono orgânico disponível, proveniente da palha de arroz adicionada ao solo (Sass et al., 1991) ou adubos verdes.

Nesse estudo ficou demonstrado que os diferentes sistemas de manejo pós-colheita exerceram influencia sobre as emissões de  $\text{CH}_4$  durante o período de cultivo do arroz. Os sistemas de manejo que incorporaram palha de arroz pós-colheita (Gpc, Gpc + Gas, RFpc, RFpc + Gas e Gas) ou que retiraram essa da área (RPpc) foram aqueles que mitigaram as emissões de  $\text{CH}_4$  durante o cultivo do arroz. Esses sistemas, além de reduzirem as emissões de  $\text{CH}_4$ , que é o maior contribuidor para o potencial de aquecimento global (PAG), como será visto no capítulo III, trouxeram outro benefício, que é deixar as áreas já preparadas para a semeadura na época adequada, criando assim uma expectativa de manutenção das produtividades.

Para um mesmo local, mesma cultivar de arroz e mesma condução ao longo da estação de cultivo, tipos diferentes de manejo antes da instalação da cultura podem ser decisivos nos resultados dos efluxos de  $\text{CH}_4$  (Costa, 2005) e alterações nos sistemas de manejo com culturas de inverno como adubo verde na cultura do arroz pode efetivamente melhorar a produtividade do arroz, mas também aumentar a emissão de  $\text{CH}_4$  (Kim, 2012). Além disso, o preparo e adição de resíduos orgânicos de origem vegetal são pontos importantes para determinar a diferença entre sistemas de manejo quanto às emissões de  $\text{CH}_4$ , sendo um consenso mundial de que as práticas agrícolas com potencial de mitigar os fluxos de  $\text{CH}_4$  do solo precisam ser identificadas, estudadas e implementadas, sem comprometer a produtividade do arroz (Costa, 2005).

Nesse contexto, práticas com potencial de mitigar a emissão de  $\text{CH}_4$  em áreas cultivadas com arroz irrigado no sul do Brasil deverão ser mais estudadas, no intuito de se adotar um sistema de manejo com potencial mitigador de  $\text{CH}_4$ , mas que ao mesmo tempo possibilitem a sustentabilidade do sistema de produção.

### **3.4.3 Emissão acumulada de CH<sub>4</sub>**

Na entressafra de 2010 as emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> nos tratamentos com incorporação da palha de arroz pós-colheita com rolo-faca foram significativamente superiores aos demais sistemas de manejo avaliados (Tabela 3). Em média os tratamentos RFpc e RFpc + Gas emitiram 11 vezes mais CH<sub>4</sub> que o tratamento RPpc e 7 vezes mais que o tratamento Sm. Já na entressafra de 2011, as emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> não diferiram significativamente entre os sistemas de manejo avaliados, embora os tratamentos Gpc e Gpc + Gas tenham emitido em média 5 vezes mais CH<sub>4</sub> do que o tratamento Sm.

As maiores emissões de CH<sub>4</sub> nos tratamentos citados anteriormente estão ligadas principalmente a incorporação da palha de arroz ao solo, pois esses resíduos são fonte de C para a metanogênese (Yu e Patrick, 2004; Ma et al., 2009; Ma et al., 2012; Kim, 2012), ocasionando maior produção de CH<sub>4</sub> nesses sistemas em que a palha fica depositada sob a superfície do solo, o que aumenta a disponibilidade de C lábil para a metanogênese (Inubushi et al., 2003). O preparo do solo associado à incorporação de resíduos (resteva de arroz) implica no aumento das emissões de CH<sub>4</sub> em solos mal drenados (Ma et al., 2009; Ahmad et al., 2009). A realização antecipada das operações de preparo no solo nos tratamentos com incorporação (outono/inverno) provavelmente resultou na decomposição dos resíduos do arroz numa condição de solo mais aerado, repercutindo numa maior emissão de CO<sub>2</sub> do solo em virtude de sua condição oxidada, o que por outro lado, reduziria a quantidade de C disponível para a metanogênese na safra de arroz seguinte (primavera/verão) (Zschornack, 2011).

Os valores acumulados de CH<sub>4</sub> observados nas entressafas desse estudo são inferiores aos valores verificados durante o cultivo do arroz irrigado, corroborando com outros autores (Bhatia, 2005; Costa, 2005), que citam que os valores dos fluxos de CH<sub>4</sub> observados no período de cultivo de arroz são muitas vezes superiores aos observados durante o período de entressafra. Esses valores dos fluxos na entressafra poderão ser maiores, se anterior ao período de alagamento do arroz houver adição de adubos verdes, incorporação ou a presença de resíduos culturais sob o solo, como mostrado em outros estudos (Bhatia, 2005; Kim, 2012).

Em ambas as entressafras, os fluxos iniciais foram responsáveis pela maior parte das emissões, nos tratamentos com incorporação da palha ao solo. Em outros estudos (Costa, 2005; Bayer, 2012) também se verificou que as maiores emissões de CH<sub>4</sub> ocorreram nas primeiras semanas após o manejo dos resíduos.

Na safra de 2010/11 as emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> no tratamento Sm foram significativamente superiores ao tratamento Gpc, sendo 2 vezes superior ao Gpc (Tabela 3). Embora não tenha havido diferença significativa entre os demais tratamentos, em números absolutos, o tratamento Sm + Az, que também manteve a palha de arroz sob a superfície do solo durante toda a entressafra, emitiu quase 2 vezes mais CH<sub>4</sub> que o tratamento Gpc. Os dois tratamentos (Sm e Sm + Az) foram os maiores emissores de CH<sub>4</sub> para a atmosfera na safra 2010/11. Na safra de 2011/12 as emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> no tratamento Sm + Az foi significativamente superior aos tratamentos RFpc, Gpc e RPpc (Tabela 3). No tratamento Sm + Az, a emissão de CH<sub>4</sub> foi 2 vezes superior ao RFpc. Nessa safra, embora não tenha havido diferença significativa entre os demais tratamentos, em números absolutos, os tratamentos Sm e Sm + Az, que mantiveram a palha de arroz sob a superfície do solo durante toda a entressafra foram aqueles que apresentaram os maiores valores acumulados de CH<sub>4</sub> emitidos. O aumento das emissões de CH<sub>4</sub> nas duas safras está diretamente relacionado à quantidade de resíduo aportado no solo (Naser et al., 2007), pois a adição de C no solo (substrato para metanogênese), aliado às condições anaeróbicas do solo alagado, estimula a produção e a emissão de CH<sub>4</sub> (Dalal et al., 2008). Esses resultados corroboram com os de Bhatia (2005), que trabalhando com cultivo de arroz irrigado e diferentes fontes de nutrientes (NPK e fontes orgânicas) na Índia, verificou que onde foi adicionado somente fontes orgânicas, ou, adubação NPK complementada com fontes orgânicas, ocorreram as maiores emissões de CH<sub>4</sub>, diferindo significativamente do controle ou do solo adubado com NPK. Em outro estudo, conduzido por Bhattacharrya (2012) na Índia, a quantidade emitida de CH<sub>4</sub> no cultivo de arroz irrigado no controle foi menor que onde palha de arroz foi adicionada como fonte de nutrientes, cerca de 70 kg ha<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> no controle e 115 kg ha<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> onde foi adicionada palha de arroz, num período de cultivo de 128 dias. Kim (2012) também verificou que os valores totais de CH<sub>4</sub> foram aumentados em 80 e 250% em dois anos consecutivos de cultivo de arroz irrigado, quando adubos orgânicos foram incorporados ao solo, em comparação com adubação NPK. No trabalho de Inubushi et al. (1994) apenas a

incorporação dos resíduos de arroz 20 dias antes da inundação foi capaz de reduzir em 25% as emissões de CH<sub>4</sub> durante o cultivo do arroz, quando comparados a sistemas onde a palha permaneceu em superfície. Os resultados observados corroboram com os desse autor, pois onde a palha foi incorporada com bastante antecipação (outono) ou logo antes da semeadura do arroz (primavera), as emissões de CH<sub>4</sub> no cultivo do arroz foram reduzidas.

Do total de emissões anuais médias de CH<sub>4</sub> nesse estudo em dois anos (safra + entressafra), 98% do CH<sub>4</sub> foi emitido durante o período de cultivo do arroz irrigado e apenas 2% do total de CH<sub>4</sub> foi emitido na entressafra. Nesse contexto, é necessária a adoção de práticas agrícolas que eliminem os restos culturais do arroz pós-colheita, para que esses sejam decompostos durante a entressafra e não sirvam de substrato para a metanogênese durante o cultivo do arroz irrigado. Além disso, com a adoção de práticas adequadas pós-colheita, existe a expectativa de que ocorram as semeaduras do arroz nas épocas adequadas, distribuição das atividades ao longo do ano, manutenção das produtividades nas áreas, e o mais importante de todos, que é a mitigação das emissões de CH<sub>4</sub> durante o cultivo do arroz, já que este gás é o que gera praticamente sozinho todo o valor do PAG em lavouras de arroz (Zschornack, 2011).

Dessa forma, para reduzir as emissões anuais de CH<sub>4</sub> é importante selecionar sistemas de manejo que incorporem ou eliminem a palha de arroz durante a entressafra, para que no momento do alagamento não haja presença desses resíduos que servem como substrato para a metanogênese.

### **3.5 Conclusões**

Em áreas cultivadas com arroz irrigado, a antecipação do preparo do solo, com incorporação da palha do arroz pós-colheita com rolo-faca e grade pode ser uma alternativa de manejo capaz de mitigar as emissões anuais de CH<sub>4</sub>, já que as emissões desse gás de efeito estufa durante o cultivo do arroz irrigado são as que mais contribuem para o somatório total das emissões anuais de CH<sub>4</sub> em solos de várzea.

## **4. CAPÍTULO III – POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL E RENDIMENTO DE GRÃOS NA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DA PALHA PÓS-COLHEITA**

### **4.1 Introdução**

O sucesso de um sistema de produção agrícola depende de sua correta execução, preservando-se desse modo o sistema como um todo, gerando renda com sustentabilidade econômica e ambiental (Gomes, 2006). Uma preocupação ambiental recente é o aumento da concentração dos gases de efeito estufa (GEE): dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) na atmosfera, os quais são responsáveis pelo aquecimento global (Houghton, 2001). Os fluxos de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera são de máxima importância, pois estes GEE contribuem substancialmente para o aquecimento global observado (IPCC, 2007). Globalmente, as emissões agrícolas de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  aumentaram quase 17% de 1990 a 2005 (IPCC, 2007a), e as emissões agrícolas de  $\text{N}_2\text{O}$  são projetadas para aumentar em 35-60% até 2030, devido ao aumento do uso de N via adubos químicos e orgânicos (FAO, 2003). As concentrações atmosféricas desses gases aumentaram consideravelmente desde a revolução industrial, e ainda estão aumentando anualmente de 0,5%, 1,1% e 0,3%, respectivamente (IPCC, 2001).

Das fontes emissoras, a agricultura é responsável por aproximadamente 20% das emissões de GEE, sendo que pode atuar como fonte ou dreno destes (Johnson et al., 2005). Das emissões globais antropogênicas, em 2005, agricultura foi responsável por cerca de 50% das emissões de  $\text{CH}_4$  e 60% de  $\text{N}_2\text{O}$  (IPCC, 2007a). Dentre as fontes agrícolas emissoras de GEE, o cultivo de arroz por alagamento foi identificado como uma importante fonte atmosférica de  $\text{CH}_4$  (Zou, 2009), sendo esse gás um potente GEE, com potencial 23 vezes superior de retenção de radiação na atmosfera em relação ao  $\text{CO}_2$  (IPCC, 2007), o que o torna o segundo GEE mais eficiente em reter calor, quando se fala em aquecimento global. A cultura do arroz se destaca mundialmente, pois cerca de 150 milhões de hectares de arroz são cultivados, produzindo 590 milhões de toneladas, sendo que mais de 75% desta

produção é oriunda do sistema de cultivo irrigado (EMBRAPA, 2010). No Brasil, a cultura do arroz é extremamente importante, ocupando aproximadamente 2,9 milhões de hectares de área cultivada (SOSBAI, 2012), sendo 1,5 milhões dessas cultivados sob sistema de cultivo irrigado. O estado do Rio Grande do Sul (RS) é o maior produtor nacional, com uma área de cultivo de aproximadamente 1,1 milhão de hectares com o uso de irrigação por alagamento (IRGA, 2010), sendo responsável por 61% da produção de grãos do cereal no Brasil (EMBRAPA, 2010). Isso torna as áreas de arroz importantes, tanto economicamente, quanto fonte de alimentos e potenciais fontes emissoras de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera.

Nas várzeas cultivadas com arroz o manejo é realizado em épocas diferenciadas, com intuito de incorporar a palha e nivelar a superfície do terreno e para evitar problemas com excesso de resíduos na hora da semeadura. Nesses sistemas de manejo a palha de arroz é incorporada logo após a colheita ou antecedendo a semeadura, o que pode ter implicações na dinâmica do C e do N e influenciar nas emissões de GEE nas áreas que são utilizadas para a produção orizícola. Tanto  $\text{CH}_4$  quanto o  $\text{N}_2\text{O}$  são gases chave nas emissões de GEE que contribuem para o cálculo do potencial de aquecimento global (PAG) (IPCC 2007a), já que são importantes GEE de longa duração na atmosfera (Zou, 2009). O conceito de PAG foi desenvolvido para comparar a capacidade de cada GEE em reter o calor na atmosfera relativamente à quantidade de  $\text{CO}_2$ . O PAG de cada GEE determina a quantidade de calor que um GEE pode aprisionar em relação a uma unidade de massa de  $\text{CO}_2$  (Shine et al., 1995).

Durante o ciclo de cultivo do arroz irrigado, praticamente toda a composição do PAG é composta pelas emissões de  $\text{CH}_4$  (Zschornack, 2011), e, durante os períodos de secagem e drenagem na entressafra, o  $\text{N}_2\text{O}$  se torna mais importante (Ghosh, 2003), pois as condições para a produção e emissão desse gás são favorecidas. No cálculo do PAG, todas as emissões são usualmente transformadas em  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{CO}_2$  eq.) de acordo com a força radiativa na atmosfera de cada GEE. Flessa et al. (2002) e Maljanen et al. (2002) sugeriram que uma simultânea medição de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , e  $\text{N}_2\text{O}$  devem ser intensificadas para entender as emissões globais de GEE no agrossistema.

Dessa forma, o presente estudo teve por objetivo avaliar a contribuição de diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita do arroz sobre as emissões anuais de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  na cultura do arroz, e sua contribuição para o potencial de

aquecimento global parcial (PAGp) na entressafra e durante o cultivo do arroz irrigado e, para o potencial de aquecimento global total (PAGt) anual.

## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Caracterização do local, tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM (29° 45'S, 53° 42'W; cerca de 95 metros de altitude), Rio Grande do Sul, Brasil. O clima do local é subtropical húmido (tipo Cfa2 na classificação de Köppen) com precipitação média anual de 1.686 mm e temperatura média anual de 19,3°C. O solo foi classificado como Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico (EMBRAPA, 2006). As características do solo na camada de 0-0,1 m no início das avaliações foram as seguintes: carbono orgânico 0,6%; pH – 5,3; densidade – 1,42 g cm<sup>-3</sup>; areia – 21%; silte – 57%; argila – 22%; 21,7 mg kg<sup>-1</sup> de P e 96,5 mg kg<sup>-1</sup> de K, extraídos por Mehlich-1. Anteriormente a implantação do experimento, o solo da área foi revolvido com grade de discos e depois cultivado com arroz irrigado. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com quatro repetições em parcelas de 12 m<sup>2</sup> (3 m x 4 m) (Fig. 1).



**Fig. 1.** Vista geral da área experimental durante o período de entressafra da cultura do arroz irrigado, sob diferentes sistemas de manejo da palha após a colheita, Santa Maria, RS.

Os tratamentos avaliados foram compostos por diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita do arroz irrigado, conforme segue na tabela 1:

**Tabela 1**

Tratamentos compostos por oito sistemas diferentes de manejo da palha pós-colheita em 2010 e 2011.

Detalhes dos tratamentos	
T1 – (Sm)	Sem manejo da palha
T2 – (RFpc)	Incorporação da palha com rolo-faca pós-colheita
T3 – (Gpc)	Incorporação da palha com grade pós-colheita
T4 – (RPpc)	Retirada da palha pós-colheita
T5 – (Sm + Az)	Cultivo de azevém 30 dias pós-colheita
T6 – (Gas)	Sem manejo da palha, com grade em agosto
T7 – (Gpc + Gas)	Incorporação da palha com grade pós-colheita e grade em agosto
T8 – (RFpc + Gas)	Incorporação da palha com rolo-faca pós-colheita e grade em agosto

As parcelas dos tratamentos foram delimitadas em 17 de abril de 2010, um dia após a colheita dos grãos de arroz da cultivar Puitá Inta-CL<sup>®</sup>. A quantidade de palha de arroz que foi devolvida/distribuída na superfície do solo nas parcelas de todos os tratamentos no início do experimento foi ajustada para 6,5 Mg ha<sup>-1</sup> pós-colheita em 2010, e 11,3 Mg ha<sup>-1</sup> pós-colheita em 2011, com exceção do tratamento RPpc, onde a palha foi retirada das parcelas, permanecendo apenas uma pequena parte dos colmos das plantas que não foram cortados pela colhedora no momento da colheita.

No tratamento Sm a palha não sofreu nenhum manejo na entressafra, sendo que a semeadura do arroz em outubro foi realizada sobre a palha remanescente que ainda permanecia na superfície do solo (1,5 Mg ha<sup>-1</sup> na semeadura em 2010 e 1,1 Mg ha<sup>-1</sup> na semeadura em 2011). Nos tratamentos RFpc e Gpc a palha que estava na superfície do solo foi manejada com rolo-faca e com grade pós-colheita, respectivamente. No tratamento Sm + Az a palha não sofreu nenhum manejo e aos 31 dias após a colheita do arroz foi semeado azevém a lanço. Nesse tratamento a semeadura do arroz em outubro foi realizada sobre a palha do arroz remanescente mais a palha restante de azevém (2,1 Mg ha<sup>-1</sup> na semeadura em 2010 e 1,1 Mg ha<sup>-1</sup>

na semeadura em 2011) após a entressafra. No Gas a palha que estava na superfície do solo foi incorporada com grade de discos em agosto de 2010 e 2011. Nos tratamentos Gpc + Gas e RFpc + Gas a palha foi manejada com grade e rolo-faca pós-colheita, respectivamente, e com grade de disco também em agosto (Tabela 2). No momento da passagem do rolo-faca (tratamentos RFpc e RFpc + Gas) a parcela apresentava uma lâmina de água de aproximadamente 10 cm. Já na passagem da grade em agosto o solo encontrava-se úmido.

#### **4.2.2 Coletas e avaliações das emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O**

Na tabela 2 são apresentadas as datas de início e término das avaliações de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O durante o período experimental. Na entressafra, as avaliações foram realizadas com auxílio de um sistema composto por uma base e uma câmara conforme método da câmara estática fechada, proposto por Mosier (1989). A base quadrada em aço galvanizado ficou permanentemente no campo, inserida no solo até 0,12 m de profundidade, deixando exposta uma calha para encaixe da câmara, no momento das amostragens. As câmaras estáticas quadradas também em aço galvanizado apresentavam 0,20 m de altura e 0,40 m de largura. Durante o período de avaliações de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O na entressafra e safra nos dois anos de experimento, as bases foram alocadas nas parcelas, de modo que duas linhas de plantio do arroz passassem no interior de cada base. Durante o cultivo do arroz, as metodologias empregadas foram as mesmas utilizadas nos experimentos realizados em condições de sequeiro, com exceção da coleta das amostras de ar para as análises de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, onde além das câmaras de coleta, era colocado mais um extensor da câmara à medida que as plantas de arroz cresciam.

Cada câmara possuía um ventilador tipo “cooler” no seu interior, o qual foi conectado e ligado a uma bateria de 12 V durante 30 segundos para homogeneização da atmosfera interna, imediatamente antes das coletas das amostras. Termômetros digitais foram utilizados para monitorar a temperatura do ar no interior das câmaras a cada amostragem e no solo. Na parte superior da câmara existia uma válvula de três vias, pela qual foram retiradas as amostras de ar durante as coletas. No momento das amostragens, cada câmara foi encaixada à calha da base metálica, e em seguida foi adicionada água na calha para selar a câmara,

buscando-se impedir trocas gasosas entre o interior da câmara e o ambiente externo durante as coletas.

As amostras de ar do interior das câmaras foram coletadas com seringas de polipropileno, em três tempos: 0, 20 e 40 minutos na entressafra e em quatro tempos: 0, 8, 16 e 24 minutos durante o período de cultivo do arroz, esses tempos contados sempre após o fechamento das câmaras. Após cada coleta, as amostras de ar foram transportadas imediatamente ao laboratório e analisadas dentro do período máximo de 24 horas após a coleta de campo.

A determinação da concentração de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  na safra e entressafra foi realizada por cromatografia gasosa (Shimadzu GC – 2014 modelo Greenhouse) equipado com um detector de ionização de chama (FID) utilizado para quantificar a concentração de  $\text{CH}_4$  e outro de captura de elétrons ECD (Electron Capture Detection) para detecção de  $\text{N}_2\text{O}$  nas amostras. Os dados climáticos foram obtidos da Estação Automática de Meteorologia do Departamento de Fitotecnia (UFSM), distante 0,5 km do local do experimento.

#### ***4.2.3 Avaliações dos estoques de C no solo e rendimento de grãos***

As amostras de solo para o cálculo do estoque de C no solo foram coletadas no início do experimento ( $T_i$ ) e no final do experimento ( $T_f$ ), em todos os tratamentos. No início e ao final do experimento foram abertas em cada parcela duas trincheiras com dimensões de 30 cm x 10 cm, das quais foram retiradas amostras de solo nas camadas de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm de profundidade. Após a coleta, as amostras foram peneiradas a 4 mm para retirar os resíduos vegetais grosseiros e submetidas à secagem ao ar. O efeito dos tratamentos sobre a evolução nos estoques de C do solo foi avaliado em comparação os estoques de C total em amostras de solo coletadas na implantação do experimento ( $T_i$ ). Os teores de C foram determinados em um analisador elementar (modelo FlashEA 1112, Thermo Finnigan, Milan, Itália) por combustão seca (Nelson e Sommers, 1996). Também no início e ao final do experimento foi avaliada a densidade aparente do solo em todos os tratamentos, as quais foram utilizadas para o cálculo do estoque de C no solo.

Para avaliação das produtividades nos diferentes tratamentos, foi colhida, em cada parcela, uma área central equivalente a 2,55 m<sup>2</sup> (10 linhas x 1,5 m comprimento).

#### 4.2.4 Condução do experimento

Na tabela 2 são apresentadas em ordem cronológica as principais operações realizadas durante o período de avaliações.

**Tabela 2**

Cronograma das principais operações de campo realizadas no período de avaliações de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O.

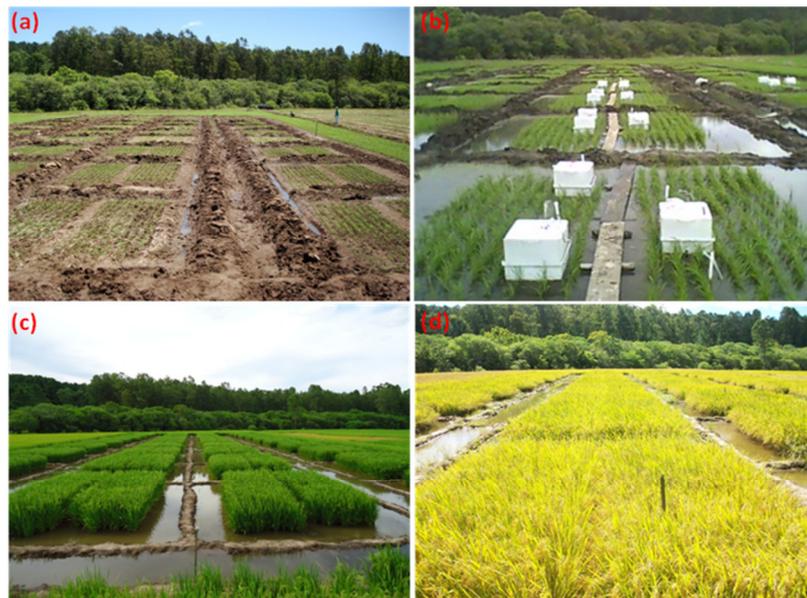
Operação de campo	Ano agrícola	
	2010/11	2011/12
Aplicação da palha nas parcelas	17 abril 2010	14 março 2011
Início das amostragens de CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O na entressafra	18 abril 2010	15 março 2011
Manejo da palha com rolo-faca pós-colheita (tratamentos RFpc e RFpc + Gas)	24 abril 2010	19 março 2011
1º manejo da palha com grade (tratamento Gpc)	03 maio 2010	05 abril 2011
Semeadura do azevém (60 kg ha <sup>-1</sup> sementes) no tratamento Sm + Az	17 maio 2010	07 maio 2011
Adubação nitrogenada no azevém (30 kg N ha <sup>-1</sup> )	16 julho 2010	01 julho 2011
Dessecação do azevém	28 setembro 2010	
Cortes do azevém (simulação de pastejo)		11 agosto e 07 outubro 2011
2º manejo da palha com grade (tratamentos Gpc + Gas, RFpc + Gas e Gas)	11 agosto 2010	18 agosto 2011
Última amostragem de CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O na entressafra	01 outubro 2010	10 outubro 2011
Semeadura do arroz (90 kg ha <sup>-1</sup> de sementes)	22 outubro 2010	18 outubro 2011
Início das amostragens de CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O no período de cultivo do arroz irrigado	12 novembro 2010	19 novembro 2011
1ª adubação nitrogenada de cobertura (50 kg N ha <sup>-1</sup> ) em todas as parcelas e início da irrigação permanente	20 novembro 2010	21 novembro 2011
2ª adubação nitrogenada de cobertura (35 kg N ha <sup>-1</sup> ) em todas as parcelas	22 dezembro	22 dezembro 2011
3ª adubação nitrogenada de cobertura (35 kg N ha <sup>-1</sup> ) em todas as parcelas	15 janeiro 2011	11 janeiro 2012
Suspensão da irrigação permanente nas parcelas	03 março 2011	07 março 2012
Última amostragem de CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O no período de cultivo do arroz irrigado	10 março 2011	08 março 2012
Colheita	10 março 2011	12 março 2012

A produção de matéria seca (MS) no tratamento com azevém foi de 3,1 e 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> nas entressafras em 2010 e 2011, respectivamente.

A semeadura do arroz na safra 2010/11 foi realizada em 22/10/2010, e na safra 2011/12 em 18/10/2011, ambas as semeaduras dentro da época recomendada de semeadura na depressão central do estado do Rio Grande do Sul, utilizando-se 90 kg ha<sup>-1</sup> de sementes da cultivar Puitá Inta-CL<sup>®</sup> e 300 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula NPK 5-20-20 em adubação de base, num total de 18 linhas em cada parcela. A população de plantas foi ajustada para 250 plantas por metro quadrado, seguindo as recomendações para o cultivo de arroz irrigado no estado do RS.

Antes da semeadura do arroz, as parcelas dos tratamentos Sm, RPpc e Sm + Az não sofreram nenhum tipo de manejo por ocasião da semeadura, apenas no primeiro ano de cultivo, o solo dos demais tratamentos sofreu um nivelamento superficial com uma lâmina hidráulica niveladora a fim de melhorar as condições para a semeadura do arroz. No primeiro e segundo ano de cultivo, em 20/11/2010 e 21/11/2011, respectivamente, foi iniciada a irrigação permanente, em torno de 20 dias após a emergência das plantas, conforme a tabela 2. Após o início da irrigação se manteve a altura da lâmina de água com 10 cm de profundidade na safra 2010/11 e 7 cm na safra 2011/12.

A adubação de cobertura com N foi realizada em três épocas: 1<sup>a</sup> aplicação anterior ao no início da irrigação permanente (50 kg de N ha<sup>-1</sup>); 2<sup>a</sup> aplicação no início do perfilhamento (35 kg de N ha<sup>-1</sup>); e a 3<sup>a</sup> aplicação no início da diferenciação da panícula (IP) (35 kg de N ha<sup>-1</sup>), totalizando 135 kg de N (15 kg na semeadura e 120 kg parcelados em cobertura). Os demais tratamentos culturais utilizados foram semelhantes aos utilizados nas áreas de cultivo de arroz irrigado no RS. Na figura 2 pode ser vista a disposição geral do experimento durante o cultivo do arroz irrigado, em diferentes estádios de desenvolvimento.



**Fig. 2.** Vista geral do experimento durante o período de cultivo do arroz irrigado, nos diferentes estádios de desenvolvimento durante a safra, segundo Counce et al. (2000): a) estágio de desenvolvimento vegetativo (V2/V3); b) estágio de desenvolvimento vegetativo (V5/V6); c) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R3); d) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R9); Santa Maria, RS.

#### 4.2.5 PAG

Para calcular o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) em cada sistema de manejo, nas entressafras e durante o período de cultivo do arroz, foram contabilizados as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O quantificadas durante esses períodos. Para calcular o potencial de aquecimento global total (PAGt) anual em cada sistema de manejo, foram contabilizados as emissões anuais de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, os gastos energéticos com fertilização nitrogenada e manejos do solo, e, as perdas ou ganhos de C em cada sistema de manejo. Dessa forma, o PAGt foi calculado convertendo-se os gastos energéticos, as perdas e ganhos de C e emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, anualmente, para kg CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup>, segundo as equações:

Período de entressafra:

**PAGp** = (CH<sub>4</sub> x 23) + (N<sub>2</sub>O x 298) + (CO<sub>2</sub> eq. dos gastos energéticos com manejos com grade e rolo-faca e aplicação de N em cobertura no azevém)

Período de cultivo do arroz irrigado:

**PAGp** = (CH<sub>4</sub> x 23) + (N<sub>2</sub>O x 298) + (CO<sub>2</sub> eq. dos gastos energéticos com manejos com a semeadura do arroz e aplicação de N em cobertura no arroz)

Período anual (entressafra + período de cultivo do arroz irrigado):

**PAGt** = (CH<sub>4</sub> x 23) + (N<sub>2</sub>O x 298) + (CO<sub>2</sub> eq. das perdas ou ganhos ( $\Delta$ C) de C nos sistemas) + (CO<sub>2</sub> eq. dos gastos energéticos com manejos com grade e rolo-faca, semeadura do arroz e aplicação em cobertura de N em cobertura no azevém e no arroz)

sendo: CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O correspondem as emissões acumuladas de cada gás durante a entressafra e o período de cultivo do arroz (Mg ha<sup>-1</sup>); 23 e 298 são os valores de PAG para o CH<sub>4</sub> e o N<sub>2</sub>O, respectivamente, considerando-se um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (Forster et al., 2007); e o CO<sub>2</sub> eq. das perdas ou ganhos nos sistemas foi calculado pela conversão das variações dos estoques de C no solo ( $\Delta$ C) em CO<sub>2</sub> eq.. O CO<sub>2</sub> eq. dos gastos energéticos referentes aos manejos foi calculado pela conversão dos gastos de combustível para realizar os manejos com grade e rolo-faca, de fabricação e aplicação de N-uréia em cobertura, para CO<sub>2</sub> eq. em cada sistema de manejo, segundo coeficientes verificados por Lal (2004).

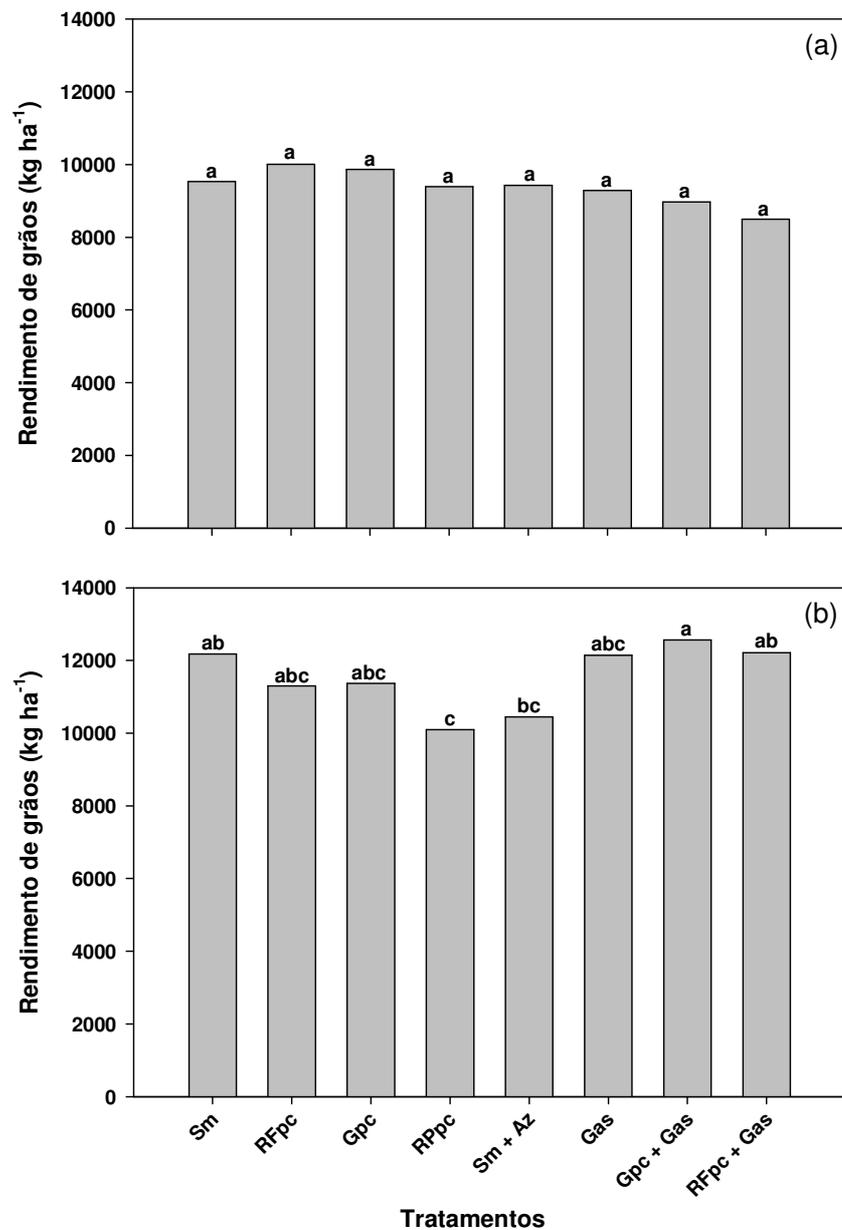
#### **4.2.6 Análise estatística**

Os dados referentes ao rendimento de grãos foram submetidos ao teste de Tukey a 5% de probabilidade para a comparação de médias, sem transformação dos dados, e, os dados referentes ao PAGp e PAGt foram submetidos ao teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de probabilidade para a comparação de médias, sem transformação dos dados, utilizando-se dos procedimentos disponíveis no programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2000).

### **4.3 Resultados**

#### **4.3.1 Rendimento de grãos**

Na safra 2010/11 o rendimento de grãos variou entre 8.497 kg ha<sup>-1</sup> no tratamento RFpc + Gas e 10.003 kg ha<sup>-1</sup> no tratamento RFpc (Fig. 3a). Nesse mesmo período o rendimento de grãos em kg ha<sup>-1</sup>, seguiu a seguinte ordem decrescente entre os tratamentos: RFpc (10.003) > Gpc (9.866) > Sm (9.529) > Sm + Az (9.430) > RPpc (9.393) > Gas (9.289) > Gpc + Gas (8.968) > RFpc + Gas (8.497). Não foram observadas diferenças significativas entre os sistemas de manejo em relação ao rendimento de grãos na safra 2010/11.

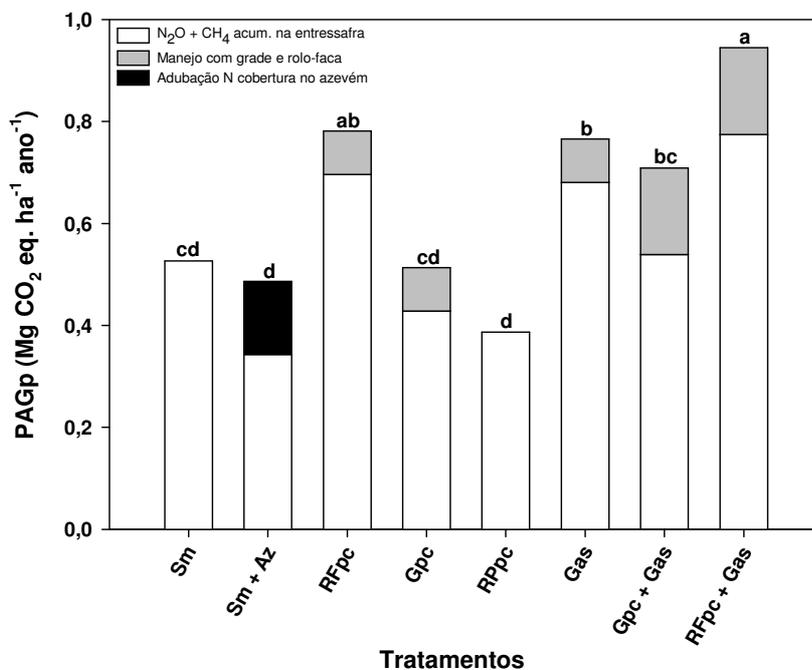


**Fig. 3.** Rendimento de grãos na cultura do arroz irrigado, sob diferentes sistemas de manejo pós-colheita, nos anos agrícolas de 2010/11 (a) e 2011/12 (b). Letras iguais nas barras não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância.

Na safra 2011/12 houve um incremento no rendimento de grãos em todos os tratamentos em relação à safra 2010/11. O rendimento de grãos variou de 10.099 kg ha<sup>-1</sup> no tratamento RPpc até 12.561 kg ha<sup>-1</sup> no tratamento Gpc + Gas (Fig. 3b). Na safra 2011/12 o rendimento de grãos em kg ha<sup>-1</sup>, seguiu a seguinte ordem decrescente entre os tratamentos: Gpc + Gas (12.562) > RFpc + Gas (12.217) > Sm (12.179) > Gas (12.146) > Gpc (11.376) > RFpc (11.303) > Sm + Az (10.449) > RPpc (10.099). Em relação ao rendimento de grãos na safra 2010/11, o tratamento Gpc + Gas foi significativamente superior em relação aos tratamentos RPpc e ao Sm + Az.

#### 4.3.2 PAGp na entressafra

Com base nas emissões acumuladas na entressafra de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> eq. dos gastos de combustível referentes aos manejos com grade e rolo-faca, e custos em CO<sub>2</sub> eq. para a fabricação e aplicação de N-uréia em cobertura no azevém, todos convertidos para CO<sub>2</sub> eq., foi estimado o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) para o período de entressafra, expresso em Mg de CO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Fig. 4 e tabela 5).



**Fig. 4.** Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) na entressafra da cultura do arroz irrigado, em CO<sub>2</sub> eq. das emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> na entressafra e dos gastos em CO<sub>2</sub> eq. referentes

aos manejos com grade e rolo-faca e, a aplicação de N-uréia em cobertura no azevém, em diferentes sistemas de manejo pós-colheita. Os valores do PAGp são a média de 2 anos de avaliações. Letras iguais nas barras não diferem entre si pelo teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de significância.

No período de entressafra os valores do PAGp variaram de 0,39 a 0,94 Mg de CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Fig. 4). O PAGp, em Mg CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, na entressafra, seguiram a seguinte ordem decrescente entre os tratamentos: RFpc + Gas (0,94) > RFpc (0,78) > Gas (0,77) > Gpc + Gas (0,71) > Sm (0,53) > Gpc (0,51) > Sm + Az (0,49) > RPpc (0,39).

Durante o período de entressafra, dentre as emissões em CO<sub>2</sub> eq. do N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, custos em CO<sub>2</sub> eq. referentes aos manejos com grade e rolo-faca e aplicação de N no azevém, o N<sub>2</sub>O foi que teve o maior percentual de contribuição para o PAGp em todos os tratamentos (Tabela 3).

### Tabela 3

Contribuição das emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, dos manejos com grade e rolo-faca e aplicação de N em cobertura no azevém, para o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) durante o período de entressafra.

Tratamento	Contribuição para o PAGp da entressafra (%)				Total
	N <sub>2</sub> O <sup>(1)</sup>	CH <sub>4</sub>	Manejos com grade e rolo-faca	N cobertura azevém	
Sm	91,3	8,7	0,0	0,0	100,0
Sm + Az	60,6	9,9	0,0	29,4	100,0
RFpc	56,7	32,4	10,9	0,0	100,0
Gpc	50,3	33,2	16,6	0,0	100,0
RPpc	87,5	12,5	0,0	0,0	100,0
Gas	83,6	5,3	11,1	0,0	100,0
Gpc + Gas	51,0	25,0	24,0	0,0	100,0
RFpc + Gas	56,1	25,9	18,0	0,0	100,0

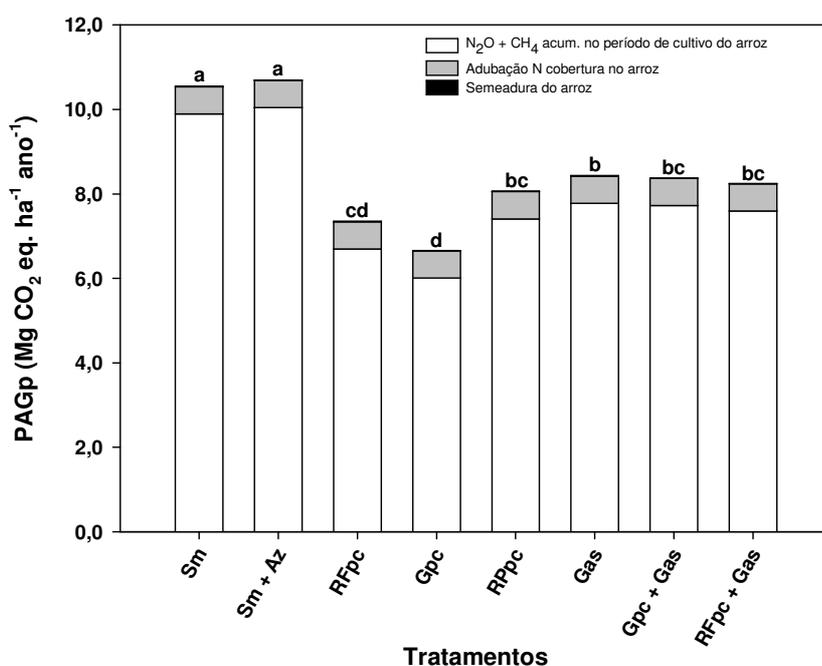
<sup>(1)</sup> Os valores em % dessa tabela foram calculados em relação aos valores de PAGp observados durante o período de entressafra da cultura do arroz irrigado. Os valores das contribuições são médias de dois anos de avaliações.

A maior contribuição do N<sub>2</sub>O para o PAGp foi observada no tratamento Sm (91,3%), onde houve também um baixo percentual de contribuição do CH<sub>4</sub>, dos manejos e do N em cobertura. Já a menor contribuição do N<sub>2</sub>O para o PAGp foi

observada no tratamento Gpc (50,3%), onde também houve uma maior contribuição do CH<sub>4</sub> para o PAGp.

### 4.3.3 PAGp durante o cultivo do arroz

Com base nas emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> durante o cultivo do arroz, CO<sub>2</sub> eq. do gasto com combustível referente à semeadura do arroz, e, CO<sub>2</sub> eq. do custo de fabricação e aplicação de N-uréia em cobertura no arroz irrigado, todos convertidos em CO<sub>2</sub> eq., foi estimado o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) para o período de cultivo do arroz, expresso em Mg de CO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Fig. 5 e tabela 5).



**Fig. 5.** Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) durante o período de cultivo do arroz irrigado, em CO<sub>2</sub> eq. das emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> durante o cultivo do arroz, dos gastos em CO<sub>2</sub> eq. referentes aos manejo de semeadura e aplicação de N-uréia em cobertura no arroz, em diferentes sistemas de manejo pós-colheita. Os valores de PAGp são a média de 2 anos de avaliações. Letras iguais nas barras não diferem entre si pelo teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de significância.

No período de cultivo do arroz, os valores do PAGp variaram de 6,66 até 10,70 Mg de CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Fig. 5). O PAGp, em Mg CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, seguiu a seguinte ordem decrescente entre os tratamentos: Sm + Az (10,70) > Sm (10,55)

> Gas (8,43) > Gpc + Gas (8,37) > RFpc + Gas (8,25) > RPpc (8,07) > RFpc (7,35) > Gpc (6,66).

Durante o período de cultivo do arroz irrigado, dentre as emissões em CO<sub>2</sub> eq. do N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, custos em CO<sub>2</sub> eq. referentes à semeadura e aplicação de N no arroz, o CH<sub>4</sub> foi que teve o maior percentual de contribuição para o PAGp em todos os tratamentos (Tabela 4).

**Tabela 4**

Contribuição das emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, dos manejos com grade e rolo-faca e aplicação de N em cobertura no azevém, para o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) durante o período de cultivo do arroz irrigado.

Tratamento	Contribuição para o PAGp da entressafra (%)				Total
	N <sub>2</sub> O <sup>(1)</sup>	CH <sub>4</sub>	Semeadura do arroz	N cobertura arroz	
Sm	-0,2	94,0	0,1	6,1	100,0
Sm + Az	-0,4	94,2	0,1	6,0	100,0
RFpc	0,3	90,8	0,2	8,7	100,0
Gpc	0,1	90,1	0,2	9,7	100,0
RPpc	0,3	91,6	0,2	8,0	100,0
Gas	-0,2	92,4	0,1	7,6	100,0
Gpc + Gas	-0,1	92,2	0,1	7,7	100,0
RFpc + Gas	0,0	92,1	0,1	7,8	100,0

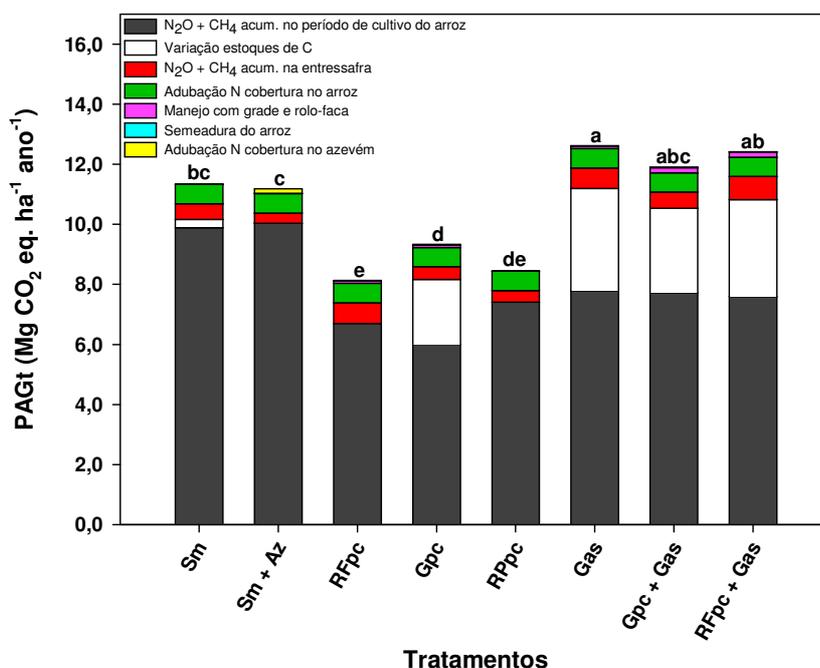
<sup>(1)</sup> Os valores em % dessa tabela foram calculados em relação aos valores do PAGp observados durante o período de cultivo do arroz irrigado. Os valores das contribuições são médias de dois anos de avaliações.

A maior contribuição do CH<sub>4</sub> foi observada no tratamento Sm + Az (94,2%), onde houve também um baixo percentual de contribuição do N<sub>2</sub>O, da semeadura e do N em cobertura, para o PAGp. Já a menor contribuição do CH<sub>4</sub> para o PAGp foi observada no tratamento Gpc (90,1%), onde também houve uma maior contribuição da semeadura do arroz e do N aplicado em cobertura no arroz, para o PAGp.

#### **4.3.4 PAGt e relação PAGt/rendimento de grãos**

Com base nas emissões anuais acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, gastos de combustível dos manejos com grade e rolo-faca, ΔC do solo, semeadura do arroz e aplicação de N-uréia em cobertura no azevém e no arroz irrigado, todos convertidos

para CO<sub>2</sub> eq., foi estimado o potencial de aquecimento global total (PAGt) anual, expresso em Mg de CO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para os oito sistemas de manejo do solo avaliados nesse estudo (Fig. 6 e tabela 5). Anualmente, os valores do PAGt variaram de 8,00 a 12,62 Mg de CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Fig. 6).



**Fig. 6.** Potencial de aquecimento global total (PAGt) anual, em CO<sub>2</sub> eq. das emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, gastos com sementeira e maneios com grade e rolo-faca, perdas ou ganhos de C no solo ( $\Delta$ C) e, fabricação e aplicação de N-uréia na cultura do arroz irrigado, em diferentes sistemas de manejo pós-colheita. Os valores de PAGt são a média de 2 anos de avaliações. Letras iguais nas barras não diferem entre si pelo teste t LSD (Least Square Difference) a 5% de significância.

O PAGt, em Mg CO<sub>2</sub> eq. ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, seguiu a seguinte ordem decrescente entre os tratamentos: Gas (12,62) > RFpc + Gas (12,42) > Gpc + Gas (11,90) > Sm (11,35) > Sm Az (10,79) > Gpc (9,33) > RPpc (8,33) > RFpc (8,00).

Na tabela 5 são apresentados os valores em CO<sub>2</sub> eq. dos maneios com grade e rolo-faca, do  $\Delta$ C do solo, dos custos com a sementeira do arroz e com as aplicações de N em cobertura, os valores de PAGp na entressafra e durante o período de cultivo do arroz, de PAGt e, a relação entre os valores do PAG total/rendimento de grãos em cada tratamento.

**Tabela 5**

CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> eq.) dos manejos com grade e rolo-faca, do  $\Delta C$  do solo, dos custos com a semeadura do arroz e com as aplicações de N em cobertura, dos valores de potencial de aquecimento global parcial (PAGp) na entressafra e durante o período de cultivo do arroz, do potencial de aquecimento global total (PAGt) anual e, índice PAGt/rendimento de grãos (PAGt/rend. grãos) médios para oito sistemas de manejo pós-colheita na cultura do arroz irrigado, nas entressafras de 2010 e 2011 e durante o período de cultivo do arroz em 2010/11 e 2011/12.

Tratamento	PAGp entressafra <sup>(1)</sup>	PAGp safra	PAG ( $\Delta C$ )	PAG manejo grade e rolo-faca	PAG manejo semeadura arroz	PAG N cobert. arroz	PAG N cobert. azevém	PAGt	Rend. médio de grãos	PAGt/rend. grãos
					Mg CO <sub>2</sub> eq. ha <sup>-1</sup>				Mg ha <sup>-1</sup>	Mg CO <sub>2</sub> /Mg grãos
Sm	0,52	9,89	0,27	0,00	0,01	0,64	0,00	11,35	10,85	1,04
RFpc	0,70	6,70	-0,14	0,09	0,01	0,64	0,00	8,00	10,65	0,75
Gpc	0,43	6,00	2,15	0,09	0,01	0,64	0,00	9,33	10,62	0,88
RPpc	0,39	7,41	-0,12	0,00	0,01	0,64	0,00	8,33	9,75	0,85
Sm + Az	0,34	10,04	-0,40	0,00	0,01	0,64	0,14	10,79	9,94	1,08
Gas	0,68	7,78	3,42	0,09	0,01	0,64	0,00	12,62	10,72	1,18
Gpc + Gas	0,54	7,72	2,82	0,17	0,01	0,64	0,00	11,90	10,76	1,10
RFpc + Gas	0,77	7,59	3,23	0,17	0,01	0,64	0,00	12,42	10,36	1,20

<sup>(1)</sup> PAGp entressafra = (CH<sub>4</sub> x 23) + (N<sub>2</sub>O x 296); PAGp safra = (CH<sub>4</sub> x 23) + (N<sub>2</sub>O x 296); PAG  $\Delta C$ : perdas ou ganhos de C no solo, convertidos para CO<sub>2</sub> eq.; PAG manejo com grade e rolo-faca: 4 passadas de grade ou rolo-faca multiplicado pelos coeficientes verificados por Lal (2004) em CO<sub>2</sub> eq.; PAG aplicação de N em cobertura no azevém e no arroz: custos em CO<sub>2</sub> eq. para a fabricação e aplicação de 135 kg ha<sup>-1</sup> de N-uréia, segundo o coeficiente verificado por Lal (2004); PAGt = PAGp entressafra + PAGp safra + PAG  $\Delta C$  + PAG manejo com grade e rolo-faca + PAG aplicação de N em cobertura no azevém e no arroz. Os valores das contribuições são médias de dois anos de avaliações.

O índice PAGt/rend. de grãos variou de 0,75 Mg CO<sub>2</sub>/Mg grãos no tratamento RFpc a 1,20 Mg CO<sub>2</sub>/Mg grãos no tratamento RFpc + Gas. O índice PAGt/rend. de grãos seguiu a seguinte ordem decrescente entre os tratamentos: RFpc + Az > Gas > Gpc + Gas > Sm + Az > Sm > Gpc > RPpc > RFpc. Anualmente, dentre todas as fontes avaliadas nesse estudo que contribuíram para o PAGt, as emissões de CH<sub>4</sub> foram aquelas que se destacaram perante as demais, como maiores contribuidores para o PAGt em todos os tratamentos (Tabela 6).

**Tabela 6**

Contribuição das emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, dos manejos com grade e rolo-faca e aplicação de N em cobertura no azevém, para o potencial de aquecimento global total (PAGt) anual.

Tratamento	Contribuição para o PAGp da entressafra (%)							
	N <sub>2</sub> O <sup>(1)</sup>	CH <sub>4</sub>	$\Delta C$	Manejos com grade e rolo-faca	Semeadura do arroz	N cobertura arroz	N cobertura azevém	Total

	faca							
Sm	4,0	87,8	2,4	0,0	0,1	5,7	0,0	100,0
Sm + Az	2,4	93,9	-3,7	0,0	0,1	6,0	1,3	100,0
RFpc	5,8	86,6	-1,7	1,1	0,2	8,0	0,0	100,0
Gpc	2,8	66,2	23,1	0,9	0,1	6,9	0,0	100,0
RPpc	4,3	89,2	-1,4	0,0	0,2	7,7	0,0	100,0
Gas	5,0	62,1	27,1	0,7	0,1	5,1	0,0	100,0
Gpc + Gas	3,0	66,4	23,7	1,4	0,1	5,4	0,0	100,0
RFpc + Gas	4,3	63,1	26,0	1,4	0,1	5,2	0,0	100,0

<sup>(1)</sup> Os valores em % dessa tabela foram calculados em relação aos valores do PAGt observados anualmente. Todos os valores contidos nessa tabela são médias de dois anos de avaliações.

A maior contribuição do CH<sub>4</sub> foi observada no tratamento Sm + Az (93,9%), onde houve também baixos percentuais de contribuição das outras fontes de CO<sub>2</sub> eq. para o PAGt. Já a menor contribuição do CH<sub>4</sub> para o PAGp foi observada no tratamento Gas (62,1%), onde também houve uma maior contribuição das outras fontes de CO<sub>2</sub> eq. para o PAGt, em especial do CO<sub>2</sub> eq. do  $\Delta C$ . Dentre as fontes avaliadas e que contribuíram para o PAGt, a operação de semeadura do arroz foi a que teve a menor contribuição para o PAGt, tendo contribuído com cerca de 0,1 a 0,2% do valor do PAGt nos tratamentos.

## 4.4 Discussão

### 4.4.1 Rendimento de grãos

Na safra 2010/11, embora não tenham sido verificadas diferenças significativas entre os tratamentos, em números absolutos, os sistemas de manejo com incorporação da palha pós-colheita tiveram os maiores rendimentos de grãos, com destaque para o tratamento RFpc, que teve produtividade 17% superior ao tratamento Gas, em que foi verificada a menor produtividade. A não existência de diferença significativa entre os tratamentos em relação ao rendimento de grãos nesse ano de cultivo pode estar relacionada ao fato de ser o primeiro ano de avaliações com esses manejos, e que ainda não exerceram efeito sobre o rendimento de grãos da cultura do arroz. Além disso, o período foi chuvoso e com menor radiação solar, o que pode não ter propiciado a expressão máxima do potencial de rendimento de grãos de cada sistema de manejo. O aumento médio no rendimento de grãos em todos os tratamentos na safra 2011/12, em relação à safra

2010/11 foi de 23% e, pode estar relacionado à menor ocorrência de chuvas, com dias mais secos e maior radiação solar em 2011/12.

Na safra 2011/12 o tratamento Gpc + Gas apresentou diferença significativa no rendimento de grãos em relação aos tratamentos RPpc e ao Sm + Az. O tratamento Gpc + Gas teve rendimento de grãos 24% superior ao tratamento RPpc e 20% ao tratamento Sm + Az. Em média, nos dois anos de cultivo do arroz irrigado, os tratamentos Sm + Az e RPpc tiveram menor rendimento de grãos em relação aos demais tratamentos. Isso deve estar relacionado com a reciclagem dos nutrientes, que ficam novamente disponíveis no solo para a absorção das plantas nos tratamentos com incorporação ou manutenção da palha nas parcelas, em relação aos tratamentos em que a palha foi removida das parcelas ou em que o solo foi cultivado com azevém sem adubação com fósforo (P) e potássio (K) no inverno. Estudando o acúmulo de nutrientes pelo arroz influenciado pela incorporação de palha em um Gleissolo, Camargo et al. (1995) concluíram que a adição de palha de arroz no solo não afeta as concentrações de P e Ca + Mg, mas proporciona aumento de carbono (C), nitrogênio (N) e K. Isso pode ter efeitos sobre o rendimento de grãos mais à frente, durante o período de cultivo do arroz. O menor rendimento médio, principalmente em 2011/12, no tratamento RPpc está associado com a exportação dos nutrientes contidos na palha de arroz, quando essa foi removida das parcelas no tratamento RPpc. Já no tratamento Sm + Az os nutrientes foram absorvidos pelo azevém, e conseqüentemente, refletindo sobre o rendimento de grãos durante o cultivo do arroz, em especial na safra 2011/12.

Os resultados desse estudo corroboram com os resultados observados em outros estudos (Surckha et al., 2006; Polthanee et al., 2008), em que verificaram que quando a palha de arroz foi incorporada ao solo, o rendimento de grãos foi maior, enquanto que sem a presença de palha os rendimentos foram menores. Os resíduos podem ser utilizados para aumentar a produtividade quando incorporados ao solo, pois, a sua composição apresenta 0,5–1,5% N, 0,2–1,0% P e 0,8–1,0% K (Mongkol, 2006). Quando incorporado ao solo, a palha proporciona à liberação de 22 a 59% do fósforo entre a quinta e a 23ª semana, já a liberação do K atinge o percentual de 79% após a 5ª semana (Mishra et al., 2001). De acordo com SOSBAI (2012), o manejo adequado dos resíduos pode melhorar a produtividade da lavoura de arroz, melhoria da fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes. Nesse contexto, os manejos que incorporaram a palha durante a entressafra, além de obterem os maiores

rendimentos de grãos, também tiveram os menores valores de PAGt. Sendo assim, estes sistemas de manejo da palha pós-colheita tem potencial para manter as produtividades, e potencial para mitigar o PAGt.

#### **4.4.2 PAGp na entressafra**

Na média das duas entressafras, o maior PAGp foi observado no tratamento RFpc + Gas, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos, com exceção do RFpc, que apresentou o 2º maior valor do PAGp (Fig. 4). O RFpc + Gas teve um PAGp 144% superior ao RPpc e 94% superior ao SM + Az. O maior contribuidor para o PAGp no tratamento RFpc + Gas foi N<sub>2</sub>O, com 56%, e que foi todo emitido na entressafra e, o CH<sub>4</sub>, que contribuiu com 26%. Além disso, os manejos com rolo-faca e grade também influenciaram no valor do PAGp, pois contribuíram com 18%. Essa diferença no valor do PAGp no tratamento RFpc + Gas em relação aos demais, é devida principalmente as emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, que são dois GEE 296 e 23 vezes mais potentes que o CO<sub>2</sub> (IPCC, 2007) e, dos gastos com combustível, visto que o tratamento RFpc + Gas recebeu manejo em duas épocas (pós-colheita e no mês de agosto). As práticas de cultivo e de manejo que causam alguma perturbação no solo podem afetar as suas propriedades químicas, físicas e biológicas, e, portanto, influenciar na liberação de GEE (Baggs e Blum, 2004; Oorts et al., 2007), contribuindo de forma diferenciada quando o solo é revolvido e a palha é incorporada ou retirada das parcelas, ou ainda, quando alguma cultura é introduzida no sistema. Gomes (2006) também verificou que as emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> foram alteradas devido aos manejos do solo, sendo que as maiores contribuições de N<sub>2</sub>O para o PAG foram observadas em SPD, quando comparadas ao SPC, e, as maiores contribuições de CH<sub>4</sub> foram observadas no SPC, quando comparadas ao SPD, semelhante aos resultados observados nesse estudo na entressafra.

As maiores contribuições do N<sub>2</sub>O para o PAGp na entressafra estão relacionadas principalmente com a disponibilidade de substrato para os processos microbianos e, com a dinâmica da umidade do solo (Pinto et al., 2004). As condições de aerobiose do solo na entressafra permitem que os processos de nitrificação e desnitrificação ocorram, produzindo maiores quantidades de N<sub>2</sub>O e aumentando a contribuição desse gás na entressafra, em relação ao CH<sub>4</sub> e aos custos em CO<sub>2</sub> eq.

com os manejos. Já os menores valores do PAGp foram observados nos tratamentos em que a palha foi retirada das parcelas (RPpc) e naquele em que o solo foi cultivado com azevém (Sm + Az). Esses dois tratamentos teriam valores semelhantes, não fosse a contribuição de 29% da adubação nitrogenada de cobertura no Sm + Az, que ocasionou um aumento no PAGp, pois a adubação nitrogenada é uma das principais causas das emissões globais de N<sub>2</sub>O (Ruser et al., 2006). O menor valor do PAGp no tratamento RPpc é devido a retirada da palha, que ocasionou baixas emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> na entressafra, enquanto que o contrário foi observado para os tratamentos que continham palha incorporada ou sob a superfície do solo. Já no tratamento Sm + Az, o baixo valor de PAGp é devido ao cultivo de azevém, que absorve o N disponível no solo que seria usado na nitrificação, e após, na desnitrificação. Como consequência disso, há uma redução na quantidade produzida de N<sub>2</sub>O, que é o principal GEE que contribui para o PAGp na entressafra, já que ele é todo emitido nesse período.

Considerando somente o período de entressafra, os sistemas de manejo RPpc, Sm + Az, Gpc e Sm foram aqueles promoveram o menor PAGp durante o período de entressafra.

#### **4.4.3 PAGp durante o cultivo do arroz**

Durante o período de cultivo do arroz o maior PAGp foi verificado nos tratamentos Sm e Sm + Az, que tiveram diferença significativa em relação aos demais tratamentos (Fig. 5). Os tratamentos Sm + Az e Sm tiveram um PAGp 61 e 58% superiores ao tratamento Gpc e, 45 e 43% superiores ao tratamento RFpc, ambos tratamentos que tiveram os menores valores de PAGp durante o período de cultivo. Quando a palha de arroz foi incorporada ao solo pós-colheita com grade e rolo-faca, houve redução no PAGp em relação aos demais tratamentos, principalmente em relação aqueles tratamentos sem incorporação. O maior contribuidor para o PAGp em todos os tratamentos, sem dúvida, foi o CH<sub>4</sub>, tendo contribuído acima de 90% em todos os tratamentos. O restante do valor do PAGp foi oriundo das operações de semeadura e aplicação de N em cobertura no arroz. Esses resultados corroboram com os encontrados por Ahmad et al. (2009), que trabalhando com SPD e SPC adubado e não adubado, verificou que a maior

contribuição para o PAG foi do CH<sub>4</sub>. Segundo Khalil e Inubushi (2007) e Zschornack (2011), o CH<sub>4</sub> é o principal contribuinte para o PAG em solos alagados.

Essas maiores diferenças entre os tratamentos que se assemelham ao sistema de plantio direto (SPD) (Sm e Sm + Az) e os que se assemelham ao cultivo mínimo (CM) ou sistema de plantio convencional (demais tratamentos, com exceção do RFpc), são devido principalmente a existência de substrato (palha remanescente da entressafra) no momento do alagamento. Esse material vegetal é fonte de C para a metanogênese (Ma et al., 2012), o que aumenta a disponibilidade de matéria orgânica lábil (Wassmann et al., 1993), fonte de C para a metanogênese. Isso resultou em maiores quantidades de CH<sub>4</sub> emitidos nos tratamentos Sm e Sm + Az no presente estudo, ocasionando uma maior contribuição para os valores do PAGp nesses dois tratamentos em relação aos demais. Os resultados do PAGp durante o cultivo do arroz são próximos aos observados em estudos em outros países, por exemplo, em um experimento conduzido por Bhatia et al. (2005) na Índia, verificou-se que durante o cultivo de arroz irrigado o PAG variou entre 11,8 e 17,9 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> em diferentes sistemas de manejo, e somente trabalhando com fertilização nitrogenada esse valor foi de 13,9 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. Já Bhattacharrya (2012) verificou que o PAG variou de 5,8 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> em um cultivo de arroz sem fertilização, com uréia atingiu 8,0 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> e 9,4 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> com fertilização nitrogenada a base de uréia e adição de palha de arroz incorporada, com produtividades que variaram de 3,5 a 5,6 Mg ha<sup>-1</sup>. Em estudo na região sul do Brasil, em uma área de várzea com cultivo de arroz irrigado, Zschornack (2011) verificou que os valores do PAGp variaram de 9,5 a 11,3 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> nos sistemas de SPD e CM, respectivamente.

Considerando somente o período de cultivo do arroz irrigado, é necessária a escolha de sistemas de manejo que incorporem a palha pós-colheita na entressafra, como o RFpc e Gpc, pois são esses sistemas que permitem a decomposição dos resíduos culturais durante a entressafra e, tiveram o menor valor de PAGp durante o período de cultivo do arroz irrigado.

#### **4.4.4 PAGt e relação PAGt/rendimento de grãos**

Em relação ao PAGt anual, os tratamentos puderam ser separados por grupos, os que tiveram maior PAGt (Gas, Gpc + Gas e RFpc + Gas), os que tiveram valores de PAGt intermediários (Sm e SM + Az) e, os que tiveram valores de PAGt

menores (RFpc, Gpc e RPpc). Os tratamentos que receberam manejo com grade em agosto (Gas, Gpc + Gas e RFpc + Gas) não apresentaram diferença significativa entre si, mas foram significativamente superiores aos tratamentos que receberam apenas um manejo da palha pós-colheita (Gpc e RFpc) ou onde a palha foi retirada das parcelas (RPpc) (Fig. 6). Já os tratamentos que se assemelham ao SPD (Sm e SM + Az) e que apresentaram valores de PAGt intermediários aos dois grupos de tratamentos citados anteriormente, e também foram significativamente superiores aos tratamentos Gpc, RFpc e RPpc.

Além de todos os custos em CO<sub>2</sub> eq., um fator importante que contribuiu para que os tratamentos com gradagem em agosto tivessem os maiores valores de PAGt, foi a perda de C do solo nesses tratamentos, ocasionado principalmente pelo preparo com grade, que expõem a matéria orgânica do solo (MOS) ao ataque dos microrganismos. Esse efeito do SPC sobre as perdas de C do solo também é observado nos solos sob condições de sequeiro, quando comparados com solos sob SPD (Gomes, 2006; Costa, 2008; Campos, 2011; Calonego, 2012). Não fosse as perdas de C do solo, o grupo de tratamentos com maiores emissões teria valores de PAGt menores que os tratamentos em que a palha não foi incorporada ao solo (tratamentos Sm e Sm + Az). O tratamento Gas teve o maior PAGt dentre os tratamentos avaliados nesse estudo, sendo significativamente 58, 51 e 35% superior aos tratamentos RFpc, RPpc e Gpc, que tiveram os menores valores de PAGt. Esse mesmo tratamento Gas também foi significativamente superior em 17 e 11% em relação aos tratamentos Sm + Az e Sm, respectivamente.

Os resultados de PAGt do presente trabalho são próximos aos observados por Grace et al. (2003), que verificaram em um sistema de rotação trigo-arroz que o PAG foi entre 12,8 e 16,1 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, dependendo das práticas de manejo adotadas, enquanto Datta (2011) cita o valor de uma sucessão arroz e arroz com um valor de PAG de 8,6 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. Entretanto esse autor utilizou somente os valores acumulados de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> para calcular o PAG. Já no presente estudo, além das emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, também foram contabilizados para o PAGt os custos em CO<sub>2</sub> com os manejos, fertilização nitrogenada e variações nos estoques e C no solo. Robertson et al. (2000) e Six et al. (2004) citam que as mudanças nos estoques de C no solo devem ser considerados no cálculo do PAG, para avaliar o potencial de mitigação de gases em sistemas de manejo do solo. Já Ahmad et al. (2009), cultivando arroz inundado em dois sistemas de manejo fertilizados e não

fertilizados, verificou que o PAG atingiu de 16,4 a 26,0 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. Em um estudo realizado na região sul do Brasil com arroz irrigado por dois anos, Zschornack (2011) verificou que o PAGp (N<sub>2</sub>O + CH<sub>4</sub>) foi de 9,5; 10,0 e 13,5 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> para os sistemas de manejo plantio direto, cultivo mínimo e preparo convencional, mas as produtividades obtidas foram entre 6,7 e 7,2 Mg ha<sup>-1</sup>, enquanto que nesse estudo as produtividades médias de dois anos de cultivo quase chegaram em 11 Mg ha<sup>-1</sup>, o que poderia explicar em parte as maiores emissões nesse trabalho, pois quanto maior a biomassa de plantas maior o potencial de emissão principalmente de CH<sub>4</sub> (Aulakh, 2000a).

Em relação às contribuições para o PAGt, os gastos de CO<sub>2</sub> eq. com os manejos com grade, rolo-faca e semeadura, produção e aplicação de N no arroz e no azevém, e o  $\Delta C$ , tiveram baixa contribuição para o PAGt quando comparados com o CH<sub>4</sub>, que contribuiu em média com 77% para o PAGt anual. Sem dúvida, o período de cultivo do arroz irrigado é o que mais contribuiu anualmente para o PAGt, especialmente por causa das elevadas emissões de CH<sub>4</sub>. Os resultados desse estudo corroboram com o de Bhattacharyya (2012), que verificou a existência de correlações positivas significativa entre as emissões de CH<sub>4</sub> e o PAG. Com base nesses resultados, esforços visando à redução da emissão de gases em solos cultivados com arroz irrigado devem ser direcionados, sobretudo, a mitigação das emissões de CH<sub>4</sub> do solo (Zschornack, 2011).

Quando separamos por sistemas de manejo, verifica-se que esse valor das contribuições de CH<sub>4</sub> para o PAG total é maior ainda, ficando em 88 e 94% nos sistemas de manejo Sm e Sm + Az, respectivamente, enquanto que os sistemas de manejo em que o CH<sub>4</sub> menos contribuiu foram são o Gpc, Gas, Gpc + Gas e o RFpc + Gas, com 66, 62, 66 e 63%, respectivamente, ambos com incorporação da palha de arroz ao solo em algum momento durante o período de entressafra. Nesses tratamentos que tiveram as menores contribuições de CH<sub>4</sub>, também houve as maiores contribuições para o PAGt pelas perdas de C do solo. Esses resultados das maiores contribuições do CH<sub>4</sub> para o PAGt corroboram com de outros estudos (Bhatia, 2005; Khalil e Inubushi, 2007; Ahmad et al., 2009; Datta, 2011) que trabalhando com arroz irrigado, também verificaram que a maior contribuição para o PAG foi do CH<sub>4</sub>, que é o principal contribuinte para o PAG em solos alagados (Zschornack, 2011).

No contexto de mudanças climáticas globais e emissões antropogênicas dos GEE para a atmosfera, a sustentabilidade pode ser mensurada considerando o potencial de aquecimento global do sistema de manejo, entretanto, devido a importante função do solo de produtividade de alimentos e fibras, acredita-se que a produtividade deva ser considerada na avaliação da sustentabilidade (Gomes, 2006). A busca por práticas de manejo capazes de mitigar as emissões de GEE não deve redundar na diminuição da produtividade do arroz (Yu e Patrick, 2004). Dessa forma, utilizou-se a razão PAGp/RG para avaliar a efetividade de um determinado sistema de manejo na mitigação das emissões de CH<sub>4</sub> e de N<sub>2</sub>O (Shang et al., 2011). Levando-se o exposto acima em consideração, a relação PAGt/rendimento de grãos (PAGt/rend. grãos) foi calculada anualmente para os oito diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita (Tabela 5). Os tratamentos RFpc, RPpc e Gpc se mostraram mais eficientes energeticamente, pois tiveram as menores relações entre o PAGt e a produtividade de grãos, ou seja, produziram maior quantidade de grãos com menores emissões de GEE. Esses três tratamentos foram eficientes em reduzir em 58, 51 e 35% os valores do PAGt em relação ao tratamento Gas, onde foi verificado o maior PAGt. Os resultados desse estudo são próximos aos encontrados por Zschornack (2011), mas divergem entre os sistemas de manejo, pois no seu estudo esse autor verificou menores relações de PAGt/rend. grãos no SPD, enquanto nesse estudo foi verificado os menores valores nos sistemas onde a palha de arroz foi incorporada pós-colheita com grade ou rolo-faca e onde ela foi retirada das parcelas. No entanto, Zschornack (2011) não levou em consideração os valores das emissões na entressafra da cultura do arroz, dos gastos em CO<sub>2</sub> eq. referentes aos combustíveis utilizados com os manejos, e dos gastos com a fabricação e aplicação de N no arroz. Nesse estudo todos esses fatores foram levados em consideração e a produtividade foi maior em alguns sistemas de manejo, fatores esses que contribuíram para as diferenças encontradas nesse trabalho.

Dessa forma, esse estudo conseguiu demonstrar que os sistemas de manejo da palha pós-colheita tem influência sobre as emissões de GEE e o PAGt em áreas de cultivo de arroz irrigado, e que existem sistemas de manejo que são potenciais mitigadores das emissões de GEE em comparação com outros sistemas, e, que permitem a manutenção das produtividades.

## 4.5 Conclusões

Sistemas de cultivo que envolvam a incorporação da palha do arroz logo após a colheita da cultura ou a retirada da palha das parcelas, reduzem o potencial de aquecimento global sem diminuir o rendimento de grãos, em relação aos sistemas que não incorporam a palha de arroz ao solo.

O índice PAGt/Rendimento de grãos indicou que quando os resíduos culturais são incorporados ao solo logo após a colheita ou são retirados das parcelas, uma menor quantidade de gases de efeito estufa é emitida para cada quilograma de grãos produzido, sendo esses sistemas de manejos mais eficientes e sustentáveis. Por outro lado, os sistemas que se assemelham ao SPD, mantendo a palha sob a superfície do solo durante toda a entressafra, apresentam maiores emissões de óxido nitroso e metano, ou ainda aqueles sistemas que recebem gradagem antes da semeadura (no mês de agosto), perdem grandes quantidades de C do solo, resultando em um PAGt elevado nesses sistemas, mostrando-se menos eficientes e de baixa sustentabilidade.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cultivo do arroz sob condições de alagamento tem sido citado como uma atividade agrícola com elevado potencial, em especial em relação às emissões de gases de efeito estufa, como o CH<sub>4</sub>. Embora em diversos estudos realizados em outros países se verifique esse comportamento, esses trabalhos trazem informações em relação às emissões de gases de efeito estufa especialmente do período de cultivo de arroz, sem considerar o período de entressafra. No sul do Brasil, as pesquisas envolvendo as emissões de gases de efeito estufa e sistemas de manejo do solo na cultura do arroz irrigado são recentes, sendo necessários mais estudos para o seu melhor entendimento, em especial em relação à definição de estratégias eficazes para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa em áreas de várzea cultivadas com arroz irrigado.

Os resultados desse trabalho demonstram a importância dos sistemas de manejo do solo e da palha de arroz pós-colheita, no período de entressafra. Verificou-se que os sistemas de manejo da palha de arroz pós-colheita influenciam na emissão de gases de efeito estufa, e que alguns sistemas de manejo são potencialmente mais eficazes na mitigação das emissões no período de entressafra e, outros, no período de cultivo do arroz, além de manterem as altas produtividades. Dessa forma com as medidas das emissões de gases, somadas a contabilização dos gastos energéticos e as perdas ou ganhos de carbono em cada sistema de manejo, foi possível calcular o potencial de aquecimento global, que leva em consideração todos os gastos em carbono equivalente anual de cada sistema. Assim, esse trabalho demonstrou que anualmente alguns sistemas de manejo, como incorporação da palha de arroz logo após a colheita com grade ou rolo-faca, ou ainda retirar a palha das parcelas, tem potencial mitigador das emissões de gases de efeito estufa em áreas de várzea que são utilizadas para o cultivo do arroz no sul do Brasil. Esse trabalho contemplou algumas perspectivas para estudos futuros, anteriormente propostas em outros trabalhos realizados no sul do Brasil (Costa, 2005, Zanatta, 2009 e Moterle, 2011). No entanto são necessários mais estudos, especialmente de longa duração, que possibilitem:

- avaliar as emissões de gases de efeito estufa em diferentes regiões produtoras de arroz no sul do Brasil, com diferentes climas e classes de solos;

- calcular o potencial de aquecimento global total anual em diferentes sistemas de manejo em diferentes regiões produtoras de arroz no sul do Brasil;
- avaliar a interação da utilização de diferentes doses de nitrogênio com a utilização de diferentes sistemas de manejo do solo, além da utilização de irrigação intermitente em regiões produtoras de arroz no sul do Brasil;
- avaliar as emissões de gases de efeito estufa em sistemas naturais (várzeas), no intuito de realizar a comparação com várzeas que são cultivadas com arroz irrigado, uma vez que estas últimas são melhores drenadas e ficam sob condições de alagamento praticamente somente o período de cultivo do arroz.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agostinetto, D. et al. Potencial de Emissão de Metano em Lavouras de Arroz Irrigado. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.32, n.6, p.1073-1081, 2002.

Ahmad, S., Li, C., Dai, G., Zhan, M., Wang, J., Pan, S., Cao, C., 2009. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China. *Soil and Tillage Research Amsterdam* 106, 54-61.

Aulakh, M.S., Bodenbender, J., Wassmann, R., Rennenberg, H., 2000a. Methane transport capacity of rice plants I Influence of methane concentration and growth stage analyzed with an automated measuring system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58, 357-366.

Aulakh, M.S., Bodenbender, J., Wassmann, R., Rennenberg, H., 2000b. Methane transport capacity of rice plants. II. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58, 367-375.

Aulakh, M.S., Wassmann, R., Bueno, C., Rennenberg, H., 2001. Impact of root exudates of different cultivars and plant development stages of rice (*Oryza sativa* L.) on methane production in a paddy soil. *Plant and Soil* 230, 77-86.

Aulakh, M.S., Wassmann, R., Rennegberg, H., 2001a. Methane emissions from rice field – quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options. *Advances in Agronomy San Diego* 70, 193-260.

Baggs, E.M., Chebii, J., Ndufa, J.K., 2006. A short-term investigation of trace gas emissions following tillage and no-tillage of agroforestry residues in western Kenya. *Soil and Tillage Research* 90, 69–76.

Baggs, E.M., Stevenson, M., Pihlatic, A., Regar, A., Cook, H., Cadisch, G., 2003. Nitrogen oxide emissions following application of residues and fertilizer under zero and conventional tillage. *Plant and Soil* 254, 361-270.

Baggs, E.M., Blum, H., 2004. CH<sub>4</sub> oxidation and emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from Lolium perenne swards under elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Soil Biology & Biochemistry* 36, 713-723.

Ball, B.C., Scott, A., Parker, J.P., 1999. Field N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil Till* 53, 29-39.

Bayer, C., Gomes, J., Vieira, F.C.B., Zanatta, J.A., Piccolo, M.C., Dieckow, J., 2012. Methane emission from soil under long-term no-till cropping system. *Soil and Tillage Research* 124, 1-7.

Bhandral, R. et al. 2007. Transformation of nitrogen and nitrous oxide emission from grassland soils as affected by compaction. *Soil Tillage & Research* 94, 482-492.

Bharati, K., Mohanty, S.R., Rao, V.R., et al., 2001. Influence of flooded and non-flooded conditions on methane efflux from two soils planted to rice. *Chemosphere – Global Change Science, Oxford* 3, 25-32.

Bhattacharyya, P., Roy, K.S., Neogi, S., Adhya, T.K., Rao, K.S., Manna, M.C., 2012. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice. *Soil and Tillage Research* 124, 119–130.

Bhatia, A., Pathak, H., Jain, N., Sing, P.K., Singh, A.K., 2005. Global warming potential of manure amended soils under rice–wheat system in the Indo-Gangetic plains. *Atmospheric Environment* 39, 6976–6984.

Boeckx, P., Van Cleemput, O., 2001. Estimates of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from agricultural lands in various regions in Europe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60, 35–47.

Bossio, D.A., William, R.H., Mutters, R.G., et al., 1999. Methane pool and flux dynamics in a rice field following straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 1313-1322.

Bouwman, A.F., 1990. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. In: *Bouwman Soils and the greenhouse effect*. Wiley England, 61-127.

Cai, Z., Xing, G., Yan, X., Xu, H., Tsuruta, H., Yagi, K., Minami, K., 1997. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. *Plant and Soil* 196, 7-14.

Cai, Z., SHAN, Y., XU, H., 2007. Effects of nitrogen fertilization on CH<sub>4</sub> emissions from rice fields. *Soil Sci. Plant Nutr.* 53, 353–361.

Calonego, J.C., Santos, C.H., Tiritan, C.S., Júnior, J.R.C., 2012. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. *Revista Caatinga* 25, 128-135.

Camargo, F.A.O., Santos, G.A., Rossiello, R.O., Zonta, E., 1995. Incorporação de palha de arroz em um Gleissolo e efeitos no rendimento da cultura do arroz irrigado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 30, 983-987.

Campos B.C., Amado, T.J.C., Tornquist, C.G., Nicoloso, R.S., Fiorin, J.E., 2011. Long-term C-CO<sub>2</sub> emissions and carbon crop residue mineralization in an oxisol under different tillage and crop rotation systems. *Revista Brasileira Ciência do Solo* 35, 819-832.

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

Cerri, C.C., Maia, S.M.F., Galdos, M.V., Cerri, C.E.P., Feigl, B.J., Bernoux, M., 2009. Brazilian Greenhouse Gas Emissions: The importance of Agriculture and Livestock. *Scientia Agricola* 66, 831-843.

Cicerone, R. J. et al. 1983. Seasonal variation of methane flux from a California rice paddy. *Journal of Geophysical Research* 88, 1022-1024.

Costa, F. 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. 128p. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

Costa.F.S. 2008. Diurnal variation of methane emission from a paddy field under Rice cultivation in the Southern Brazil. *Revista Ciência Rural* 38, 2049-2053.

Counce, P.A., Keisling, T.C., Mitchell, A.J., 2000. A uniform, objective, and adaptative system for expressing rice development. *Crop Science* 40, 436-443.

Chapuis, L., E., Wrage, N., Metay, A., Chotte, J.L., Bernoux, M., 2007. Soils a sink for N<sub>2</sub>O of review. *Global Change Biology* 13, 1–17.

Dalal, R., Allen, D., Livesley, S., Richards, G., 2008. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review. *Plant Soil* 309, 43–76.

Datta, A., Rao, K.S., Santra, S.C., Mandal, T.K., Adhya, T.K., 2011. Greenhouse gas emissions from rice based cropping systems: Economic and technologic challenges and opportunities. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 16, 597–615.

Dobbie, K.E., Smith, K.A., 2001. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N<sub>2</sub>O emissions from an imperfectly drained gleysol. *European Journal of Soil Science* 52, 667-673.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2<sup>a</sup> ed. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 2006. 306p.

EMBRAPA e CNPMA. Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: emissões de óxido nitroso proveniente de solos agrícolas. Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, 2006.

EMBRAPA. Segundo inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: emissões de metano do cultivo de arroz. Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, 2010. 50p.

Escobar, L. F. Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo do solo do planalto médio do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado-UFSM, 104 p, 2008.

FAO. 2003. Weed management for developing countries. Addendum 1, by, R. Labrada, ed. Rome. (Disponível em <http://www.fao.org>).

Ferreira, D. F. Sistemas de análises estatística para dados balanceados. Lavras: UFLA/DEX/SISVAR, 2000. 145 p.

Flessa, H., Ruser, R., Schilling, R., Lofffield, N., Munch, J.C., Kaiser, E.A., Beese, F., 2002. N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes in potato fields: automated measurement, management effects and temporal variation. *Geoderma* 105, 307-325.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schutz, M., Van Dorland, R., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, USA, pp. 129–234.

Garcia, J.L., PATEL, B., OLLIVIER, B., 2000. Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic archaea. *Anaerobe* 6, 205.

Gogoi, N., Baruah, K.K., Gogoi, B., Gupta, P.K., 2005. Methane emission characteristics and its relation with plant and soil parameters under irrigated rice ecosystem of north-east India. *Chemosphere* 59 (2), 1677–1684.

Gomes, J. Emissão de gases do efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo. Porto Alegre (Tese de Tese de doutorado). 2006. 151 p.

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

Gomes, J., Zschornack, T., Bayer, C., Marcolin, E., Macedo, V.R.M., Rosa, C.M., Silva, P.R., 2010. Mitigação das emissões de metano e de óxido nitroso em diferentes sistemas de preparo do solo cultivado com arroz irrigado no Sul do Brasil. *Anais Fertbio*.

Ghosh, S., Majumdar, D., Jain, M.C., 2003. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India, *Chemosphere. Science Direct* 51, 181-195.

Grace, P.R., Harrington, L., Jain, M.C., Robertson, G.P., 2003. Longterm sustainability of tropical and subtropical rice–wheat system: an environmental perspective. In: Ladha, J.K. (Ed.), *Improving the Productivity and Sustainability of Rice–wheat Systems: Issues and Impacts*. CSSA and SSSA, Madison, WI, ASA Special Publication 65, 27-41.

Harada, H., Kobayashi, H., Shindo, H., 2007. Reduction in greenhouse gas emissions by no-tilling rice cultivation in Hachirogata polder, northern Japan: Life-cycle inventory analysis. *Soil Science and Plant Nutrition*. 53, 668-677.

Hou, A.X., Chen, G.X., Wang, Z.P., Van Cleemput, O., Patrick Jr., W.H., 2000. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2180-2186.

Houghton, Y., Ding, D.J., Griggs, M., Noguer, P. J., Van Der Linden J. T., and Xiaosu, D., 2001. *Climate Change: The Scientific Basis*. United King: IPCC.

Huang, Y., Zhang, W., Zheng, X., Li, J., Yu, Y., 2004. Modeling methane emission from rice paddies with various agricultural practices. *Journal. Geophysics* 109.

Lida, T., Deb, S.K., Kharbuja, R.G., 2007. Nitrous oxide emission measurement with acetylene inhibition method in paddy fields under flood conditions. *Paddy and Water Environmental* 5, 83-91.

Inubushi, K., Muramatsu, Y., Umebayashi, M., 1994. Effect of incorporation timing of rice straw on methane emissions from paddy soil. *Soil Science and Plant Nutrition* 65, 22-26.

Inubushi, K., Cheng, W., Aonuma, S., Hoque, M.M., Kpyabasho, K., Miura, S., Kim, H.Y., Okada, M., 2003. Effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on CH<sub>4</sub> emission from a rice paddy soil. *Glob. Change Biol.* 9, 1458–1464.

IPCC. *Climate change 2001: the scientific basis*. United kingdom: Cambridge University Press, 2001. 881p.

IPCC. *Carbon dioxide capture and storage*. METZ, B.; DAVIDSON, O.; CONINCK, H.; LOOS, M.; MEYER, L. (Eds). Cambridge University press, New York, 2005. 431 p.

IPCC, 2007a. *Agriculture*. In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R. (Eds.), *Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA.

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

IRGA. Instituto Rio Grandense do Arroz. Porto Alegre, 2010.  
<http://www.irga.rs.gov.br/index.php>. Acesso ao site em março de 2011.

IRRI. <http://www.irri.org/science/ricestat/index.asp>, 2004.

Janseens, I.A., Freibauer, A., Ciais, P., et al., 2003. Europe's biosphere absorbs 7–12% of anthropogenic carbon emissions. *Science* 300, 1538–1542.

Jacinte, P.A., & LAL, R., 2005. Labile carbon and methane uptake as affected by tillage intensity in a Mollisol. *Soil & Tillage Research* 80, 35-45.

Jantalia, C.P., Dos Santos, H.P., Urquiaga, S., Boddey, R.M., Alves, B.J.R., 2008. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 82, 161–173.

Johnson, J.M.F., Reicosky, D.C., Allmaras, R.R., Sauer, T.J., Venterea, R.T., Dell, C.J., 2005. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agriculture in the central USA. *Soil & Tillage Research* 83, 73–94.

Kessavalou, A. et al., 1998. Greenhouse gas fluxes following tillage and wetting in a wheat-fallow cropping system. *Journal on Environmental Quality, Madison* 27, 1105-1116.

Khalil, M.I., Inubushi, K., 2007. Possibilities to reduce rice straw-induced global warming potential of a sandy paddy soil by combining hydrological manipulations and urea-N fertilizations. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 2675-2681.

Kim, S.Y., Gutierrez, J., Kim, P.J., 2012. Considering winter cover crop selection as green manure to control methane emission during rice cultivation in paddy soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment - Science Direct* 161, 130-136.

Lal, R., 2004. Carbon emission from farm operations. *Environment International* 30, 981-990.

Lemer, J., Roger, P., 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology* 37, 25-50.

Liang, W., Shi, Y., Zhang, H., Yue, J., Huang, G., 2007. Greenhouse Gas Emissions from Northeast China Rice Fields in Fallow Season, *Pedosphere – Science Direct* 17, 630-638.

Linn, D.M., Doran, J.W., 1984. Effect of water-filled pore-space on carbon-dioxide and nitrous-oxide production in tilled and no tilled soils. *Soil Science Society of America Journal* 48, 1267–1272.

Liu, X.J., Mosier, A.R., Halvorson, A.D., Zhang, F.S., 2006. The impact of nitrogen placement and tillage on NO, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes from a clay loam soil. *Plant and Soil* 280, 177–188.

Liu, X.J., Mosier, A.R., Halvorson, A.D., Reule, C.A., Zhang, F.S., 2007. Dinitrogen and N<sub>2</sub>O emissions in arable soils: Effect of tillage, N source and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 2362-2370.

Liu, S., Qin, Y., Zou, J., Liu, Q., 2010. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N<sub>2</sub>O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China. *Science of the Total Environment* 408,906-913.

Ma, Y., Yu, Q., Tang, H., Yang, S., Eneji, E.A., 2009. Effects of tillage and straw management on soil properties and greenhouse gas emissions from paddy field. *Soil & Tillage Research* xxx xxx–xxx.

Ma, J., Ma, E., Xu, H., Yagi, K., Cai, Z., 2009. Wheat straw management affects CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice fields. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 1022–1028.

Ma, Y., Wang, J., Zhou, W., Yan X., Xiong, Z., 2012. Greenhouse gas emissions during the seedling stage of rice agriculture as affected by cultivar type and crop density. *Biology Fertility Soils* 48, 589–595.

Machida, T., Nakazawa, T., Fujii, Y.S., Watanabe, O., 1995. Increase in the atmospheric nitrous oxide concentrations during the last 250 years. *Geophysical Research Letters* 22, 2921–2924.

Majumdar, D., Kumar, S., Pathak, H., Jain, M.C., Kumar, U., 2000. Reducing nitrous oxide emission from an irrigated rice field of North India with nitrification inhibitors. *Agriculture Ecosystems & Environment – Science Direct* 81, 163-169.

Maljanen, M., Martikainen, P.J., Aaltonen, H., Silvola, J., 2002. Short-term variation in fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in cultivated and forested organic boreal soils. *Soil Biology and Biochemistry – Science Direct* 34, 577-584.

Mariko, S., Harazono, Y., Owa, N., Nouchi, I., 1991. Methane in flooded soil water and the emission through rice plants to the atmosphere. *Environment Experimental Botany* 31, 343–350.

MCT, 2009. Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Informações Gerais e Valores Preliminares, Brasília, 24 de novembro de 2009 (24 de novembro de 2009).

Mei, B., Zheng, X., Xie, B., Dong, H., Zhou, Z., Wang, R., Deng, J., Cui, F., Tong, H., Zhu, J., 2009. Nitric oxide emissions from conventional vegetable fields in southeastern China. *Atmospheric Environment – Science Direct* 43, 2762-2769.

Mishra, B., Sharma, P.K., Bronson, K.F., 2001. Decomposition of rice straw and mineralization of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium in wheat field soil in western Uttar Pradesh. *Journal Indian Society of Soil Science* 49, 419-424.

Mitra, S., Jain, M.C., Kumar, S., et al., 1999. Effect of rice cultivars on methane emission. *Agriculture Ecosystems & Environment* 73, 177-183.

Mitsch, W.J., Wu, X., 1995. Wetlands and global change. In: Lal, R. et al. (Soil Management and greenhouse effect. Boca Raton: CRC Lewis, 1995. P.205-230. (Advances in soil science)

Mkhabela, M.S., Madani, A., Gordon, R., Burton, D., Cudmore, D., Elmi, A., Hart, W., 2008. Gaseous and leaching nitrogen losses from no-tillage and conventional tillage systems following surface application of cattle manure. *Soil & Tillage Research* 98, 187-199.

Mongkol, T.A.P., 2006. Improvement of paddy soil for organic rice (in Thai). Department of Extension Cooperative, Ministry of Agriculture and cooperatives 22.

Moore, T.R., Dalva, M., 1993. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils. *Journal of Soil Science* 44, 651-664.

Moreira, F.M de S., Siqueira, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. 2. ed. atual. eampl. Lavras: Editora UFLA, 2006.

Mosier, A.R., 1989. 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 175-187.

Moterle, D.F. Efluxo de metano em solo sob manejos de irrigação e cultivares de arroz irrigado. 2011. 146 F. Tese de doutorado (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS. 2011.

Naser, H.M., Nagata, O., Tamura, S., Hatano, R., 2007. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* 53, 95-101.

Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Black, C.A., ed. *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods* Madison. Soil Science of America and American Society of Agronomy, 961-1010.

Neue, H., 1993. Methane emission from rice fields: Wetland rice fields may make a major contribution to global warming. *Biology Science* 43, 466-73.

Oorts, K., Merckx, R., Gréhan, E., Labreuche, J., Nicolardot, B., 2007. Determinants of annual fluxes of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France. *Soil & Tillage Research* 95, 133-148.

Omonode, R.A., Vyn, T.J., Smith, D.R., Hegymegi, P.; Gál, A., 2007. Soil carbon dioxide and methane fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn-soybean rotations. *Soil & Tillage Research* 95, 182-195.

Passianoto, C.C., et al. Emissions of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, and NO in conventional and no-till management practices in Rondônia, Brazil. *Biology and Fertility of Soils* 38, 200-205. 2003.

Pathak, H., Bhatia, A., Prasad, S., Singh, S., Kumar, S., Jain, M.C., Kumar, U., 2002. Emission of nitrous oxide from rice wheat system of Indo-Gangetic plains of India. *Environmental Monitoring and Assessment* 77, 163-178.

Pavei, M.A. Decomposição de resíduos culturais e emissões de gases do efeito estufa em sistemas de manejo do solo em Ponta Grossa (PR). 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

Pinto, M., Merino, P., Prado, A., Estavillo, J.M., Yamulki, S., Gebauer, G., Piertzak, S., Lauf, J., Oenema, O., 2004. Increased emissions of nitric oxide and nitrous oxide following tillage of a perennial pasture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70, 13–22.

Piva, J.T. Emissão de óxido nitroso e metano em um latossolo bruno submetido a sistemas de preparo e integração lavoura-pecuária, 2010. 57p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

Polthanee, A. et al. Effect of rice straw management and organic fertilizer application on growth and yield of dry direct-seeded rice. *Paddy and Water Environment*, v.6 p.237–241, 2008.

Reddy, K.R., DeLaune, R.D., 2008. *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. CRC Press 806.

Robertson, G.P., Paul, E.A., Harwood, R.R., 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289, 1922-1925.

Rochette, P., Angers, D.A., Denis Côte, D., 2000. Soil Carbon and Nitrogen Dynamics Following Application of Pig Slurry for the 19th Consecutive Year: I. Carbon Dioxide Fluxes and Microbial Biomass Carbon. *Soil Science Society of America Journal* 64, 1389–1395.

Rochette, P., Tremblay, N., Fallon, E., Angers, D.A., Chantigny, M.A., MacDonald, J.D., Bertrand, N., Parent, L., 2010. N<sub>2</sub>O emissions from an irrigated and non-irrigated organic soil in eastern Canada as influenced by N fertilizer addition. *European Journal of Soil Science* 61, 186–196.

Ruser, R., Flessa, H., Russow, R., Schmidt, G., Buegger, F., Munch, J.C., 2006. Emission of N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 263-274.

Ruschel, A.P., 1992. O efeito estufa e a cultura arrozeira. *Lavoura Arrozeira* 45, 3-4.

Sass, R. L., et al. Mitigation of methane emissions from rice fields: possible adverse effects of incorporated rice straw. *Global Biogeochemical Cycles*, Washington, v. 5, n. 3, p. 275-287, Sept. 1991.

Shan, Y., CAI, Z., HAN, Y., JOHNSON, S. E., BURESH, R.J., 2008. Organic acid accumulation under flooded soil conditions in relation to the incorporation of wheat and Rice straws with different C:N ratios. *Soil Science and Plant Nutrition* 54, 46-56.

Shang, Q., Yang, X., Gao, C., Wu, P., Liu, J., Xu, Y., Shen, Q., Zou, J., Guo, S., 2011. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments. *Global Change Biology* 17, 2196-2210.

Shine, K.P., Derwent, R.G., Wuebbles, D.J., Morcrette, J.J., 1995. Radiative forcing of climate. In: Houghton, J.T. (Ed.), *Climate change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 47-68.

Singh, S.N., 2001. Exploring correlation between redox and other edaphic factors in field and laboratory conditions in relation to methane efflux. *Environment international* 27, 265-274.

Six, J., Feller, C., Deneff, K., Ogle, S.M., Sa, J.C.M., Albrecht, A., 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effect of no-tillage. *Agronomie* 22, 755-775.

Six, J., Ogle, S., M., Breidt, F. J., Conant, R. T., Mosier, A. R., Paustian, K., 2004. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. *Global Change Biology* 10, 155-160.

Smith, K.A., Dobbie, K.E., Ball, B.C., Bakken, L.R., Sitaula, B.K., Hansen, S. et al., 2000. Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. *Global Change Biology* 6, 791-803.

Smith, P., Goulding, K.W., Smith, K.A., Powlson, D.S., Smith, J.U., Falloon, P., Coleman, K., 2001. Enhancing the carbon sink in European agricultural soils: including trace gas fluxes in estimates of carbon mitigation potential. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60, 237-252.

Smith, K.A., Ball, T., Conen, F., Dobbie, K.E., Massheder, J., Rey, A., 2003. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal Soil Science* 54, 779-791.

Smith, P.; Martino, D.; Cai, Z.; Gwary, D.; Janzen, H.; Kumar, P.; McCarl, B.; Ogle, S.; O'Mara, F.; Rice, C.; Scholes, B.; Sirotenko, O. Agriculture. In: Metz, B.; Davidson, O.R.; Bosch, P.R.; Dave, R.; Meyer, L.A. Climate change 2007: Mitigation. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom & New York: Cambridge University Press, 2007. p.497-540.

Sosbai. Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. Itajaí, SC: SOSBAI, 2012. 179 p.

Sousa, R. O. Oxirredução em solos alagados afetada por resíduos vegetais. 2001. 164f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.

Surckha, 2006. Effect of straw on yield components of rice (*Oryza sativa* L.) under rice-rice cropping system. Journal of Agronomy & Crop science 192, 92-101.

Tanji, K.K., Gao, S., Scardaci, S.C., Chow, A.T., 2003. Characterizing redox status of paddy soils with incorporated rice straw, Geoderma – Science Direct 114, 333-353.

Tedesco, M.J. et al. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 1995. 215 p.

USDA. Production, supply and distribution online – Foreign Agricultural Service. 2010. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdResult.aspx>>. Acesso em: 26 set. 2011.

Ussiri, D.A.N., Lal, R., Jarecki, M.K., 2009. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. Soil & Tillage Research 104, 247-255.

Vinten, A.J.A., Ball, B.C., O'Sullivan, M.F., Henshall, J. K., 2002. The effects of cultivation method, fertilizer input and previous sward type on organic C and N storage and gaseous losses under spring and winter barley following long-term leys. Journal of Agricultural Science 139, 231–243.

Wang, Z., Ineson, P., 2003. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. Soil Biology and Biochemistry 35, 427-433.

Wassmann, R., Papen, H., Rennenberg, H., 1993. Methane emission from rice paddies and possible mitigation strategies, *Chemosphere – Science Direct* 26, 201-217.

Wassmann, R., Neue, H.U., Alberto, M.C.R., et al., 1996. Fluxes and pools of methane in wetland rice soil with organic inputs. *Environmental Monitoring and Assessment* 42, 163-173.

Wassmann, R., Neue, H.U., Bueno, C., Lantin, R.S., Alberto, M.C.R., Buendia, L.V., Bronson, K., Papen, H., Rennenberg, H., 1998. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates. *Plant and Soil* 203, 227–237.

Watanabe, A. et al. Evaluations of origins of CH<sub>4</sub> carbon emitted from rice paddies. *Journal of Geophysical Research, Washington*, v.104, p.23623 23629, 1999.

Weiler, D. A. Decomposição de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo e emissões de óxido nitroso. 2010. 72 F. Dissertação de mestrado (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS. 2010.

Xing, G.X. 1998. N<sub>2</sub>O emission from cropland in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52, 249–254.

Xing, G.X., Cao, Y.C., Shi, S.L., Sun, G.Q., Du, L.J., Zhu, J.G., 2002. Denitrification in underground saturated soil in a rice paddy region. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 1593-1598.

Xiong, Z.Q., Xing, G.X., Zhu, Z.L., 2007. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen. *Pedosphere* 17, 146–155.

Xu, H., Cai, Z.C., Li, X.P., Tsuruta, H., 2000. Effect of antecedent soil water regime and rice straw application time on CH<sub>4</sub> emission from rice cultivation. *Australian Journal of Soil Research* 38, 1-12.

Yan, X., Yagi, K., Akiyama, H., Akimoto, H., 2005. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biology* 11, 1131–1141.

Yan, X., AKiyama, H., Yagi, K., Akimoto, H., 2009. 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* 23.

Yang, S.S., Chang, H.L., 1998. Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddy soil. *Agriculture Ecosystems & Environment* 69, 69-80.

Yang, S.S., Chang, H.L., 2001. Effect of green manure amendment and flooding on methane emission from paddy fields. *Chemosphere - Global Change Science* 3, 41-49.

Yao, Z., Zhou, Z., Zheng, X., Xie, B., Mei, B., Wang, R., Butterbachbahl, K., Zhu, J., 2010. Effects of organic matter incorporation on nitrous oxide emissions from rice-wheat rotation ecosystems in China. *Plant and Soil* 327, 315-330.

Yoshida, T., 1978. Microbial metabolism in rice soils. In: International Rice Research Institute. *Soils and rice* 445-463.

Yu, K., Patrick Jr., W. H., 2004. Redox window with minimum global warming potential contribution from rice soils. *Soil Science Society of America Journal* 68, 2086-2091.

Zanatta, J. A. Emissão de óxido nitroso afetada por sistemas de manejo do solo e fontes de nitrogênio, 2009. 92p. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Zanatta, J.A., 2010. Nitrous oxide and methane fluxes in south brazilian gleysol as affected by nitrogen fertilizers. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 1653-1665.

Zheng, X.H., Wang, M.X., Wang, Y.S., Shen, R.X., Gou, J., Li, J., Jin, J.S., Li, L.T., 2000. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from crop lands: a case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China. *Chemos. Glob. Change Sci.* 2, 207–224.

Zou, J., Huang, Y., Zong, L., Zheng X., Wang, Y., 2004. Carbon Dioxide, Methane, and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Wheat Rotation as affected by Crop Residue Incorporation and Temperature. *Advances in atmospheric sciences* 215, 691–698.

Zou, J., Huang, Y., Jiang, J., Zheng, X., Sass, R.L., 2005. A 3-year field measurement of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice paddies in China: effects of water regime, crop residue and fertilizer application. *Global Biogeochem. Cycles* 19, 2021.

Zou, J., Liu, S., Qin, Y., Pan, G., Zhu, D., 2009. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in southeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 129, 516–522.

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. 90 F. Tese de doutorado (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS. 2011.

## **ANEXOS**



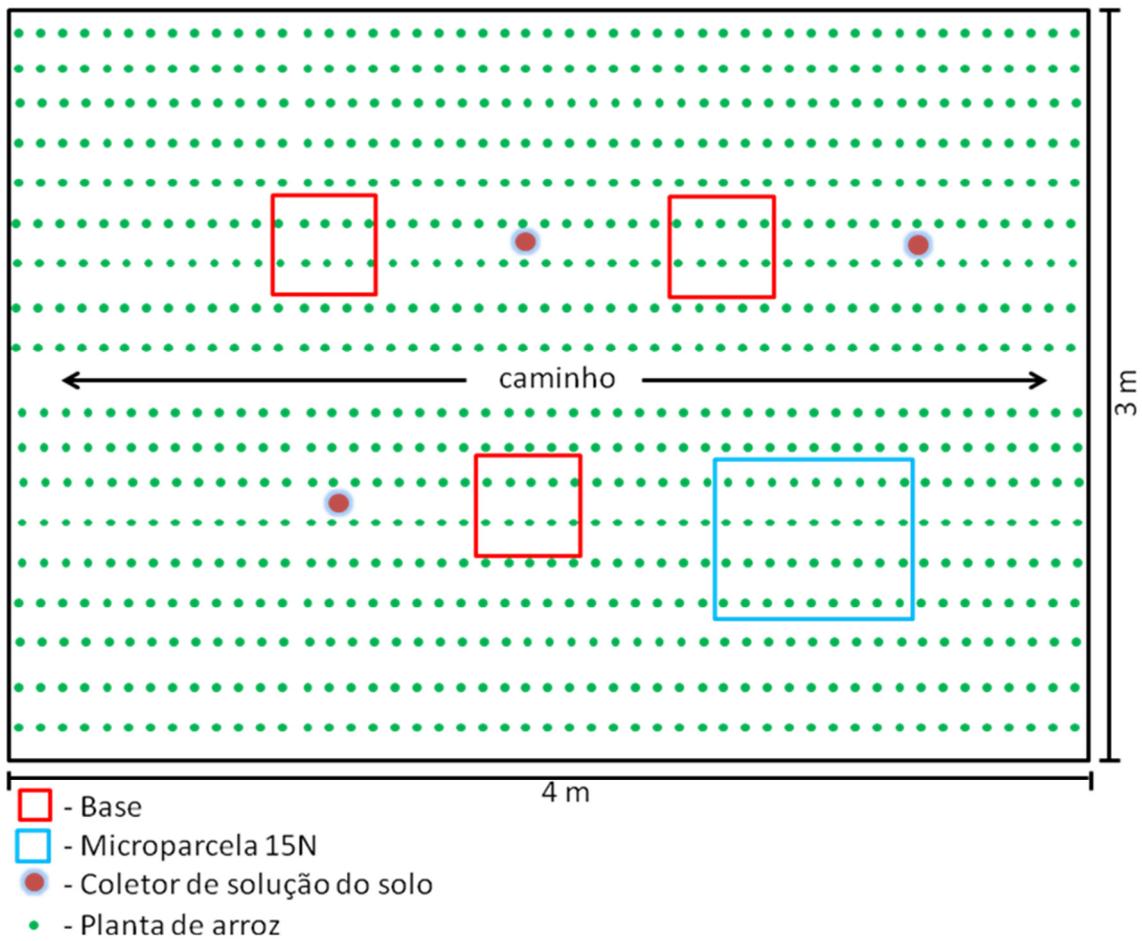
## ANEXO A – Croqui do experimento

## CROQUI DO EXPERIMENTO GEE VÁRZEA – 2010-2013



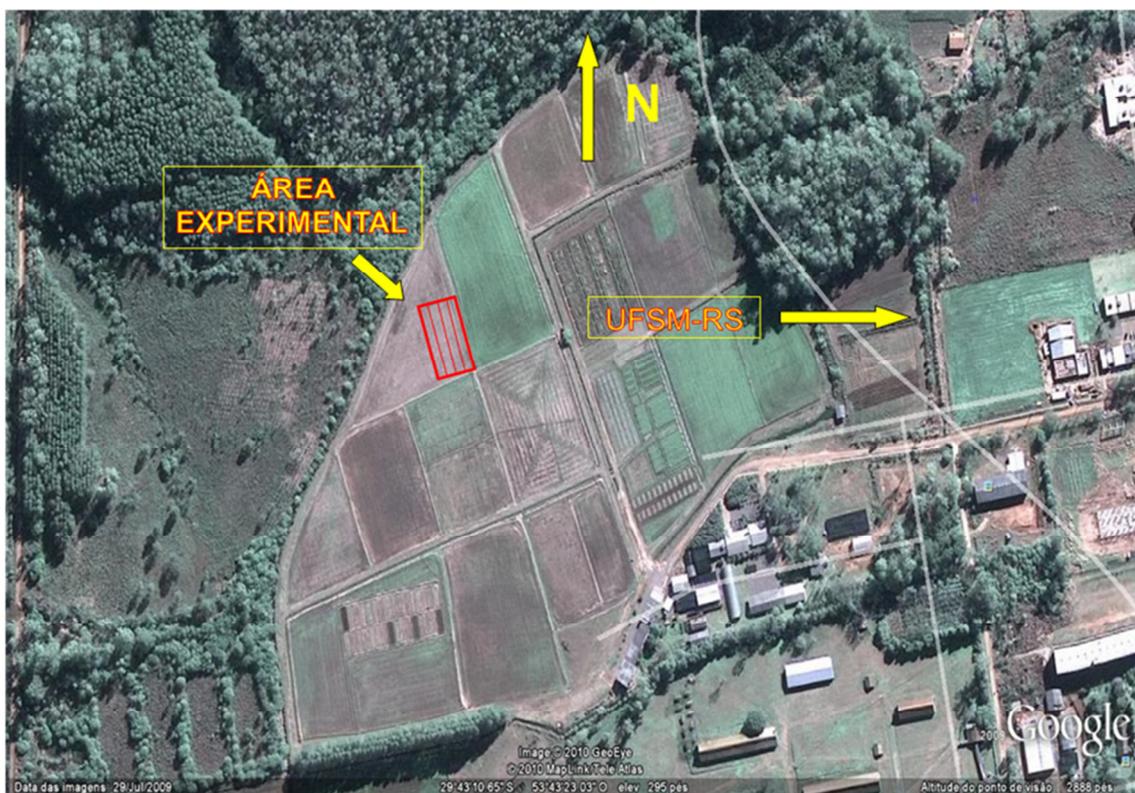
Caminho	Canal de irrigação	Caminho	Caminho	Canal de irrigação	Caminho
Gas		RPpc	Sm + Az		Sm
Gpc + Gas		Gpc	Gpc		Gpc + Gas
RFpc + Gas		RFpc	RFpc		RFpc + Gas
Sm		Sm + Az	RPpc		Gas
Caminho		Caminho	Caminho		Caminho
Gas		RPpc	Sm + Az		Sm
RFpc + Gas		RFpc	RFpc		RFpc + Gas
Gpc + Gas		Gpc	Gpc		Gpc + Gas
Sm		Sm + Az	RPpc		Gas

Croqui do experimento

**ANEXO B – Distribuição das bases de coleta nas parcelas**

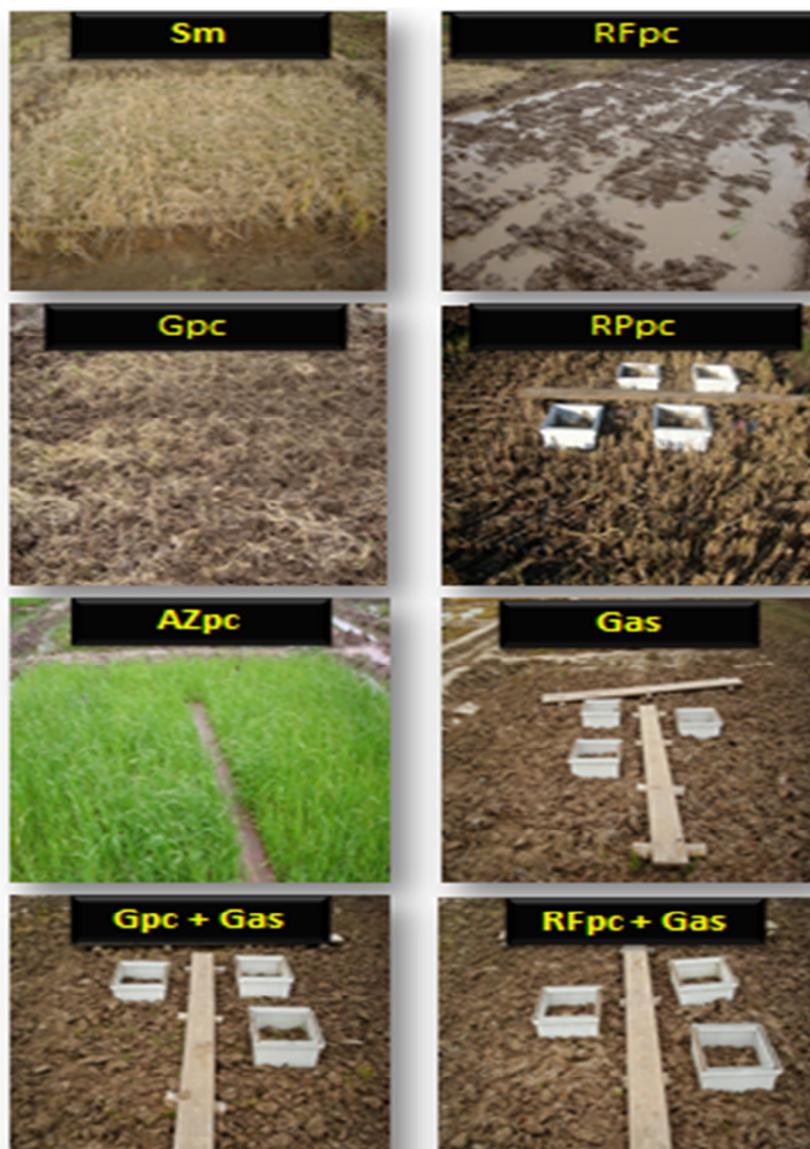
Esquema mostrando a distribuição das bases para coleta de GEE, coletores de solução do solo, das microparcelas com aplicação de  $^{15}\text{N}$  e das plantas de arroz, dentro de uma das parcelas.

## ANEXO C – Área experimental

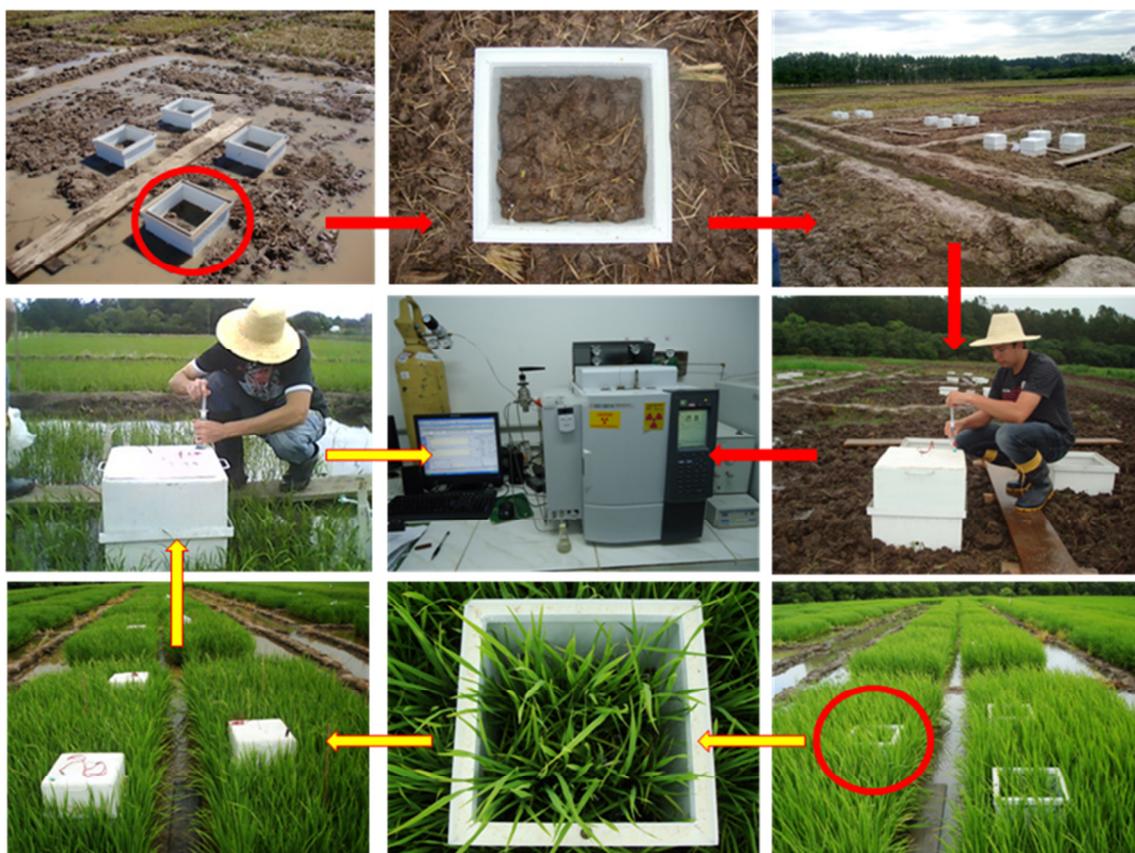


Vista aérea da área experimental.

## ANEXO D – Sistemas de manejo



Diferentes sistemas de manejo da palha pós-colheita do arroz irrigado.

**ANEXO E – Coletas de gases de efeito estufa na entressafra e safra**

Coletas de gases durante a entressafra (flechas vermelhas) e durante o cultivo do arroz irrigado (flechas amarelas).