



FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO (N_2O) E DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2) EM SOLOS DE REMANESCENTES DA FLORESTA ATLÂNTICA NO SUDESTE DO BRASIL

W.Z. de Mello¹ & T.J. Goreau²

¹Instituto de Química, Departamento de Geoquímica - UFF, Outeiro São João Batista s/n, CEP 24020-007, Niterói, RJ

²Global Coral Reef Alliance, 324 Bedford Rd., Chappaqua, NY 10514

Recebido em 07/97; aprovado para publicação em 12/97

ABSTRACT

N_2O and CO_2 emission rates were measured simultaneously at the soil-atmosphere interface in fragments of the Atlantic Forest in Rio de Janeiro State. Sixty-three flux measurements were performed by using static chamber techniques. N_2O and CO_2 were emitted to the atmosphere at rates of $<0,3$ to $56,1 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$ and 34 to $642 mg C-CO_2 m^{-2} h^{-1}$. Flux rates of N_2O in the Atlantic Forest soils were in the lower range of N_2O fluxes measured in Central Amazon, where as flux rates of CO_2 were in the middle range. Twenty four per cent of the flux measurements were made during the rainy season (early austral summer), 35% during the fall and 45% during the dry season (winter). The data suggest that seasonal and spatial variabilities occur. In the Serra da Coroa Grande, where measurements were performed during 3 different periods of the year, N_2O and CO_2 fluxes showed significant seasonal variation. Fluxes decreased in the following order: December > May > August. The spatial variability was examined by comparing the gas flux data measured in August in Maciço da Tijuca, Serra da Coroa Grande and Serra dos Órgãos. The spatial variation was less evident than temporal variation; only the N_2O fluxes in Serra da Coroa Grande and Maciço da Tijuca were considered significantly different.

RESUMO

Fluxos de N_2O e CO_2 foram medidos, simultaneamente, na interface solo-atmosfera em remanescentes da Floresta Atlântica no Estado do Rio de Janeiro. Foram realizadas 63 medições de fluxo por meio de câmaras estáticas. Os fluxos de N_2O e CO_2 variaram de $<0,3$ a $56,1 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$ e 34 a $642 mg C-CO_2 m^{-2} h^{-1}$. O fluxo médio de N_2O na Floresta Atlântica situa-se próximo ao limite inferior das médias apresentadas para solos de floresta da Amazônia Central, ao passo que o de CO_2 encontra-se na faixa intermediária entre os valores mínimo e máximo apontados pela literatura. Entretanto, é importante considerar que, das 63 medições de fluxo realizadas na Floresta Atlântica, 24% delas foram no período das chuvas (início de verão), 35% no período intermediário (outono) e 41% no período seco (inverno). Os fluxos mostraram variações temporais e espaciais. Na Serra da Coroa Grande, local onde foram realizadas medições em 3 diferentes períodos do ano, os fluxos de N_2O e CO_2 apresentaram variabilidades sazonais estatisticamente significativas. Os fluxos decresceram na seguinte ordem: dezembro > maio > agosto. A variabilidade espacial foi verificada através da comparação dos fluxos medidos no mês de agosto no Maciço da Tijuca, Serra da Coroa Grande e Serra dos Órgãos. Esta foi menos expressiva que a variação temporal e só mostrou diferença estatisticamente significativa entre os fluxos de N_2O medidos da Serra da Coroa Grande e Maciço da Tijuca.

INTRODUÇÃO

O conhecimento dos fluxos de óxido nítrico (N_2O) e dióxido de carbono (CO_2) do solo para a atmosfera é de grande importância para uma melhor conceituação, tanto do balanço do ciclo biogeoquímico global do nitrogênio e carbono quanto da participação desses gases em processos químicos e físicos da atmosfera. As concentrações atmosféricas de N_2O e CO_2 vêm crescendo globalmente, desde o início do século XIX, em decorrência de uma série de fatores relacionados às atividades antrópicas, tais como desmatamento, queimadas, uso impróprio da terra, aplicação de fertilizantes sintéticos, indústrias e queima de combustíveis fósseis. Esses fatores respondem pelo aumento observado de 7% e 25% das concentrações atmosféricas de N_2O e CO_2 , respectivamente, nos últimos 200 anos (Nefel *et al.*, 1985; Friedli *et al.*, 1986; Khalil & Rasmussen, 1992). O N_2O e CO_2 são gases que absorvem a radiação infravermelha emitida pela superfície do planeta, exercendo, portanto, um papel relevante no controle do balanço térmico da atmosfera. Com base nas concentrações atmosféricas atuais, a contribuição relativa do N_2O e CO_2 para o efeito estufa é da ordem de 5% e 60%, respectivamente (Rodhe, 1990). Na estratosfera (camada da atmosfera entre 13 e 50 km de altitude), a reação entre o N_2O e o átomo de oxigênio eletronicamente ativo [O(1D)] leva à formação do monóxido de nitrogênio (NO), que, através de reações cíclicas, conduz à destruição do ozônio (O_3) estratosférico, responsável por grande parte da absorção da radiação solar na região do UV-B (290-320 nm).

Florestas tropicais são, reconhecidamente, os ecossistemas mais produtivos e de maior diversidade de nosso planeta. Os solos de florestas tropicais têm participação significativa na dinâmica de processos químicos e físicos da atmosfera, uma vez que atuam como fonte e sorvedouro de vários gases-traço, como N_2O , NO, CO_2 e CH_4 (Keller *et al.*, 1983; Keller *et al.*, 1986; Goreau & de Mello, 1987, 1988; Kaplan *et al.*, 1988; Bakwin *et al.*, 1990). Na superfície do solo de florestas, o CO_2 é produzido, principalmente, pela participação de microorganismos na decomposição aeróbia da matéria orgânica, enquanto o N_2O tem sua produção associada à nitrificação e desnitrificação (Hutchinson & Davidson, 1993). No primeiro caso, a produção de N_2O ocorre durante a primeira fase do processo de nitrificação, ou seja, durante a oxidação do amônio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-) por bactérias autotróficas, como as do gênero *Nitrosomonas*, *Nitrosolobus* e *Nitrospira* (Goreau *et al.*, 1980). No segundo caso, o N_2O forma-se a partir da redução do NO_3^- ou NO_2^- , através de bactérias aeróbicas que possuem a capacidade alternativa de reduzir óxidos de N, sempre que o O_2 tornar-se insuficiente à nitrificação. A rápida mineralização da matéria orgânica (e, concomitantemente, do N a ela associada) em solos tropicais, estimulada pela umidade e temperatura elevadas, oferece condições bastante propícias à produção de CO_2 e N_2O , quando comparada aos solos das regiões de clima temperado (Goreau & de Mello, 1987; Goreau, 1981).

A disponibilidade de dados de fluxos de N_2O e CO_2 em solos de florestas tropicais no Bra-

sil resultam de estudos realizados na Amazônia Central e, além disso, restritos a locais não muito distantes da periferia de Manaus (< 80 km) (Keller *et al.*, 1983; Keller *et al.*, 1986; Goreau & de Mello, 1987; Livingston *et al.*, 1988; Wofsy *et al.*, 1988; Luizão *et al.*, 1989; Matson *et al.*, 1990). O objetivo desse trabalho foi estimar fluxos de N_2O e CO_2 em solos de remanescentes da Floresta Atlântica da Região Sudeste do Brasil. Os fluxos de N_2O e CO_2 foram estudados em áreas íngremes, uma vez que a ocorrência de Floresta Atlântica restringe-se, atualmente, quase que em sua totalidade, aos locais de relevo montanhoso e, em geral, com declividade acentuada.

MATERIAL E MÉTODOS

De dezembro de 1986 a agosto de 1987, foram efetuadas 63 medições simultâneas de fluxos de N_2O e CO_2 em solos de remanescentes da Floresta Atlântica (RJ), em altitudes entre 300 e 1200 m. Os locais de amostragem situam-se em vertentes da Serra da Coroa Grande (Mangaratiba), Maciço da Tijuca (Rio de Janeiro), Serra do Mato Grosso (Maricá) e Serra dos Órgãos (Teresópolis), cujas coordenadas geográficas e altitudes encontram-se indicadas na Tabela 1.

Os fluxos de N_2O e CO_2 na superfície do solo foram medidos pelo método da câmara estática, que se baseia na variação da concentração do gás no interior de uma câmara, disposta sobre a superfície do solo, em função do tempo. Para isso, foram utilizadas câmaras metálicas, de formato cilíndrico, com 11 cm de altura e 27,5 cm de diâmetro. Para a determinação do fluxo, a câmara foi fixada na

Tabela 1 - Coordenadas geográficas e altitudes dos pontos de amostragem situados em áreas de remanescentes da Floresta Atlântica. RJ.

Local	Latitude	Longitude	Altitude, m
Serra da Coroa Grande	22°53'-22°54'	43°53'-43°54'	300-500
Maçico da Tijuca	22°56'-22°57'	43°17'-43°18'	700-800
Serra do Mato Grosso	22°53'-22°54'	42°41'-42°42'	300-400
Serra dos Orgãos	22°27'-22°28'	42°59'-43°00'	1100-1200

superfície do solo através de movimentos giratórios, de forma a minimizar alterações na serrapilheira e, ao mesmo tempo, assegurar boa vedação. A profundidade de penetração da câmara no solo foi de, aproximadamente, 1 cm. A face superior fechada da câmara possuía dois orifícios vedados com rolhas de silicone, atravessadas por agulhas epidérmicas acopladas a uma válvula de polipropileno. Durante a amostragem, enquanto um dos orifícios era utilizado para a retirada da amostra, o outro servia para manter a pressão interna da câmara igualada à atmosférica. Imediatamente após a inserção da câmara na superfície do solo, uma amostra de ar atmosférico (25 cm³) era recolhida em seringa de vidro (com capacidade de 50 cm³) com êmbolo esmerilhado. A partir daí, outras três amostras de ar eram retiradas do interior da câmara, com seringas do mesmo tipo, em intervalos de 5 minutos. As seringas possuíam válvulas de polipropileno que asseguravam a vedação das mesmas.

No laboratório, as amostras de ar foram analisadas em menos de 24 horas após a coleta. As análises foram efetuadas num cromatógrafo gasoso Shimadzu modelo GC-6AM, equipado com um detector de captura de elétrons de Ni⁶³ (ECD-6M) e outro de condutividade térmica (TCD-6M),

destinados às determinações de N₂O e CO₂, respectivamente. Os detectores de captura de elétrons e condutividade térmica foram operados a 350°C e 150°C, respectivamente. Um sistema de injeção em série, com controle de válvulas individuais, permitia a análise simultânea dos dois gases. As colunas cromatográficas (em Teflon) possuíam 2,45 m de comprimento e 0,317 cm de diâmetro interno e foram empacotadas com Porapak Q de 80-100 mesh (0,18-0,15 mm). Durante a análises, as colunas foram mantidas à temperatura do ar, no laboratório com refrigeração (~23°C). Os gases de arraste utilizados foram argônio com 5% de metano, para o detector de captura de elétrons e hélio, para o de condutividade térmica. Estes gases possuíam elevado grau de pureza (*zero grade*), adquiridos da Liquid Carbonic Corp. (Chicago, IL). Ar comprimido (Liquid Carbonic Corp., Chicago, IL), contendo 310 ppbv de N₂O e 352 ppmv de CO₂ (concentrações cordialmente calibradas por W.A. Kaplan, Center for Earth and Planetary Physics, Harvard University) foi utilizado para calibração das amostras. A precisão dos resultados analíticos, obtida da reprodutibilidade de 5 determinações, foi de ±1%.

O fluxo (F) dos gases (N₂O e CO₂) na interface solo-atmos-

fera foram calculados através da equação:

$$F = (V/A)\rho(dC/dt)_{t=0}$$

onde V é o volume interno da câmara acima da superfície do solo (~5,35 dm³); A , a área superficial do solo encoberta pela câmara; ρ , a densidade do ar ajustada à temperatura do ar no momento da amostragem, e dC/dt , a inclinação da curva de variação de concentração do gás em função do tempo em $t = 0$. Os fluxos mínimos mensuráveis de N₂O e CO₂ foram 0,3 µg N-N₂O m⁻² h⁻¹ e 0,5 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹, respectivamente. Os pormenores dos procedimentos adotados na amostragem e análises encontram-se descritos em Goreau & de Mello (1987).

RESULTADOS

Nas Figuras 1a e 1b, são mostrados, respectivamente, exemplos típicos de curvas de evolução das concentrações de N₂O e CO₂ no interior da câmara em função do tempo, obtidas a partir de quatro determinações de fluxo na superfície do solo. No caso das curvas não lineares, os valores de dC/dt na Equação 1 foram obtidos a partir das tangentes às curvas em $t = 0$, isto é, no instante de inserção das câmaras à superfície do solo. Na Tabela 2, são apre-

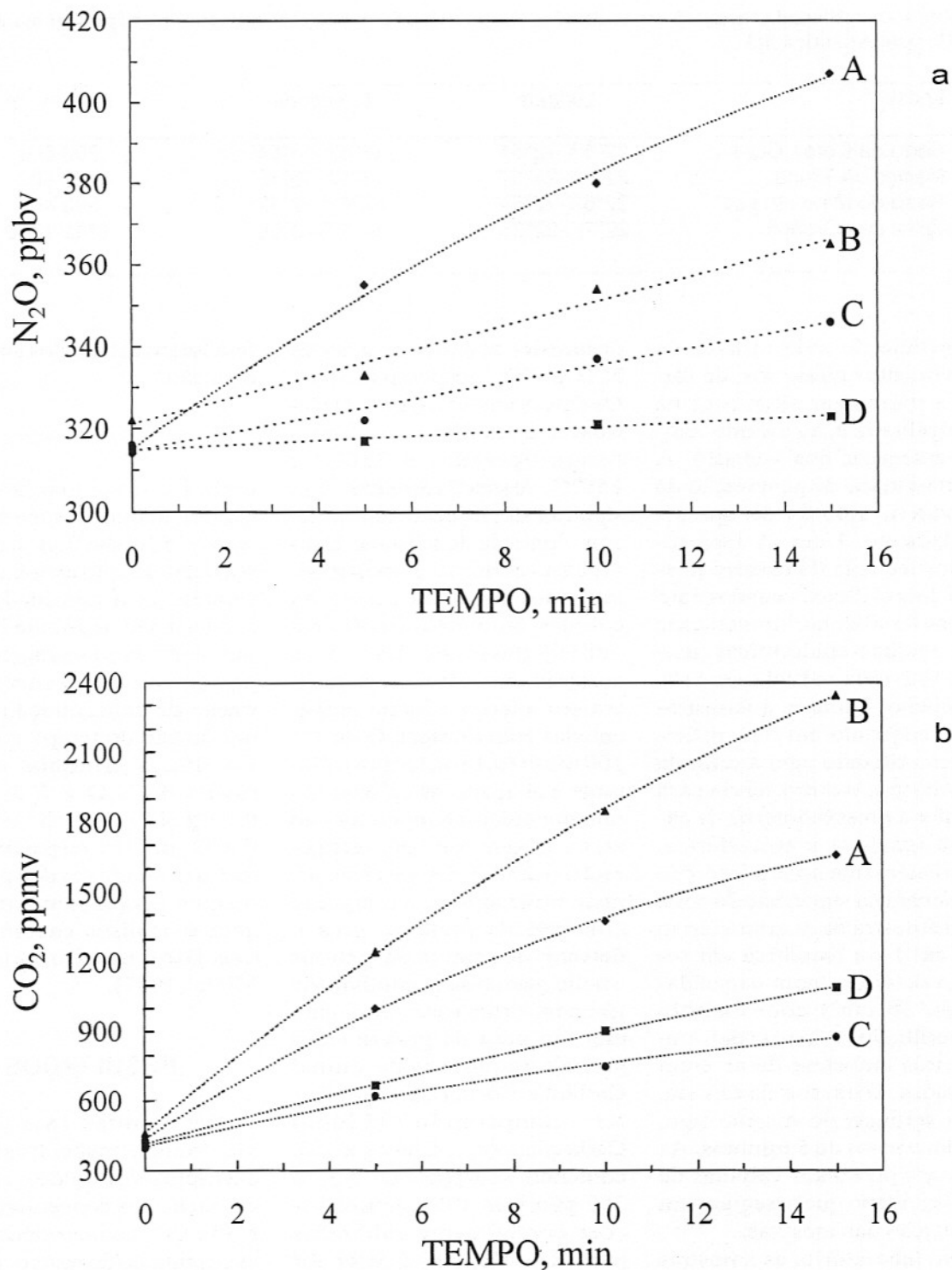


Figura 1 - a) Exemplos típicos de quatro curvas de variação de concentração de N_2O em função do tempo, obtidas pelo método da câmara estática para determinação de fluxo do gás na interface solo-atmosfera. (A) Serra do Mato Grosso, em 30/04/87, $F = 37,8 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$; (B) Serra do Mato Grosso, em 30/04/87, $F = 18,7 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$; (C) Serra da Coroa Grande, em 14/05/87, $F = 13,2 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$; (D) Serra da Coroa Grande, em 14/05/87, $F = 3,5 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$. **b)** Exemplos típicos de quatro curvas de variação de concentração de CO_2 em função do tempo, obtidas pelo método da câmara estática para determinação de fluxo do gás na interface solo-atmosfera. (A) Serra do Mato Grosso, em 30/04/87, $F = 298 mg C-CO_2 m^{-2} h^{-1}$; (B) Serra do Mato Grosso, em 30/04/87, $F = 466 mg C-CO_2 m^{-2} h^{-1}$; (C) Serra da Coroa Grande, em 14/05/87, $F = 130 mg C-CO_2 m^{-2} h^{-1}$; (D) Serra da Coroa Grande, em 14/05/87, $F = 142 mg C-CO_2 m^{-2} h^{-1}$.

Tabela 2 - Fluxos de óxido nitroso e dióxido de carbono em solos de remanescentes da Floresta Atlântica, RJ.

Local	MA	DP	MED	MIN	MAX	n	T (°C)	Data
Óxido nitroso ($\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)								
Serra da Coroa Grande	15,2	16,4	8,3	1,8	56,1	10	24	08/12/86
	16,4	11,1	10,9	6,2	31,3	5	23	10/12/86
	8,5	6,7	5,7	1,0	21,6	11	22	14/05/87
	5,9	4,1	5,7	<0,3	11,4	11	20	27/08/87
Maciço da Tijuca	14,3	8,1	14,7	3,8	25,6	8	13	21/08/87
Serra do Mato Grosso	14,2	8,6	12,7	7,4	37,8	11	22	30/04/87
Serra dos Orgãos	8,1	6,0	7,7	2,2	16,6		17	15/08/87
Dióxido de carbono ($\text{mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)								
Serra da Coroa Grande	187	54	187	75	267	10	24	08/12/86
	257	79	232	203	395	5	23	10/12/86
	140	50	130	91	280	11	22	14/05/87
	60	20	56	34	92	9	20	27/08/87
Maciço da Tijuca	70	14	70	46	92	8	13	21/08/87
Serra do Mato Grosso	280	158	243	113	642	11	22	30/04/87
Serra dos Orgãos	67	28	52	41	112	7	17	15/08/87

MA	Média aritmética
MED	Mediana
DP	Desvio padrão
MIN	Mínima
MAX	Máxima
n	Número de amostras
T	Temperatura média do solo cerca de 3 cm abaixo da superfície

sentados dados estatísticos referentes aos resultados dos fluxos de N_2O e CO_2 , discriminados pela localização e data de amostragem. Os desvios padrões não necessariamente representam a forma mais adequada de apresentação do grau de dispersão da média, uma vez que o número de observações realizadas em cada campanha foi insuficiente para indicar se os dados seguem ou não a distribuição normal. Entretanto, uma vez que a comparação entre a média aritmética e a mediana pode dar uma indicação da forma da curva de frequência, as medianas foram incluídas na Tabela 2. O fato das medianas terem sido, na maior par-

te dos casos, inferiores às médias aritméticas sugere uma tendência à assimetria positiva (desvio para a direita) das curvas de frequência e, sendo assim, uma fuga à distribuição normal.

Os fluxos de N_2O em solos de remanescentes da Floresta Atlântica ($n = 63$) variaram de $<0,3$ a $56,1 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. A média aritmética (\pm desvio padrão, DP), mediana e moda foram, respectivamente, $11,4 (\pm 9,7)$, $8,7$ e $7,7 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. O primeiro e terceiro quartis foram respectivamente $5,4$ e $14,7 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Os fluxos de CO_2 ($n = 61$) variaram de 34 a $642 \text{ mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e a média aritmética (\pm DP), me-

diana e moda foram respectivamente $153 (\pm 113)$, 123 e $123 \text{ mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($n = 61$). O primeiro e terceiro quartis foram, respectivamente, 70 e $203 \text{ mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. As distribuições de frequência contendo os valores totais de fluxo de N_2O e CO_2 são apresentadas nas Figuras 2a e 2b, sob a forma de histogramas. A assimetria positiva observada ($2,12$ para N_2O e $1,94$ para CO_2) indica, simplesmente, que a ocorrência de fluxos baixos foi superior aos fluxos elevados. Distribuições de frequência com características de assimetria positiva são, comumente, observadas nas determinações de fluxos de gases-traço na interface solo-at-

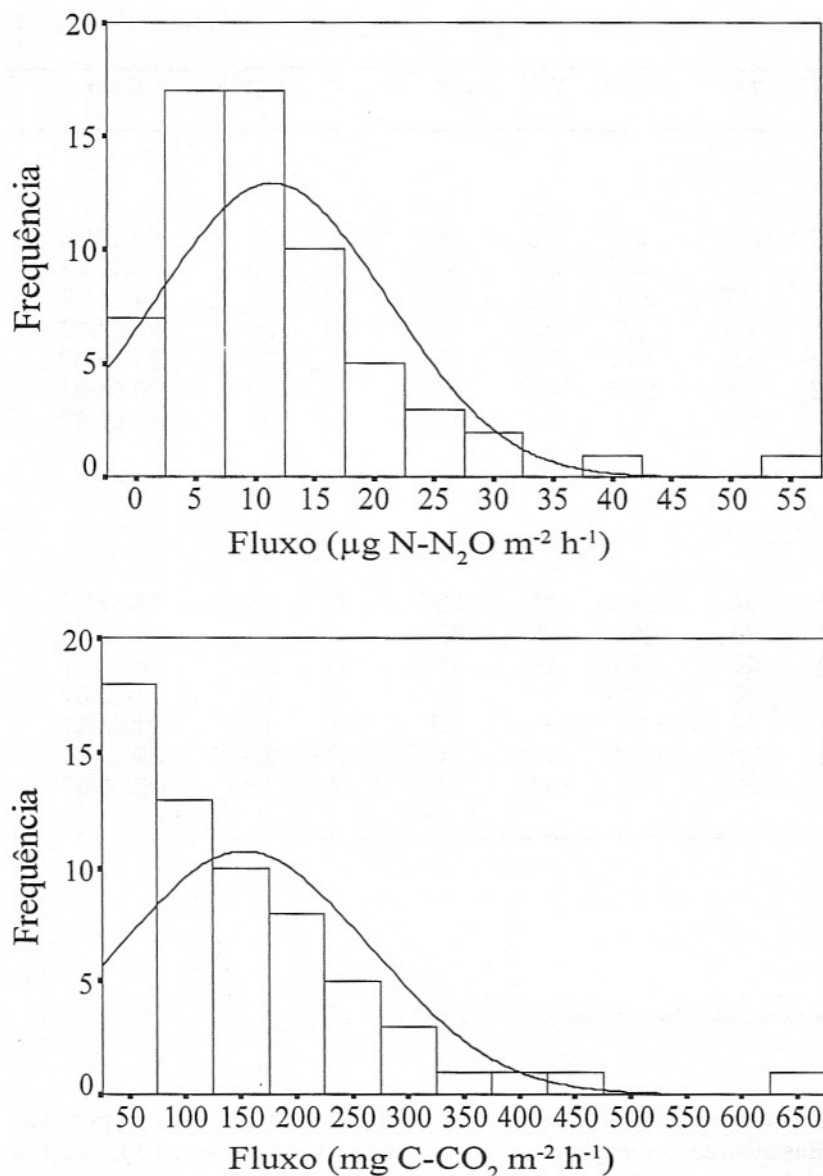


Figura 2 - Histogramas de freqüência de fluxos de óxido nitroso ($n = 63$) e dióxido de carbono ($n = 61$), contendo todas as determinações efetuadas.

mosfera em ambientes naturais de regiões de clima tropical e temperado (Livingston *et al.*, 1988; Schmidt *et al.*, 1988; de Mello, 1992).

DISCUSSÃO

A grande variabilidade espacial nos fluxos de N_2O e CO_2 , verificada nos solos da Floresta Atlântica, está plenamente de

acordo com outros estudos realizados em solos de florestas tropicais (Keller *et al.*, 1986; Goreau & de Mello, 1987) e de clima temperado (Goreau, 1981; Schmidt *et al.*, 1988; Brumme & Beese, 1992). Os coeficientes de variação (desvio padrão/ média) em torno das médias (por local e data) variaram de 57% a 108% para os fluxos de N_2O e de 20% a 56% para os de CO_2 . Isto sugere que

o número de fatores que exercem influência sobre os processos de produção e emissão desses gases pode ser menor para o CO_2 do que para o N_2O . Outra possibilidade é de que esses processos não respondam igualmente às variações dos fatores comuns sobre eles influentes. Os dados apresentados por Goreau & de Mello (1987) mostraram também que os coeficientes de variação em torno da média de N_2O foram maiores do que os de CO_2 .

Na Tabela 3, os fluxos médios de N_2O e CO_2 , verificados nos solos da Floresta Atlântica, são comparados aos medidos, em diferentes períodos do ano, em solos de terra firme da Floresta Amazônica. Encontram-se, ali, excluídos os dados de fluxo obtidos nos solos encharcados e nos constituídos de areias quartzosas distróficas. Apesar da literatura apresentar um número maior de informações relativo aos fluxos de N_2O do que CO_2 nos solos da Amazônia Central, verifica-se que o fluxo médio de N_2O na Floresta Atlântica situa-se próximo ao limite inferior das médias apresentadas para os solos amazônicos, ao passo que o de CO_2 encontra-se na faixa intermediária entre os valores mínimo e máximo.

Solos de florestas tropicais da Costa Rica e Havaí, possuindo diferentes graus de fertilidade e diferentes altitudes, apresentaram correlação significativa entre taxa de mineralização de N e fluxo de N_2O (Matson & Vitousek, 1987). Os solos mais férteis da Costa Rica apresentaram fluxos mais elevados, com médias na faixa de 16 a 62 $\mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$, ao passo que os solos menos férteis do Havaí mostraram fluxos entre 0 e 2,6 $\mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$. Fluxos de N_2O determinados em

solos da floresta de terra firme na Amazônia central, durante a estação das chuvas (Matson *et al.*, 1990), mostraram, também, dependência da taxa de mineralização de N.

Na Serra da Coroa Grande, o único dos quatro locais estudados em que a amostragem se deu em três diferentes períodos do ano, as médias dos fluxos de N_2O e CO_2 mostraram indícios de variação temporal, apresentando um decréscimo nos fluxos médios na seguinte ordem: dezembro > maio > agosto (Tabela 2). O teste (não-paramétrico) U de Mann-Whitney foi aplicado para mostrar se os conjuntos de dados de fluxo, oriundos de medidas realizadas nos diferentes meses, constituíam ou não a mesma população. Os fluxos dos dias 8 e 10 de dezembro foram reunidos ($n = 15$) para comparação com os dos meses de maio e agosto. No caso do N_2O , foi verificada diferença significativa (i.e., rejeitada a hipótese da nulidade, H_0) somente entre os meses de dezembro e agosto ($p < 0,01$). No caso do CO_2 , os fluxos foram considerados significativamente diferentes entre os meses de dezembro e maio ($p < 0,01$) e entre maio e agosto ($p < 0,001$). Ainda dentro da análise da variação temporal, vale ressaltar que a comparação entre os dados relativos aos dias 8 e 10 de dezembro não permitiu a rejeição de H_0 para N_2O , mas sim para CO_2 ($p < 0,05$). A temperatura e umidade do solo são fatores relevantes no controle da taxa de decomposição da matéria orgânica do solo (Bouwman *et al.*, 1993), podendo, por essa razão, ser considerados potencialmente responsáveis pelas variações sazonais dos fluxos de N_2O e CO_2 na Serra da Coroa Grande.

No caso da Serra da Coroa Grande, a variabilidade sazonal da temperatura na superfície do solo (1-2 cm) foi de $4^\circ C$, que representa a diferença entre as temperaturas médias verificadas nos meses de dezembro e agosto (Tabela 2). Embora a umidade do solo não tenha sido medida quando da determinação dos fluxos dos gases, é de se esperar que hajam variações sazonais, uma vez que o regime pluviométrico nas proximidades da Serra da Coroa Grande difere de forma significativa entre verão e inverno. Registros da estação meteorológica Fazenda Lapa (Município de Mangaratiba) mostram que as precipitações médias nos meses de dezembro, maio e agosto (meses das determinações das emissões de N_2O e CO_2) são, respectivamente, 310, 104 e 84 mm (período 1931-1975) (FIDERJ, 1978). Na Amazônia, Luizão *et al.* (1989) não encontraram variação sazonal significativa nos fluxos de N_2O em solo de floresta, muito embora os fluxos médios tenham variado de 15 a $35 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$. Em contraste, esses mesmos autores mostraram que, em pastagem, os fluxos chegaram a atingir valores superiores a $100 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$, no período das chuvas. Nos solos de florestas localizadas nas regiões de clima temperado, os maiores fluxos de N_2O tendem a ocorrer no outono, período em que se dá a queda das folhas, e no início da primavera, possivelmente devido à decomposição da folhagem acumulada na superfície do solo (preservada durante o inverno), o que contribui para o aumento da mineralização do N e conseqüente aumento dos fluxos de N_2O (Goreau, 1981; Schmidt *et al.*, 1988). Nas regiões de clima temperado, os solos apre-

sentam umidade elevada no início da primavera, devido ao degelo da neve acumulada durante o inverno. Se a umidade do solo é uma variável importante no controle do fluxo de N_2O , a variação pluviométrica sazonal pode, pelo menos em parte, explicar a variação sazonal das emissões de N_2O observada nos solos da Floresta Atlântica. Nesse caso, a altitude teria, também, poder de influência, já que fatores associados ao relevo são determinantes na ocorrência das chuvas orográficas.

Uma comparação entre os fluxos médios de N_2O e CO_2 medidos no mesmo período do ano (agosto) (Tabela 2), que inclui os locais de amostragem da Serra da Coroa Grande, Maciço da Tijuca e Serra dos Órgãos, sugere a ocorrência de uma variação espacial que, aparentemente, parece ser mais expressiva para o caso do N_2O do que para o do CO_2 . As medianas dos fluxos de N_2O e CO_2 mostraram, respectivamente, as seguintes seqüências: Maciço da Tijuca > Serra dos Órgãos > Serra da Coroa Grande e Maciço da Tijuca ~ Serra da Coroa Grande > Serra dos Órgãos. Quando comparadas as médias aritméticas, a seqüência para N_2O permanece igual à descrita, porém, para CO_2 , os fluxos tornam-se semelhantes nos 3 locais. A aplicação do teste U de Mann-Whitney indicou diferença significativa somente entre os fluxos de N_2O do Maciço da Tijuca e Serra da Coroa Grande ($p < 0,01$), ao passo que, para o caso dos fluxos de CO_2 medidos nos 3 locais, o teste não proporciona evidência que justifique a rejeição de H_0 .

Apesar do fluxo médio de N_2O no Maciço da Tijuca ter sido superior ao da Serra da Coroa Grande, a diferença po-

Tabela 3 - Comparação de fluxos de N_2O ($\mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$) e CO_2 ($mg C-CO_2 m^{-2} h^{-1}$) em solos de remanescentes da Floresta Atlântica (Estado do Rio de Janeiro) e de florestas tropicais da bacia Amazônica (somente áreas de terra firme).

Local	N_2O	n	CO_2	n	mês/ano	Referência
Floresta Atlântica	11,4	63	153	63	Dez 86-Ago 87	Este estudo
Amazônia						
Floresta primária ⁽¹⁾	43,5	11	nd	-	Abr 83	Keller et al., 1983
Amazônia						
Floresta primária ⁽²⁾	13,1	6	112	7	Dez 83	Keller et al., 1986
Floresta primária ⁽²⁾	31,0	9	138	9	Mar 84	Keller et al., 1986
Amazônia						
Floresta primária ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾	18,8	36	193	36	Jul-Ago 84	Goreau & de Mello, 1987
Floresta secundária ⁽⁵⁾	24,3	36	110	36	Jul-Ago 84	Goreau & de Mello, 1987
Amazônia						
Floresta primária ⁽⁴⁾	nd	-	176	36	Jul 85	Wofsy et al., 1988
Amazônia						
Floresta primária ⁽⁴⁾	11,0	?	nd	-	Ago 85	Livingston et al., 1988
Amazônia						
Floresta secundária ⁽⁴⁾	23,1	16	204	16	Jul-Ago 85	Keller et al., 1988
Amazônia						
Floresta primária ⁽⁶⁾	15-35	88	nd	-	Abr 87-Abr	Luizão et al., 1989
Amazônia						
Floresta primária ⁽⁴⁾⁽⁷⁾	19	80	nd	-	Abr 86-Mai 87	Matson et al., 1990

- (1) Reserva da Bacia Modelo do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA).
 (2) Fazenda Porto Alegre (km 75 da rodovia Manaus-Boavista, BR-174) - área de desenvolvimento do projeto *Biological Dynamics of Forest Fragments* (World Wildlife Fund e INPA).
 (3) Fazenda Esteio (situada na ZF-3) - área de desenvolvimento do projeto *Biological Dynamics of Forest Fragments* (World Wildlife Fund e INPA).
 (4) Reserva Florestal Ducke (km 26 da rodovia Manaus-Itacoatiara) do Instituto de Pesquisa da Amazônia (INPA).
 (5) Reserva florestal na sede do INPA em Manaus.
 (6) Fazenda próxima ao km 38 da rodovia Manaus-Boavista (BR-174).
 (7) Reservas florestais da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), ZF-1, Carapanã e Fundação de Apoio Distrito Agropecuário (FUCADA).

deria ter sido ainda maior se não fosse a diferença de temperatura dos solos destas localidades na ocasião das medidas, i.e., média de 13,5°C, no Maciço da Tijuca e 20,0°C, na Serra da Coroa Grande. A disponibilidade de N aos microorganismos produtores do N_2O é um fator determinante no controle da taxa de produção do N_2O (Matson & Vitousek, 1987; Matson *et al.*, 1990; Hutchinson & Davidson, 1993). Observações feitas em florestas temperadas sujeitas à influência da atividade antrópica têm mostra-

do que o aumento da deposição atmosférica de N (sob a forma de NH_4^+ e NO_3^-) pode induzir um estado de incapacidade de assimilação de N pela vegetação e, em consequência disso, o aumento da produção e lixiviação de NO_3^- para os lençóis freáticos e emissão de N_2O para a atmosfera (Aber *et al.*, 1989; Bowden *et al.*, 1991). Brumme & Beese (1992) encontraram um fluxo médio de 64 $\mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$ em solos de uma floresta decídua em Solling, Alemanha, considerado elevado para a região. Tal

fluxo foi atribuído à saturação em N do sistema, em decorrência de um elevado índice de deposição atmosférica deste elemento ao longo de vários anos, que, investigada desde 1969, tem sido da ordem de 35 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ (400 $\mu g N m^{-2} h^{-1}$). De acordo com Brumme & Beese, o balanço de massa mostra que cerca de 16% do N depositado pela atmosfera retorna como N_2O , 14% deixa o sistema por lixiviação através do solo e o restante (70%) é estocado na vegetação, na matéria orgânica do solo ou é

perdido como N_2 . Na Serra da Coroa Grande, o fluxo médio de N_2O , calculado a partir da combinação dos resultados das 4 campanhas realizadas, foi de $10,6 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, o que representa cerca de 18% da taxa de deposição atmosférica de N (NH_4^+ e NO_3^-) no local, monitorada no período de março de 1988 a março de 1989 (de Mello, 1993).

No Maciço da Tijuca, a queda anual de serrapilheira foi estimada em $6,9 \times 10^6 \text{ g ha}^{-1}$ (Oliveira, 1987), o que representa, em termos de transferência de carbono (~50% da matéria orgânica) da copa da floresta para a superfície do solo, uma taxa de $39,4 \text{ mg-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Este valor equivale a 56% da emissão de CO_2 medida no solo do Maciço da Tijuca. Nesse caso, admite-se que os outros 44% do CO_2 emitido do solo provêm da respiração de raízes e da atividade de microorganismos associados às mesmas (e.g., bactérias e fungos). Estudos realizados na Amazônia têm mostrado a existência de outras fontes de emissão de CO_2 da superfície do solo, além da decomposição da matéria orgânica oriunda das partes aéreas das plantas, e que chegam a contribuir com 70-80% do fluxo to-

tal de CO_2 do solo (Medina *et al.*, 1980; Goreau & de Mello, 1985; Wofsy *et al.*, 1988). Na Amazônia central, Goreau & de Mello (1987) realizaram medidas de fluxos de CO_2 no solo de uma floresta intacta e, progressivamente, durante 4 semanas após sua remoção. O resultado foi uma queda gradativa do fluxo de CO_2 na superfície do solo, mostrando que, 35 dias após a remoção da floresta, a perda foi de, aproximadamente, 2/3 do fluxo original (Goreau & de Mello, 1988). O baixo fluxo de CO_2 medido no Maciço da Tijuca, durante o mês de agosto, pode ser atribuído ao período do ano em que foi realizado, quando as condições do solo tendem a ser de pouca umidade e baixa temperatura. Portanto, o valor estimado de 44% do fluxo de CO_2 , atribuído a outras fontes, além da decomposição da serrapilheira, deve crescer, se for utilizada a média anual das emissões de CO_2 .

CONCLUSÕES

Os fluxos de N_2O e CO_2 em solos de remanescentes da Floresta Atlântica variaram de $<0,3$ a $56,1 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e 34 a $642 \text{ mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, e apre-

sentaram, respectivamente, as seguintes médias aritméticas e medianas: 11,4 e 8,7 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e 153 e 123 $\text{mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. O fluxo médio de N_2O na Floresta Atlântica situa-se próximo ao limite inferior das médias apresentadas para solos de floresta da Amazônia Central (Tabela 3), ao passo que o de CO_2 encontra-se na faixa intermediária entre os valores mínimo e máximo apontados pela literatura. Entretanto, vale considerar que do total das 63 medidas de fluxo, realizadas nos solos de remanescentes da Floresta Atlântica, 41% delas ocorreram no período de inverno. Do restante das determinações de fluxo, 24% foram realizadas no período das chuvas (início de verão) e 35% em período intermediário (outono). Os fluxos apresentaram variações temporais e espaciais, sendo que as primeiras foram consideradas, através da aplicação do teste não-paramétrico U de Mann-Whitney, estatisticamente mais significativas que as últimas. Os resultados sugerem que, dos dois fatores associados às condições climáticas da região, a pluviosidade deve exercer maior influência no controle das variabilidades sazonais dos fluxos de N_2O e CO_2 do que a temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABER, J.D.; NADELHOFFER, K.J.; STEUDLER, P.A.; MELILLO, J.M. (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, **39**:378-386.
- BAKWIN, P.S.; WOFSEY, S.C.; FAN, S.-M.; KELLER, M.; TRUMBORE, S.E.; COSTA, J.M. D.A. (1990) Emission of nitric oxide (NO) from tropical forest soils and exchange of NO between the forest canopy and atmospheric boundary layer. *J. Geophys. Res.*, **95**:16755-16764.
- BOWDEN, R.D.; MELILLO, J.M.; STEUDLER, P.A.; ABER, J.D. (1991) Effects of nitrogen additions on annual nitrous oxide fluxes from temperate forest soils in the northeastern United States. *J. Geophys. Res.*, **96**:9321-9328.
- BOUWMAN, A.F.; FUNG, I.; MATTHEWS, E.; JOHN, J. (1993) Global analysis of the potential for N_2O production in natural soils. *Global Biogeochem. Cycles*, **7**:557-597.
- BRUMME, R.; BEESE, F. (1992) Effects of liming and nitrogen fertilization on emissions of CO_2 and N_2O from a temperate forest. *J. Geophys. Res.*, **97**:12851-12858.

- DE MELLO, W.Z. (1992) Factors controlling fluxes of volatile sulfur compounds in *Sphagnum* peatlands. PhD Thesis, University of New Hampshire, Durham, Estados Unidos, 166p.
- DE MELLO, W.Z. (1993) Elemental input-output mass budgets in the Itinguassú river watershed, RJ. *In: Int. Symp. Perspectives for Environmental Geochemistry in Tropical Countries*, Niterói, RJ. Extended Abstracts, p.165-169.
- FIDERJ - Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Rio de Janeiro (1978) Indicadores climatológicos do Estado do Rio de Janeiro. Sistema de Informações para o Planejamento Estadual (SIPE). Rio de Janeiro, 156p.
- FRIEDLI, H.; LÖTSCHER, H.; OESCHGER, H.; SIEGENTHALER, U.; STAUFFER, B. (1986) Ice core record of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature*, **324**:237-238.
- GOREAU, T.J. (1981) Biogeochemistry of nitrous oxide. PhD Thesis, Harvard University, Cambridge, Estados Unidos, 145p.
- GOREAU, T.J. & DE MELLO, W.Z. (1987) Effects of deforestation on sources and sinks of atmospheric carbon dioxide, nitrous oxide, and methane from central Amazonian soils and biota during the dry season: preliminary study. *In: D. Athie; T.E. Lovejoy; P. de M. Oyens (Eds.) Proceedings of the Workshop on Biogeochemistry of Tropical Rain Forests: Problems for Research*, Piracicaba, CENA & WWF, p.51-66.
- GOREAU, T.J. & DE MELLO, W.Z. (1988) Tropical deforestation: some effects on atmospheric chemistry. *Ambio*, **17**:275-281.
- GOREAU, T.J.; KAPLAN, W.A.; WOFSEY, S.C.; McELROY, M.B.; VALOIS, F.W.; WATSON, S.W. (1980) Production of NO_2^- and N_2O by nitrifying bacteria at reduced concentrations of oxygen. *Appl. Environ. Microbiol.*, **40**:526-532.
- HUTCHINSON, G.L. & DAVIDSON, E.A. (1993) Processes for production and consumption of gaseous nitrogen oxides in soil. *In: Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change*. Madison, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America & Soil Science Society of America, p.79-93.
- KAPLAN, W.A.; WOFSEY, S.C.; KELLER, M.; COSTA, J.M. da (1988) Emission of NO and deposition of O_3 in a tropical forest system. *J. Geophys. Res.*, **93**:1389-1395.
- KELLER, M.; GOREAU, T.J.; WOFSEY, S.C.; KAPLAN, W.A.; McELROY, M.B. (1983) Production of nitrous oxide and consumption of methane by forest soils. *Geophys. Res. Lett.*, **10**:1156-1159.
- KELLER, M.; KAPLAN, W.A.; WOFSEY, S.C. (1986) Emissions of N_2O , CH_4 and CO_2 from tropical soils. *J. Geophys. Res.*, **91**:11791-11802.
- KELLER, M.; KAPLAN, W.A.; WOFSEY, S.C.; DA COSTA, J.M. (1988) Emissions of N_2O from tropical forest soils: response to fertilization with NH_4^+ , NO_3^- and PO_4^{3-} . *J. Geophys. Res.*, **93**:1600-1604.
- KHALIL, M.A.K. & RASMUSSEN, R.A. (1992) The global sources of nitrous oxide. *J. Geophys. Res.*, **97**:14651-14660.
- LIVINGSTON, G.P.; VITOUSEK, P.M.; MATSON, P.A. (1988) Nitrous oxide flux and nitrogen transformations across a landscape gradient in Amazonia. *J. Geophys. Res.*, **93**:1593-1599.
- LUIZÃO, F.; MATSON, P.; LIVINGSTON, G.; LUIZÃO, R.; VITOUSEK, P. (1989) Nitrous oxide flux following tropical land clearing. *Global Biogeochem. Cycles*, **3**:281-285.
- MATSON, P.A. & VITOUSEK, P.M. (1987) Cross-system comparisons of soil nitrogen transformations and nitrous oxide flux in tropical forest ecosystems. *Global Biogeochem. Cycles*, **1**:163-170.
- MATSON, P.A.; VITOUSEK, P.M.; LIVINGSTON, G.P.; SWANBERG, N.A. (1990) Sources of variation in nitrous oxide flux from Amazonian ecosystems. *J. Geophys. Res.*, **95**:16789-16798.
- MEDINA, E.; KLINGE, H.; JORDAN, C.; HERRERA, R. (1980) Soil respiration in Amazonian rain forests in the Rio Negro Basin. *Flora*, **170**:240-250.
- NEFTEL, A.; MOOR, E.; OESCHGER, H.; STAUFFER, B. (1985) Evidence from polar ice cores for the increase of atmospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature*, **315**:45-47.
- OLIVEIRA, R.R. (1987) Produção e decomposição da serrapilheira no Parque Nacional da Tijuca - Rio. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, 107p.
- RODHE, H. (1990) A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science*, **248**:1217-1219.

- SCHMIDT, J.; SEILER, W.; CONRAD, R. (1988) Emission of nitrous oxide from temperate forest soils into the atmosphere. *J. Atmos. Chem.*, **6**:95-115.
- VITOUSEK, P.M. (1984) Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology*, **65**: 285-298.
- WOFSY, S.C.; HARRISS, R.C.; KAPLAN, W.A. (1988) Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon basin. *J. Geophys. Res.*, **93**:1377-1387.