

INTENSIFICAÇÃO DO PERÍODO SECO E SEU EFEITO SOBRE O FLUXO DE ÓXIDO NÍTRICO, ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO EM FLORESTA PRIMÁRIA DE TERRA FIRME NO SUDESTE AMAZÔNICO¹

José Henrique CATTANIO²

Eric DAVIDSON³

Louis V. VERCHOT⁴

Daniel C. NEPSTAD³

Ilse ACKERMAN⁵

RESUMO: Modelos de Circulação Geral (GCM's) prevêem para estas próximas décadas um aumento na concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera e elevação da temperatura global, entre 1,5 a 4,5 °C, com provável diminuição das chuvas nos ecossistemas amazônicos. Neste sentido, esta pesquisa teve como objetivo, durante o período de menor precipitação, avaliar o efeito da diminuição da umidade do solo na produção e fluxo de NO, N₂O e CH₄ em floresta primária de terra firme. Para isto, usaram-se tratamentos de restrição da entrada de água da chuva com objetivo de aumentar o déficit hídrico no solo. Foram desenvolvidos dois experimentos com análises diferenciadas: a) experimento descritivo compreendendo a comparação entre uma parcela de 100 m² que vem recebendo tratamento de restrição da entrada da água da chuva a 4 anos e uma parcela testemunha, e b) experimento em blocos casualizados, com 3 tratamentos de umidade: 100%, 50% e 0% da água da chuva, no município de Paragominas (2°59'S, 47°31'W), Estado do Pará. A umidade do solo foi medida através de sensores de time domain reflectometry (TDR) e pelo método gravimétrico. As medidas mensais do fluxo de NO do solo foram feitas no campo através da circulação de ar entre câmaras estáticas de solo e um aparelho com detetor quimioluminescência de NO₂ (Scintrex LMA-3.), e para o N₂O e CH₄ foram coletadas amostras em seringas no campo e injetadas no laboratório em cromatógrafos. Os resultados revelaram que a diminuição da umidade do solo provocou um aumento no fluxo de NO e N₂O. Para o CH₄ encontrou-se uma diminuição no consumo de CH₄ atmosférico pelos organismos do solo com a diminuição da umidade do solo, existindo até um fluxo de CH₄ do solo para a atmosfera nos tratamentos mais seco. Através destas evidências, pode-se esperar que a diminuição da umidade do solo nas florestas primárias semelhantes à de Paragominas podem no futuro contribuir para uma intensificação do efeito estufa regional e global.

TERMOS PARA INDEXAÇÃO: Fluxo de NO e N₂O, solo, estresse hídrico, floresta primária

¹ Aprovado para publicação em 09.12.98

² Parte da Dissertação apresentada pelo primeiro autor para obtenção do grau de Mestre na FCAP em 1996

³ Engenheiro Florestal, vinculado ao Projeto SHIFT/FCAP, ... Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia/Embrapa Amazônia Oriental

⁴ Biólogo, PhD. Pesquisador Senior do Woods Hole Research Center, ... Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia/Embrapa Amazônia Oriental

⁵ Biólogo, PhD, Pesquisador do Institute of Ecosystems Studies, ... Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia/Embrapa Amazônia Oriental

⁶ Engenheira Florestal, M.Sc., University of New Hampshire, Pesquisadora do Woods Hole Research Center

EFFECTS OF DROUGHT INTENSIFICATION ON SOIL FLUXES OF NITRIC OXIDE, NITROUS OXIDE AND METHANE IN A HIGHLAND PRIMARY FOREST OF SOUTHEASTERN BRAZILIAN AMAZONIA.

ABSTRACT: General Circulation Models (GCM'S) predicted for the next decade an increase in greenhouse gases concentration, a global warming between 1,5 to 4,5° C and a probable decrease of rain in the Amazon ecosystems. Taking into consideration these tendencies, the objective of this work was to determine the effect of intensifying soil water stress on a dry season in the flux rates and production of NO, N₂O and CH₄ in a tropical primary forest. Two experiments were made in a highland primary forest of Paragominas (2°59'S, 47°31'W) in Pará state: 1) a no replicate descriptive analysis comparing a plot of 100m² with rainfall restriction for 4 years and a control plot, with no restriction of rain; 2) a randomized block experimental design with treatments simulating the application of 100, 50 and 0% of the total amount of throughfall water, with five replicates. The soil moisture were measured by the time domain reflectometry (TDR) and the gravimetric method, on a volume basis. Monthly measurements of soil NO fluxes were made in the fields by air circulation between a static soil chamber and the Scintrex LMA-3 NO analyser. Samples of N₂O were collected with syringes and injected in a gas chromatograph on laboratory. The results showed an increase of dead roots mass and in soil NO and N₂O fluxes with a decrease of soil moisture. There was a decrease in the CH₄ consumption by soil microorganisms as a function of soil moisture, being observed a CH₄ flux from the soil to atmosphere in the drier treatments. These results suggests that a decrease in soil moisture of primary tropical forests, such as this of Paragominas, can contribute in the future to the intensification of regional and global greenhouse effect.

INDEX TERMS: NO and N₂O's flux, soil, hydric stress, primary forest.

1 - INTRODUÇÃO

Vários biomas apresentam marcante sazonalidade com distintos períodos secos e chuvosos, os quais produzem variação na umidade do solo. Mesmo com uma expressiva sazonalidade e flutuação interanual no total das chuvas, principalmente pela ocorrência do fenômeno El Niño (El Niño Southern Oscillation-ENSO)⁶, a grande maioria das áreas de floresta primária amazônica mantém-se sempre verde por todo ano (Nepstad et al 1994). Para que isto ocorra, atribui-se a existência, nestes ecossistemas, de raízes profundas (Nepstad et al, 1994).

Os solos são fontes biogênicas muito importantes de NO e N₂O para a atmosfera, principalmente em ecossistemas tropicais (MacElroy, Wofsy 1986; Davidson, 1991), os quais têm maior abundância relativa de nitrogênio em comparação a outros biomas (Vitousek & Sanford, 1986). Elevados pulsos de NO e N₂O foram observados em solo seco de floresta tropical após o umidecimento (Davidson et al, 1991). Devido à sazonalidade e a extensa área que as florestas tropicais ocupam, a emissão de NO do solo, o qual afeta a química do ozônio na troposfera (Logan, 1983), e de N₂O, que contribui para o aquecimento global (Lashof & Ahuja, 1990;

⁶ El Niño é resultado da interação entre oceano (aumento da temperatura do oceano) e atmosfera (variação em larga escala da massa atmosférica) a qual provoca grandes chuvas nas regiões norte do globo e diminuição das chuvas em algumas regiões na linha do Equador. Tendo como variáveis a pressão superficial, temperatura e chuva em várias partes do globo (PHILANDER, 1990; DIAZ & KILADIS, 1992).

Khalil & Rasmussen, 1995) e destruição do ozônio na estratosfera (Logan, 1983; Cicerone, 1987; Khalil, 1995), são fontes relevantes para serem consideradas em relação às mudanças climáticas regionais e globais (Matson & Vitousek, 1990; Davidson, 1992; Khalil, 1995).

Estudos sobre o balanço global de CH_4 mostraram um importante aumento da concentração deste gás na atmosfera, na razão de 1% por ano na década de 80 e, com isto, tem aumentado sua importância na intensificação do efeito estufa (Tyler, 1991; Khalil & Rasmussen, 1994, 1995). Apesar do metano ter um menor tempo relativo de residência na atmosfera em comparação ao CO_2 (10 e 120 anos, respectivamente), tem potencial para aquecimento da atmosfera 60 vezes maior, devido diretamente à sua alta capacidade de absorção de calor, como, também, indiretamente, é gerador de CO_2 e O_3 troposférico e ainda vapor d'água estratosférico (Cicerone & Oremland, 1988; Duxbury et al, 1993; Khalil & Rasmussen, 1995).

O principal consumo de metano da atmosfera, de um fluxo total (540 Tg/ano) ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$), é pela reação com OH (85%), produzindo CO_2 , H_2O , CO, H_2 e outros produtos intermediários (Cicerone & Oremland 1988; Tyler 1991). Aproximadamente, 60 Tg CH_4 /ano reagem na estratosfera com O(¹D) e Cl (Khalil & Rasmussen, 1995). Contudo, existe um consumo adicional de metano, aproximadamente 5 a 58 Tg CH_4 /ano (Dörr et al, 1993), por organismos do solo através da oxidação bacteriana (Schultz et al, 1990; Tyler, 1991). Recentemente, Potter et al (no prelo) estimaram um consumo de 17 a

23 Tg CH_4 /ano. Solos de florestas tropicais mostraram-se tanto como produtores e como consumidores de CH_4 (Keller et al, 1986). Devido a isto, estes solos são um importante componente a ser considerado no balanço global deste gás (Potter et al, no prelo). Entretanto, as fontes e locais de consumo deste gás são pouco caracterizados (Schultz et al, 1990), bem como o efeito da sazonalidade em seu ciclo (Keller et al, 1986).

Os microorganismos do solo produzem e consomem NO e N_2O (Davidson & Schimell, 1995), sendo reconhecidas muitas fontes de NO e N_2O , tanto bióticas como abióticas. Devido a isto, tem sido difícil a real identificação das fontes mais influentes em cada condição do ecossistema (Davidson & Schimell, 1995; Davidson, 1992). Davidson (1992) sugere que se os processos biológicos requerem tempo para se restabelecerem após passar por um período de estresse, provavelmente, os fluxos de NO e N_2O observados após períodos prolongados de seca são resultantes de processos abióticos. Entretanto, evidências de fontes abióticas não descartam a ocorrência de processos biológicos e nem a interação dos dois processos (Davidson, 1992). Dois mecanismos relativos à quantidade de água no solo são importantes para a regulação da nitrificação e desnitrificação: a) o suprimento de substrato para os microorganismos, via difusão na película de água do solo; e b) conteúdo de água nos poros, a qual tem um controle efetivo sobre a difusão dos gases dentro do solo e deste para a atmosfera (Davidson & Schimell, 1995).

Também, a nitrificação como um processo oxidativo requer O_2 , entretanto, este se comporta como inibidor da desnitrificação.

Davidson (1993) sugeriu que a nitrificação é fonte mais importante de NO e N₂O do que a denitrificação quando WFPS⁷ ("Water-filled pore space, ou espaço dos poros ocupado por água") < 60%. Quando WFPS > 60% a denitrificação pode ser a fonte mais importante de NO e N₂O. Este mesmo autor mostra que a razão de emissão de N₂O:NO do solo foi < 1 quando WFPS < 60%, e esta razão é > 1 quando WFPS > 60%. Concluiu-se, então, que a produção de NO via nitrificação ou uma combinação de nitrificação e reações abióticas são dominantes em solos secos, e quando estes solos atingem um conteúdo de umidade intermediário, tanto NO quanto N₂O são produzidos por nitrificação e denitrificação e, finalmente, quando o solo fica em condições acima de uma umidade moderada a maioria de NO produzido é consumido antes de escapar do solo, e que o N₂O tem uma difusão gradual para fora do solo ou fica retido na fase aquífera deste (Davidson, 1991).

Umidade do solo, porosidade, drenagem e razão de respiração afetam a difusão e o consumo do O₂ e, com isto, uma variação na proporção de anaerobiose dentro do solo permite que tanto nitrificação quanto denitrificação ocorram em diferentes microsítios (Davidson, 1992). A diminuição da água no solo provoca a concentração de íons, incluindo H⁺ e NO₂⁻, numa fina linha de concentração de água (Blackemer & Cerrato, 1986; Davidson, 1991; Hutchinson & Davidson, 1993). A nitrificação ocorre em solo seco, ainda que em baixa proporção (Vitousek et al, 1989), e tanto H⁺ e NO₂⁻ são produzidos

por bactérias que oxidam o NH₄⁺ (Davidson, 1991). Também, produção abiótica de NO pode ocorrer onde NO₂⁻ e H⁺ estão concentrados em um fino filete de água perto dos locais de oxidação do NH₄⁺ (Blackemer & Cerrato, 1986; Vitousek et al, 1989; Davidson & Schimell, 1995).

Um modelo conceptual proposto por Firestone & Davidson (1989) demonstra três níveis da regulação da emissão do solo de NO e N₂O: 1) fatores que afetam a razão de nitrificação e denitrificação; 2) fatores que afetam o produto final destes processos; e 3) os fatores que afetam a difusão destes gases no solo e o possível consumo depois de alcançado a superfície do solo.

A produção de metano no solo por fontes biogênicas (metanogênese) é resultante de complexas e restritas reações bioquímicas envolvendo bactérias (*Archaeobacteria*), durante a decomposição da matéria orgânica, sendo estas bactérias estritamente anaeróbicas (Cicerone & Oremland, 1988; Bédard & Knowles, 1989; Tyler, 1991). Devido a este caráter anaeróbio, esta produção se restringe a solos e sedimentos alagados, bem como a áreas agrícolas inundadas, assim como ao trato intestinal de animais (Tyler, 1991).

São reconhecidos como substratos principais para bactérias metanogênicas a utilização como fonte de energia, a redução hidrogenada do dióxido de carbono, acetato, formato, metanol, CO, etc. (King, 1984; Cicerone & Oremland, 1988). Também pode ocorrer seu desenvolvimento em ambientes em

⁷ %WFPS = [100 * (q * BD)] / [1 - (BD/PD)], onde BD é densidade do solo (g de solo seco. cm⁻³), e PD é a densidade das partículas (2,65 g solo seco cm⁻³ para a maioria dos solos)

condições extremas, caracterizados por alta temperatura, hipersalinidade e elevado ou reduzido pH. Contudo, os organismos metanogênicos se tornam ativos apenas em ambientes anóxicos, sendo que também fatores físicos, químicos e biológicos podem influenciar a fisiologia das bactérias metanogênicas e a ecologia dos ecossistemas anaeróbios e, portanto, influenciar na produção de metano (Cicerone & Oremland, 1988).

O metano é oxidado por bactérias aeróbicas do solo (metanotróficas), sendo este fator um significativo regulador da produção de metano no solo e da absorção do metano da atmosfera (Cicerone & Oremland, 1988; Tyler, 1991). Bactérias metanotróficas (família *Methylococcaceae*) obtêm energia e carbono da oxidação do CH_4 durante a decomposição de matéria orgânica em condições aeróbicas, como também bactérias que oxidam amônia (família *Nitrobacteraceae*) podem oxidar metano (Bédard & Knowles, 1989).

O balanço entre produção e consumo de CH_4 dentro do solo é regulado pela razão de difusão do O_2 dentro do solo e pela razão de consumo de O_2 pelas raízes e microorganismos (Moore & Knowles, 1989). Portanto, uma alta razão de respiração pode provocar uma diminuição na concentração de O_2 e aumentar a concentração de CO_2 dentro do solo e, com isto, induzir anaerobiose em alguns microsítios. Também, a retirada (oxidação) de CH_4 pelo solo é inibida por concentrações elevadas de NH_4^+ do solo (Stuedler et al, 1989; Mosier et al, 1991). A disponibilidade de NH_4^+ afeta a oxidação do CH_4 (Mosier et al, 1991), devido ao fato que tanto NH_4^+ como CH_4 são oxidados pelas mesmas duas enzimas microbianas: a) metano

monooxigenase, encontrada em bactérias metanotróficas, e b) amônia monooxigenase encontrada em bactérias nitrificantes (Bédard & Knowles, 1989). Bactérias nitrificantes podem oxidar CH_4 , entretanto, são incapazes de crescer apenas com este elemento e, por outro lado, bactérias metanotróficas requerem unicamente CH_4 para se desenvolverem (Davidson & Schimel, 1995).

Alta razão de respiração do solo pode criar microsítios de anaerobiose, onde a metanogênese pode ocorrer. O solo da floresta com maior potencial oxidativo, durante a estação seca, deve consumir metano. Um dos objetivos da pesquisa é saber o quanto muda o consumo de CH_4 em solo de floresta tropical primária quando da intensificação da sazonalidade.

Portanto, eventos de secagem e umedecimento afetam a produção biológica do NO e seu fluxo (Davidson, 1991), pois a umidade do solo interfere na proporção relativa do fluxo de NO e N_2O (Davidson et al, 1991) e CH_4 neste ecossistema (Davidson, comunicação pessoal). Com isto, o objetivo desta pesquisa é tentar entender a dinâmica do fluxo de NO, N_2O e CH_4 , bem como da relativa proporção de variação em uma floresta tropical submetida a tratamento de intensificação da sazonalidade, investigando o fluxo destes três gases traçadores durante o período de menor índice pluviométrico. A hipótese inicial é que existe um fluxo diferencial entre os gases dentro dos tratamentos, tendo uma maior produção do solo de NO, N_2O e um maior consumo de CH_4 atmosférico pelos organismos do solo, com a intensificação da sazonalidade em comparação à testemunha.

2 – MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido em uma floresta primária de terra firme localizada na fazenda Vitória a 7 km a noroeste de Paragominas (2° 59' S, 47° 31' W), Pará. A precipitação média anual em um período de 22 anos (Jipp et al, no prelo) foi de 1 803 ± 555 mm/ano (média ± desvio padrão). O período seco estende-se de junho a novembro com uma precipitação total menor que 16% da média anual. A região possui um relevo plano a suavemente ondulado com locais bem suscetíveis à erosão. Os solos são, na maioria, formados a partir de sedimentos caoliníticos da formação Barreiras, profundos e bem drenados (Sombroek, 1984). Na área de estudo predomina Latossolo Vermelho-Amarelo (Haplustox) com elevada porcentagem de argila caolinitica (70 a 80% do peso seco) e em menor proporção (10 a 20%) gipsita (Nepstad, 1989).

2.1 – EXPERIMENTO DESCRITIVO

No início de 1993, uma parcela de 10 m x 10 m foi demarcada com trincheiras de, aproximadamente, 0,5 m de profundidade, e coberta com telhas de amianto sobre suportes de madeira, numa altura média de 2 m do chão, denominada de parcela de exclusão da água da chuva. Para não cortar a vegetação que passava pelo telhado, foi aberto um buraco na telha com diâmetro aproximado ao do caule da planta. No tronco das árvores de maior diâmetro, bem como dos cipós, folhas plásticas foram amarradas com fita de borracha, de forma que a água da chuva que escorresse pelo tronco passasse para a folha plástica e caísse sobre o telhado. O objetivo da cobertura foi produzir uma exclusão da chuva, através da

maior restrição da água que chega ao chão da floresta, diminuindo a entrada de água no solo e aumentando o estresse hídrico durante a estação seca. Para comparação com as condições naturais, em 1995 foi demarcada uma outra área, distante, aproximadamente, 20 m da área coberta, denominada de parcela testemunha.

Para se tentar entender melhor possíveis alterações na estrutura radicular após 3 anos de tratamento de estresse e, conseqüentemente, alterações no fluxo superficial de gases do solo, foi escavado manualmente um buraco de 1,3 m x 0,6 m, com 4 m de profundidade em cada uma das duas áreas, exclusão da chuva e testemunha. Todas as raízes grossas, maiores que 2 mm de diâmetro, foram retiradas nas profundidades de 0 a 20, 20 a 50, 50 a 100, 100 a 150, 150 a 200, 200 a 300, 300 a 400 cm. Para quantificação das raízes finas, diâmetro menor ou igual a 2 mm, foram feitas, no mesmo buraco, três amostragens com trado com 10 cm de altura, nas profundidades mencionadas, conforme metodologia utilizada por Nepstad (1989).

Nestes mesmos buracos, na superfície e a cada metro de profundidade (até 3,5 m), foram instalados, em furos horizontais de trado com 1,45 m de comprimento nas paredes dos poços, sensores de "Time Domain Reflectometry" (TDR - Tektronix® 1502b), que periodicamente era ligado a um computador, conforme metodologia descrita por Jipp et al (no prelo). Este aparelho é utilizado para quantificar mudanças no conteúdo de água volumétrico (CAV)⁸. As leituras se baseiam em emissões de ondas de radar entre duas hastes de metal relacionando ao tempo de movimentação destas ondas

através do solo (para tanto foi construída uma curva de calibração em laboratório). Após esta calibração, as medições, no início e no final do experimento, foram convertidas em CAV.

2.1.1 – Fluxo de NO, N₂O e CH₄ do solo

Os fluxos superficiais de NO, N₂O e CH₄ foram medidos nos meses de junho a dezembro de 1995, durante a estação seca. Cada local foi amostrado seqüencialmente, procurando ter as mesmas condições de umidade. O método para medições de fluxo de NO no campo foi descrito em detalhes por Davidson et al (1991), e para N₂O e CH₄, por Vistoossek et al (1989). Oito anéis, com 20 cm de diâmetro e 10 cm de altura, de PVC para fluxo, foram espalhados ao redor de cada buraco de amostragem das raízes (parcela coberta e testemunha). Estes anéis foram afixados no solo em uma profundidade de 2 a 3 cm, e uma tampa ventilada de PVC, do mesmo diâmetro do anel e 10 cm de altura, foi utilizada para tampar o anel e fazer uma câmara de fluxo (câmara ventilada). O anel foi fechado durante cada período de medição, aproximadamente 3 minutos para NO e 30 minutos para N₂O e CH₄. Primeiramente, era feita a medição de NO, depois disto a tampa do anel era retirada e iniciava-se, após alguns minutos, a medição do fluxo de N₂O e CH₄ (ou vice-versa).

Para medição do fluxo de NO, uma circulação de ar, aproximadamente de 0,5 l/min, foi drenada da câmara ventilada de solo

a qual estava ligada ao equipamento por duas mangueiras, promovendo um fluxo fechado. Este fluxo passava primeiramente por um controlador de fluxo, indo por um dispositivo especial, o qual se constituía de duas mangueiras, uma externa, onde passava ar seco proveniente de uma câmara contendo sílica gel, e outra mais interna, a qual deixava passar apenas umidade do ar proveniente da câmara ventilada. Devido ao fato deste fluxo de ar seco passar pela mangueira mais externa e a interna apenas deixar passar a umidade, este sistema tinha como finalidade diminuir a umidade do ar que entra no aparelho para análise de NO. Após a entrada do ar dentro do aparelho, o ar penetrava em uma câmara contendo CrO₃ onde NO era oxidado para NO₂. O NO₂ foi detectado pela quimioluminescência, usando detector de NO₂ Scintrex LMA-3.

Para as medições do fluxo de N₂O e CH₄, quatro amostras de gás foram retiradas com seringas especiais que não possuem N₂O e CH₄ na sua constituição, de cada câmara ventilada com 10 minutos de intervalo e, posteriormente, foram injetadas no laboratório em um cromatógrafo. Primeiramente o gás passava por um cromatógrafo com detector de captura de elétron, para determinação de N₂O e, posteriormente, por intermédio de válvulas, a amostra passava por um cromatógrafo de gás com detector de ionização por chama. A razão de acumulação de NO e N₂O para cada câmara de solo foi calculada por um quadrado mínimo de uma regressão linear.

*O conteúdo de água volumétrico (CAV) é obtido através de curvas de calibrações feitas em laboratório usando amostras intactas de solo, conforme descrito em detalhes por JIPP et al (no prelo)

**Esta diferença de tempo para os dois gases se deve a maior sensibilidade de equipamentos para NO em relação ao N₂O e CH₄. Também o aumento da concentração de NO dentro da câmara diminui rapidamente a difusão do gás do solo para a atmosfera, e que um fluxo maior pode provocar um erro de amostragem.

dentro e fora de cada parcela. Estas medições do CAV ao final da estação seca (novembro/95) tiveram como finalidade diferenciar a influência da cobertura das parcelas sobre a umidade do solo em relação a cada tratamento.

2.2.1 - Análise estatística

Para análise estatística dos resultados foi utilizada uma análise de parcelas subdivididas (split-plot). Este delineamento foi escolhido devido à necessidade de associar os tratamentos e o tempo (t) com as medidas repetidas para cada UE, assim como o t é uma subunidade de medida para cada UE (Hicks, 1973; Gumpertz & Brownie, 1992). Para isto, adotou-se a seguinte equação, separadamente para as UE com material de liteira e as que não continham este material:

Modelo:

$$\begin{aligned} \text{Fluxo} = & \text{bloco} + \text{tratamento} + \text{bloco} \times \\ & \text{tratamento} + \\ & \text{toda a parcela} \\ & + \text{tempo} + \text{bloco} \times \text{tempo} + \text{tratamento} \times \\ & \text{tempo} + \text{bloco} \times \text{tratamento} \times \text{tempo} \\ & \text{parcela dividida} \end{aligned}$$

Conforme Hicks (1973), os três primeiros termos da equação representam toda a parcela, e a interação bloco x tratamento é freqüentemente referida ao erro devido à parcela toda. Usualmente assume-se que esta interação não existe, e que este termo é realmente uma estimativa do erro (erro a) dentro da parcela principal. Os quatro últimos termos representam a parcela dividida, e a interação bloco x tratamento x tempo se refere ao erro da parcela dividida. Algumas vezes a interação bloco x tempo é considerada não existente e é combinada com a interação bloco x tratamento x tempo na forma de erro (erro b).

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados publicados por Jipp et al (no prelo) mostram que, em uma média de 20 anos, os meses mais secos na região de Paragominas vão de junho a novembro, com uma precipitação média diária de 1,4 mm, e um total anual de 1 750 mm. Para o ano de 1995, observou-se um total anual de 2 002 mm de chuva com uma precipitação média de 1,3 mm/dia durante o período mais seco. Os dados de chuva coletados abaixo do dossel da floresta (throughfall) mostram que na estação seca de 1995, em média, aproximadamente 1 mm/dia de água da chuva chegou ao solo da floresta (Figura 1). Estes dados, levando-se em consideração que existe perda de água da chuva pela evaporação nas folhas, absorção e escoamento pelo tronco, estão dentro do padrão de 20 anos apresentado por Jipp et al (no prelo).

3.1 - EXPERIMENTO DESCRITIVO

Devido à não repetibilidade da parcela de 100 m², o que impediu de adotar-se uma análise estatística, utilizou-se uma abordagem descritiva, apresentando resultados de uma área de floresta madura de terra firme, a qual, por um período de quatro anos consecutivos, foi submetida a uma restrição aproximada de 80% da chuva que chega ao solo da floresta. Entretanto, com a finalidade de comparação entre as duas áreas estudadas, foi feita uma análise de variância (ANOVA) e teste t (teste de Student) nos dados de biomassa de raízes finas (n = 3 para cada profundidade amostrada) e nos dados de fluxo de NO, N₂O e CH₄ durante os seis meses do estudo.

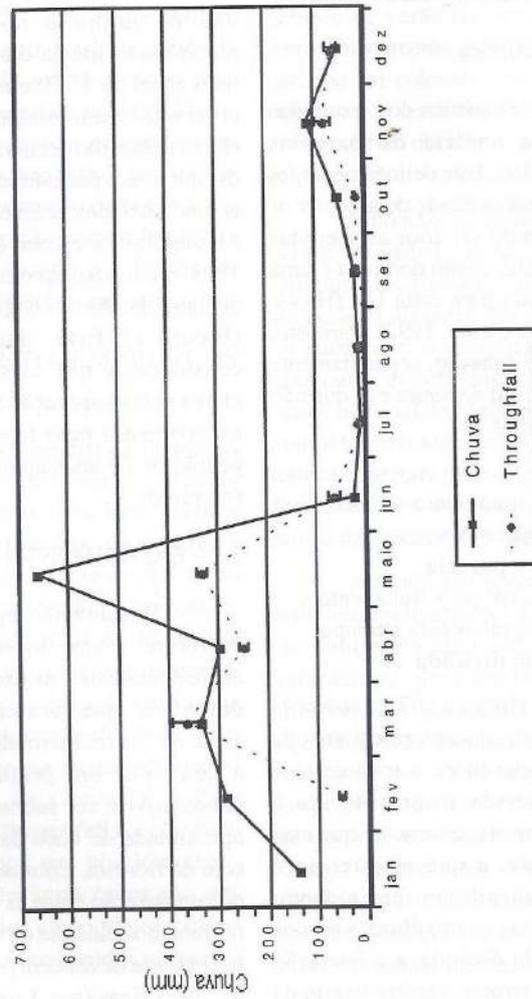
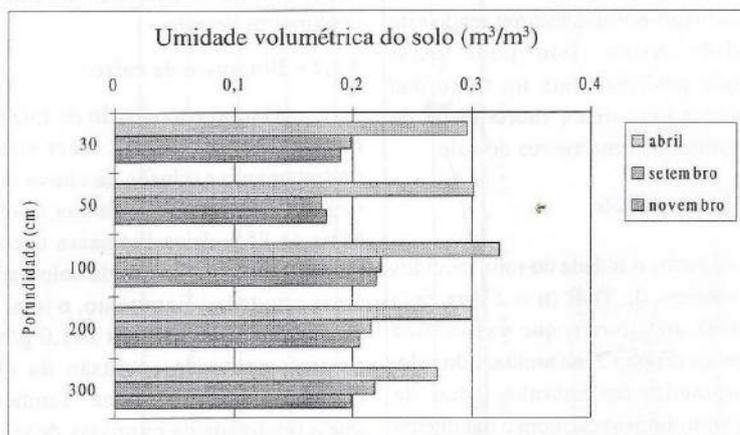


Figura 1— Média mensal da chuva total e "throughfall", durante o ano na Fazenda Vitória (Paragominas-Pa, 1995).

TESTEMUNHA



TRATAMENTO DE EXCLUSÃO DA CHUVA

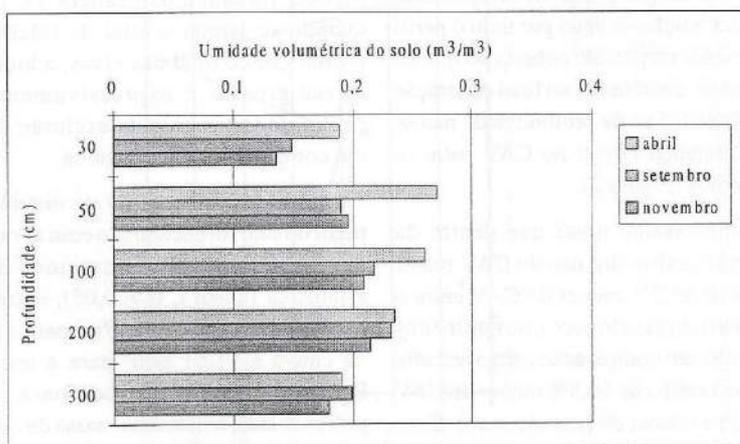


Figura 2 – Conteúdo de umidade volumétrica média do solo em diferentes profundidades, nos tratamentos testemunha e exclusão da chuva, durante três meses na fazenda Vitória (Paragominas-Pa, 1995).

Tabela 1 – Peso de raízes finas e grossas divididas em vivas e mortas dentro dos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha, nas respectivas profundidades (Paragominas- Pará).

Profundidade (cm)	Raiz Fina				Raiz Grossa			
	Exclusão da Chuva (g/m ³)		Testemunha (g/m ³)		Exclusão da Chuva (g/m ³)		Testemunha (g/m ³)	
	Viva	Morta	Viva	Morta	Viva	Morta	Viva	Morta
0	195,1(51,0)	652,1(25,8)	244,0(36,6)	553,8(27,1)	4783,5	664,6	12593,0	336,5
20	99,0(23,8)	153,9(35,8)	96,9(31,1)	81,6(15,0)	9422,4	711,2	1428,4	NE
50	63,8(22,4)	62,2(15,0)	27,8(3,7)	15,5(2,4)	410,2	7,6	282,8	4,3
100	11,8(2,8)	26,3(13,6)	5,2(3,8)	3,8(1,6)	48,8	29,4	27,9	2,0
150	12,4(7,4)	7,0(1,5)	108,5(81,5)	253,7(115,9)	26,7	8,5	14,5	–
200	15,9(10,2)	7,3(2,2)	5,2(3,4)	2,3(0,9)	–	8,7	59,0	–
300	7,4(3,4)	6,5(3,1)	1,3(0,5)	1,1(0,1)	22,3	2,0	28,9	–
400	1,8(1,1)	1,0(0,7)	0,6(0,1)	0,5(0,0)	–	–	37,5	0,8
Total	407,2	916,3	489,5	912,3	14713,9	1432,0	14472,0	343,6

Nota: a) números em negrito para raízes finas correspondem à média de três tratagens e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média;

b) números para raízes grossas correspondem ao total de raízes no intervalo de profundidade inicial até a próxima profundidade

(ex.: 0 → 0 a 20 cm);

c) Sinal convencional utilizado;

– Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento

Os resultados apresentaram uma ligeira variação no total de raízes finas vivas entre os dois tratamentos (407,2 g/ m³ para a exclusão da chuva e 489,6 g/ m³ para a testemunha). Entretanto, se comparada cada profundidade, apenas para os 150 cm a biomassa de raízes finas vivas foi maior para o tratamento testemunha.

Os dados de biomassa de raízes estão de acordo com Nepstad et al (1994), quando revelam que 65 a 70% do total da biomassa de raízes na floresta, até 8 m de profundidade, estão acima do primeiro metro de solo. Apesar da massa de raízes mortas ser significativamente maior no tratamento de exclusão da chuva, a biomassa de raízes vivas tem uma tendência a não variar entre os dois tratamentos.

3.1.3 – Fluxo de NO

Em média, o fluxo de NO durante o período sazonal seco foi, aproximadamente,

quatro vezes maior para o tratamento de exclusão da chuva (47,06 mg/m²) em comparação à testemunha (10,73 mg/m²), havendo uma diferença estatística significativa (Teste t, p < 0,01) entre os dois locais. Também existe uma variação estatística entre os meses dentro de cada tratamento (ANOVA, p < 0,05).

Nota-se que a diminuição da chuva e, conseqüentemente, da umidade do solo (Figura 1 e 2), acarreta uma diminuição significativa (ANOVA, p < 0,05) na produção de NO do solo (Figura 3), observada nitidamente no tratamento de exclusão da chuva, contudo, na testemunha isto não ocorreu. Apenas com o aumento das chuvas (Figura 1), após o período seco, mesmo não se tendo observado um aumento na umidade do solo (Figura 2), foi observado um aumento no fluxo de NO (Figura 3).

Pela análise da literatura, estudos em solos secos revelaram ocorrer uma

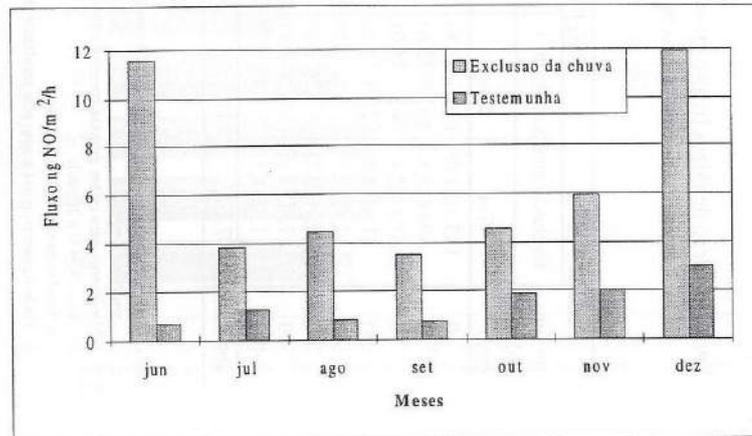


Figura 3 – Fluxo superficial de NO do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

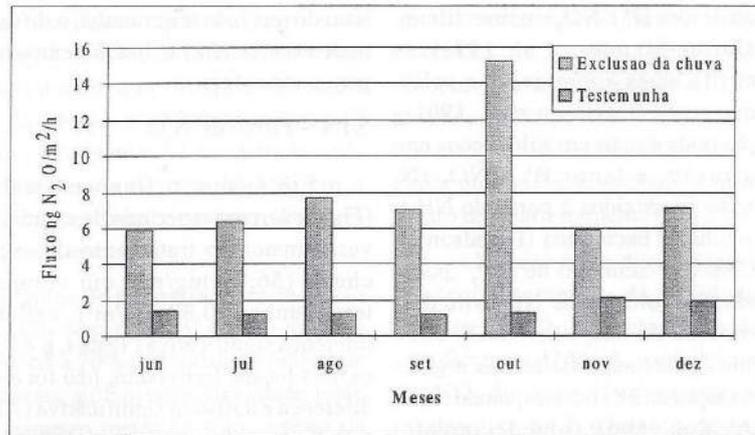


Figura 4 – Fluxo superficial de N₂O do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

diminuição no fluxo do solo com a diminuição da umidade do solo. Isto está de acordo com Davidson (1991), pois em solos moderadamente molhados, tanto nitrificação como denitrificação podem ser fontes biológicas de N₂O. Quando o solo seca a nitrificação passa a ser a fonte principal de N₂O.

A amostragem de N₂O do perfil¹³ até 350 cm de profundidade, ao final do período seco (Figura 5), revela que, em média, a concentração de N₂O, abaixo dos 20 cm, foi 22,7% maior no tratamento de exclusão da chuva em comparação à testemunha. Ao analisar a camada superficial do solo, acima de 20 cm, os resultados revelaram que a concentração de N₂O ficou 16% menor no tratamento de exclusão da chuva. Isto indica que existe maior concentração de N₂O em

profundidade para o tratamento de exclusão da chuva, entretanto, a menor concentração relativa na camada superficial pode estar correlacionada à maior difusão para a atmosfera, conforme indica os dados do fluxo superficial, e com isto não ser unicamente resultante de uma menor produção.

A diminuição na umidade do solo dentro do tratamento de exclusão da chuva, em conjunto com a maior biomassa de raízes mortas, podem provocar um aumento na mineralização do nitrogênio (NH₄⁺), incentivando a atividade das bactérias nitrificantes e, com isto, resultar em uma maior produção de N₂O via nitrificação. Entretanto, não existem dados suficientes para afirmar que a maior produção de N₂O seja devido a fatores biológicos ou que fatores abióticos não estejam ocorrendo simultaneamente.

¹³Mesma metodologia usada por Davidson & Trumbore (1995) para análise da concentração de CO₂ no perfil do solo.

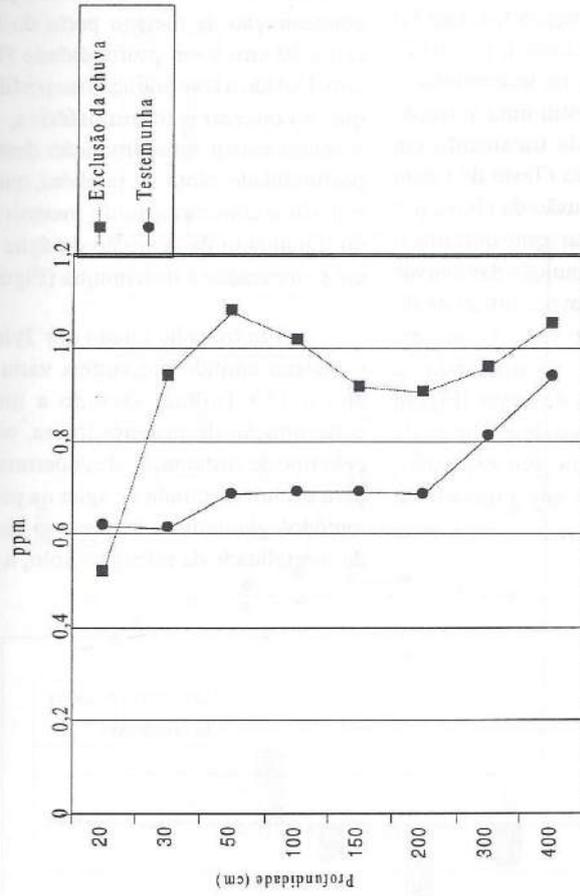


Figura 5 – Concentração de N₂O no perfil do solo de uma floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

3.1.5 – Fluxo de CH₄

Inesperadamente, em média, durante o período estudado houve uma produção mensal de CH₄ (Figura 6) dentro do tratamento de exclusão das chuvas (58,3 mg/m²), a qual foi significativamente maior (Teste t, p < 0,05) do que o consumo de CH₄ na testemunha (-94.4 mg/m²). Também, existiu uma variação significativa dentro de cada tratamento em relação aos meses de estudo (Teste de t para testemunha p < 0,05 e exclusão da chuva p < 0,01). É interessante notar que durante o período sazonal seco a diminuição das chuvas (Figura 1) na testemunha provoca um aumento no consumo de metano pelo solo. Ao mesmo tempo que as chuvas vão se iniciando, o consumo de CH₄ começa a diminuir (Figura 6). Entretanto, no tratamento de exclusão da chuva, ao contrário do que era esperado, ocorreu uma produção deste gás (Figura 6) na maioria dos meses estudados.

Analisando o perfil do solo (Figura 7), nota-se que a concentração de CH₄ para a testemunha permanece praticamente igual por todo o perfil do solo, entretanto, no tratamento de exclusão da chuva existe um aumento na concentração de metano perto da superfície (20 a 30 cm) e em profundidade (150 a 200 cm). Devido à concentração no perfil ser maior que a concentração atmosférica, os dados revelam existir uma produção deste gás em profundidade. Nota-se, também, que por todo o perfil a concentração de metano foi maior no tratamento de restrição de água da chuva em comparação à testemunha (Figura 7).

Em trabalho citado por Tyler (1991), o metano emitido por cupins varia de 2 Tg/ano a 150 Tg/ano. Devido a uma maior concentração de madeira morta, ocasionada pelo tipo de sustentação da cobertura utilizada para excluir a entrada de água na parcela (ver metodologia acima), bem como da alta taxa de mortalidade de raízes no solo, a produção

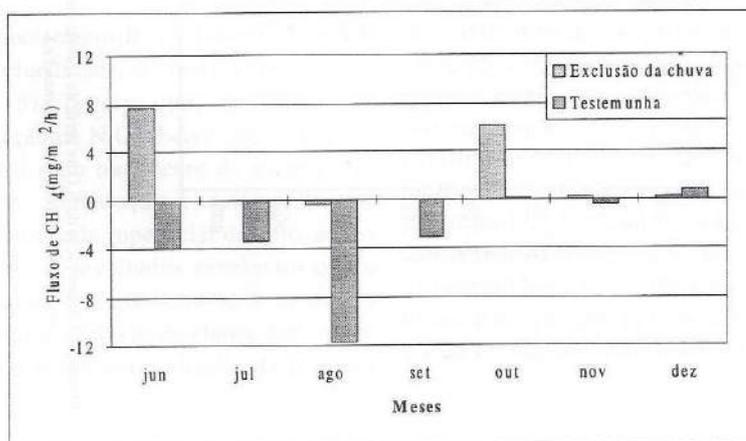


Figura 6 – Fluxo superficial de CH₄ do solo de uma floresta primária, durante o período seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

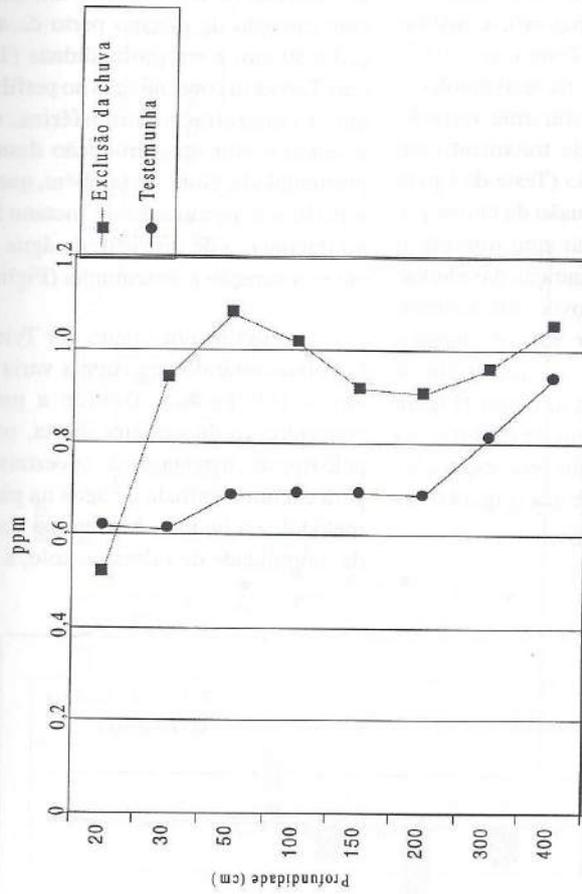


Figura 5 - Concentração de N₂O no perfil do solo de uma floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

3.1.5 – Fluxo de CH₄

Inesperadamente, em média, durante o período estudado houve uma produção mensal de CH₄ (Figura 6) dentro do tratamento de exclusão das chuvas (58,3 mg/m²), a qual foi significativamente maior (Teste t, p < 0,05) do que o consumo de CH₄ na testemunha (-94,4 mg/m²). Também, existiu uma variação significativa dentro de cada tratamento em relação aos meses de estudo (Teste de t para testemunha p < 0,05 e exclusão da chuva p < 0,01). É interessante notar que durante o período sazonal seco a diminuição das chuvas (Figura 1) na testemunha provoca um aumento no consumo de metano pelo solo. Ao mesmo tempo que as chuvas vão se iniciando, o consumo de CH₄ começa a diminuir (Figura 6). Entretanto, no tratamento de exclusão da chuva, ao contrário do que era esperado, ocorreu uma produção deste gás (Figura 6) na maioria dos meses estudados.

Analisando o perfil do solo (Figura 7), nota-se que a concentração de CH₄ para a testemunha permanece praticamente igual por todo o perfil do solo, entretanto, no tratamento de exclusão da chuva existe um aumento na concentração de metano perto da superfície (20 a 30 cm) e em profundidade (150 a 200 cm). Devido à concentração no perfil ser maior que a concentração atmosférica, os dados revelam existir uma produção deste gás em profundidade. Nota-se, também, que por todo o perfil a concentração de metano foi maior no tratamento de restrição de água da chuva em comparação à testemunha (Figura 7).

Em trabalho citado por Tyler (1991), o metano emitido por cupins varia de 2 Tg/ano a 150 Tg/ano. Devido a uma maior concentração de madeira morta, ocasionada pelo tipo de sustentação da cobertura utilizada para excluir a entrada de água na parcela (ver metodologia acima), bem como da alta taxa de mortalidade de raízes no solo, a produção

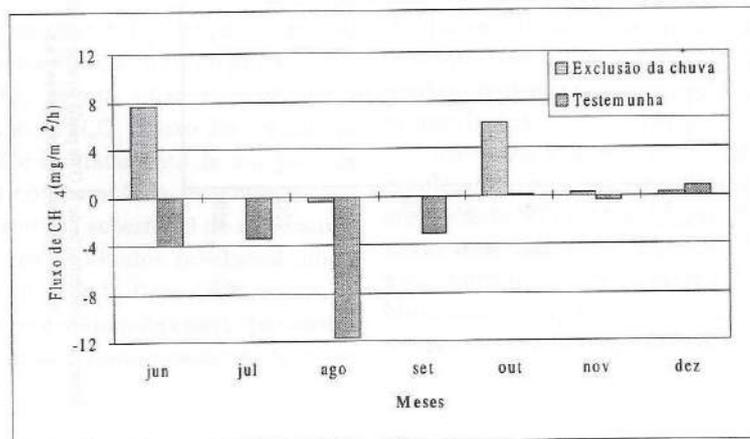


Figura 6 – Fluxo superficial de CH₄ do solo de uma floresta primária, durante o período seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

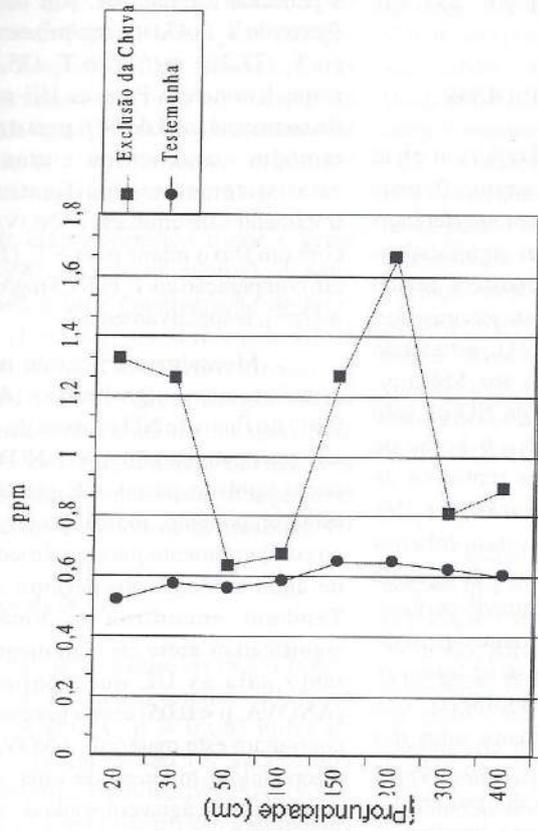


Figura 7 - Concentração de CH₄ no perfil do solo de uma floresta tropical primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

superficial de metano pode ser resultante de uma maior atividade de cupins nesta área em comparação à testemunha, embora isto não tenha sido observado. Entretanto, pouco se pode falar sobre uma maior concentração, e até de uma produção deste gás em profundidade.

3.2 – EXPERIMENTO EM BLOCOS

Estudos feitos por Davidson et al (dados não publicados), na mesma floresta estudada, revelaram que qualquer interferência física no solo pode influenciar significativamente no fluxo de NO para a atmosfera, devido à alta capacidade de difusão deste gás traçador. Também Davidson et al (1991), estudando uma floresta tropical seca no México, encontraram elevados pulsos de NO do solo seco após umedecimento, 2 a 6 horas de umedecimento. Portanto, na tentativa de padronizar a entrada de água dentro dos tratamentos, todas as parcelas foram cobertas com lona plástica, e a quantidade de água da chuva que ocorreu num determinado período, a partir de 50 mm de chuva durante o período seco, foi colocado de uma vez só na forma de rega manual (conforme metodologia). Isto geralmente foi feito uma semana antes das leituras dos gases. Entretanto, no mês de outubro, a leitura foi feita no dia posterior à colocação de água. Devido a isto, resolveu-se tirar este mês da análise estatística dos resultados.

3.2.1 – Fluxo de NO

Em média o fluxo total¹⁴ de NO (Tabela 2), para o período de seca, nas UE que continham liteira, apresentou uma variação significativa (ANOVA, $p < 0,01$), entre os fluxos do T₂ (147,016 mg/m²) em comparação ao T₁ (77,285 mg/m²) e T₃ (75,326 mg/m²), respectivamente. Para as UE sem liteira, o fluxo mensal total de NO, para o período seco, também apresentou uma variação estatisticamente significativa entre os tratamentos de umidade (ANOVA, $p < 0,05$), com um fluxo maior para o T₂ (191,4 mg/m²) em comparação ao T₃ (114,3 mg/m²) e T₁ (50,2 mg/m²), respectivamente.

Mensalmente ocorreu uma variação estatisticamente significativa (ANOVA, $p < 0,01$) no fluxo de NO (Tabela 2), tanto para as UE que continham liteira (ANOVA, $p < 0,01$) como, também, para as UE que não continham este componente, indicando ter uma ligação ao comportamento pluviométrico, quantidade de água colocada do período da pesquisa. Também encontrou-se uma interação significativa entre os tratamentos e meses, tanto para as UE que continham liteira (ANOVA, $p < 0,05$) como para as UE que não continham este material (ANOVA, $p < 0,01$), reforçando a hipótese de uma influência da quantidade de água colocada de uma só vez, a qual corresponde à quantidade de chuva de um determinado período de tempo.

¹⁴Considera fluxo total como a soma dos fluxos médios mensais

É interessante notar que nos dois tratamentos que receberam restrição de água (T_2 e T_3), o fluxo mensal total de NO foi maior para as UE que não continham liteira (23,1% e 34,1% maior, respectivamente). Entretanto, no tratamento que não recebeu restrição de água o fluxo de NO foi maior nas UE que continham liteira (35,0% maior). Estes resultados revelam que uma diminuição na quantidade de água provocou um aumento na produção de NO, confirmando o que foi observado no experimento descritivo.

Pode estar ocorrendo o que sugeriu Davidson (1993), ou seja, a diminuição da água no solo provoca uma concentração de íons, incluindo H^+ e NO_2^- , numa fina película de água (Davidson, 1991; Hutchinson & Davidson, 1991, 1993) e que esta concentração pode provocar um aumento da atividade microbiana e, com isto, um aumento no fluxo de NO. Entretanto, isto não exclui uma possível influência de fontes abióticas no fluxo de NO do solo.

3.3.2 – Fluxo de N_2O

O fluxo total médio de N_2O (Tabela 3) para todas as UE não apresentou diferença estatística (ANOVA, $p > 0,05$) entre os tratamentos. Também não foi encontrada variação estatística significativa (ANOVA, $p > 0,05$) entre os meses dentro dos tratamentos (Tabela 3), para as UE que continham liteira. Entretanto, para as UE que não continham este material encontrou-se uma variação significativa (ANOVA, $p < 0,05$) no fluxo mensal de NO dentro dos tratamentos de umidade. Não ocorreu interação significativa (ANOVA, $p > 0,05$) entre os tratamentos e os meses para as duas UE.

Os tratamentos que representam uma restrição na entrada da água da chuva (T_2 e T_3), quando comparados com os resultados da parcela maior, a qual está por mais tempo (4 anos) recebendo uma restrição da entrada da água da chuva, não tiveram tempo suficiente (10 meses) para interferir no fluxo de N_2O do solo. Isto é confirmado quando se compara o fluxo mensal médio durante o período seco entre o tratamento de 100% de água da chuva (T_1) e a testemunha (condições naturais) e observa-se que houve uma diminuição (51,4%) deste para o fluxo de NO do solo no T_1 , em comparação à área sem cobertura. Esta variação indica que o tempo e/ou a área necessária para o tratamento foi pequeno, ou, ainda, não ocorreu uma mortalidade de raízes considerável, e com isto a quantidade de N-mineralizado não é suficiente para um aumento significativo na produção de N_2O .

3.3.3 – Relação entre o fluxo de NO: N_2O

Como já foi discutido anteriormente, nota-se que a relação NO: N_2O em média foi maior que 1 (menos no T_1 sem liteira no mês de junho), para todos os tratamentos e meses estudados (Tabela 4), confirmando a hipótese de que a maior mortalidade de raízes encontrada no tratamento de exclusão da chuva tem um papel importante nesta relação. Portanto, pode-se interpretar, pela análise dos dados, que a secagem do solo num primeiro momento interferiu positivamente no fluxo de NO, provavelmente devido à diminuição na umidade do solo e aumento da difusibilidade, bem como em uma maior atividade de bactérias nitrificantes. A partir de um tempo de secagem maior, ocorre um aumento na quantidade de matéria orgânica morta

Tabela 2 – Fluxo mensal de NO (ng/cm²/h) do solo de floresta tropical em unidades experimentais com liteira e sem liteira, dentro de três tratamentos de umidade

Meses	Com Liteira			Sem Liteira		
	T ₁ ^a	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
junho	0,839(0,273) ^b	1,434(0,383)	1,682(0,454)	0,665(0,182)	1,693(0,441)	1,637(0,540)
julho	1,064(0,721)	1,478(1,004)	1,245(0,466)	1,046(0,631)	2,685(2,217)	2,132(0,685)
agosto	0,517(0,137)	1,295(0,457)	1,019(0,279)	0,867(0,182)	1,878(0,637)	1,851(0,556)
setembro	1,460(0,242)	2,697(0,283)	1,154(0,101)	1,284(0,401)	4,426(1,448)	2,035(0,772)
outubro	5,327(2,315)	6,852(2,790)	1,464(0,421)	4,341(1,945)	9,013(3,560)	1,714(0,498)
novembro	2,994(1,692)	7,533(2,938)	1,786(0,349)	2,112(0,646)	7,455(2,938)	2,510(1,103)
dezembro	3,860(1,606)	6,014(1,240)	3,576(0,349)	0,999(0,488)	8,452(2,528)	5,712(2,033)

Nota: a) tratamento de 100% (T₁), 50% (T₂) e 0% (T₃) de água da chuva que chega ao solo da floresta a qual foi colocada por rega manual dentro da parcela.

b) números em negrito correspondem à média e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média

Tabela 3 – Fluxo mensal de N_2O ($ng/cm^2/h$) do solo de floresta tropical em unidades experimentais com liteira e sem liteira, dentro de três tratamentos de umidade.

Meses	Com Liteira			Sem Liteira		
	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
junho	0,801(0,221) ^b	0,995(0,307)	0,869(0,147)	0,777(0,289)	0,837(0,169)	1,130(0,296)
julho	1,102(0,750)	0,595(0,021)	0,520(0,127)	0,662(0,609)	0,490(0,029)	0,467(0,055)
agosto	0,484(0,220)	0,259(0,059)	0,428(0,059)	0,471(0,156)	0,554(0,273)	0,486(0,123)
setembro	0,689(0,183)	0,686(0,180)	0,628(0,104)	0,496(0,127)	0,448(0,081)	0,580(0,058)
outubro	1,019(0,174)	1,210(0,475)	0,505(0,087)	0,704(0,291)	1,196(0,449)	0,538(0,075)
novembro	0,892(0,244)	0,602(0,208)	0,556(0,114)	0,879(0,282)	0,493(0,092)	0,338(0,059)
dezembro	0,362(0,034)	0,497(0,179)	0,522(0,190)	0,468(0,075)	0,469(0,139)	0,471(0,095)

Nota: a) tratamento de 100% (T_1), 50% (T_2) e 0% (T_3) de água da chuva que chega ao solo da floresta a qual foi colocada por rega manual dentro da parcela.

b) números em negrito correspondem à média e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média

Tabela 4 – Relação fluxo mensal de NO₂O do solo de floresta tropical em unidades experimentais com liteira e sem liteira, dentro de três tratamentos de umidade.

Meses	Com Liteira			Sem Liteira		
	T ¹	T ²	T ³	T ¹	T ²	T ³
junho	1,116(0,465) ^b	1,455(0,683)	1,470(0,610)	0,946(0,480)	2,116(0,790)	1,137(0,458)
julho	2,628(2,442)	2,487(1,690)	2,314(0,333)	0,377(0,377)	5,759(4,857)	4,455(0,942)
agosto	1,756(0,946)	6,941(4,373)	2,234(0,704)	1,847(0,482)	7,714(3,100)	3,598(0,889)
setembro	2,522(0,877)	5,921(1,077)	2,469(0,539)	3,848(2,494)	13,103(3,595)	3,765(2,111)
outubro	5,864(1,899)	7,373(1,363)	4,453(2,267)	11,101(3,314)	13,530(4,793)	4,470(2,372)
novembro	2,930(0,993)	14,626(2,271)	3,961(1,262)	2,570(0,814)	18,839(10,73)	7,077(2,183)
dezembro	14,308(7,010)	17,625(10,81)	6,639(1,727)	1,655(0,785)	28,410(19,27)	8,406(3,235)

Nota: a) tratamento de 100% (T₁), 50% (T₂) e 0% (T₃) de água da chuva que chega ao solo da floresta a qual foi colocada por rega manual dentro da parcela.

b) números em negrito correspondem à média e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média

(aumento na biomassa de raízes mortas), isto interfere positivamente e mais intensamente na produção de N_2O , pelo aumento na quantidade de N-orgânico, possibilitando maior mineralização do nitrogênio.

Considerando a existência de uma interferência dentro do desenho estatístico utilizado (descrito acima), baseado em uma observação pessoal, acredita-se que o fluxo do solo para a atmosfera, tanto de NO quanto de N_2O , possui uma dinâmica correlacionada com a precipitação, concordando com Davidson, 1992. Também, como fonte de variação das condições naturais, a concentração da água, no sentido de apenas após ter um acúmulo de 50 mm de chuva, para depois colocar dentro da parcela, pode ter provocado uma intensificação do estresse e, com a entrada de água, induzir um pulso de NO devido a uma intensificação na atividade microbiana do solo, comparativamente às condições naturais (Davidson et al, 1991). Outra possibilidade que se deve levar em consideração é que a produção de N_2O , observada no tratamento de 100% da água da chuva em comparação as condições naturais (testemunha), pode ser reflexo do estresse provocado pelo tempo sem água. Entretanto, Verchot et al (no prelo) revelam que a variabilidade do fluxo destes gases dentro desta floresta é muito grande e a diferença encontrada nesta pesquisa, entre os tratamentos de exclusão da chuva e o que representam as condições naturais (testemunha), pela distância entre uma e outra, pode ser reflexo desta variabilidade espacial. Contudo, os dados revelam que a diminuição das chuvas e a concentração da mesma pode provocar aumento no fluxo de NO e N_2O do solo, mesmo que para este último gás necessite de um tempo maior

de estresse, e a partir disto ocorra um aumento significativo no fluxo. Também estes resultados confirmam maior dinâmica na produção do NO correlacionada com o comportamento de umidade do solo.

3.2.4 – Fluxo de CH_4

Em média mensal, o fluxo de CH_4 (Tabela 5) para o período de seca, nas UE que continham liteira, apresentou uma variação significativa (ANOVA, $p < 0,01$) entre os tratamentos de umidade, com uma inesperada produção de metano para o T_3 ($66,06 \text{ mg/m}^2$) e nos outros dois tratamentos encontrou-se um consumo de CH_4 ($T_1 = -96,96 \text{ mg/m}^2$ e $T_3 = 78,20 \text{ mg/m}^2$). Também para as UE sem liteira, em média, o fluxo mensal de CH_4 , para o período seco, apresentou uma variação estatisticamente significativa (ANOVA, $p < 0,05$) entre os tratamentos de umidade. Seguindo o mesmo padrão das UE que continham liteira, ou seja, em média houve uma maior produção de CH_4 para o tratamento com exclusão da água ($T_3 = 33,13 \text{ mg/m}^2$), divergindo dos outros dois tratamentos para as quais se encontrou um consumo de CH_4 atmosférico pelo solo ($T_1 = -103,90 \text{ mg/m}^2$ e $T_2 = -34,09 \text{ mg/m}^2$). Mensalmente (Tabela 5) foi encontrada uma variação estatisticamente significativa para as UE que continham liteira (ANOVA, $p = 0,05$), entretanto, não se encontrou uma interação significativa (ANOVA, $p > 0,05$) entre os tratamentos e os meses.

Não se encontrou variação estatística entre as UE que continham liteira e as UE que não continham este material, tanto nos tratamentos em que ocorreu um consumo, bem como no tratamento (T_3) onde ocorreu uma

Tabela 5 – Fluxo de CH₄ (mg /m²/d) do solo de floresta tropical em unidades experimentais com liteira e sem liteira, dentro de três tratamentos de umidade.

Meses	Com Liteira			Sem Liteira		
	T ₁ ^a	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
junho	5,654(0,449) ^b	1,746(1,772)	0,955(1,772)	5,924(1,083)	3,773(2,378)	1,967(2,244)
julho	5,617(0,359)	6,875(0,382)	1,961(5,530)	7,487(1,083)	1,379(4,381)	0,832(5,188)
agosto	5,589(0,803)	5,915(1,142)	5,736(7,672)	5,839(1,619)	6,357(0,382)	3,275(7,674)
setembro	1,234(0,250)	1,435(0,068)	2,212(1,880)	1,590(0,112)	1,264(0,291)	4,059(3,750)
outubro	1,027(0,119)	1,109(0,180)	3,503(2,536)	1,569(0,189)	0,815(0,551)	2,118(1,995)
novembro	1,347(0,217)	0,415(1,627)	3,491(1,623)	1,074(0,216)	0,498(0,861)	0,040(0,809)
dezembro	1,222(0,294)	1,595(0,249)	0,430(1,591)	0,761(0,441)	1,414(0,258)	1,038(0,402)

Nota: a) Tratamento de 100% (T₁), 50% (T₂) e 0% (T₃) de água da chuva que chega ao solo da floresta a qual foi colocada periodicamente por rega manual, dentro da parcela.

b) Os números em negrito correspondem à média e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média.

produção de CH_4 . Estes resultados mostram que uma diminuição na quantidade de água pode alterar a dinâmica deste gás dentro da floresta estudada, ou seja, esperava-se que durante a época seca ocorresse um consumo de CH_4 devido à maior aeração do solo. Com a intensificação da sazonalidade (tratamento de estresse) este consumo deveria manter-se no mesmo padrão ou aumentar. Entretanto, foi observado que nos tratamentos em que foi colocada água houve um consumo de CH_4 e no tratamento em que foi excluído a água houve uma produção deste gás. Também como pode ser observado no gráfico (Figura 6), a diminuição da umidade pelos tratamentos T_1 e T_2 provoca uma diminuição no consumo de CH_4 de dentro da câmara de solo.

Alguns fatores podem estar influenciando os resultados e não apenas um específico. A diminuição da umidade pode provocar um aumento de material seco e, com isto, acarretar um aumento do ataque de cupins¹⁵. Isto fica fácil de se imaginar quando se enfoca o experimento descritivo (10x10 m), devido à introdução de madeira seca na parcela (sem prévio tratamento com óleo queimado), bem como da provável alta taxa de mortalidade de raízes no solo (após 4 anos de tratamento). Entretanto, nos blocos, além de todos tratamentos serem cobertos com suportes de madeira (tratada com óleo queimado, ver metodologia) e lona plástica, cada parcela se localizava bem próxima uma da outra. Mesmo que tenha ocorrido ataque de cupins na parcela mais seca (0% de água), por que isto não ocorreu na parcela em que foi retirada 50%

da água da chuva? Em relação a existir uma maior biomassa de raízes mortas no tratamento mais seco, provavelmente no delineamento em blocos não houve tempo suficiente para que se pudesse fazer esta afirmação.

Pela análise da literatura supõe-se que, em condições normais de umidade, a oxidação do CH_4 realizada no solo, no local do experimento, não é única e exclusivamente feita por bactérias metanotróficas, ou seja, exista uma contribuição de bactérias nitrificantes. Quando o solo seca abaixo de um certo limite, pode ocorrer um aumento na concentração de NH_4 do solo e com isto as bactérias nitrificantes passem a dar preferência apenas para este elemento, o que pode provocar uma diminuição na oxidação do CH_4 (Stuedler et al, 1989; Mosier et al, 1991). Entretanto, para que exista um aumento na concentração de CH_4 dentro das UE, conforme observado no perfil da parcela de exclusão da chuva (Figura 7), deve estar ocorrendo uma produção deste gás em profundidade.

Contudo, o que foi observado neste experimento é que a diminuição da umidade do solo na floresta tropical estudada provoca um fluxo de CH_4 do solo para a atmosfera, podendo ser resultante de uma diminuição na oxidação deste gás, ou devido a uma produção, o que não quer dizer que ambas possam estar acontecendo simultaneamente. Pela análise do delineamento em blocos, não está provado que este fluxo provenha de atividade de cupins e/ou de uma maior mortalidade de raízes. Portanto, este é um efeito não esperado que pode causar importantes conseqüências nas

¹⁵ Os cupins possuem bactérias no trato digestivo aos quais produzem CH_4

mudanças climáticas resultantes de uma possível diminuição na umidade do solo em floresta primária do sudeste amazônico.

4 – CONCLUSÃO

A diminuição da umidade do solo na floresta de terra firme em Paragominas traduziu-se em um aumento na biomassa total de raízes mortas. Também, a diminuição da umidade do solo provocou um aumento no fluxo de NO, N₂O, e uma diminuição no consumo do CH₄ atmosférico pelos microorganismos do solo, e até foi encontrado uma produção deste gás em profundidade. Também, os resultados mostraram um aumento na concentração de N₂O e CH₄ no perfil do solo. Em se tratando do N₂O, este aumento deve estar relacionado ao da quantidade de matéria orgânica morta no solo resultante do aumento da biomassa de raízes mortas. No caso do CH₄ é importante dizer que a produção é altamente relacionada a padrões de anoxia no solo, sendo que na referida pesquisa esta possibilidade é bem remota devido ao fato de esta se realizar na época seca e ainda existir tratamentos que aumentam o déficit hídrico do solo. Portanto, não foi encontrada uma conclusão para a maior concentração de CH₄ no perfil do solo, bem como da existência de fluxo deste gás para a atmosfera.

Contudo, os resultados revelam que, se esta tendência se confirmar, a intensificação dos períodos secos em florestas, parecidas com as de Paragominas, pode provocar um aumento na produção de NO e N₂O do solo com uma diminuição do consumo de CH₄ atmosférico pelos organismos do solo e até uma produção deste gás para a atmosfera. Com isto, é de

esperar uma participação importante da Região Amazônica na intensificação do efeito estufa a nível global. Estes dados são de grande valia, haja vista o aumento considerável do desmatamento na Região Amazônica e ao pouco conhecimento que se tem sobre o ciclo biogeoquímico destes gases.

Portanto, é de grande importância que se intensifiquem estudos sobre o ciclo destes três gases, a participação mais efetiva do governo federal na fiscalização, no sentido de impedir grandes desmatamentos e a substituição de grandes áreas da floresta amazônica por outra forma de vegetação e, com isto, prevenindo a diminuição das chuvas nesta região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BÉDARD, C., KNOWLES, R. Physiology, biochemistry, and specific inhibitors of CH₄, NH₄⁺, and CO oxidation by methanotrophs and nitrifiers. *Microbiological Reviews*, v.53, p. 68-84, 1989.
- BLACKEMER, A. M., CERRATO, M. E. Soil properties affecting formation of nitric oxide by chemical reaction of nitrite. *Soil Science Society American Journal*, v.50, p.1215-1218, 1986.
- CICERONE, R. J. Changes in stratospheric ozone. *Science*, v.237, p.35-42, 1987.
- _____, OREMLAND, R. S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochemic Cycles*, v.2, p. 299-327, 1988.
- DAVIDSON, E. A. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. In: ROGERS, J.E. (Ed.), WHITMAN, W. B. (Ed.). *Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrogen oxides, and halomethanes*. Washington, D.C.: American Society for Microbiology, 1991.
- _____. Soil water content and the ratio of nitrous oxide to nitric oxide emitted from soil. In: OREMLAND, R. S. (Ed.). *The biogeochemistry of global change: radiatively active trace gases*. New York: Chapman & Hall, 1993. p. 369-386.

- DAVIDSON, E. A. Sources of nitric oxide and nitrous oxide following wetting of dry soil. *Soil Science Society of American Journal*, v. 56, n.1, p.95-102, 1992.
- _____, SCHIMMEL, J. P. Microbial processes of production and consumption of nitric oxide, nitrous oxide and methane. In: MATSON, P. A. (Ed.), HARRIS, R.C. (Ed.). **Biogenic trace gases: measuring emissions from soil and water**. Oxford: Blackwell Science, 1995. p. 327-357.
- _____, TRUMBORE, S. E. Gas diffusivity and production of CO₂ in deep soils of the eastern Amazon. *Tellus* 47B, p. 0-16, 1995.
- _____, MATSON, P.A., VITOUSEK, P.M., RILEY, R., DUNKIN, K., GARCIA-MENDEZ, G., MAASS, J.M. Processes regulating soil emissions of NO and N₂O in a seasonally dry tropical forest. *Ecology*, v. 74, n.1, p. 130-139, 1993.
- _____, VITOUSEK, P. M., MATSON, P.A., RILEY, R., GARCIA-MENDEZ, G., MAASS, J.M. Soil emissions of nitric oxide in a seasonally dry tropical forest of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, v. 96 (D8), n. 15, p. 439-445, 1991.
- DIAZ, H, KILADIS, G. N. Atmospheric teleconnections associated with the extreme phases of the Southern Oscillation. In: DIAZ, H. F. (Ed.), MARKGRAF, V. (Ed.). **El Niño, historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation**. 1992. p. 7-28.
- DÖRR, H., KATRUFF, L., LEVIN, I. Soil texture parameterization of methane uptake in aerated soils. *Chemosphere*, v.26, p. 697-713, 1993.
- DUXBURY, J. M., HARPER, L. A., MOSIER, A. R. Contributions of agroecosystems to global climate change. In: SEGOE, R.D. (Ed.), MADISON, W. I. (Ed.). **Agriculture ecosystem effects on trace gases and global climate change**. Madison: American Society of Agronomy, 1993. p. 1-18. (ASA Special Publication, 55).
- FIRESTONE, M. K., DAVIDSON, E. A. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. In: ANDREAE, M. O. (Ed.), SCHIMMEL, D.S. (Ed.). **Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and atmosphere**. Chichester: J. Wiley, 1989. p. 7-21..
- GARCÍA-MÉNDEZ, G., MAASS, J. M., MATSON, P. A., VITOUSEK, P. M. Nitrogen transformations and nitrous oxide flux in a tropical deciduous forest in Mexico. *Oecologia*, v. 88, p. 362-366, 1991.
- GUMPERTZ, M. L., BROWNIE, C. Repeated measures in randomized block and split-plot experiments. *Canadian Journal of Forestry Research*, v.23, p. 625-639, 1992.
- HICKS, C. R. **Fundamental concepts in the design of experiments**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1973. 350 p.
- HUTCHINSON, G. L., DAVIDSON, E. A. Processes for production and consumption of gaseous nitrogen oxides in soil. In: SEGOE, R.D. (Ed.), MADISON, W. I. (Ed.). **Agriculture ecosystem effects on trace gases and global climate change**. Madison: American Society of Agronomy, 1993. p. 79-93. (ASA. Special Publication, 55).
- JIPP, P. H.; NEPSTAD, D. C., CASSEL, D. K. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally-dry Amazonia. **Climatic Change** (no prelo).
- KELLER, M., KAPLAN, W. A., WOFSEY, S. C. Emissions of N₂O, CH₄ and CO₂ from tropical soils. *Journal Geophysical Research*, v. 91, p. 11791-11802, 1986.
- KHALIL, M. A. K. **Greenhouse gases in the earth's atmosphere: encyclopedia of environmental biology**. New York: Academic Press, 1995. 265p.
- _____, RASMUSSEN, R. A. The changing composition of the earth's atmosphere. In: HANWANT, B. S. (Ed.). **Composition chemistry, and climate of the atmosphere**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1995. p. 50-87.
- _____, _____. Global emissions of methane during the last several centuries. *Chemosphere*, v. 29, n. 5, p. 833-842, 1994.
- KING, G. M. Utilisation of hydrogen, acetate and "non-competitive" substrates by methanogenic bacteria in marine sediments. *Geomicrobiological Journal*, v.3, p. 275-306, 1984.
- LASHOF, D. A., AHUJA, D. R. Relative contribution of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature*, v.344, p.529-531, 1990.
- LOGAN, J. Nitrogen oxides in the troposphere: global and regional budgets. *Journal Geophysics Research*, v.88, p.10785-10807, 1983.
- MAcELROY, M. B., WOFSEY, S. C. Tropical forest: interactions with the atmosphere. In: PRANCE, G. T. (Ed.). **Tropical rain forest and the world atmosphere**. Boulder: Westview, 1986. p 33-60.

- MATSON, P. A., VITOUSEK, P. M. Ecosystem approach to a global nitrous oxide budget. *Bioscience*, v.40, p.667-672, 1990.
- MOORE, T. R., KNOWLES, R. The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. *Canadian Journal of Soil Science*, v.69, p.33-38, 1989.
- MOSIER, A., SCHIMMEL, D., VALENTINE, D., BRONSON, K., PARTON, W. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature*, v.350, p.330-332, 1991.
- NEPSTAD, D. C. *Forest regrowth in abandoned pastures of eastern Amazonia: limitations to tree seedling survival and growth*. New Haven: Yale University, 1989. Tese (Doutorado) - Yale University, 1989.
- _____, CARVALHO, C. R. de, DAVIDSON, E. A., JIPP, P., LEFEBVRE, P. A., NEGREIROS, G. H., SILVA, E. D. da, STONE, T.A., TRUMBORE, S. E., VIEIRA S. The role of deep root in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, v.372, p. 666-669, 1994.
- PHILANDER, S. G. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. London: Academic Press, 1990. 293 p.
- POTTER, C. S., DAVIDSON, E., VERCHOT, L. V. Estimation of global biogeochemical controls and seasonality in soil methane consumption. *Chemosphere* (no prelo).
- SCHÜLTZ, H., SEILER, W., RENNENBER, H. Soil and land use related sources and sinks of methane (CH₄) in the context of the global methane budget. In: BOUWMAN, A. F. (Ed.). *Soil and the greenhouse effect*. New York: J. Wiley, 1990.
- SOMBROEK, W. G. Soil of the Amazon region. In: SIOLI, H. (Ed.). *The Amazon basin: landscape ecology and hydrology a mighty, tropical river and its basin*. Dordrecht: W. Junk, c1984. 763p. p.122-135.
- STEUDLER, P. A., BOWDEN, R.D., MELILLO J. M., ABER, J. D. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature*, v. 341, p. 314-316, 1989.
- TYLER, S. C. The global methane budget. In: ROGERS, J.E. (Ed.), WHITMAN, W. B. (Ed.). *Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrogen oxides, and halomethanes*. Washington, D. C.: American Society for Microbiology, 1991. p. 7-37.
- VERCHOT, L. V., DAVIDSON, E. A., CATTANIO, J. H., ACKERMAN, I. L., HEATHER, E. E., KELLER, M. Land-use and biogeochemical controls of nitrogen trace gas emissions from soils in the eastern Amazon. *Global Biogeochemical Cycles* (no prelo)
- VITOUSEK, P. M., SANFORD, R. L. Nutrient cycling in moist tropical forests. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v.17, p. 137-167, 1986.
- _____, MATSON, P. A., VOLKMANN, C., MAASS, J. M., GARCIA-MENDEZ, G. Nitrous oxide flux from dry tropical forests. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 3, p. 375-382, 1989.

