

DINÂMICA DA EMISSÃO DE METANO EM SOLOS SOB CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO NO SUL DO BRASIL⁽¹⁾

Leandro Souza da Silva⁽²⁾, Gustavo Griebeler⁽³⁾, Diovane Freire Moterle⁽⁴⁾, Cimélio Bayer⁽⁵⁾, Tiago Zschornack⁽⁶⁾ & Elisandra Pocojeski⁽⁴⁾

RESUMO

Solos de várzea sob cultivo de arroz irrigado contribuem com aproximadamente 18 % das emissões totais de metano (CH₄) do Estado do Rio Grande do Sul. Entretanto, a liberação de CH₄ depende do curso de redução de cada solo. O objetivo do presente estudo foi avaliar a dinâmica da emissão desse gás de efeito estufa (GEE) em seis solos: Gleissolo (2), Planossolo (2), Chernossolo e Neossolo, representativos do cultivo de arroz irrigado no Sul do Brasil, visando identificar também sua relação com propriedades do solo e as alterações eletroquímicas da solução após o alagamento. O experimento foi realizado em casa de vegetação, com três repetições, segundo delineamento de blocos casualizados. Os solos foram dispostos em vasos de PVC mantidos com uma lâmina de água de 10 cm de altura e cultivados com arroz. A avaliação das emissões de CH₄ foi realizada semanalmente, do 3º ao 66º dia após o alagamento (DAA) do solo, com o auxílio de uma câmara de PVC acoplada ao topo dos vasos. As amostras de ar foram coletadas em quatro intervalos de 5 min, para estimativa das taxas de emissão de CH₄. A solução do solo também foi coletada e caracterizada. O início da emissão de CH₄ variou entre os solos e, normalmente, ocorreu após a quase total redução do Fe³⁺ (em torno de 90 % da maior liberação de Fe²⁺) e estabilização dos valores de pH e de Eh da solução. A emissão total de CH₄ variou de 8,5 a 44,2 g m⁻² e apresentou relação sigmoideal com os teores de C orgânico dos solos (r²=0,83, p < 0,05), sugerindo que a disponibilidade de C somente foi limitante para o processo de metanogênese em teores inferiores a 8 g kg⁻¹ de C no solo. Os resultados mostram que a dinâmica e as quantidades totais de CH₄ emitidas são influenciadas pelo tipo de solo e que

⁽¹⁾ Recebido para publicação em fevereiro de 2010 e aprovado em janeiro de 2011.

⁽²⁾ Professor Associado, Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Av. Roraima 1000, Camobi, CEP 97105-900 Santa Maria (RS). Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq. E-mail: leandro@smail.ufsm.br

⁽³⁾ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFSM. E-mail: gustavogriebeler@hotmail.com

⁽⁴⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFSM. E-mails: diovanemoterle@gmail.com; epocojeski@gmail.com

⁽⁵⁾ Professor Associado, Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, CEP 91540-000 Porto Alegre (RS). Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq. E-mail: cimelio.bayer@ufrgs.br

⁽⁶⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFRGS. E-mail: tivizs@yahoo.com.br

esforços devem ser direcionados para determinação dos fatores de emissão de CH₄ para os diferentes solos representativos da produção de arroz no Sul do Brasil, bem como na avaliação do efeito de práticas agrícolas na mitigação das emissões desse GEE nos diferentes solos.

Termos de indexação: aquecimento global, gases de efeito estufa, redução do solo, solos de várzea.

SUMMARY: DYNAMICS OF METHANE EMISSION FROM FLOODED RICE SOILS IN SOUTHERN BRAZIL

Paddy soils under flooded rice produce nearly 18% of all methane (CH₄) emissions in the state of Rio Grande do Sul. However, CH₄ release depends on the intensity of soil reduction. The objective of this study was to evaluate the dynamics of emissions of this greenhouse gas from six representative soils [Albaqualf (2), Endoaqualf (2), Udorthent and Hapludoll] of rice cultivation in southern Brazil, to identify the relation with soil properties and electrochemical changes in the soil solution after flooding. The experiment was carried out in a greenhouse with three replications in a randomized block design. Rice was grown in PVC pots filled with soil and covered with a 10 cm water layer. CH₄ emissions were evaluated weekly from the 3rd to the 66th day after flooding, using a gas trap fixed on top of the pots. The gas was collected every five minutes, four times, to estimate CH₄ emission rates. Soil solution was collected and analyzed as well. The beginning of CH₄ emissions varied according to the soil type and usually occurred when 90 % of Fe³⁺ had been reduced to Fe²⁺ and pH and Eh stabilized. Total CH₄ emission varied from 8.5 to 44.2 g m⁻² and had a sigmoid relation to soil organic C (r² = 0.83, p < 0.05), suggesting that C availability only limited methanogenesis when levels were below 8 g kg⁻¹ C soil. The results illustrate that the dynamics and total fluxes were strongly affected by the soil type and efforts must be directed toward determining CH₄ emission factors for the different representative soil types of rice cultivation in southern Brazil, and agricultural practices to mitigate greenhouse gases from the different soils should be evaluated.

Index terms: global warming, greenhouse gases, soil reduction, paddy soils.

INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é cultivado em aproximadamente 157 Mha em todo o mundo, sendo a base da alimentação de muitos povos (IRRI, 2007). O principal sistema de cultivo desse cereal no mundo envolve a irrigação por alagamento, correspondendo a 57 % da área total cultivada, e contribui com mais de 70 % da produção mundial desse cereal (IRRI, 2007). No Brasil, a área cultivada com arroz irrigado por inundação, em 2008/2009, foi de aproximadamente 2,8 Mha. Nesse mesmo ano, o Estado do Rio Grande do Sul cultivou 1,06 Mha, com produção de 7,3 milhões de toneladas (IBGE, 2009). A produção de arroz no Rio Grande do Sul é concentrada na metade sul do Estado, onde predominam, nas terras baixas, os Planossolos e Gleissolos, representando 56 % das áreas de várzea. Localizados em cotas mais elevadas, ocorrem os Chernossolos e os Neossolos, que representam 16 e 11 % das áreas de várzea, respectivamente (Pinto et al., 2004). Os últimos, embora participem com menor área, são importantes ordens de solos utilizadas para o cultivo de arroz, pois,

associado ao fato de a posição geográfica de onde ocorrem ser favorável à cultura, apresentam produtividades mais elevadas em razão da fertilidade química natural em relação às demais ordens.

Em solos cultivados com arroz no sistema de alagamento contínuo, as condições de anaerobiose resultam na produção de metano (CH₄) como produto final da decomposição de compostos orgânicos por bactérias metanog nicas (Lai, 2009). Esse gás do efeito estufa (GEE) tem potencial de absorção de radiação infravermelha cerca de 21 vezes maior que o do CO₂, sendo considerado o segundo gás em importância no efeito estufa antrópico (IPCC, 2007). O fator de emissão de CH₄ geral, indicado para elaboração de inventários de emissão deste gás em lavouras de arroz irrigado por alagamento,   de 7,08 mg m² h⁻¹, o que corresponde a 1,7 kg ha dia⁻¹ CH₄ (IPCC, 2007). No Brasil, são poucos os estudos em que têm avaliado diretamente as emissões de CH₄ de solos com lavouras de arroz irrigado. Em solos de campos experimentais do Estado de São Paulo, foi determinado um fator de emissão de 2,74 mg m² h⁻¹ CH₄ (0,67 kg ha⁻¹ dia⁻¹ CH₄) (Lima et al., 2003), enquanto um fator de

16,25 mg m⁻² h⁻¹ CH₄ (3,9 kg ha⁻¹ dia⁻¹ CH₄) foi determinado em lavouras de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Costa, 2005). Essa ampla variação nas emissões de CH₄ demonstra a necessidade de intensificação na pesquisa dos fatores de emissão desse GEE em diferentes condições edafoclimáticas, visando à elaboração de futuros inventários no Brasil, bem como a identificação de variáveis controladoras das emissões que contribuam futuramente para a modelagem destas.

A produção de CH₄ é influenciada por fatores intrínsecos dos solos (Neue et al., 1994; Sass et al., 1994; Setyanto et al., 2002) e de clima (Schütz et al., 1990), além de fatores relacionados aos sistemas de manejo do solo, irrigação e disponibilidade de C (Schütz et al., 1991; Wassmann et al., 2000; Costa, 2005). Especificamente, o tipo de solo é um fator a ser estudado quanto à sua influência nas emissões de CH₄ sob alagamento. As propriedades químicas e mineralógicas dos solos alteram o comportamento do potencial de oxirredução (Eh), o qual reflete no equilíbrio dinâmico do sistema redox que envolve principalmente O, N, Fe, Mn, S e C (Ponnamperuma, 1972).

Sob alagamento, a condição de potencial redox entre -150 e -200 mV (Wang et al., 1993) é necessária para a atividade de bactérias metanogênicas. Essas são estritamente anaeróbias, condição que é atingida após a redução da maioria dos íons inorgânicos, quando as bactérias passam a utilizar o C como acceptor de elétrons, o que resulta na produção de CH₄ (Peters & Conrad, 1996; van Bodegom & Stams, 1999). Portanto, como a dinâmica da redução varia entre os tipos de solo (Le Mer & Roger, 2001), basicamente em função do tipo e da quantidade do íon envolvido no sistema redutor (van Bodegom & Stams, 1999), espera-se que a dinâmica da emissão de CH₄ seja diferenciada entre solos em função da variação da composição do seu sistema redox. Outro componente que se agrega a essa variação na emissão de CH₄ é a disponibilidade de C lábil, a qual pode ser diferenciada em função dos teores e da dinâmica da matéria orgânica ou pelo efeito do tipo de solo no crescimento e desenvolvimento vegetal, alterando a produção de resíduos culturais e a exsudação radicular (Schütz et al., 1991).

No Rio Grande do Sul – que concentra a maior área cultivada com arroz irrigado no Brasil – o cultivo ocorre em diversos tipos de solo, com características distintas, o que poderá ter forte influência no processo de oxirredução e, em consequência, na dinâmica da emissão de CH₄ (Setyanto et al., 2002; Giani et al., 2006). Para avaliar essa hipótese, realizou-se o presente estudo, o qual teve por objetivos avaliar, sob condições controladas, a dinâmica da emissão de CH₄ em diferentes solos de várzea sob cultivo de arroz e verificar a sua relação com as propriedades do solo e com as características eletroquímicas da solução.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo consistiu no desenvolvimento de um experimento em casa de vegetação, no Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, o qual visou avaliar a dinâmica de emissão de CH₄ de diferentes solos nas mesmas condições de temperatura e de manejo da água, de modo que a única variável que alterasse as emissões do gás fosse o tipo de solo. Seis solos representativos da lavoura arrozeira do Rio Grande do Sul foram coletados em municípios produtores: Santa Maria (um Planossolo Háplico - P_{SM} e um Gleissolo Háplico - G_{SM}), Pelotas (Planossolo Háplico - P_{PE}), Uruguaiana (Neossolo Litólico - N_{UR}), Cachoeirinha (Gleissolo Háplico - G_{CA}) e Santa Vitória do Palmar (Chernossolo - C_{SV}). Os solos foram coletados na camada de 0–20 cm, secos ao ar, moídos e peneirados em malha de 4 mm. A distribuição granulométrica e os teores de Mn e Fe extraídos por oxalato ácido de amônio e ditionito-citrato-bicarbonato, respectivamente, foram determinados segundo métodos descritos por Embrapa (1997). O conteúdo de C e N foi determinado em autoanalisador de C e N Flash EA 1112, e os teores de Ca, Mg e K trocáveis, o cálculo da CTC e a mensuração do pH foram realizados de acordo com métodos descritos por Tedesco et al. (1995) (Quadro 1).

Quadro 1. Distribuição granulométrica e características químicas dos solos avaliados

| Solo | Localização | Dist. granulométrica | | | C ⁽¹⁾ | N ⁽¹⁾ | pH H ₂ O (1:1) | Ca ²⁺⁽²⁾ | Mg ²⁺⁽²⁾ | CTC | K ⁽³⁾ | Mn | Feo | Fed |
|-------------|---------------|----------------------|-------|--------|------------------|------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|------|--------------------|------|-----|-----|
| | | Areia | Silte | Argila | | | | | | | | | | |
| | | % | | | | | cmol _c kg ⁻¹ | | mg kg ⁻¹ | | g kg ⁻¹ | | | |
| Planossolo | Pelotas | 64,5 | 17,1 | 18,4 | 1,3 | 0,13 | 5,8 | 9,2 | 1,4 | 11,7 | 48 | 0,27 | 3,3 | 3,9 |
| Neossolo | Uruguaiana | 22,9 | 47,1 | 30,0 | 1,7 | 0,24 | 5,5 | 11 | 5 | 16,3 | 116 | 2,53 | 4,8 | 7,7 |
| Planossolo | Santa Maria | 49,2 | 22,7 | 28,1 | 1,3 | 0,12 | 6,9 | 11 | 1,1 | 14,0 | 112 | 0,33 | 1,2 | 4,9 |
| Chernossolo | Santa Vitória | 52,6 | 17,4 | 30,0 | 1,6 | 0,17 | 5,7 | 12 | 3,4 | 16,0 | 224 | 0,14 | 0,6 | 0,9 |
| Gleissolo | Santa Maria | 19,1 | 34,0 | 46,9 | 3,3 | 0,32 | 4,6 | 6,4 | 2,5 | 11,2 | 108 | 0,08 | 6,6 | 9,0 |
| Gleissolo | Cachoeirinha | 51,5 | 27,5 | 21,0 | 0,6 | 0,06 | 5,1 | 2,1 | 0,8 | 3,1 | 52 | 0,11 | 1,6 | 3,5 |

⁽¹⁾ Determinados em autoanalisador elemental modelo Flash 1112. ⁽²⁾ Extraído com KCl 1 mol L⁻¹. ⁽³⁾ Extraído com solução Mehlich-1. Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio; Fed: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato.

Vasos de PVC com dimensões de 60 cm de altura e 24,15 cm de diâmetro (0,045 m²) foram montados com aproximadamente 9 kg de solo, os quais foram distribuídos em delineamento de blocos ao acaso, com três repetições. Dez plântulas de arroz (*Oryza sativa* L.) foram transplantadas para cada vaso, e o solo foi saturado com água, formando inicialmente uma lâmina de 1 cm de água sobre o nível do solo, a qual foi elevada conforme o crescimento das plantas até, no máximo, 10 cm de altura. A avaliação das emissões de CH₄ foi feita utilizando o método da câmara fechada estática (Mosier, 1989), a qual foi composta por um tubo de PVC fechado em sua extremidade superior, acoplado à parte superior dos vasos por meio de um canal circular preenchido com água, visando à vedação completa do sistema (Figura 1).

A parte superior do tubo de PVC foi acoplada aos vasos contendo o solo e as plantas de arroz quando da realização da coleta das amostras de ar, a qual continha um termômetro digital, uma válvula de três vias para a coleta das amostras de ar e um ventilador, cuja finalidade foi homogeneizar o ar no interior da câmara imediatamente anterior à coleta propriamente dita (Figura 1). As coletas foram realizadas semanalmente, a partir do 3º dia até o 66º dia após a inundação do solo. Para coleta, foram utilizadas seringas de polipropileno de 20 mL, que eram acopladas à válvula de três vias na extremidade superior do tubo de PVC, e amostras de ar eram coletadas ao 0, 5, 10, 15 e 20 min após o fechamento da câmara. Imediatamente após a coleta, as seringas foram

armazenadas em caixa térmica contendo gel em forma de gelo e enviadas ao Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para análise cromatográfica da concentração de CH₄ das amostras de ar. Por ocasião das coletas, foi avaliada a temperatura no interior da câmara e a altura da lâmina de água, a qual foi utilizada na determinação do volume de ar da câmara para os cálculos das taxas de emissão de CH₄. As temperaturas da água de inundação e do solo a 10 cm de profundidade foram registradas com auxílio de termômetro digital com haste metálica (Quadro 2).

A concentração de CH₄ nas amostras de ar foi determinada, num prazo de 36 h após a coleta, em cromatógrafo SHIMADZU, GC-2014 (Mod. "Greenhouse"), equipado com três colunas empacotadas funcionando a 70 °C, N₂ com o gás de arraste a um fluxo de 26 mL min⁻¹, injetor com alça de amostragem direta de 1 mL e temperatura de 250 °C, detector de ionização de chama (FID) a 250 °C. Os fluxos de CH₄ foram calculados com base na equação (1).

$$f = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{PV}{RTA} \quad (1)$$

em que f é fluxo de metano ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CH}_4$); Q , a quantidade do gás na câmara no momento da coleta ($\mu\text{g CH}_4/\text{câmara}$); P , a pressão atmosférica (atm) no interior da câmara, assumida como 1 atm; V , o volume da câmara (L); t , é o tempo (h); R , a constante dos

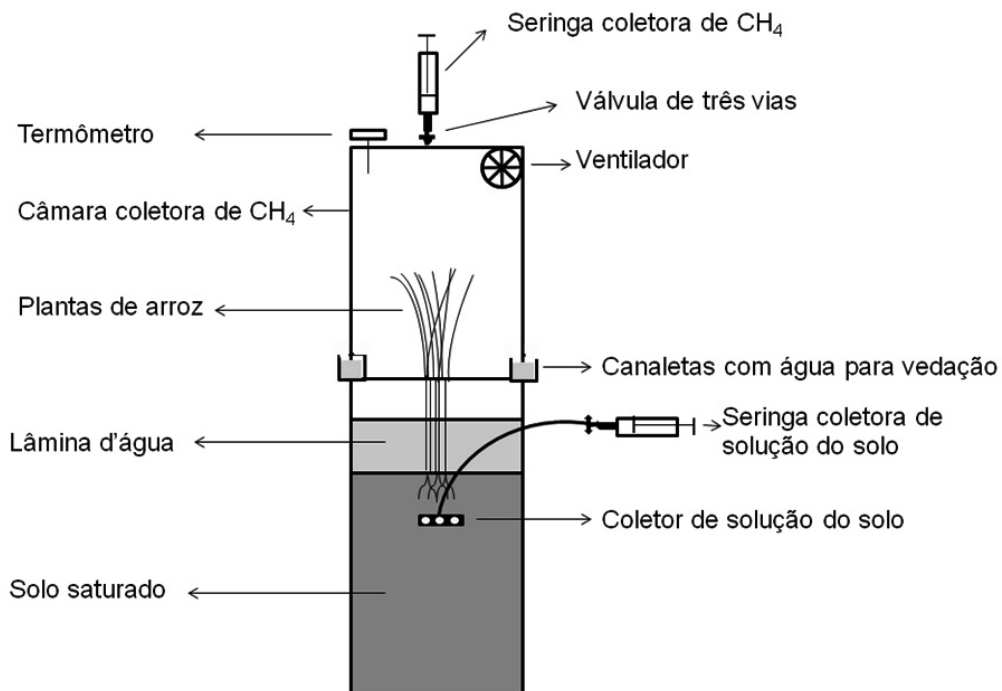


Figura 1. Ilustração do vaso e tubo de PVC superior que constituíram a câmara estática e demais detalhes (canaleta com água, termômetro, válvula de três vias, etc., na parte superior da câmara).

Quadro 2. Temperaturas médias do ar da câmara, da água e do solo dos vasos, por coleta

| Posição | Coletas - dia após o alagamento | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 3 | 10 | 17 | 24 | 31 | 38 | 45 | 52 | 59 | 66 |
| | °C | | | | | | | | | |
| Ar da câmara | 18,5 | 19,8 | 20,5 | 22,8 | 21,7 | 25,5 | 23,3 | 21,6 | 20,7 | 19,0 |
| Água | 19,9 | 16,5 | 22,5 | 21,5 | 21,5 | 23,5 | 24,5 | 19,5 | 19,5 | 18,5 |
| Solo | 20,9 | 17,5 | 23,5 | 22,5 | 21,5 | 23,5 | 24,5 | 20,5 | 19,5 | 18,5 |

gases ideais ($0,08205 \text{ atm L mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T, a temperatura no interior da câmara no momento da coleta ($^{\circ}\text{K}$); e A, a área da câmara (m^2). A taxa de aumento do gás no interior da câmara foi obtida pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada entre a concentração dos gases e o tempo de coleta. A partir dos valores de fluxo calculados, foi estimada a emissão total do período (66 dias) pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores de taxa de emissão de CH_4 do solo medida e o intervalo de tempo considerado entre as coletas (Gomes et al., 2009).

Por ocasião da coleta das amostras de ar, realizou-se a coleta da solução do solo, visando relacionar as alterações nas características eletroquímicas com a emissão de CH_4 nos diferentes solos. Previamente à inundação do solo, instalou-se um tubo de PVC (10 cm de comprimento x 2,5 cm de diâmetro), o qual foi localizado a 5 cm abaixo do nível do solo. Em uma de suas extremidades, o tubo era perfurado e recoberto com tela de poliamida com porosidade de $80 \mu\text{m}$. Na extremidade externa do tubo foi conectada uma mangueira (3 mm de diâmetro x 50 cm de comprimento) com uma seringa de polietileno de 60 mL na sua outra extremidade, com a qual foi realizada sucção para extração da solução do solo (Figura 1). Nas amostras de solução do solo, determinou-se o pH e o potencial redox com potenciômetros portáteis, sendo o eletrodo de potencial redox do tipo Ag/AgCl com anel de platina, e uma conversão dos valores de potencial redox medido em eletrodo de Ag para padrão Eh foi realizada pela adição do valor de 220 mV às leituras. Em seguida, uma alíquota de 30 mL da solução foi filtrada (Milipore® $0,45 \mu\text{m}$) com auxílio de uma bomba de vácuo, a qual foi acidificada pela adição de 1 mL de HCl 1 mol L^{-1} , a fim de evitar a precipitação do Fe por reoxidação da solução durante o armazenamento da amostra. Posteriormente, nessa solução acidificada foram analisados os teores de Fe e de Mn por espectrofotometria de absorção atômica.

Os resultados de emissão total de CH_4 foram submetidos à análise da variância ($p < 0,05$), e as diferenças entre as médias de solos foram avaliadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). A relação entre a taxa de emissão de CH_4 e as características eletroquímicas da solução dos solos foi avaliada pela significância dos coeficientes de correlação (r) linear de Pearson. A

relação entre a taxa relativa de emissão de CH_4 (taxa na coleta em relação à taxa máxima) e a quantidade relativa de Fe^{2+} (teor na coleta em relação ao teor máximo) foi estabelecida por meio do ajuste matemático, utilizando a equação (2):

$$y = ae^{bx} \quad (2)$$

em que y é a taxa relativa de emissão de CH_4 ; x, a quantidade relativa de Fe^{2+} ; e é o número de Euler e os demais parâmetros (a e b) constantes do modelo.

A relação entre as taxas máximas de emissão de CH_4 , a quantidade total acumulada de CH_4 e o teor de C no solo foi ajustada pela equação (3):

$$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}} \quad (3)$$

em que y é a taxa máxima de emissão de CH_4 ou quantidade total acumulada de CH_4 ; x refere-se ao teor de C no solo; e é o número de Euler; e x_0 é o ponto de inflexão da curva e os demais parâmetros (a e b) constantes do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O início da emissão de CH_4 foi distinto entre os solos (Figura 2) e teve estreita relação com as alterações eletroquímicas na solução do solo (Figura 3). As emissões de CH_4 até o 17º dia após alagamento (DAA) tiveram fluxos inferiores a $1 \text{ mg h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ CH}_4$ e corresponderam a menos de 1 % das emissões totais em todos os solos. A partir desse período, as emissões de CH_4 aumentaram exponencialmente (Figura 2), coincidindo com a estabilização do pH e do Eh, em seus máximos e mínimos valores, respectivamente (Figura 3).

A estabilização dos teores de Mn^{2+} e de Fe^{2+} em seus valores máximos, a partir dos 17 DAA (Figura 3), indica que o início das emissões de CH_4 ocorreu após as reduções sequenciais de Mn(III e IV) e de Fe(III) no solo. Após esses elementos atuarem como aceptores de elétrons no processo de redução, os compostos

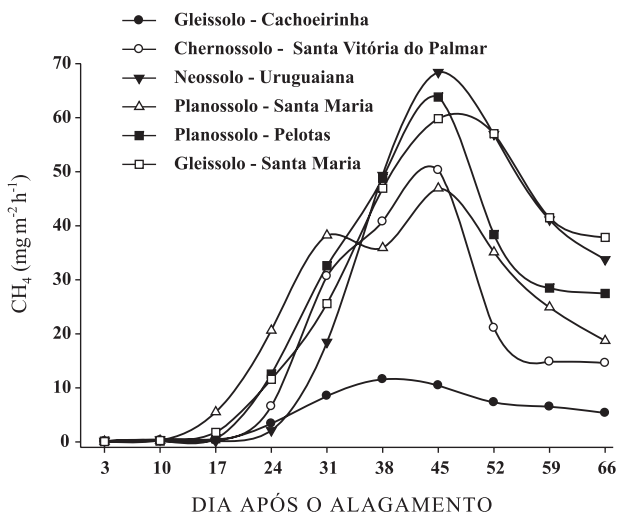


Figura 2. Taxa de emissão de metano (CH_4) de seis solos representativos do cultivo do arroz no Rio Grande do Sul.

orgânicos passaram a ser utilizados por bactérias metanogênicas, havendo a intensificação da produção de CH_4 nos solos de maneira geral (Figura 2). Na figura 4, verifica-se claramente essa relação entre a redução do Fe(III) e a emissão de CH_4 dos solos. Observa-se que, enquanto o Fe ainda está atuando como aceptor de elétrons, a emissão de CH_4 é muito baixa e se intensifica exponencialmente a partir de

90 % do pico máximo de liberação de Fe^{2+} para a solução do solo, independentemente do valor de Eh dessa solução (Figura 3). Esses resultados foram idênticos aos obtidos por Setyanto et al. (2002), segundo os quais a produção de CH_4 somente ocorreu quando aproximadamente 90 % do Fe foi reduzido.

O Mn teve destaque na dinâmica das emissões de CH_4 do Neossolo, o qual teve a emissão retardada em relação aos demais (Figura 2), possivelmente devido à diminuição mais lenta do Eh causada pela alta quantidade de Mn(III ou VI) reduzido a Mn^{2+} em comparação aos demais solos, que apresentaram concentrações máximas de 10 (Gleissolo e Planossolo de Santa Maria) a 50 vezes (Gleissolo de Cachoeirinha) inferiores às do Neossolo (Figura 3). A máxima concentração de Mn^{2+} na solução do solo foi atingida aos 17 DAA, enquanto a de Fe^{2+} foi atingida aos 31 DAA, período que coincidiu com o aumento exponencial da emissão de CH_4 nesse solo. Esses resultados indicam que, enquanto houver compostos inorgânicos sendo reduzidos pelas bactérias anaeróbias, especialmente óxidos de Fe e de Mn, a utilização de compostos de C como aceptores de elétrons é restrita, permanecendo baixa a metanogênese (van Bodegon & Stams, 1999).

A dinâmica do processo de redução no Chernossolo diferiu em relação à dos demais solos (Figura 3). O pH manteve-se constante durante todo o período de avaliação, variando entre 5,9 e 6,1, o que provavelmente ocorreu devido aos baixos teores de Fe

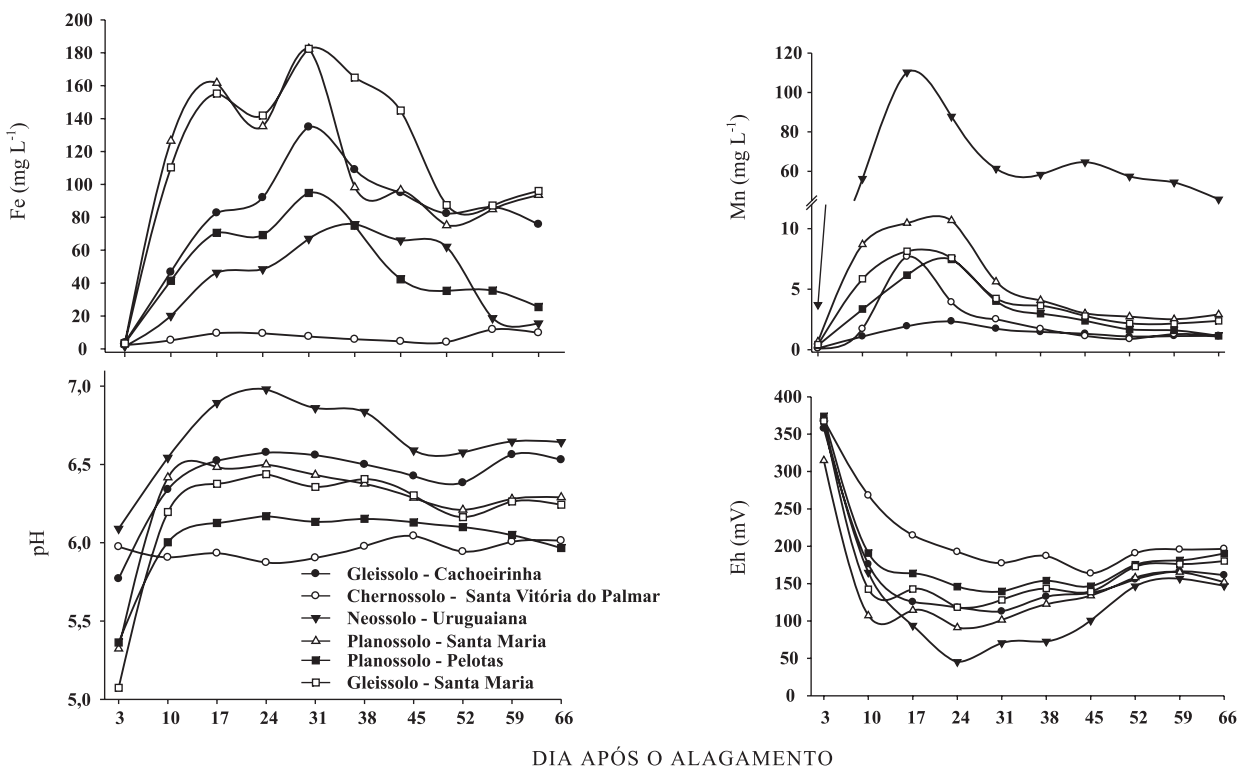


Figura 3. Teores de ferro (Fe^{2+}) e manganês (Mn^{2+}) e valores de pH e de Eh no decorrer do processo de redução de seis solos representativos do cultivo de arroz no Rio Grande do Sul.

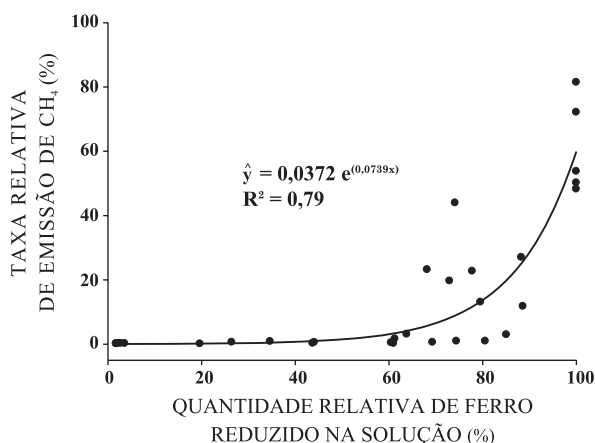


Figura 4. Relação entre a quantidade relativa de ferro reduzido na solução do solo e a taxa de emissão de CH₄ em seis solos representativos do cultivo de arroz no Rio Grande do Sul.

no solo (Quadro 1). Nessas condições, o Eh diminuiu lentamente e permaneceu mais elevado entre os solos estudados (Figura 3). A dinâmica de emissão de CH₄ nesse solo contradiz a expectativa, pois as alterações eletroquímicas na solução foram distintas, enquanto a emissão de CH₄ foi semelhante à dos outros solos (Figura 2 e Quadro 3), sugerindo que as condições de pH e Eh da solução do solo não são determinantes para que ocorra a metanogênese. Isso contraria Wang et al. (1993), os quais sugerem que a maioria das bactérias metanogênicas é neutrófila e sua atividade é restrita a valores de Eh inferiores a -150 mV. Em estudo realizado em campo por Costa (2005), também foram observadas emissões de CH₄ em valores de Eh superiores a -150 mV, o que pode estar relacionado à atividade de bactérias metanogênicas em microssítios de solo com menores valores de Eh. Isso pode ter ocorrido no presente trabalho, já que as avaliações da solução do solo referem-se à solução que migra para os coletores utilizados, fixados em uma determinada profundidade dos vasos.

As taxas máximas de emissão de CH₄ ocorreram próximas aos 45 DAA e variaram de 13,1 mg m⁻² h⁻¹, no Gleissolo de Cachoeirinha; a 68,4 mg m⁻² h⁻¹, no Neossolo de Uruguaiana (Figura 2 e Quadro 3). Nesse período, as plantas de arroz estavam no estágio de diferenciação da panícula – fase em que também foram encontrados picos de emissão de CH₄ por Neue et al. (1994) e Huang et al. (2002) em experimentos em casa de vegetação. Segundo Huang et al. (2002), um segundo pico de emissão de CH₄ ocorre durante o estágio de florescimento, a partir dos 70 dias de ciclo. Entretanto, no presente estudo esse pico não foi verificado, pois o experimento foi encerrado antes desse estágio.

As taxas de emissão de CH₄ não foram correlacionadas com os teores de Fe, Mn, Ca e Mg ou valores de pH na solução do solo (Quadro 4), porém as taxas máximas e a emissão total tiveram relação sigmoide com os teores de C total dos solos (Figura 5). O teor de C orgânico do solo é um indicador da disponibilidade de C para metanogênese, e a relação sigmoide sugere que as taxas máximas de CH₄ somente apresentaram redução expressiva quando os teores de C orgânico foram inferiores a 8 g kg⁻¹ C de solo. Cabe salientar que foram utilizados os valores de C total do solo; a atividade microbiana e, conseqüentemente, a emissão de CH₄ poderiam estar mais bem relacionadas com a disponibilidade de C em formas lábeis do que as quantidades totais.

A emissão total de CH₄ variou de 8,5 a 44,2 g m⁻² CH₄ (Quadro 3), demonstrando a grande diferença entre os solos representativos da cultura arroz quanto ao seu potencial de emissão de CH₄. Também houve alto coeficiente de correlação ($r = 0,93$) entre a taxa de emissão máxima e a emissão total de CH₄ nos solos, o que indica que a taxa de emissão explica 93 % da variação do potencial de emissão de CH₄ dos solos. Entretanto, como não houve correlação entre a taxa de emissão e algumas variáveis eletroquímicas da solução do solo (Quadro 4), as quais são indicadoras do curso do processo de redução do solo, os resultados sugerem que a variação no início da emissão de CH₄,

Quadro 3. Taxas máximas e emissão total de metano (CH₄) em seis solos representativos do cultivo de arroz no Rio Grande do Sul, durante 66 dias de alagamento

| Solo | Localização | Taxa de emissão máxima | Emissão total |
|-------------|---------------|--|-----------------------------------|
| | | mg m ⁻² h ⁻¹ CH ₄ | g m ⁻² CH ₄ |
| Planossolo | Pelotas | 63,8 (45 DAA) ⁽¹⁾ | 40,2 a ⁽²⁾ |
| Neossolo | Uruguaiana | 68,4 (45 DAA) | 42,6 a |
| Planossolo | Santa Maria | 46,9 (45 DAA) | 36,4 a |
| Chernossolo | Santa Vitória | 50,3 (45 DAA) | 28,9 a |
| Gleissolo | Santa Maria | 51,0 (45 DAA) | 44,2 a |
| Gleissolo | Cachoeirinha | 13,1 (38 DAA) | 8,5 b |
| CV (%) | | | 16,6 |

⁽¹⁾ Dias após o alagamento em que a taxa de emissão máxima ocorreu. ⁽²⁾ Resultados seguidos pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %; DAA: dia após o alagamento.

controlado pelas variáveis eletroquímicas da solução, não é o fator determinante do potencial de emissão desse gás nos solos avaliados. Por fim, sugere-se que estudos sobre essa temática, em campo, sejam intensificados, visando identificar as principais variáveis relacionadas ao potencial de emissão de CH₄ em solos representativos do cultivo do arroz, pois fatores como temperatura e conteúdo de frações lábeis

da matéria orgânica, entre outros, devem ter forte relação com o potencial de emissão de CH₄ dos diferentes solos e condições climáticas em que o arroz é cultivado no Sul do Brasil.

CONCLUSÕES

1. O início da emissão de CH₄ foi dependente do curso de redução dos solos, sendo intensificada a partir da estabilização do pH e do Eh, o que ocorreu quando se atingiu aproximadamente 90 % da máxima liberação de Fe na solução do solo.

2. Os solos representativos do cultivo do arroz no Rio Grande do Sul apresentam grande variação quanto ao potencial de emissão de CH₄; a taxa máxima e a quantidade acumulada desse gás em 66 dias de alagamento estão associadas entre si e não dependem das características eletroquímicas da solução do solo, mas apresentam relação sigmoideal com os teores de C orgânico do solo.

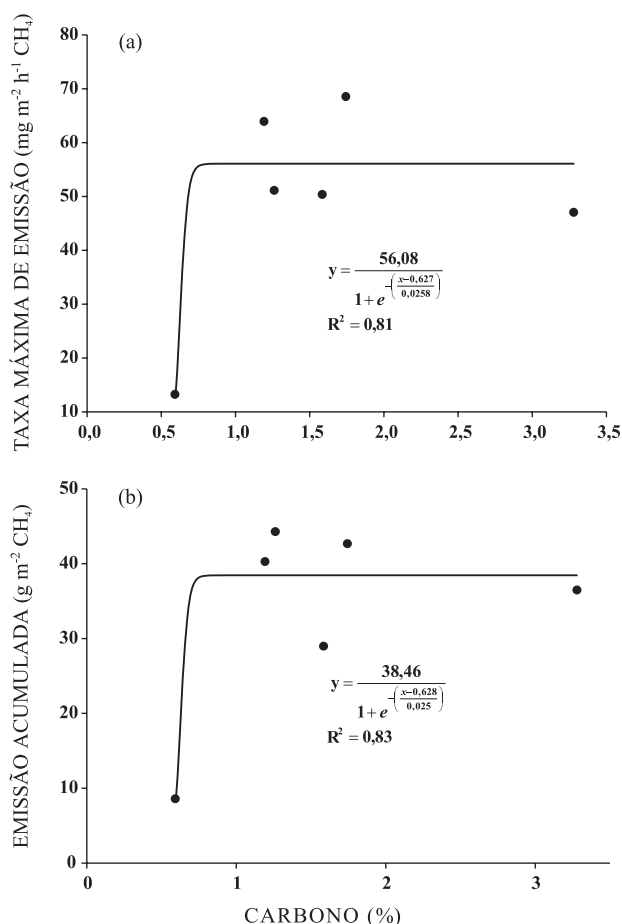


Figura 5. Relação entre (a) taxa de emissão de CH₄ e (b) emissão acumulada de CH₄ com o teor de carbono orgânico do solo em seis solos representativos do cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro e bolsas de produtividade em pesquisa (L.S. Silva e C. Bayer); à FAPERGS, pela concessão de bolsa de iniciação científica (G. Griebeler); e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão das bolsas de doutorado (D. F. Mortele, T. Zschornack e E. Pocojeski).

LITERATURA CITADA

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. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 128p. (Tese de Doutorado)

Quadro 4. Matriz de correlação linear de Pearson entre a taxa de emissão de metano pelo solo e as variáveis eletroquímicas da solução do solo

| Variável | Taxa emissão CH ₄ | Teor de Fe | Teor de Mn | pH | Eh | Teor de Mg | Teor de Ca |
|------------------------------|------------------------------|------------|------------|----------|----------|------------|------------|
| Taxa emissão CH ₄ | 1 | - | - | - | - | - | - |
| Teor de Fe | 0,09 | 1 | - | - | - | - | - |
| Teor de Mn | 0,08 | -0,09 | 1 | - | - | - | - |
| pH | 0,15 | 0,51 ** | 0,59 ** | 1 | - | - | - |
| Eh | -0,31 * | -0,62 ** | -0,40 * | -0,81 ** | 1 | - | - |
| Teor de Mg | 0,09 | 0,31 * | 0,86 ** | 0,75 ** | -0,63 ** | 1 | - |
| Teor de Ca | -0,01 | 0,27 * | 0,87 ** | 0,75 ** | -0,62 ** | 0,96 ** | 1 |

* p < 0,05 e ** p < 0,01.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- GIANI, L.; DITTRICH, K.; MARTSFELD-HARTMANN, A. & PETERS, G. Methanogenesis in saltmarsh soils of the North Sea coast of Germany. *Europ. J. Soil Sci.*, 47:175-182, 2006.
- GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F.S.; PICCOLO, M.C.; VIEIRA, F.C.B. & SIX, J. Soil nitrous oxide emission as affected by long term tillage, crop rotations and fertilization in a subtropical environment. *Soil Tillage Res.*, 101:36-44, 2009.
- HUANG, Y.; JIAO, Y.; ZONG, L.G.; ZHENG, X.H.; SASS, R.L. & FISHER, F.M. Quantitative dependence of methane emission on soil properties. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 64:157-167, 2002.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola, Dezembro de 2008. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_200904comentarios.pdf acesso em 26 de maio de 2009.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis: Summary for policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2007.
- INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE – IRRI. World Rice Statistics 1961-2007. disponível em http://beta.irri.org/solutions/index.php?option=com_content&task=view&id=250, acesso em 27-04-09.
- LAI, D.Y.F. Methane dynamics in northern peatlands: A review. *Pedosphere*, 19:409-421, 2009.
- LIMA, M.A.; PESSOA, M.C.P.Y. & LIGO, M.A.V. Primeiro inventario brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Relatórios de referência – Emissões de metano da pecuária. Brasília, IBGE/EMBRAPA/MCT, 2002. 79p.
- Le MER, J. & ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Europ. J. Soil Biol.*, 37:25-50, 2001.
- MOSIER, A.R. Chamber and isotope techniques. In: ANDREAE, M.O. & SCHIMMEL, D.S., eds. Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere: report of the Dahlem Workshop. Berlin, Wiley, 1989. p.175-187.
- NEUE, H.U. & SASS, R. Trace gas emissions from rice fields. In: PRINN, R.G., ed. Global atmospheric-biospheric chemistry. *Environ. Sci. Res.*, 48:119-148, 1994.
- NEUE, H.U.; LATIN, R.S.; WASSMANN, R.; ADUNA, J.B.; ALBERTO, C.R. & ANDALES, M.J.F. Methane emission from rice soils of the Philippines. In: MINAMI, K.; MOSIER, A. & SASS, R., eds. CH₄ and N₂O: Global emissions and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources. Tokyo, Yokendo Publisher, 1994. p.55-63.
- PETERS, V. & CONRAD, R. Sequential reduction processes and initiation of CH₄ production upon flooding of oxic upland soils. *Soil Biol. Biochem.*, 28:371-382, 1996.
- PINTO, L.F.S.; LAUS NETO, L.A. & PAULETTO, E.A. Solos de várzea do sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A.S. & MAGALHÃES Jr., A.M. Arroz irrigado no sul do Brasil. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.75-95.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemical of submerged soils. *Adv. Agron.*, 24:29-96, 1972.
- SASS, R.L. & FISCHER, F.M. CH₄ emission from paddy fields in United States gulf coast area. In: MINAMI, K.; MOSIER, A.R. & SASS, R.L., eds. CH₄ and N₂O: Global emissions and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources. Tokyo, Yokendo Publishers, 1994. p.65-77.
- SCHÜTZ, H.; SCHRÖDER, P. & RENNENBERG, R. Role of plants in regulating the methane flux to the atmosphere. In: SHARKEY T.D.; HOLLAND, E.A.; MOONEY, H.A., eds. Trace gas emissions by plants. New York, Academic Press, 1991. p.29-63.
- SCHÜTZ, H.; SEILER, W. & CONRAD, R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. *Biogeochemistry*, 11:77-95, 1990.
- SETYANTO, P.; ROSENANI, A.B.; MAKARIM, A.K.; FAUZIAH, C.I.; BIDIN, A. & SUHARSIH. Soil controlling factors of methane gas production from flooded rice fields in Pati District, Central Java. Indonesia. *J. Agric. Sci.*, 3:20-31, 2002.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5)
- van BODEGOM, P.M. & STAMS, A.J.M. Effects of alternative electron acceptors and temperature on methanogenesis in rice paddy soils. *Chemosphere*, 39:167-182, 1999.
- WANG, Z.P.; DELAUNE, R.D.; PATRICK JR., W.H. & MASSCHELEYN, P.H. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:382-385, 1993.
- WASSMANN, R.; NEUE, H.U.; LANTIN, R.S.; BUENDIA, L.V. & RENNENBERG, H. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. I. Comparison among field sites in five countries. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 58:1-12, 2000.