

Capítulo 6

Emissão de metano em cultivo de arroz irrigado por inundação

Magda Aparecida de Lima, Rosa Toyoko Shiraishi Frighetto, Omar Vieira Villela, Falberni de Souza Costa, Cimélio Bayer, Vera Regina Mussoi Macedo, Elio Marcolin

Resumo: avaliações de emissão de metano em cultivo de arroz irrigado por inundação foram realizadas nas regiões Sudeste e Sul do Brasil, utilizando o método de câmara estática. Experimentos foram conduzidos com plantio convencional, plantio direto, e cultivo mínimo na região Sul e na região Sudeste. Foram comparados cultivos sob regime de água contínuo e intermitente. Essas áreas encontram-se em regiões climáticas distintas, com diferentes tipos de solos e cultivares de arroz. Avaliações sobre os efeitos de diferentes manejos de cultura e do solo nas emissões sazonais de metano são apresentados, bem como o impacto de regimes de água no cultivo. Em geral, menores taxas de emissão sazonal de metano foram associadas ao sistema de plantio direto e ao regime intermitente de água considerando as três safras analisadas nessas regiões do País. Fatores de emissão sazonais são apresentados para cada safra nos três locais estudados (Pindamonhangaba, SP, Cachoeirinha, RS, e Uruguaiana, RS).

Palavras-chave: arroz irrigado, metano, Pindamonhangaba, Cachoeirinha, Uruguaiana, plantio direto, regime de água.

Introdução

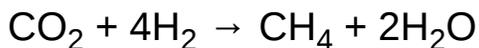
O cultivo de arroz irrigado por inundação representa uma das principais fontes antrópicas globais de metano (CH_4), um importante gás de efeito estufa que influencia fortemente a fotoquímica da atmosfera. Estima-se que a taxa de emissão global desse gás nos campos de arroz irrigado varie de 20 teragramas a 100 teragramas (média de 60 Tg) por ano, o que corresponde a 16% do total de emissão de todas as fontes (HOUGHTON et al., 1995).

O CH₄ é produzido em solos inundados pelas bactérias estritamente anaeróbicas. A drenagem diminui a emissão (efluxo) de CH₄ para a atmosfera, pois a aeração do solo inibe a sua produção pelas bactérias metanogênicas. Concomitantemente, ocorre a diminuição de CH₄ no solo em razão da oxidação aeróbia pelas bactérias metanotróficas.

A inundação do solo em um campo de arroz interrompe a entrada de oxigênio atmosférico no solo, e a decomposição da matéria orgânica torna-se anaeróbica. Além do CO₂, o metano é o principal produto final da decomposição anaeróbica que pode escapar para a atmosfera por ebulição, por difusão através das camadas superficiais do solo e água de inundação, e pelo aerênquima das plantas do arroz. Uma porção substancial do metano produzido no solo de arroz irrigado é oxidada dentro do solo e na água, antes que ele escape para a atmosfera.

As duas vias principais de produção de metano em solos submersos são:

(1) Redução de CO₂ com H₂ (derivado de um composto orgânico)



(2) Descarboxilação (transmetilação) de ácido acético



Estimativa nacional de emissão de metano em arroz irrigado por inundação

Utilizando-se a metodologia revisada do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC et al., 1997) para estimar as emissões anuais de gases de efeito estufa, em que uma taxa média global de emissão de metano proveniente de campos de arroz inundado é recomendada ($20 \text{ g m}^{-2} \text{ estação de crescimento}^{-1}$), foram estimadas para o Brasil, em 1994, emissões da ordem de 283 gigagramas¹ de metano proveniente do cultivo de arroz irrigado (BRASIL, 2004, 2006). Nesse ano, as emissões provenientes de cultivo de arroz continuamente inundado somaram 261,08 Gg (92,2%), em regime intermitentemente inundado 0,58 Gg (0,2%), e em regime de várzea 21,38 Gg (7,6%).

A realização de estudos visando obter taxas reais de emissão (efluxo) de metano em condições nacionais e a compreensão dos processos e práticas agropecuárias na atividade orizícola que interferem e são influenciadas pela mudança do clima constituíram o principal foco deste estudo no âmbito da rede Agrogases.

Este capítulo apresenta resultados obtidos em experimentos de mensuração de emissão de metano por cultivo de arroz irrigado por inundação realizados nas safras de 2002–2003, 2003–2004, 2004–2005 na estação experimental da Apta/Pólo Regional de Desenvolvimento Tecnológico do Vale do Paraíba, em Pindamonhangaba, SP, e na estação experimental do Instituto Riograndense do Arroz (Irga), em Cachoeirinha, RS. Na safra de 2004–2005 foi realizado um experimento na estação experimental do Irga, em Uruguaiana, RS.

Nos experimentos conduzidos em Pindamonhangaba foram avaliadas emissões de metano em sistemas de produção irrigada sob regime contínuo e regime intermitente de água. Na região Sul, foram avaliados três sistemas de plantio: sistema convencional (Cachoeirinha e Uruguaiana, RS), sistema de plantio direto

(Cachoeirinha, RS), e sistema de cultivo mínimo (Cachoeirinha, RS). Trata-se de regiões climáticas bastante distintas, com diferentes tipos de solos e formas de cultivo predominantes.

Na safra de 2002–2003 em Pindamonhangaba, SP, foi verificada uma média de emissão sazonal de $32,84 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 0,24 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em cultivo de arroz sob regime de inundação contínua, e de $28,47 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 10,65 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ sob regime de inundação intermitente. As emissões médias diárias de metano foram estimadas em $313,57 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 13,98 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$ sob regime de inundação contínua e em $389,74 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 140,26 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$ sob regime de inundação intermitente.

Na safra de 2003–2004, foram verificadas as menores emissões sazonais médias registradas ao longo das 4 safras estudadas, com emissões de $8,92 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 1,05 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em regime de inundação contínua e $5,68 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 2,12 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em regime de inundação intermitente. As emissões médias diárias foram também mais baixas do que as verificadas nas outras safras, com emissões de $79,01 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 9,71 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em regime de inundação contínua e $52,17 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 18,70 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em regime de inundação intermitente.

Na safra de 2004–2005, foram registradas emissões sazonais médias de $18,91 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 2,38 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em regime de inundação contínua e de $16,20 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 2,54 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em regime de inundação intermitente. Emissões médias diárias de metano foram maiores no cultivo sob regime de inundação contínua com $188,97 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 23,76 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$, em relação às emissões sob regime de inundação intermitente $169,94 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 17,24 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$.

Em Cachoeirinha, RS, na safra de 2002–2003, foram estimadas emissões sazonais médias de 49 g CH₄ m⁻² sob plantio convencional, e de 33 g CH₄ m⁻² sob plantio direto. Na safra de 2003–2004, as emissões foram estimadas, respectivamente, em 59 g CH₄ m⁻² e 55 g CH₄ m⁻² nos sistemas de preparo convencional e plantio direto.

Em Uruguaiana e em Cachoeirinha, RS, na safra de 2004–2005, foram estimadas emissões de 4,0 g CH₄ m⁻² e 4,7 g CH₄ m⁻², respectivamente, sob cultivo convencional e cultivo mínimo.

Variáveis que afetam a emissão

Fatores como a temperatura, o pH do solo e a adição de materiais orgânicos influenciam a relação entre metano e gás carbônico produzido. As razões exatas para as variações dessa relação não estão muito claras, mas pode ser o resultado das variações na disponibilidade de oxidantes (Fe, Mn, NO₃, SO₄) e mudança na população de *archae* metanogênicas.

O pH na faixa próximo ao neutro (6,9-7,1) é condição ideal para a produção de CH₄ (OREMLAND, 1988 citado por GON, 1996; WANG et al., 1997). Enquanto a inundação do solo geralmente causa a estabilização do pH do solo entre 6,5 e 7,2, o Eh desce a níveis que dependem dos aceptores de elétron presentes (PONNAMPERUMA, 1972). Em estudos de incubação em laboratório, a produção de metano foi observada somente sob um Eh abaixo de -150 mV (WANG et al., 1997). Valores mais elevados de Eh, entretanto, têm sido verificados em estudos conduzidos por Yagi e Minami (1990) em alguns campos de arroz sem adubação orgânica. Segundo Gon (1996), existem várias explicações para esta observação: 1) a produção de metano ocorre em micro sítios

onde os eletrodos de platina não conseguem penetrar; 2) as longas extremidades de 3 mm a 5 mm dos eletrodos de platina são maiores do que os microssítios onde a produção de metano ocorre e, portanto, toca locais com vários potenciais redox, sendo então o maior valor registrado; 3) a produção de metano começa em valores de Eh superiores a -150 mV. Fetzner e Conrad (1993) mostraram que a inibição da produção de metano em um potencial redox superior a -150 mV é causada pela introdução de oxigênio livre no sistema.

Sass e Fisher (1994) encontraram uma correlação negativa entre emissão de metano e o conteúdo de argila. Essa relação inversa pode ser causada pela habilidade de os minerais de argila protegerem a matéria orgânica da degradação (JENKINSON, 1977; OADES, 1988 citado por GON, 1996). Ao contrário, solos calcáreos mostram rápida formação de metano durante a inundação (NEUE; ROGER, 1994) talvez porque a presença de carbonato de cálcio tamponiza o pH em micro sítios onde a metanogênese ocorre (GON, 1996).

A planta de arroz em crescimento, com seu sistema radicular em desenvolvimento e biomassa, constitui o principal fator que controla o padrão de emissão sazonal de metano. Na fase vegetativa (até perfilhamento), os resíduos de matéria orgânica do solo, deixados pelo cultivo anterior, são a principal fonte de substrato para as metanogênicas. Na fase intermediária (perfilhamento à floração) e nos últimos estádios de desenvolvimento (floração até colheita) das plantas de arroz, a principal fonte provável de substratos constitui, respectivamente, os exsudatos de raízes e a serapilheira (GON, 1996). Variáveis climáticas, por exemplo, a radiação solar, pluviosidade e temperatura, podem afetar, indiretamente, a produção de metano por meio de efeitos na produção primária líquida e na exsudação de raízes (GON, 1996).

A temperatura é um dos fatores ambientais que governam a decomposição de substâncias orgânicas em um solo inundado e, em particular, a taxa de emissão de metano (PARASHAR et al., 1993; SCHÜTZ et al., 1990). Conrad et al. (1987) relataram que a produção de metano foi de 2,5 a 3,5 vezes maior sob temperatura do solo de 30 °C em comparação a um solo sob 17 °C. Tsutsuki e Ponnampereuma (1987) registraram um aumento significativo na emissão de metano com uma elevação da temperatura do solo de 20 °C a 35 °C. Rath et al. (2002) registraram também aumento da produção de metano com o aumento na temperatura de incubação de 15 °C a 35 °C, em que a produção de metano foi negligenciável em laterita e sulfato ácido comparada com a produção em solo aluvial, mesmo em elevada temperatura. Esses autores sugeriram que a sensibilidade à temperatura dependeria do tipo de solo e da disponibilidade dos substratos. Em seu experimento, a adição de palha de arroz a solos aluviais e laterita aumentaram significativamente os valores de coeficiente de sensibilidade à temperatura. Concluíram, então, que, apesar de os solos tropicais conterem menos carbono orgânico, os resíduos gerados na pós-colheita e a aplicação de fontes orgânicas como adubo verde aos campos de arroz poderiam contribuir para a aceleração de metano durante sua rápida decomposição nos solos tropicais.

A temperatura do ar, além de afetar a produção de metano pelas *archae* metanogênicas, também afeta o transporte de metano da rizosfera para a atmosfera pelas plantas de arroz (NOUCHI et al., 1994).

Estudos mostram que geralmente o fluxo de metano apresenta dois picos nas variações sazonais durante a estação de crescimento: um primeiro pico antes do perfilhamento, e um segundo durante o estágio reprodutivo das plantas do arroz. O primeiro ocorreria em função da quebra de matéria orgânica no solo,

e o segundo seria em razão da atividade das plantas que forneceriam exsudatos ou serapilheira às bactérias do solo (SCHÜTZ et al., 1989).

Locais de estudo

O estudo foi desenvolvido em 3 locais, sendo um na região Sudeste (Pindamonhangaba, SP) e dois na região Sul (Cachoeirinha, RS, e Uruguaiana, RS). A proposta original do projeto era de realização de estudos em 3 áreas fisiográficas na região Sul. Por se tratar de um estudo pioneiro, em que muitos detalhes operacionais dependiam de um acompanhamento fiel das etapas de estudo, além da proximidade da Embrapa Meio Ambiente, um primeiro ensaio experimental foi desenvolvido na cidade de Pindamonhangaba, SP. Posteriormente, dada à variação anual observada entre este experimento e os desenvolvidos em Cachoeirinha, julgou-se importante dar continuidade à quantificação das emissões de metano em arrozais na região Sudeste, objetivando também uma possível comparação entre diferentes condições climáticas e de manejo em regiões distintas.

A escolha de Cachoeirinha, RS, deveu-se ao fato de estar localizada em uma área fisiográfica de interface entre a região Litoral Sul e Depressão, onde se encontrou também condições logísticas (proximidade de correio Sedex 10) e recursos humanos para o desenvolvimento do trabalho, com o apoio do Irga e da UFRGS.

Na primeira safra estudada (2001–2002), foi realizado um experimento preliminar em Pindamonhangaba, SP, para testar o método de câmara fechada (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY

AGENCY, 1992). Nas safras de 2002–2003 e 2003–2004 foram realizados experimentos em Pindamonhangaba e Cachoeirinha, RS. Na safra de 2004–2005 foram conduzidos experimentos nessas áreas e também em Uruguaiana, RS.

A seguir são descritas as características das áreas de estudo, sistemas de cultivo e de manejo de água nas safras de 2002–2003, 2003–2004, 2004–2005.

Área experimental do Pólo Regional de Desenvolvimento Tecnológico dos Agronegócios do Vale do Paraíba, Pindamonhangaba, SP

Situa-se em latitude de 22°55' S e longitude de 45°30' W, a uma altitude média de 560 metros. O solo é classificado como um gleissolo de textura argilosa a franco argilosa. O terreno vem sendo plantado há mais de nove anos com cultura de arroz irrigado por inundação.

Dois sistemas de cultivo de arroz irrigado foram estudados: 1) sistema de cultivo de arroz sob regime de inundação contínua (lâmina de 10 cm em média), e 2) sistema de cultivo de arroz sob regime de inundação intermitente (banhos alternados). Para o tratamento com regime intermitente de água, houve cortes periódicos de água e reabastecimento posterior. Na safra de 2003–2004, entretanto, houve abundantes chuvas, de modo a não necessitar de suprimentos regulares de água.

A variedade utilizada nas três safras foi o IAC 103, cujas características estão descritas na Tabela 1. Essa é a denominação comercial da linhagem IAC 1282 e originou-se do cruzamento entre

as linhagens LI 84-124 e LI 82-227 realizado no Centro Experimental de Campinas, em 1986. O arroz foi transplantado manualmente em linha, sendo o espaçamento entre plantas para esta variedade de 30 cm entre linhas e de 20 cm entre touceiras. Foram utilizadas seis mudas por touceira. A produção de arroz em casca foi determinada com 13% de umidade. O sistema transplântio foi utilizado em Pindamonhangaba, SP, por ser o tipo de manejo comum na região; e, por se tratar de um sistema representativo, decidimos mantê-lo.

Tabela 1. Média diária de emissões de CH₄, fluxo sazonal e produtividade em grãos, em Pindamonhangaba, SP, safra de 2002–2003.

	Regime contínuo	Regime intermitente
Emissão média diária de CH ₄ (mg m ⁻² dia ⁻¹)	313,57	389,74
Fluxo sazonal de CH ₄ (g m ⁻²)	32,84	36,00
Produtividade (kg grãos em casca ha ⁻¹)	6.231,00	7.068,00

Fonte: adaptado de Emissão... (2008).

Estação experimental do Instituto Riograndense do Arroz (Irga), Cachoeirinha, RS

A área experimental do Irga em Cachoeirinha (região de depressão central) localiza-se em latitude 29°57'02" S, longitude 51°06'02" W, a uma altitude média de 7 m, sendo o relevo plano, e o clima subtropical úmido, Cfa (Köppen). O solo é classificado como Gleissolo Háptico Ta distrófico, textura franca (SISTEMA..., 1999). A média anual histórica (1975–2002) da temperatura média do ar é 20 °C, da precipitação pluviométrica é de 1.394 mm e da radiação solar de 357 cal cm⁻² dia⁻¹ (COSTA, 2005).

Estação experimental do Instituto Riograndense do Arroz (Irga), Uruguaiiana, RS

O experimento foi conduzido na Estação Experimental do Irga em Uruguaiiana, RS, situada na região de Fronteira Oeste, a uma altitude de 74 metros em relação ao nível do mar, latitude 29°45'33" e longitude 57°05'37". O clima é classificado como Cfa, conforme classificação de Köppen. Segundo a classificação da Embrapa (SISTEMA..., 1999), o solo é caracterizado como Chernossolo Ebânico carbonático vértico – MEk .

A cultivar utilizada no experimento foi a Irga 417, uma denominação comercial da linhagem Irga 318-11-6-9-2B, proveniente de seleção realizada em progênie do cruzamento entre a F1 de New Rex/IR19743-25-2-2 com BR-Irga-409, realizado em 1983 na EEA, lançada em 1995.

Resultados e discussão

São apresentados os resultados de experimentos de mensuração de emissão de metano por cultivo de arroz irrigado por inundação realizados nas safras de 2002–2003, 2003–2004 e 2004–2005, na estação experimental da Apta/Pólo Regional de Desenvolvimento Tecnológico do Vale do Paraíba, em Pindamonhangaba, SP, e na estação experimental do Instituto Riograndense do Arroz (Irga), em Cachoeirinha, RS. Apresentam-se também resultados de experimento realizado na estação experimental do Irga, em Uruguaiiana, RS, para a safra de 2004–2005.

Local: Pindamonhangaba, SP

Safra de 2002–2003

Na safra de 2002–2003 em Pindamonhangaba, SP, foi verificada uma média de emissão sazonal de $32,84 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 0,24 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em cultivo de arroz sob regime contínuo de inundação, e de $36,00 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 10,65 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$, sob regime intermitente (Tabela 1). Os efluxos médios de metano foram estimados em $313,57 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 13,98 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$ sob regime de inundação contínua, e em $389,74 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 140,26 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$ sob regime de inundação intermitente. Até a metade da estação de crescimento, principalmente na fase vegetativa, os efluxos foram mais elevados sob regime de inundação intermitente, tornando-se estes posteriormente inferiores aos efluxos sob regime contínuo (Figura 1). Nota-se que as variações de fluxos foram maiores sob o regime de inundação intermitente.

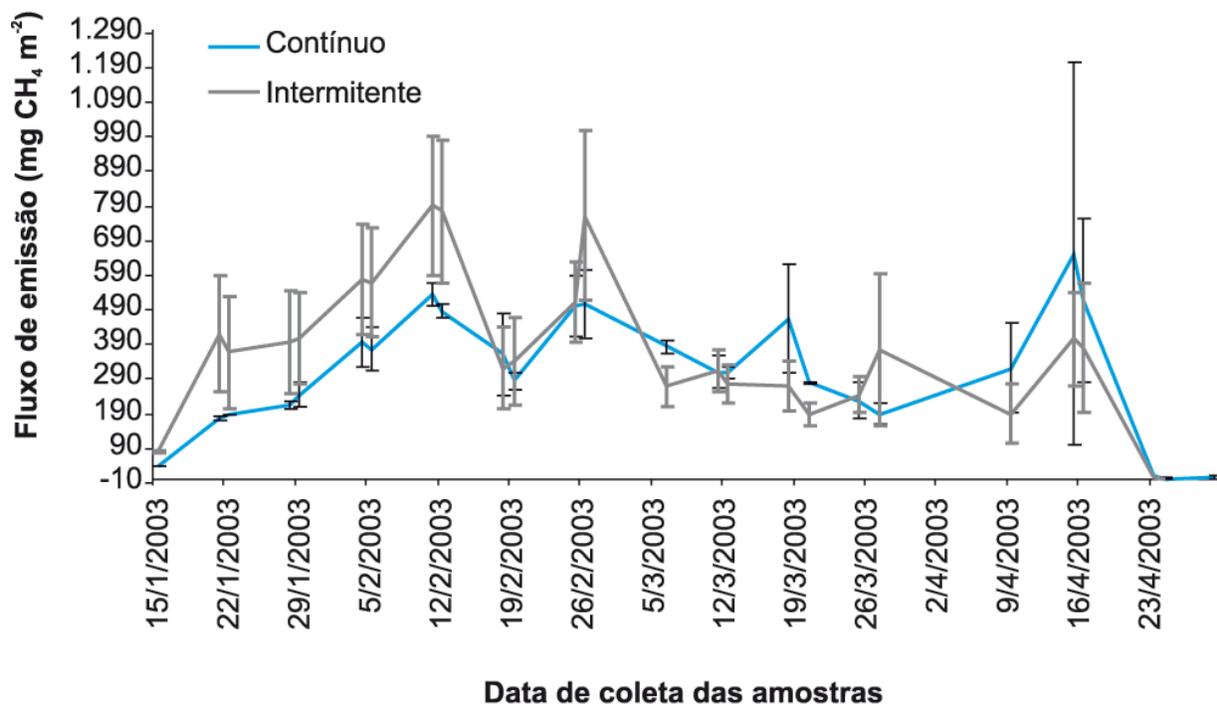


Figura 1. Fluxos de emissão de metano, em mg m^{-2} , sob regimes de inundação contínua e intermitente, na safra de 2002–2003, em Pindamonhangaba, SP.

Fonte: adaptado de Emissão... (2008).

O manejo de água exerce uma forte influência na taxa de emissão de metano, segundo Aulakh et al. (2001), Cai et al. (2003), Sass et al. (1992) e Smith e Conen (2004). Na safra de 2002–2003, não foi observada diferença entre as médias de emissão de metano nos tratamentos com manejo de irrigação contínua e intermitente. Isso pode ser explicado pelo pequeno intervalo de tempo de aeração do regime de água intermitente, dada a ocorrência frequente de chuvas. Os dois períodos de interrupção no fornecimento de água no regime intermitente somaram um total de apenas 22 dias sem abastecimento de água.

Observou-se também a ocorrência de um aumento das emissões no início de ambos os tratamentos, após a adição de adubação com ureia. Estudos relacionam a aplicação de ureia com o aumento da emissão de metano em campos de arroz inundados (AULAKH et al., 2001; LINDAU, 1994; RATH et al., 1999). De acordo

com Sass e Fisher (1995), emissões máximas são obtidas pela aplicação de 200 kg ha⁻¹ a 300 kg ha⁻¹ de N-ureia com emissões inferiores para faixas de 0 kg ha⁻¹ a 100 kg ha⁻¹ de N-ureia. Aparentemente, as emissões de metano diminuíram após as aplicações de ureia ocorridas em 14/2/2003 e 28/2/2003. Um período mais frequente de coleta, próximo à data de adubação, entretanto, poderia esclarecer o efeito da aplicação de fertilizante sobre as emissões.

Nesse experimento, observou-se também a ocorrência de aumentos de fluxos de metano simultâneos em ambos os tratamentos, após as adubações, realizadas em três datas (30/1/2003, 14/2/2003 e 28/2/2003). Sass (comunicação pessoal, 2001) sinaliza para a ocorrência de um pico maior inicial na fase de emborrachamento e um pico secundário na fase de antese (florescimento). Picos de emissão podem ocorrer também na fase final da estação, durante a maturação. Na safra estudada, aumentos de emissão foram observados após a floração no tratamento de regime contínuo. No período de maturação, após o corte de água (4/4/2003), foram registrados picos de emissão em ambos os tratamentos, o que provavelmente ocorreu em função de chuvas no período. Na fase de emborrachamento do arroz, não foram realizadas coletas de amostras que permitissem evidenciar a influência dessa fase na emissão de metano.

Safra de 2003–2004

As emissões sazonais foram avaliadas em apenas 8,92 g CH₄ m⁻² ± 1,05 g CH₄ m⁻² em regime de inundação contínua, e 5,68 g CH₄ m⁻² ± 2,12 g CH₄ m⁻² em regime de inundação intermitente, respectivamente (Tabela 2), bem inferiores aos valores encontrados na safra anterior. As emissões médias diárias foram também mais

baixas do que as verificadas nas outras safras, com valores observados de $79,01 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 9,71 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em regime de inundação contínua e $52,17 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 18,70 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em regime de inundação intermitente.

Tabela 2. Média diária de emissões de CH_4 , fluxo sazonal e produtividade em grãos, em Pindamonhangaba, SP, safra de 2003–2004.

	Regime contínuo	Regime intermitente
Emissão média diária ($\text{mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	$79,01 \pm 9,71$	$52,17 \pm 18,70$
Fluxo sazonal (g m^{-2})	8,92	5,68
Produtividade ($\text{kg grãos em casca ha}^{-1}$)	5.600	4.000

Fonte: adaptado de Emissão... (2008).

Inicialmente, foram observadas emissões mais elevadas de CH_4 para o manejo de irrigação intermitente, quando comparadas ao regime contínuo (Figura 2). A ocorrência de chuvas intensas por um período prolongado manteve o solo sob manejo intermitente em condições anaeróbicas, tal como o observado sob o manejo de irrigação contínua. Após a primeira adubação (3/2/2004), foi registrado um pico de emissão de metano em ambos os regimes contínuo e intermitente. Esse padrão ocorreu também após a segunda adubação (1/3/2004).

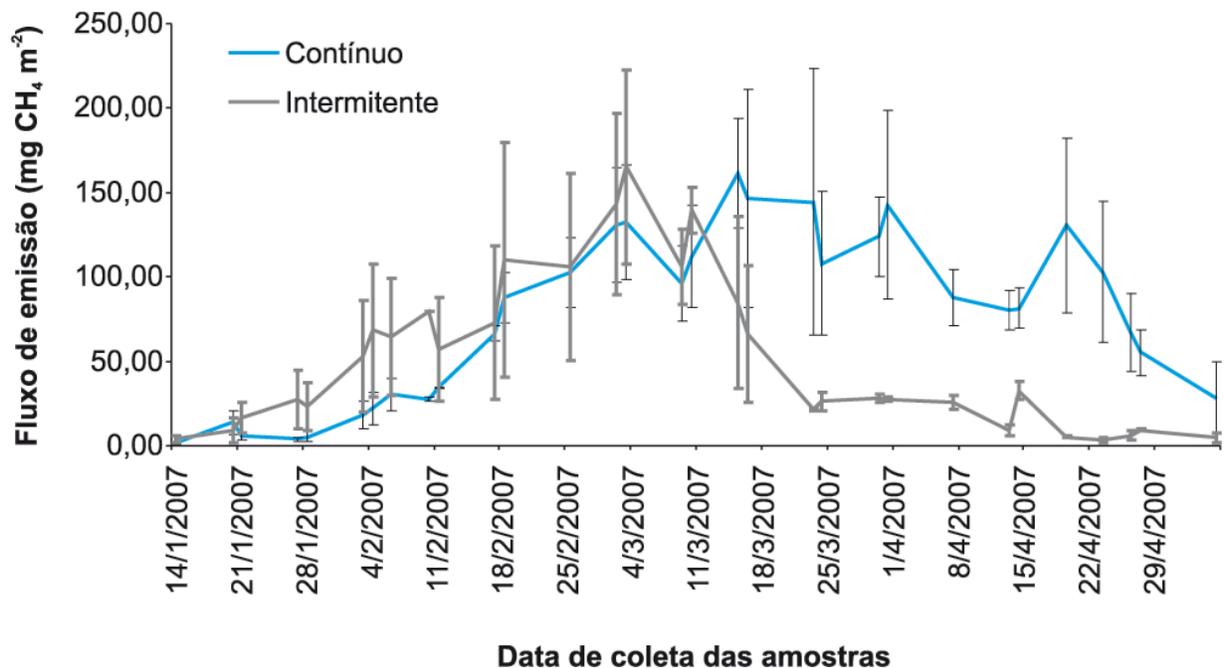


Figura 2. Fluxos de emissão de metano, em $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$, sob regimes de inundação contínua e intermitente, na safra de 2003–2004, em Pindamonhangaba, SP.

Fonte: adaptado de Emissão... (2008).

A partir da iniciação da panícula, os efluxos mantiveram-se relativamente próximos nos dois tratamentos, até o emborrachamento (9/3/2004), em que um novo pico de emissão foi registrado em ambos os regimes. Com a adubação de cobertura (14/3/2004), as emissões se elevaram no regime contínuo até 15/3/2004 (75 dias após a inundação), após o que as emissões começaram a diminuir. No regime intermitente, sem lâmina d'água, as emissões continuaram a baixar mesmo após esta terceira adubação. Por ocasião da floração (20/3/2004), aos 80 dias de inundação, os níveis de emissão no regime contínuo mantiveram-se praticamente estabilizados até 24/3/2004, seguida de redução. Nessa fase da planta, os principais substratos para as archaeometanogênicas consistem em exsudatos de raízes. Aliado a esse aspecto, a ocorrência de chuvas fortes e frequentes no período fez com que as emissões no regime intermitente se mantivessem estabilizadas até 8/4/2004, com a observação de um novo pico em

14/4/2004, seguida de uma redução gradual das emissões. No regime contínuo, após a floração, foi registrado um pico de emissão no dia 31/3/2004, seguida de redução até o corte de água (10/4/2004). Em 19/4/2004, observou-se um último pico nas emissões no regime contínuo, seguida de redução até a colheita. Para o regime intermitente verificou-se também uma elevação das emissões no dia 14/4/2004 com posterior redução. Esses picos devem estar provavelmente associados à utilização de litter de raízes pelas metanogênicas e/ou à liberação de metano aprisionado no solo (GON, 1996; JAIN et al., 2000; WASSMANN et al., 1994).

Safra de 2004–2005

Na safra de 2004–2005, em Pindamonhangaba, foram registradas emissões sazonais médias de $18,91 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 2,38 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em regime de inundação contínua, e de $16,20 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 1,69 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}$ em regime de inundação intermitente (Tabela 3), para o período de 19 de janeiro a 25 de abril de 2005, praticamente equivalentes. Emissões médias diárias de metano foram maiores no cultivo sob regime de inundação contínua, com $188,97 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 23,76 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$, em relação às emissões sob regime de inundação intermitente de $169,94 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \pm 17,24 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2}$. Na fase inicial da planta, os efluxos de metano foram mais elevados sob regime de inundação intermitente (Figura 3).

Tabela 3. Média diária de emissões de CH₄, fluxo sazonal e produtividade em grãos, em Pindamonhangaba, SP, safra de 2004–2005.

	Regime contínuo	Regime intermitente
Emissão média diária (mg m ⁻² dia ⁻¹)	188,97	169,94
Fluxo sazonal (g m ⁻²)	18,91	16,20
Produtividade (kg grãos em casca ha ⁻¹)	5.742,00	4.876,00

Fonte: adaptado de Emissão... (2008).

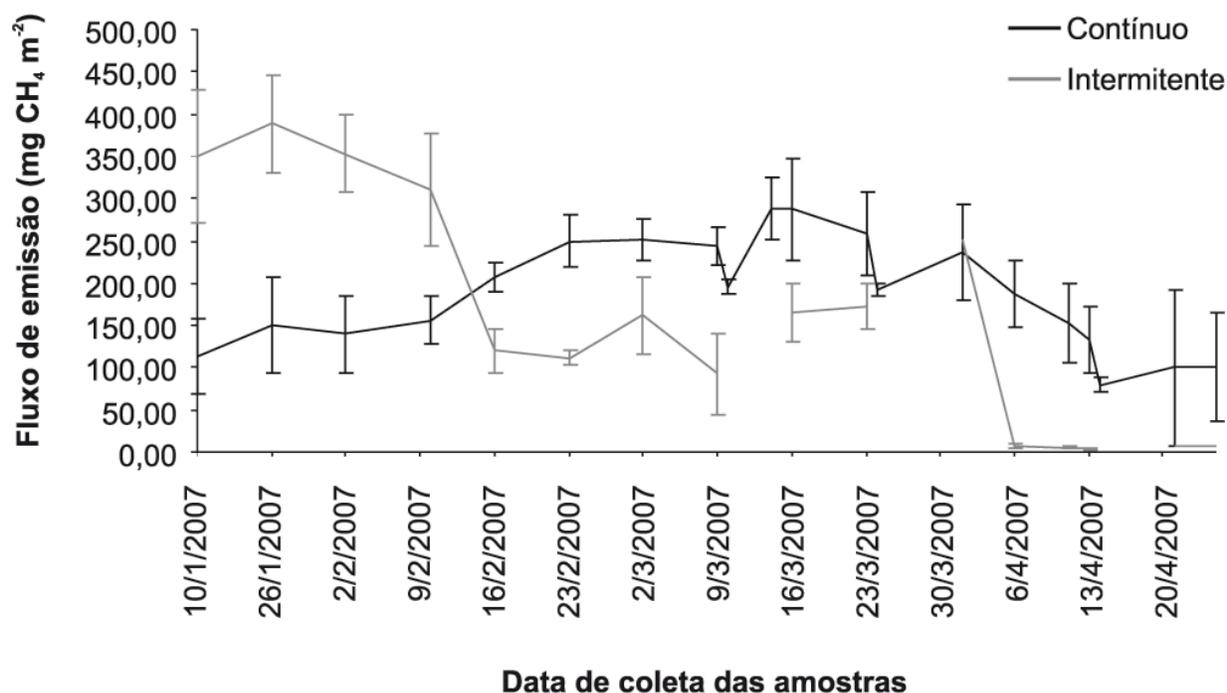


Figura 3. Fluxos de emissão de metano, em mg m⁻², sob regimes de inundação contínua e intermitente, na safra de 2004–2005, em Pindamonhangaba, SP.

Fonte: adaptado de Emissão... (2008).

Local: Cachoeirinha, RS

Na Tabela 4 são apresentados os resultados sintéticos das emissões de CH₄ e quantidade total de CH₄ liberado do solo sob plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), nas safras de 2002–2003 e de 2003–2004.

Tabela 4. Emissões médias diárias de CH₄, emissões totais (sazonais) de CH₄, rendimento de grãos de arroz, relação entre CH₄ liberado e rendimento de grãos e percentual do efluxo de CH₄ nos estádios de desenvolvimento do arroz no solo sob plantio convencional (PC) e plantio direto (PD) nas safras de 2002–2003 e de 2003–2004, em Cachoeirinha, RS.

	Estação de cultivo			
	2002–2003		2003–2004	
	PC	PD	PC	PD
Emissão média de CH ₄ (mg m ⁻² dia ⁻¹)	435 ± 79 ⁽¹⁾	324 ± 49	500 ± 92	455 ± 73
Emissão sazonal de CH ₄ (g m ⁻²)	49 ± 2,6	33 ± 0,7	59 ± 4,1	55 ± 1,2
Rendimento de grãos (Mg ha ⁻¹)	7,30	6,40	8,40	7,70
CH ₄ /rendimento de grãos (g kg ⁻¹)	67	52	70	71
Estádio da planta	Emissão de CH ₄ nos estádios de desenvolvimento do arroz ⁽²⁾			
Vegetativo	50%		47%	
Reprodutivo	30%		28%	
Amadurecimento	20%		25%	

⁽¹⁾ Erro padrão da média.

⁽²⁾ Média do PC e do PD.

Fonte: adaptado de Emissão... (2008).

Durante o cultivo, as taxas de emissão de CH₄ no PD foram menores do que no PC, exceto nas duas primeiras coletas (Figura 4). As taxas médias e amplitudes de emissão diária de CH₄ foram de 435 mg m⁻² dia⁻¹ ± 79 mg m⁻² dia⁻¹ e 500 mg m⁻² dia⁻¹ ± 92 mg m⁻² dia⁻¹ no PC, e 324 mg m⁻² dia⁻¹ ± 49 mg m⁻² dia⁻¹ e 455 mg m⁻² dia⁻¹ ± 73 mg m⁻² dia⁻¹ no PD. As médias das taxas de emissão estão dentro do intervalo de emissões citado na literatura internacional, que é de 0 mg m⁻² dia⁻¹ a 1.920 mg m⁻² dia⁻¹ (LEMER; ROGER, 2001).

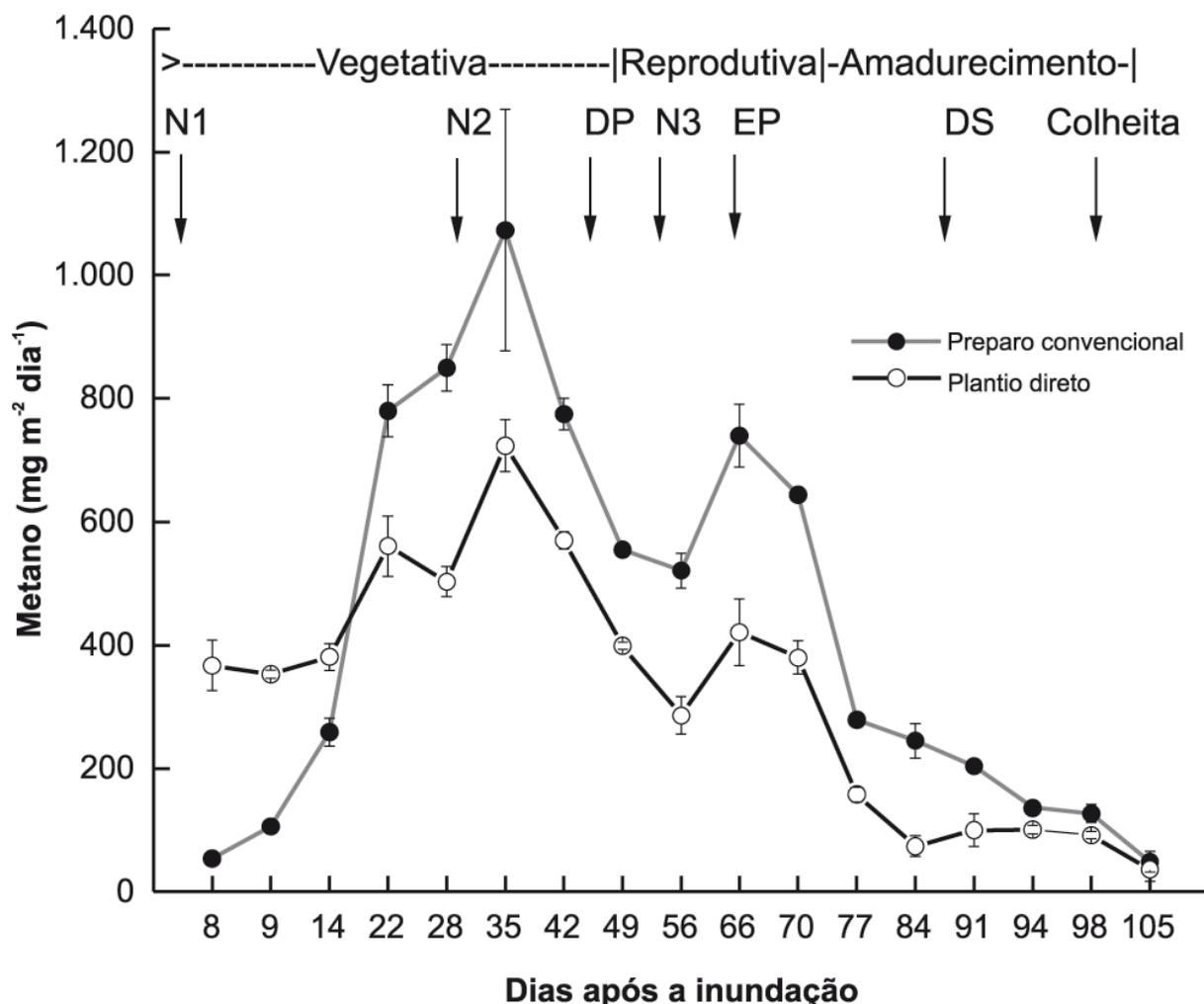


Figura 4. Taxas de emissão de CH₄ em fases de desenvolvimento do arroz nos sistemas de preparo convencional e de plantio direto, no período de 105 dias da safra 2002–2003, Cachoeirinha, RS. Os valores correspondem à média de duas repetições. N1 correspondem às aplicações de nitrogênio, DP à diferenciação das panículas, EP à emissão das panículas e DS à drenagem do solo. As barras nos símbolos correspondem ao erro padrão da média.

Fonte: adaptado de Emissão... (2008).

A maior emissão inicial de CH₄ no PD em relação ao PC pode ser em virtude da manutenção dos resíduos das culturas de inverno sobre a superfície do solo. Trabalhando com dois solos e aplicação de resíduos de azevém incorporados e na superfície do solo, Sousa (2001) demonstrou que houve maior produção de ácidos orgânicos nas primeiras semanas de alagamento do solo quando os resíduos

de azevém permaneceram na superfície do solo, com o ácido acético apresentando maior concentração na solução do solo. Esse ácido é um dos produtos da decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos e prontamente utilizável na metanogênese (WASSMANN et al.,1998). Resíduos orgânicos vegetais em solos alagados aumentam a emissão de CH_4 por reduzirem o potencial de oxirredução (Eh) do solo e por servirem de fonte de compostos orgânicos à metanogênese (NEUE et al., 1996).

No PC, a decomposição dos resíduos pode ter ocorrido ainda antes do alagamento definitivo do solo, em razão do aumento da área superficial específica (ASE) total dos resíduos fracionados suscetíveis ao ataque microbiano. Estando os resíduos já parcialmente decompostos, quando do alagamento do solo, este demoraria mais a atingir os níveis de redução necessários à metanogênese em relação ao PD. Ao longo do cultivo, esse aumento da ASE poderia resultar em maiores taxas de decomposição de frações mais recalcitrantes dos resíduos vegetais no PC em relação ao PD, que não teve seus resíduos fracionados, portanto menos decomponíveis do ponto de vista do tamanho de partícula a ser atacada pelos microrganismos decompositores.

A tendência de raízes mais profundas no perfil do solo no PC (dados não apresentados), em relação ao PD, poderia explicar suas maiores emissões de CH_4 . Em camadas mais profundas do solo, menor é a concentração de O_2 , conseqüentemente, mais reduzido será esse ambiente, no qual, sem deficiência de CO lábil, maior é o potencial de produção de CH_4 (WASSMANN et al., 1998). Ao longo do cultivo, o PC apresentou sempre maior fitomassa aérea do que o PD. Uma maior fitomassa pode ser associada a maior sistema radicular, com possível maior liberação de C das raízes, potencializando a produção de CH_4 (WANG et al., 1997).

Ambos os sistemas tiveram dois picos de emissão, sendo o primeiro e o segundo aos 35 e 66 DAA, respectivamente. Esses picos ocorreram no final da fase vegetativa e no final da fase reprodutiva, início da fase de maturação (LINDAU et al., 1991). O primeiro pico pode ser em razão da liberação de compostos orgânicos na decomposição dos resíduos vegetais de cobertura do solo no inverno, aliada à presença de compostos facilmente metabolizáveis na matéria orgânica do solo (NEUE et al., 1996). O segundo pico pode ser relacionado à liberação de exsudatos radiculares, em adição à decomposição das raízes do arroz. Nesse estudo, a aplicação de N em cobertura (N1, Figura 4) foi 2 dias antes do pico detectado aos 35 DAA, o que pode ter influenciado a magnitude do pico em ambos os sistemas. Cai et al. (1997) mediram que a emissão de CH₄ foi reduzida em 7% e 14% com a aplicação de 100 kg N ha⁻¹ e 300 kg N ha⁻¹, respectivamente, em relação ao tratamento controle. Já Lindau et al. (1991) verificaram que a adubação com ureia aumentou as emissões de CH₄ em 86% com a aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em relação à testemunha.

Nesse experimento, após a drenagem do solo, a emissão de CH₄ foi decrescente em ambos os sistemas de manejo. Isso é atribuído à redução da umidade do solo após a sua drenagem (BRONSON et al., 1997), tornando-o mais oxidado e reduzindo a atividade metanogênica (LE MER; ROGER, 2001).

A quantidade total de CH₄ emitido em 105 dias no PC (49 g m⁻²) foi 48% maior do que no PD (33 g m⁻²).

Os efluxos totais na safra de 2003–2004, em Cachoeirinha, foram de 59 g CH₄ m⁻² ± 4,1 g CH₄ m⁻² e 55 g CH₄ m⁻² ± 1,2 g CH₄ m⁻² nos sistemas de preparo convencional e plantio direto, respectivamente. O plantio direto apresentou efluxo de metano 20% menor do que o preparo convencional somente na fase vegetativa

do arroz, como aconteceu na safra 2002–2003, e o primeiro e maior pico de efluxo também aconteceu no final da fase vegetativa, como na safra anterior (Figura 5).

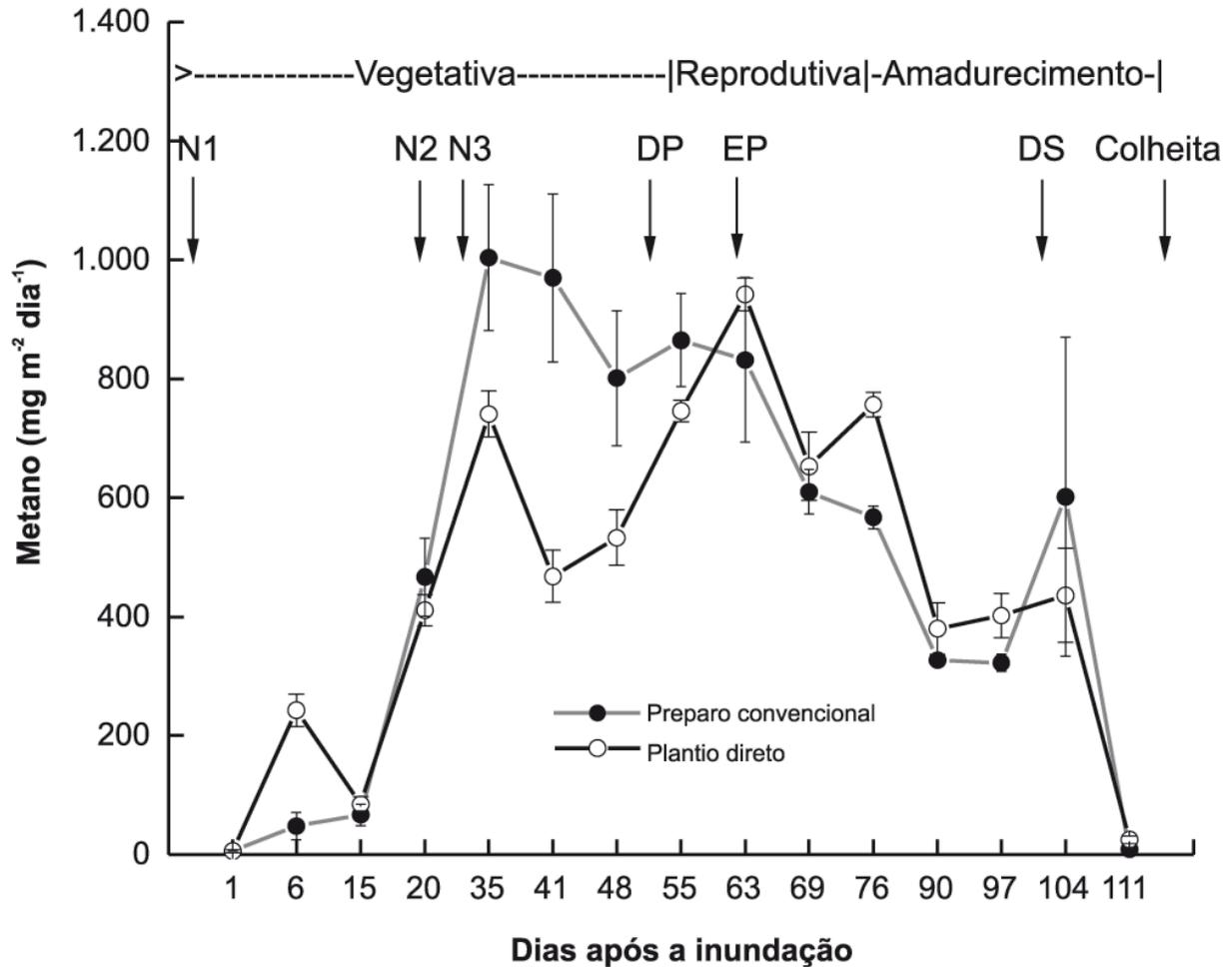


Figura 5. Emissões (efluxos) de CH₄ em fases de desenvolvimento do arroz nos sistemas de preparo convencional e de plantio direto, no período de 111 dias da safra 2003–2004, Cachoeirinha, RS. Os valores correspondem à média de três repetições. Nn correspondem às aplicações de nitrogênio; DP à diferenciação das panículas; EP à emissão das panículas; e DS à drenagem do solo. As barras nos símbolos correspondem ao erro padrão da média.

Fonte: Emissão... (2008).

As emissões no sistema de plantio direto foram inicialmente maiores do que as do sistema de plantio convencional, provavelmente em razão dos resíduos de colheita remanescentes

na superfície do solo. As emissões de metano nessa safra mostraram-se ligeiramente superiores às observadas na safra de 2002–2003, estimadas em 49 g m^{-2} e 33 g m^{-2} nos sistemas de plantio convencional e de plantio direto, respectivamente.

Na safra de 2004–2005, três sistemas de manejo foram avaliados: (1) preparo convencional, (2) cultivo mínimo e (3) sistema natural.

As variações observadas na emissão sazonal entre CM e PC (ano 2004–2005) refletem a modificação que o manejo do solo pode acarretar para a emissão do metano, e demonstram o potencial dos sistemas como o PD e PC para mitigar o efluxo de metano para atmosfera. Verificou-se, porém, que outras considerações importantes são a cultivar e as condições de clima e do solo. Além disso, deve ser considerado também que, em anos com baixa precipitação, ocorrem dificuldades na manutenção da lâmina de água nas lavouras de arroz, o que pode influenciar fortemente nos fluxos de metano, e isso deve ser um fator determinante das menores emissões em 2004–2005.

Entre os sistemas de cultivo avaliados, o preparo convencional apresentou valores maiores de efluxo, que, em vários dias, alcançou o dobro do valor do efluxo no cultivo mínimo (Figura 6).

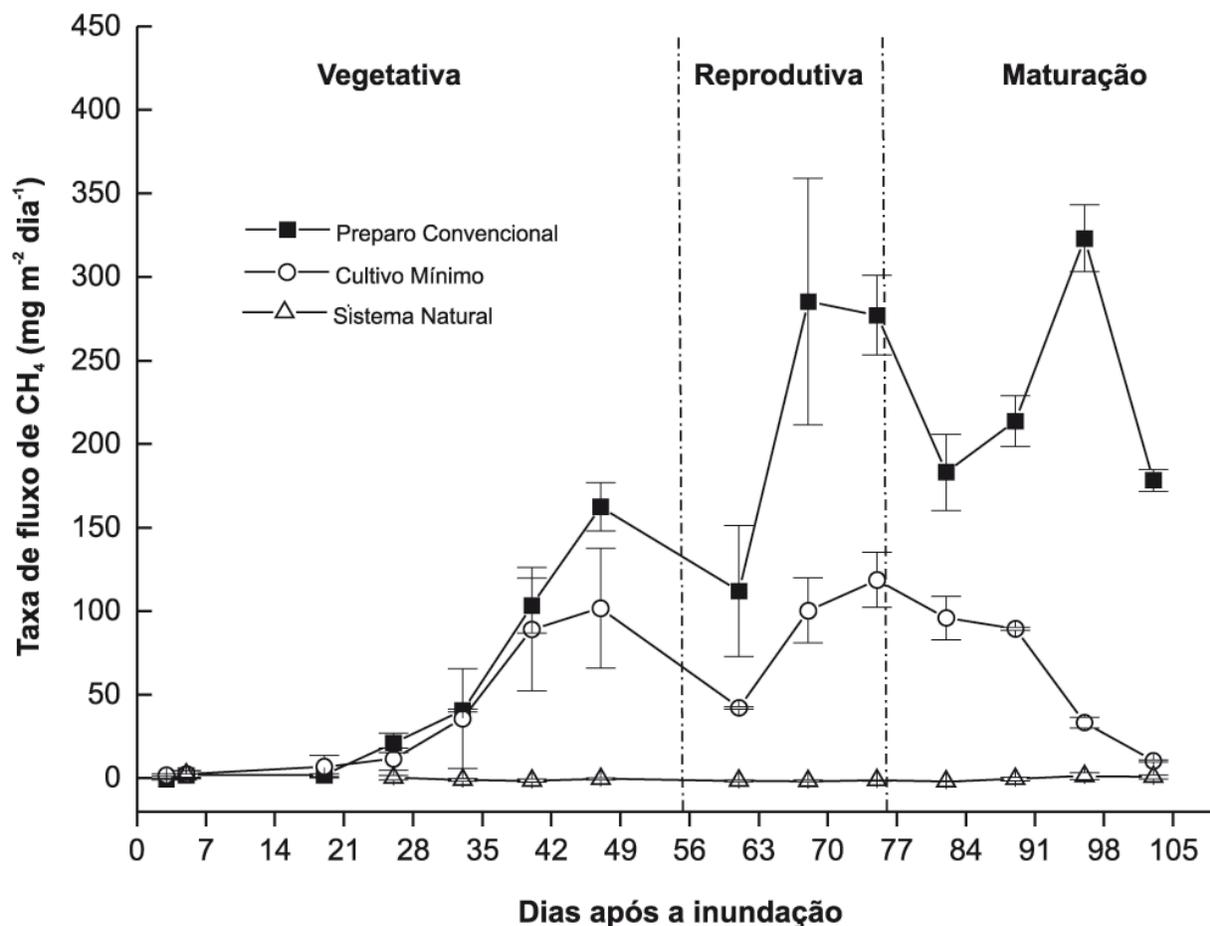


Figura 6. Fluxos de metano nos sistemas preparo convencional, cultivo mínimo e sistema natural durante a safra de 2004–2005. Fluxos para o preparo convencional e cultivo mínimo são médias de duas câmaras; e, para o sistema natural, as médias são obtidas de medidas de três câmaras, Cachoeirinha, RS, Brasil.

Fonte: Emissão... (2008).

A avaliação do fluxo de metano no sistema natural foi realizada para se verificar a contribuição de um sistema sem utilização agrícola para as emissões de metano. Foi verificado que não houve fluxo no sistema natural avaliado. As quantificações realizadas por cromatografia indicam que os valores de concentração de metano variaram entre 1,0 ppm e 1,3 ppm, sendo esses valores muito próximos à concentração do metano na atmosfera. Deve-se destacar a baixa quantidade de chuva na região durante a safra de 2004–2005.

A baixa precipitação nesse ano atípico também pode ter influenciado nos efluxos medidos no sistema de preparo (convencional). Durante o ano de 2004–2005 verificou-se que os valores mais altos de efluxo para o preparo convencional foram de, aproximadamente, $320 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; enquanto em anos anteriores, durante as safras de 2002–2003 e 2003–2004, os efluxos de metano atingiram até $650 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de metano no preparo convencional.

Os efluxos sazonais obtidos na safra 2004–2005, em Cachoeirinha, mostraram significativa diferença na contribuição da emissão do metano entre os sistemas de preparo convencional e o cultivo mínimo. O preparo convencional apresentou nesse ano emissão três vezes maior que no cultivo mínimo (Figura 7).

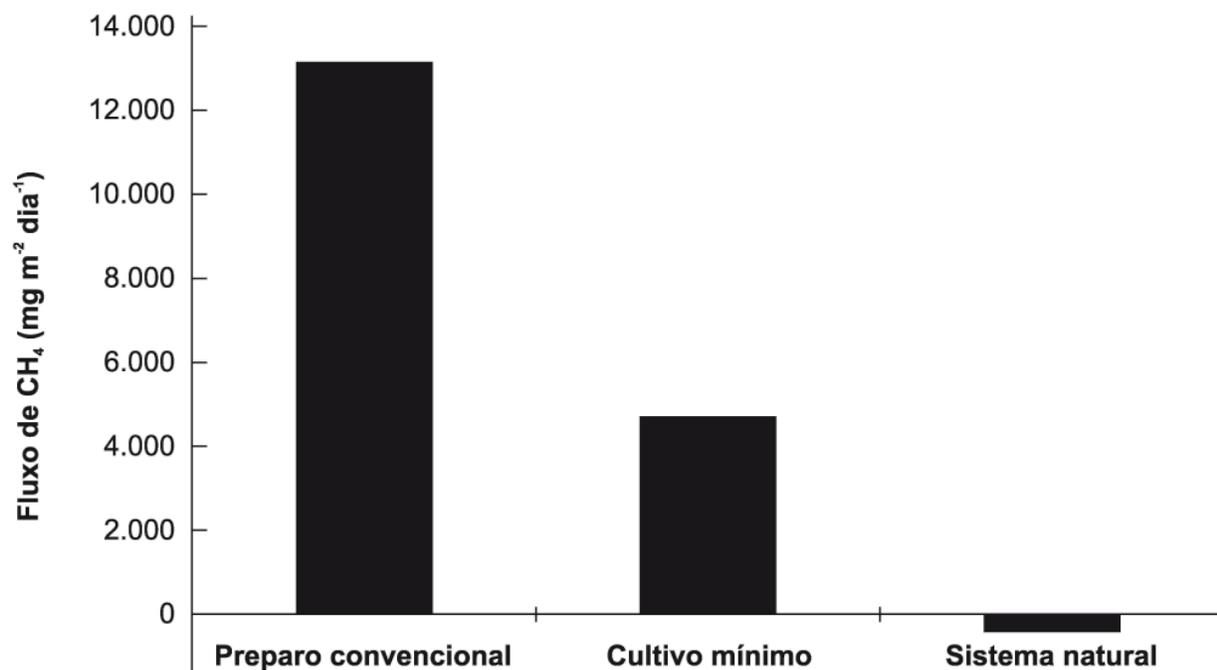


Figura 7. Fluxo sazonal de metano durante a safra de 2004–2005, Cachoeirinha, RS, Brasil.

Fonte: Emissão... (2008).

A produtividade da safra de 2004–2005 foi semelhante nos dois sistemas de preparo, apresentando valores de 7.200 kg ha⁻¹ e 7.021 kg ha⁻¹ para cultivo mínimo e preparo convencional, respectivamente.

Local: Uruguaiiana, RS

Os efluxos foram medidos na safra de 2004–2005 em área de arroz irrigado cultivado sob preparo convencional (Figura 8). Os valores de efluxo estimados no experimento em Uruguaiiana foram mais baixos, atingindo 100 mg m⁻² dia⁻¹, quando comparado aos efluxos em Cachoeirinha que alcançou 300 mg m⁻² dia⁻¹, para o mesmo sistema de preparo de solo.

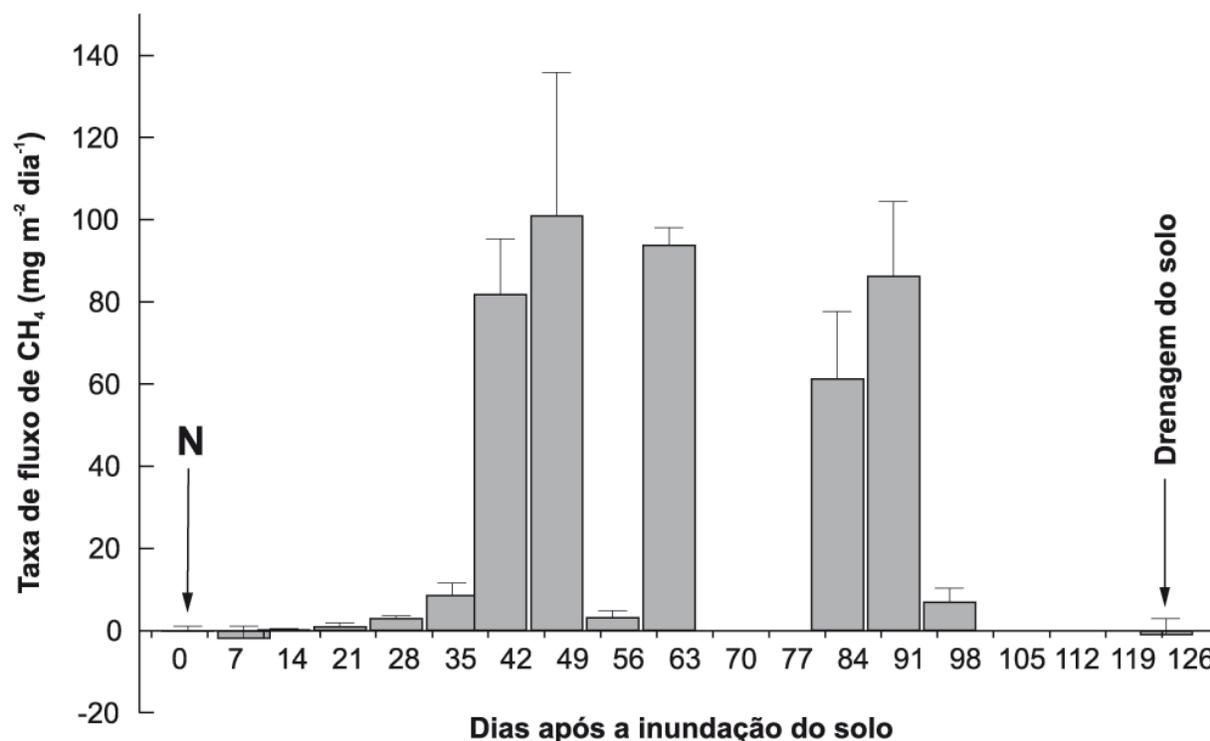


Figura 8. Fluxos de metano no sistema preparo convencional durante a safra de 2004–2005. Valores de fluxo obtidos pela média de duas câmaras, Uruguaiiana, RS, Brasil.

Nota: N-aplicação de ureia.

Fonte: Emissão... (2008).

A taxa média de efluxos de metano observada em Uruguaiana foi menor que a observada em Cachoeirinha para ambos os sistemas de preparo de solo. O valor da emissão sazonal de Cachoeirinha foi aproximadamente 3 vezes maior do que em Uruguaiana para o sistema preparo convencional (Tabela 5).

Tabela 5. Taxa média de emissão de CH₄ e emissão sazonal sob plantio convencional (CT) e cultivo mínimo (CM) na safra de 2004–2005 em Cachoeirinha, RS, Brasil, e Uruguaiana, RS, Brasil.

	Cachoeirinha			Uruguaiana
	PC	CM	SN	PC
Taxa média de fluxo, mg CH ₄ m ⁻² dia ⁻¹	135,9 ⁽¹⁾	52,9 ⁽¹⁾	-0,4 ⁽¹⁾	31,7 ⁽¹⁾
Fluxo sazonal de CH ₄ g m ⁻²	13,2	4,7	-0,44	4,0

Nota: PC: Preparo Convencional; CM: Cultivo Mínimo, SN: Sistema Natural.

⁽¹⁾ Média de 14 avaliações.

Fonte: Emissão... (2008).

As emissões de metano em campos de arroz irrigado, sob sistemas representativos nas regiões estudadas, foram bem variáveis ao longo das safras estudadas. Os sistemas de preparo do solo mais utilizados no Rio Grande do Sul são o preparo convencional (PC) e o plantio direto (PD), ambos sob regime de inundação contínua, que representam, respectivamente, 41% e 14% da área cultivada (INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ, 2003). No Estado de São Paulo, o sistema mais representativo é o preparo convencional, sob regime de inundação contínua. Em Pindamonhangaba, SP, as emissões sazonais de metano por arroz irrigado, sob regime de inundação contínua (sistema representativo na região) variaram de 32,84 g CH₄ m⁻² na safra de 2002–2003 a 8,92 g na safra de 2003–2004, e 18,91 g na safra de 2004–2005, com uma média de 20,22 g CH₄ m⁻² ± 12,01 g CH₄ m⁻² nesse período. Em Cachoeirinha, RS, as emissões sazonais de metano por regime de arroz irrigado em sistema de plantio convencional

variaram de 49,00 g CH₄ m⁻² na safra de 2002–2003 a 59,00 g CH₄ m⁻² na safra de 2003–2004, com uma média de 54,00 g de CH₄ m⁻² ± 7,07 g CH₄ m⁻². Em sistema de plantio direto, as emissões sazonais em Cachoeirinha variaram de 33 g CH₄ m⁻² na safra de 2002–2003 a 55,00 g CH₄ m⁻² na safra de 2003–2004, com uma média de 44,00 g CH₄ m⁻² ± 15,56 g CH₄ m⁻². Os resultados da safra de 2004–2005 obtidos em Cachoeirinha e em Uruguaiana, RS, não foram considerados no cálculo da média das emissões sazonais, uma vez que os tratamentos não foram repetidos em outros anos.

Com exceção da safra de 2002–2003, os resultados em Pindamonhangaba apontaram menores emissões de metano em sistema de cultivo com regime de água intermitente em relação ao sistema sob regime contínuo de água, variando de 14% a 36% a redução de emissões de metano sob regime de inundação intermitente.

Em Cachoeirinha, os resultados mostraram uma tendência a menores emissões de metano em sistemas de cultivo de plantio direto (PD), quando comparado ao sistema de plantio convencional (PC). Em sistema de cultivo mínimo (CM), observa-se também que as emissões de metano são menores em relação às de sistema de cultivo convencional. Em Uruguaiana, RS, observou-se uma baixa emissão de metano, sob condições de cultivo convencional. Entretanto, tendo em vista as condições climáticas singulares que ocorreram nessa safra nessa região, não se pode afirmar que esse seja o padrão de emissão normal associado a essa região.

A Tabela 6 apresenta os resultados finais do estudo, com fatores de emissão sazonal de metano em g m⁻² obtidos nos locais estudados, nas safras de 2002–2003, 2003–2004 e 2004–2005.

Tabela 6. Emissões de metano em sistemas de produção de arroz irrigado em Pindamonhangaba (SP) e Cachoeirinha (RS). Safras 2002–2003, 2003–2004 e 2004–2005.

Área de estudo	Sistema de manejo	Emissões sazonais de metano (g m ⁻²)			
		2002–2003	2003–2004	2004–2005	Média
Sudeste					
Pindamonhangaba, SP	Plantio convencional, regime contínuo	32,84 ± 0,24	8,92 ± 1,05	18,91 ± 2,38	20,22 ± 12,01
		36,00 ± 10,65	5,68 ± 2,12	16,20 ± 2,54	19,29 ± 15,39
Pindamonhangaba, SP	Plantio convencional, regime intermitente				
Sul					
Cachoeirinha, RS	PC - Plantio convencional	49 ± 2,6	59 ± 4,1	13,2 ⁽¹⁾	54,00 ± 7,07
		33 ± 0,7	55 ± 1,2	-	44,00 ± 15,56
Cachoeirinha, RS	PD - Plantio direto				
Cachoeirinha, RS	CM - Cultivo mínimo	-	-	4,7 ⁽¹⁾	-
Uruguaiana, RS	CM - Cultivo mínimo	-	-	4,0 ⁽¹⁾	-

⁽¹⁾ Fatores não considerados na média.
Fonte: Emissão... (2008).

Considerações finais

Os experimentos conduzidos neste projeto indicam que sistemas de plantio direto tendem a produzir menores emissões de metano em relação ao sistema convencional, assim como sistemas de inundação intermitente tendem a apresentar menores emissões em relação ao sistema de inundação contínua. Entretanto, para saber a real magnitude de contribuição de GEEs a partir desses sistemas agrícolas, seria importante também avaliar os fluxos de CO₂ e de óxido nitroso ao longo da safra e da entressafra.

O emprego de diferentes variedades de arroz deveria ser testado, uma vez que, segundo a literatura, podem influenciar a produção de metano, em função das características intrínsecas da planta, como a produção de exsudatos, a altura, aerênquima, entre outros parâmetros. Experimentos nas regiões Sul e Sudeste utilizaram variedades diferentes, em função das recomendações agronômicas locais, porém esse fato não permitiu uma análise comparativa dos sistemas de produção entre as regiões. Da mesma forma, o impacto da utilização de diferentes tipos de fertilizantes nitrogenados não foi avaliado nos experimentos citados, constituindo, portanto, uma oportunidade para avaliações do potencial de mitigação em função do uso de fertilizantes.

Ressalta-se a necessidade de monitorar por um tempo mais longo os fluxos sazonais de metano em áreas de arroz irrigado, avaliando diversas safras e sistemas de manejo, tendo em vista as diferentes respostas dos sistemas de cultivo às condições climáticas. Além dos locais estudados (Pindamonhangaba, SP, Cachoeirinha, RS, Uruguaiana, RS), outros experimentos têm sido, desde então, instalados nos municípios de Itajaí (SC), Santa Maria (RS) e Tremembé (SP).

Diferentes variedades de arroz deveriam ser estudadas para avaliação do efeito potencial dos diferentes ciclos, da quantidade e qualidade de exsudatos produzidos, das características intrínsecas a cada espécie, na emissão de metano do solo.

Os dados obtidos neste estudo estão sendo utilizados na validação do modelo DNDC, com posterior uso de sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto para a estimativa de emissão de metano em áreas de cultivo de arroz irrigado, colaborando dessa forma para melhores estimativas de emissão de metano no País.

Referências

AULAKH, M. S.; WASSMANN, R.; RENNENBERG, H. Methane emissions from rice fields: quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options. **Advances in Agronomy**, New York, v. 70, p. 193-260, 2001.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Brazil's initial communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Brasília, DF, 2004. 271 p.

brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Primeiro Inventário Brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: relatórios de referência: emissões de metano do cultivo de arroz**. Brasília, DF, 2006. 56 p.

BRONSON, K. F.; SINGH, U.; NEUE, H. U.; ABAO, E. B. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: II. Fallow period emissions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 988-993, 1997.

CAI, Z.; TSURUTA, H.; GAO, M.; XU, H.; WEI, C. Options for mitigating methane emission from a permanently flooded rice field. **Global Change Biology**, Urbana, v. 9, p. 37-45, 2003.

CAI, Z.; XING, G.; YAN, X.; XU, H.; TSURUTA, H.; YAGI, K.; MINAMI, K. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management. **Plant and Soil**, The Hague, v. 196, n. 1, p. 7-14, 1997.

CONRAD, R.; SCHÜTZ, H.; BABEL, M. Temperature limitation of hydrogen turnover and methanogenesis in anoxic paddy soil. **FEMS Microbiology Letters**, Amsterdam, NL, v. 45, p. 281-289, 1987.

COSTA, F. de S. **Estoques de carbono orgânico e efluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtropical brasileiro**. 2005. 127 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) –

Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

EMISSÃO de metano em sistemas de produção de arroz irrigado: quantificação e análise: relatório técnico final. Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia: Embrapa, 2008. 86 p.

FETZER, S.; CONRAD, R. Effect of redox potential on methanogenesis by *methanosarcina barkeri*. **Archives of Microbiology**, New York, v. 160, p. 108-113, 1993.

GON, H. A. C. van der. **Methane emission from wetland rice fields**. Wageningen: Agricultural University, 1996. 182 p.

HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L. G.; BRUCE, J.; LEE, H.; CALLANDER, B. A.; HAITES, E.; HARRIS, N.; MASKELL, K. (Ed.). **Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 339 p.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br>>. Acesso em: 26 mar. 2003.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Manual on measurement of methane and nitrous oxide emissions from agriculture**. Vienna, AT, 1992. 91 p. (IAEA. TECDOC, 674).

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change; UNEP. United Nations Environment Programme; OECD. Organization for Economic Co-Operation and Development; IEA. International Energy Agency. **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Paris, FR, 1997.

JAIN, M. C.; KUMAR, S.; WASSMANN, R.; MITRA, S.; SINGH, S. D.; SINGH, J. P.; SING, R.; YADAV, A. K.; GUPTA, S. Methane emissions from irrigated rice fields in northern India (New Delhi). **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 58, p. 75-83, 2000.

JENKINSON, D. S. Studies on the decomposition of plant material in soil: V. The effects of plant cover and soil type on the loss of carbon from ^{14}C labeled ryegrass decomposing under field conditions. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 28, p. 424-434, 1977.

LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. **European Journal of Soil Biology**, New Jersey, v. 37, p. 25-50, 2001.

LINDAU, C. W. Methane emissions from Louisiana rice fields amended with nitrogen fertilizers. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 26, p. 353-359, 1994.

LINDAU, C. W.; BOLLIICH, P. K.; DELAUNE, R. D.; PATRICK, W. H.; LAW, V. J. Effects of urea fertilizer and environmental factors on CH_4 emissions from Louisiana, USA rice field. **Plant and Soil**, The Hague, v. 136, p. 195-203, 1991.

NEUE, H. U.; ROGER, P. A. Potential of methane emission in major rice ecologies. In: ZEPP, R. G. (Ed.). **Climate biosphere interaction**. New York: Wiley & Sons, 1994. p. 65-93.

NEUE, H. U.; WASSMANN, R.; LANTIN, R. S.; ALBERTO, M. C. R.; ADUNA, J. B.; JAVELLANA, A. M. Factors affecting methane emission from rice fields. **Atmospheric Environment**, New York, v. 30, p. 1751-1754, 1996.

NOUCHI, I.; HOSONO, T.; AOKI, K.; MINAMI, K. Seasonal variation in methane flux rice paddies associated with methane concentration in soil water, rice biomass and temperature, and its modelling. **Plant and Soil**, The Hague, v. 161, p. 195-208, 1994.

Parashar, D. C.; Gupta, P. K.; Raj, J. S.; Dharma, R. C.; Singh, N. Effect of soil temperature on methane emission from paddy field. **Chemosphere**, Amsterdam, NL, v. 26, p. 247-250, 1993.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemical of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 24, p. 29-96, 1972.

RATH, A. K.; KAMAKRISHNAN, B.; SETHUNATHAN, N. Temperature dependence of methane production in tropical rice soils. **Geomicrobiology Journal, Philadelphia**, v. 19, p. 581-592, 2002.

RATH, A. K.; SWAIN, B.; RAMAKRISHNAN, B.; PANDA, D.; ADHYA, T. K.; RAO, V. R.; SETHUNATHAN, N. Influence of fertilizer management and water regime on methane emission from rice fields. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, NL, v. 76, p. 99-107, 1999.

SASS, R. L.; FISHER, F. M.; WANG, Y. B.; TURNER, F. T.; JUND, M. F. Methane emission from rice fields: the effect of floodwater management. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, DC, v. 6, n. 3, p. 249-262, 1992.

Sass, R. L.; Fisher, J. M. CH₄ emissions from paddy fields in the United States Gulf Coast area. In: MINAMI, K.; MOSIER, A.; SASS, R. L. (Ed.). **CH₄ and N₂O: global emissions and controls from rice fields and other Agricultural and Industrial Sources**. Tsukuba: National Institute of Agro-Environmental Sciences, 1994. p. 65-77. (NIAES Series, 2).

SASS, R. L.; FISHER, J. M. Methane emissions from Texas rice fields: a five year study. In: PENG, S.; INGRAM, K. T.; NEUE, H. U.; ZISKA, L. H. (Ed.). **Climate change and rice**. Berlin, DE: Springer-Verlag, 1995. p. 46-59.

SchÜtz, H.; HOLZAPFEL-PSHORN, A.; CONRAD, R.; RENNENBERG, H.; SEILER, W. A three-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy field. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 94, p. 16405-16416, 1989.

SchÜtz, H.; SEILER, W.; CONRAD, R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. **Biogeochemistry**, Amsterdam, NL, v. 11, p. 77-95, 1990.

SISTEMA brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

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

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

Tsutsuki, K.; Ponnampereuma, F. N. Behaviour of anaerobic decomposition products in submerged soils, effects of organic material amendment, soil properties and temperature. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, JP, v. 33, p. 13-33, 1987.

WANG, B.; NEUE, H. U.; SAMONTE, H. P. Effect of cultivar difference (“IR71”, “IR65598” and “DULAR”) on methane emission. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, NL, v. 62, p. 31-40, 1997.

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

WASSMANN, R.; NEUE, H. U.; LANTIN, R. S.; ADUNA, J. B.; ALBERTO, M. C. R.; ANDALES, M. J.; TAN, M. J.; GON, H. A. C. van der; HOFFMANN, H.; PAPEN, H.; RENNENBERG, H.; SEILER, W. Temporal patterns of methane emissions from wetland rice fields treated by different modes of N application. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 99, p. 16457-16462, 1994.

YAGI, K.; MINAMI, K. Effects of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, JP, v. 36, p. 599-610, 1990.