

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DO PARÁ

**EFEITO DA EXCLUSÃO DA CHUVA NO FLUXO DOS GASES
TRAÇADORES EM SOLO DE FLORESTA PRIMÁRIA DE TERRA
FIRME NO LESTE AMAZÔNICO.**

JOSÉ HENRIQUE CATTÂNIO
Eng. Florestal

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias do Pará, como
parte das exigências do Curso de
Ciências Florestais para obtenção do
título de "**Mestre**"

Prof. Dr. Daniel C. Nepstad
Orientador

Belém-Pará
1996

JOSÉ HENRIQUE CATTÂNIO

**EFEITO DA EXCLUSÃO DA CHUVA NO FLUXO DOS GASES TRAÇADORES
EM SOLO DE FLORESTA PRIMÁRIA DE TERRA FIRME NO LESTE
AMAZÔNICO..**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, como parte das exigências do Curso de Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Florestal, para obtenção do título de "**Mestre**".

APROVADO em de 22 de Outubro de 1996.

Comissão Examinadora:

Dr. Daniel Curtis Nepstad (WHRC-EUA)
(orientador)

Dr. Louis Verchot (WHRC-EUA)

Dr. Eduardo Jorge Maklouf Carvalho (EMBRAPA/CPATU)

Dra. Tatiana Deane de Abreu Sá (EMBRAPA/CPATU)

AGRADECIMENTOS

- À meus PAIS e FAMILIARES pelo grande incentivo de começar;
- Nos primeiros momentos de minha vida acadêmica, período em que iniciei minha vida científica, foi importante o apoio e auxílio do Prof. Dr. FÁBIO POGGIANI (meu primeiro orientador) e o Prof. Dr. PAULO KAGEYAMA, os quais me incentivaram à vir para a Amazônia;
- Em Belém ao meu amigo CRISOMAR LOBATO, que me recebeu muito bem, e ao amigo Dr. ANTHONY B. ANDERSON, o qual me deu a primeira oportunidade de trabalhar e me ensinou, com muita paciência, os primeiros passos para elaborar um trabalho de pesquisa e executá-lo. À EDWIRGES, LÚCIA, ANDRÉA, JOVITA, SUELY, SCOTT, THEO, MÁRIO, TÂNIA, OSCAR, ORIVALDO, DIDITO, NAZARÉ, NENEM E AMÉLIA, pessoas amigas que de uma forma ou de outra me auxiliaram muito nos primeiros trabalhos científicos;
- Ao meu orientador Dr. DANIEL C. NEPSTAD que em muito me auxiliou na idealização deste trabalho e abriu as portas do WOODS HOLE RESEARCH CENTER (WHRC) e do INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA (IPAM) para que pudesse desenvolver esta Tese. Ao meu Co-orientador, Dr. ERIC DAVIDSON (WHRC), o qual me ensinou muito na análise de meus resultados, e pelo seu importante apoio

moral, me incentivando a continuar e, principalmente pelo apoio logístico dentro de seu projeto de estudo de gases, financiado pelo National Science Foundation (NSF-EUA). Ao Dr. LOU VERCHOT pelo auxílio na análise estatística, coleta de dados e incentivo. A ILSE ARCKEMAN pelo auxílio na coleta de dados e incentivo;

- A FUNDAÇÃO COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE ENSINO SUPERIOR - CAPES, pela bolsa de estudo;
- Ao NEGO, BATI, AURÉLIO, TUCURA, GURI, BUIÃO, RALADO, JOÃO, GILMAR, ADILSON E JUBILEU, pessoal de campo do IPAM/WHRC, que com muito carinho e competência me auxiliaram nos trabalhos práticos de montagem do experimento e coleta de dados. Aos demais Assistentes de Pesquisa do IPAM, como também à Administração, que incentivaram e me agüentaram durante esta difícil etapa;
- Ao importante incentivo e apoio da minha companheira GISELLE, que em todos os momentos desta difícil barreira de escrever uma Tese de Mestrado, me tratou com muito carinho, afeto, estímulo e soube levantar meu astral sempre que necessitei. Também a minhas filhas MARIANA e YASMIM, pequenas criaturas, que sem saber, com seu sorriso lindo me auxiliam a superar a tristeza dos momentos difíceis. É a estas três lindas pessoas que DEUS colocou em minha vida que eu dedico este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE ANEXOS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1 - INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1. Apresentação do Problema	17
1.2. Dióxido de Carbono	19
1.3. Óxido Nítrico e Óxido Nitroso	20
1.4. Metano	23
1.5. Objetivos do Trabalho e Resultados Esperados	24
2. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
2.1. Município de Paragominas	26
2.2. Fazenda Vitória	26
3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	28
3.1. Clima	28
3.2. Geologia e Solos	30
3.3. Vegetação	30
4. FLUXO DE DIÓXIDO DE CARBONO	32
4.1. Introdução	32
4.2 Material e Métodos	35

4.2.1. Delineamento descritivo	35
4.2.2. Fluxo de CO ₂	37
4.2.3. Delineamento em blocos	38
4.2.4. Análise estatística	39
4.3. Resultados e Discussão	41
4.3.1. Pluviosidade	41
4.3.2. Delineamento descritivo	41
4.3.2.1. Umidade do solo	42
4.3.2.2. Biomassa de raízes	44
4.3.2.3. Fluxo de CO ₂	49
4.3.3. Delineamento em blocos	52
4.3.3.1. Umidade do solo	52
4.3.3.2. Fluxo de CO ₂	53
5. FLUXO DE ÓXIDO NITROSO E ÓXIDO NÍTRICO	59
5.1. Introdução	59
5.2. Material e Métodos	65
5.2.1. Fluxo de NO e N ₂ O	65
5.3. Resultados e Discussão	67
5.3.1. Delineamento descritivo	67
5.3.1.1. Fluxo de NO	67
5.3.1.2. Fluxo de N ₂ O	69
5.3.1.3. Relação entre fluxo de NO e N ₂ O	72
5.3.2. Delineamento em blocos	74
5.3.2.1. Fluxo de NO	74
5.3.2.2. Fluxo de N ₂ O	77
5.3.2.3. Relação entre fluxo de NO e N ₂ O	80
6. FLUXO DE METANO	82
6.1. Introdução	82
6.2. Material e Métodos	85
6.3. Resultados e Discussão	85
6.3.1. Delineamento descritivo	85
6.3.1.1. Fluxo de CH ₄	85
6.3.2. Delineamento em blocos	88
6.3.2.1. Fluxo de CH ₄	88
7. CONCLUSÃO	92
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
9. ANEXOS	101

LISTA DE Tabela

Tabela 1 - Potencial para aquecimento global de alguns gases traçadores	19
Tabela 2 - Orçamento global de óxido nitroso (N_2O)	21
Tabela 3 - Orçamento global de óxido nítrico (NO)	22
Tabela 4 - Identificação das fontes e potencial anual para produção de metano	24
Tabela 5 - ANOVA para análise univariada de parcelas divididas	39
Tabela 6 - Peso de raízes finas e grossas em várias profundidades, dentro dos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha	45
Tabela 7 - Conteúdo de água volumétrico e umidade do solo na superfície dentro e fora dos tratamentos de umidade	53
Tabela 8 - Fluxo de CO_2 do solo nas unidades experimentais com e sem liteira, dentro dos tratamentos de umidade	54
Tabela 9 - Fluxo de NO do solo nas unidades experimentais com e sem liteira, dentro dos tratamentos de umidade	75
Tabela 10 - Fluxo de N_2O do solo nas unidades experimentais com e sem liteira, dentro dos tratamentos de umidade	78
Tabela 11 - Relação NO: N_2O do fluxo do solo nas unidades experimentais com e sem liteira, dentro dos tratamentos de umidade	80
Tabela 12 - Fluxo de CH_4 do solo nas unidades experimentais com e sem liteira, dentro dos tratamentos de umidade	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização geográfica do Município de Paragominas (seta indicando <i>Fazenda Vitória</i> , onde o estudo foi conduzido) (Nepstad et al. 1991)	27
Figura 2 - Tipos de floresta em relação as estações secas da floresta Amazônica Brasileira (Nepstad et al. 1994)	29
Figura 3 - Média mensal da precipitação e throughfall durante o ano de 1995 na fazenda Vitória (Paragominas-Pa.)	42
Figura 4 - Conteúdo de umidade volumétrica média (com erro padrão) do solo em várias profundidades, no tratamento de exclusão da chuva e testemunha, durante 4 meses do período sazonal seco de 1995 (Paragominas-Pa.)	43
Figura 5 - Densidade de raízes grossas e raízes finas, dividida em mortas e vivas, em varias profundidades no tratamento de exclusão da chuva e testemunha, em floresta primária (Paragominas-Pa.)	46
Figura 6 - Crescimento de raízes em solo de floresta primária, em duas profundidades, no tratamento de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.)	48
Figura 7 - Fluxo de superficial de CO ₂ do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.)	50
Figura 8 - Concentração de CO ₂ no perfil do solo de uma floresta primária, no período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.)	51

Figura 9 - Fluxo de superficial de CO ₂ do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), submetido à tratamento de 100% da precipitação (<i>Tratamento 1</i>), 50% da precipitação (<i>Tratamento 2</i>) e 0% da precipitação (<i>Tratamento 3</i>), em unidades experimentais com liteira e sem liteira (Paragominas-Pa.)	55
Figura 10 - Processos biológicos e abióticos da produção e consumo de NO e N ₂ O (Davidson e Schimel 1995)	61
Figura 11 - Três níveis de regulação do fluxo de NO e N ₂ O: (i) a razão de nitrificação e denitrificação; (ii) a razão do produto final; e (iii) difusão e consumo dos gases de N antes de sair do solo para a atmosfera	64
Figura 12 - Fluxo de superficial de NO do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.)	68
Figura 13 - Fluxo de superficial de N ₂ O do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.)	70
Figura 14 - Concentração de N ₂ O no perfil do solo de uma floresta primária, no período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.)	72
Figura 15 - Relação NO:N ₂ O do fluxo superficial do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.)	73
Figura 16 - Fluxo de superficial de NO do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), submetido à tratamento de 100% da precipitação (<i>Tratamento 1</i>), 50% da precipitação (<i>Tratamento 2</i>) e 0% da precipitação (<i>Tratamento 3</i>), em unidades experimentais com liteira e sem liteira (Paragominas-Pa.)	76
Figura 17 - Fluxo de superficial de N ₂ O do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), submetido à tratamento de 100% da precipitação (<i>Tratamento 1</i>), 50% da precipitação (<i>Tratamento 2</i>) e 0% da precipitação (<i>Tratamento 3</i>), em unidades experimentais com liteira e sem liteira (Paragominas-Pa.)	79
Figura 18 - Fluxo de superficial de CH ₄ do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.)	86
Figura 19 - Concentração de CH ₄ no perfil do solo de uma floresta primária, no período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.)	87

Figura 20 - Fluxo de superficial de CH ₄ do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), submetido à tratamento de 100% da precipitação (<i>Tratamento 1</i>), 50% da precipitação (<i>Tratamento 2</i>) e 0% da precipitação (<i>Tratamento 3</i>), em unidades experimentais com liteira e sem liteira (Paragominas-Pa.)	89
--	----

LISTA DE ANEXOS

Anexo 9.1 - Conteúdo de água volumétrica (CAV) em relação a profundidade dentro dos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha	101
Anexo 9.2 - Fluxo de CO ₂ do solo, nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha, e a precipitação mensal	102
Anexo 9.3 - Análise "Split-unit" para o Fluxo de CO ₂	103
9.3.1. Com liteira	
9.3.2. Sem liteira	
Anexo 9.4 - Fluxo de NO do solo, nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha, e a precipitação mensal	104
Anexo 9.5 - Análise "Split-unit" para o Fluxo de NO	105
9.5.1. Com liteira	
9.5.2. Sem liteira	
Anexo 9.6 - Fluxo de N ₂ O do solo, nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha, e a precipitação mensal	106
Anexo 9.7 - Análise "Split-unit" para o Fluxo de N ₂ O	107
9.7.1. Com liteira	
9.7.2. Sem liteira	
Anexo 9.8 - Relação NO:N ₂ O do fluxo do solo nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha, e a precipitação mensal	108
Anexo 9.9 - Fluxo de CH ₄ do solo, nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha, e a precipitação mensal	109
Anexo 9.10 - Análise "Split-unit" para o Fluxo de CH ₄	110
9.10.1. Com liteira	
9.10.2. Sem liteira	

RESUMO

CATTANIO, JOSÉ HENRIQUE Efeito da exclusão da chuva no fluxo dos gases traçadores em solo de floresta primária de terra firme no leste amazônico.

Modelos de circulação geral (General Circulation Model's - GCM's) prevêem para estas próximas décadas um aumento global na concentração dos gases do efeito estufa (gases traçadores) e uma elevação da temperatura (entre 1,5 a 4,5 °C), com uma provável diminuição das chuvas nos ecossistemas Amazônicos. Levando-se em consideração esta tendência, este trabalho tem como objetivo principal tentar responder o quanto a produção dos gases traçadores (CO₂, NO, N₂O e CH₄), proveniente do solo, é alterada em tratamentos de restrição de água dentro de um ecossistema de floresta primária de terra firme na Amazônia. Usamos tratamentos de restrição da entrada de água da chuva com objetivo de aumentar o déficit hídrico no solo durante o período de menor precipitação. Nossa hipótese é que o aumento do déficit hídrico no solo provocará: h₁) uma menor atividade microbiana e menor decomposição de matéria orgânica, em conjunto com uma queda no metabolismo radicular, provocando um menor

crescimento das raízes e conseqüentemente uma queda na produção total de CO_2 ; h₂) aumento da concentração de nitrogênio mineralizado no solo (NH_4^+) e com isto esperamos um aumento nos fluxos de NO e N_2O ; h₃) aumento da aeração do solo e conseqüentemente um aumento na oxidação do CH_4 no sistema atmosfera-solo. Para testar estas hipóteses foi utilizada duas análise estatística, primeiramente uma análise descritiva entre uma parcela (10x10 m) que vem recebendo tratamento de restrição da entrada da água de chuva à 4 anos comparada à uma testemunha (delineamento descritivo); como também foi feita uma análise estatística em blocos (delineamento em blocos), com 3 tratamentos (2x2m) de umidade (100, 50 e 0% da água da chuva) em uma floresta primária no município de Paragominas (2°59'S, 47°31'W), estado do Pará. A umidade do solo foi medida através gavimetria e de sensores de *time domain reflectometry* (TDR). As medidas mensais do fluxo dos gases do solo foram feitas em câmaras estáticas de solo. O CO_2 e o NO foram medidos com aparelhos no campo (analisador de gases infravermelho-LiCor e detector de NO_2 -Scintrex, respectivamente) e para o N_2O e CH_4 foram coletadas amostras em seringas no campo e injetadas e laboratório em cromatógrafos (com detector de captura de elétrons e com detector de ionização por chama, respectivamente). Os resultados revelarão um aumento na biomassa de raízes mortas, diminuição no crescimento das raízes e diminuição no fluxo de CO_2 do solo. Também encontramos aumento no fluxo de NO e N_2O e uma inesperada diminuição na oxidação do CH_4 atmosférico pelos organismos do solo. Através destas evidências, podemos sugerir que a diminuição da umidade do solo nas florestas primárias semelhantes à de Paragominas, pode influenciar no clima regional, e, principalmente, nas mudanças globais do clima, com possível intensificação do "efeito estufa".

ABSTRACT

Rain exclusion and trace gases flux from soil of primary forest in upland on western amazon

General Circulation Model's (GCM's) predict for the next decade an increase in global concentration of "greenhouse gases" and an increase in temperature (between 1.5 to 4.5 °C), with a probable decrease of the rain in the Amazon ecosystem. Concerning this prediction the primary objective of this study is to answer how much the soil contributes to the production of trace gas (CO_2 , NO, N_2O , and CH_4) under stress conditions in primary forest on Amazon upland ecosystem. It was used treatments of rain exclusion in order to increase the hydric deficit in the soil during the dry season. The hypothesis is that an increase in hydric deficit in the soil will cause: a) a decrease of microbial activity and the organic matter decomposition, together with a decrease of root metabolism, causing a decrease in root growth and CO_2 production; b) an increase in nitrogen mineral concentration in the soil (NH_4^+) and NO and N_2O flux; c) an increase of aeration in the soil and atmospheric CH_4 oxidation. In order to check these hypothesis, it was used two statistical analyses, one a descriptive analysis between one plot (10 x 10 m) of rain exclusion during three years and standard (descriptive design); as well

as were to make on a univariate split-unit analysis (block design) with three moisture treatments (100, 50, and 0% of rain) on a primary forest in Paragominas (2° 59' and 47° 31') state of Pará. The soil moisture was measured through of time domain reflectometry and gravimetric water content, and the monthly measure of gas flux from the soil had to do in static chambers of soil. The CO₂ and NO was measured in the field with portable instruments (LiCor infrared gas analyser and NO_x detector); and the N₂O and CH₄ was sampled by syringes from field and were analysed by gas chromatography in laboratory. The results have show an increase of the dead roots biomass, decrease growth of root and decrease on CO₂ flux from the soil. It was founded an increase in the NO and N₂O flux from the soil and an unexpected decrease of atmospheric CH₄ oxidation for the soil organism. The data presented here is indicate that if soil moisture in primary forest such as Paragominas, the dynamic of trace gases may have an influence in the change of climate and global, causing an intensification of greenhouse effect.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Apresentação do Problema

Atualmente uma das grandes preocupações da humanidade é o progressivo aumento do efeito estufa. Este fenômeno ocorre naturalmente pela interação entre seres vivos, oceanos e atmosfera, provocando uma estabilidade no clima e no aquecimento da terra (KHALIL, 1995). A radiação solar ao chegar no topo da atmosfera cheia de energia, não é prontamente absorvida pela maioria dos gases atmosféricos, exceto pelo ozônio na estratosfera e alguma quantidade pelo O_2 , H_2O e aerossóis (num total de 20%). Do restante que penetra na atmosfera, aproximadamente, um terço é refletida, principalmente pelas nuvens e pela superfície terrestre, e o que sobra de energia é absorvida pela terra (KHALIL, 1995). Para que a terra tenha uma temperatura constante, ela tem que irradiar a mesma quantidade de energia que recebe ou de outra forma ficaria progressivamente fria ou quente.

A energia irradiada da terra de volta para o espaço está numa frequência (infravermelho) muito menor daquela recebida do sol (ultravioleta). Na atmosfera existem alguns constituintes naturais, os quais absorvem uma parte desta radiação, e, recentemente, foram denominados de "gases do efeito estufa"

("greenhouse gases" KHALIL, 1995). Portanto existem importantes ligações entre o ciclo de gases, clima, química da atmosfera e os componentes que constituem o ambiente.

O vapor d'água e o CO_2 são os mais importantes destes gases (DUXBURY et al. 1993, KHALIL 1995, WOODWELL 1995), entretanto, O_3 , CH_4 e N_2O (na troposfera), os quais são de origem biogênica (MACKENZIE 1995), contribuem substancialmente para o efeito estufa (KHALIL 1995). Portanto, após a camada da atmosfera absorver a radiação de calor vinda da terra, esta é metade radiada para fora e outra metade volta para a superfície terrestre (TYLER 1991, DUXBURY et al. 1993, KHALIL 1995). Relativamente ao nitrogênio e oxigênio, os gases do efeito estufa estão presentes na atmosfera em baixa concentração. Este benéfico acréscimo de energia produz aquecimento na superfície terrestre não deixando que ela esfrie (KHALIL 1995).

Cálculos do Centro de Pesquisa de Mudanças Globais mostram que, naturalmente, metade do efeito estufa é devido ao vapor d'água, e se tirássemos todo o CO_2 a média da temperatura seria mais fria em 12°C , e se tirando CH_4 , N_2O e O_3 troposférico a temperatura seria diminuída em 0,7 a 1,3, 0,6 e $0,8^\circ\text{C}$, respectivamente (TYLER 1991, KHALIL 1995). A camada de ozônio da estratosfera causa à superfície da terra um resfriamento por volta de 12°C , porque este absorve a radiação ultravioleta vinda do sol, prevenindo que penetre na atmosfera e chegue à superfície terrestre (KHALIL 1995). Por outro lado, a atividade humana, devido à necessidade de produção de alimentos e uso de energia, está causando um aumento na concentração atmosférica de CO_2 , CH_4 , N_2O e NO (DUXBURY et al. 1993; ADGER e BROWN 1994; KHALIL 1995), além do que, estes gases são emitidos diretamente dentro da atmosfera e possuem, em média, um tempo de vida relativamente longo (KHALIL e RASMUSSEN 1995). É acrescentado a isto a produção industrial dos clorofluorcarbonos (CCl_3 e CCl_2), os quais estão destruindo a camada de ozônio (O_3), aumentando assim a entrada de radiação solar, e absorvendo a radiação vinda da terra nos comprimentos de ondas na faixa do infravermelho (DUXBURY et al. 1993, KHALIL 1995, KHALIL e

RASMUSSEN 1995). Os resultados dos cálculos do “*Global Warning Potential*” (GWP, Potencial para Aquecimento Global), mostram uma importante diferença entre os gases traçadores (Tabela 1) em relação ao potencial de aquecimento e ao tempo de residência na atmosfera (DUXBURY et al. 1993).

Tabela 1. Potencial para aquecimento global (*Global warning potential* - GWP) de alguns gases traçadores.

Gás	Tempo de residência Anos	Capacidade absoluta de absorção [†] massa unitária	GWP relativo [‡]	
			20 anos	500 anos
CO ₂	120 [¶]	1	1	1
CH ₄				
Diretamente [*]	10	58	26	2
Indiretamente			37 ^{¶¶}	7
N ₂ O	150	206	270	190
CCl ₃ F (CFC-11)	60	3970	4500	1500
CCl ₂ F ₂ (CFC-12)	120	5750	7100	4500
CHCl ₂ F ₂ (HCFC-22)	15	5440	4100	510
CHCl ₂ CF ₃ (HCFC-123) [#]	1,6	2860	310	29

Fonte: DUXBURY et al. (1995)

[¶] Foi usado um termo médio entretanto o tempo de vida do CO₂ (50 a 200 anos) dependendo dos diferentes processos envolvidos no consumo do CO₂ atmosférico.

[†] Mudança por unidade de massa da concentração atual.

[‡] Seguindo a adição de 1 kg de cada gás.

^{*} Direto = representa o efeito radiativo direto do CH₄; indireto = representa a participação do CH₄ em processos químicos o quais representam a formação de outra espécie radiativamente ativa.

^{¶¶} Contribuição estimada de 24, 10 e 3 pela geração de O₃ troposférico, H₂O estratosférico e CO₂, respectivamente

[#] Um dos substitutos propostos para CFC.

1.2. Dióxido de Carbono

A concentração de dióxido de carbono atmosférico nos últimos 200 anos tem aumentado de 280 ppmv (partes por milhão de volume) para 350 ppmv (25%) devido, principalmente, a queima de combustíveis fóssil, a qual é estimada

atualmente uma emissão global de 6 Pg ($1\text{Pg} = 10^{15}\text{g}$) de carbono (CO_2) por ano (MARLAND e ROTT 1984, KHALIL 1995, MACKENZIE 1995), e pelo desmatamento e mudanças no uso da terra os quais contribuem por aproximadamente 1 (MACKENZIE 1995) a 2 Pg C ano⁻¹ (HOUGHTON et al. 1987, KHALIL 1995). Entretanto, devido aos solos estocarem 2 a 3 vezes mais carbono do que a atmosfera, mudanças que por ventura vierem a ocorrer na respiração do solo e/ou nos processos microbianos poderão vir a ser uma importante fonte de carbono para a atmosfera (WOODWELL 1989, DAVIDSON e TRUMBORE 1995), intensificando, ainda mais, este desequilíbrio. O tempo de vida do CO_2 na atmosfera é cotado em 50-200 anos (KHALIL 1995). Devido a isto, este gás é de maior significância para aquecimento global no futuro (WOODWELL 1989, DAVIDSON e ACKERMAN 1993, DAVIDSON e TRUMBORE 1995, KHALIL e RASMUSSEN 1995). Contudo, recentemente, GRACE et al. (1995) revelaram que em floresta tropical primária amazônica existe um ganho na aquisição de carbono pela fotossíntese, maior que as perdas pela respiração.

1.3. Óxido Nitroso e Óxido Nítrico

Em cem anos (1888 a 1988) a concentração de N_2O na atmosfera global tem aumentado, aproximadamente, 20 ppbv (parte por bilhão de volume) ou 7%, tendo como fonte principal os solos (Tabela 2). Comparando CO_2 com N_2O molécula por molécula, N_2O , quando se encontra na troposfera, é 200 vezes mais efetivo em causar o aquecimento da terra (KHALIL 1995, KHALIL e RASMUSSEN 1995). Na estratosfera N_2O participa de reações químicas as quais contribuem para a destruição do ozônio (CICERONE 1987, KHALIL 1995). Entretanto, a variação global da fonte e do declínio do N_2O na atmosfera (Tabela 2), não é muito bem conhecidas (DAVIDSON et al. 1991, KHALIL 1995). Isto se deve ao elevado número de processos biológicos e abióticos envolvidos na produção deste gás (DAVIDSON 1992).

Tabela 2. Balanço global do óxido nitroso (N_2O)^{*}.

Declínio e fontes	Balanço de N_2O (Tg ¹ de N_2O-N ano ⁻¹)	
	MCELROY e WOFSY (1986)	Atual
Declínio e acumulação		
Fotólise e reações estratosféricas	10,6	
Acumulação na Atmosfera	3,5	
Total	14 ± 3,5	
Fontes		
Oceano	2	2
Combustão		
Carvão e óleo	4	< 0,1
Biomassa	0,7	0,1-0,3
Solo agrícola fertilizado	0,8	0,5(0,2-2,1)
Pastagens temperadas	0,1	0,1
Floresta boreal e temperada	0,1-0,5	0,3-1,5
Floresta tropical e subtropical		
Florestas e matas	7,4	
Floresta tropical úmida		2,4
Floresta úmida convertida em pastagem		0,7
Floresta tropical seca		1,0
Conversão de floresta seca		?
Total	15,3 ± 6,7	7,9 ± ?

Fonte: DAVIDSON (1991)

Óxido Nitroso (N_2O) é um gás estável do efeito estufa (LASHOF e AHUJA 1990), tendo como processo mais comum para remover o N_2O da atmosfera, é quando este, na estratosfera, reage com átomo excitado de oxigênio proveniente da quebra do átomo de ozônio (KHALIL e RASMUSSEN 1995). Com isto o N_2O tem um tempo efetivo de vida de aproximadamente 100 a 150 anos (KHALIL 1995, KHALIL e RASMUSSEN 1995)

Também os solos parecem ser fonte principal de emissão de NO para a atmosfera (DAVIDSON et al. 1991) entretanto, este gás, como o N_2O , ainda não está bem entendido todos os processos biológicos e abiológicos e as

¹ 1 Tg = 10^{12} g

respectivas interações na sua produção (DAVIDSON 1992), e sobre a influencia da atividade humana em seu ciclo (KHLAIL 1995). Por outro lado, sabe-se que existe expressivas variações na produção deste gás entre períodos secos e chuvosos em ecossistemas naturais (DAVIDSON et al. 1991, DAVIDSON et al. 1993a).

Óxido Nítrico representa uma importante forma de perda do nitrogênio em ecossistemas terrestres. Também é um agravante do efeito estufa pois o aumento na concentração na atmosfera (Tabela 3), o qual participa de varias reações bioquímicas na troposfera (DAVIDSON 1991), como também regula tanto a oxidação de hidrocarbonetos e monóxido de carbono, e com isto representa fonte primária de aumento do ozônio troposférico, intensificando assim o efeito estufa (DAVIDSON et al. 1991, DAVIDSON et al. 1993a, KHALIL 1995). Contudo ainda não está bem caracterizado as fontes de declínio do NO na troposfera (DAVIDSON et al. 1991).

Tabela 3. Balanço global de óxido nítrico (NO)[†].

Declínio e fontes	Balanço de NO (Tg de NO-N ano ⁻¹)
Declínios	
Precipitação	12-42
Deposição seca	12-22
Total	24-64
Fontes	
Queima de combustível fóssil	21 (14-28)
Queima de biomassa	12 (4-24)
Raios	8 (2-20)
Atividade microbiana em solos	15 (10-20) [†]
Oxidação da amônia	1-10
Processos fotolíticos ou biológicos em oceanos	< 1
Entrada na estratosfera	0,5
Total	32-102

Fonte: DAVIDSON (1991).

[†] Davidson comunicação pessoal

1.4. Metano

Recentemente foi descoberto um aumento de 250% na concentração de metano na atmosfera (RASMUSSEM e KHALIL 1981, CICERONE e OREMLAND 1988) e segundo TYLER (1991) a concentração atual é de 1,7 ppmv. O aumento de 1% por ano nesta última década (RASMUSSEM e KHALIL 1981, STEELE et al. 1987, BLAKE e ROWLAND 1988) tem causado expressiva preocupação devido ser o metano 20 vezes mais efetivo em causar aquecimento global, nesta concentração atual, do que CO_2 , mesmo tendo sua molécula em mesma proporção um menor tempo de vida (KHALIL e RASMUSSEM 1995).

O envolvimento químico na atmosfera, inclui sua oxidação na troposfera afetando ozônio, radicais hidroxil e monóxido de carbono (CICERONE e OREMLAND 1988, KHALIL 1995) o qual é convertido em CO_2 (TYLER 1991). Além do que CH_4 tem grande capacidade de absorver a porção infravermelho do espectro eletromagnético. Na estratosfera este é a maior fonte de CH_2O e H_2 e acima da estratosfera contribui para a formação de H_2O (TYLER 1991).

Tem como fonte principal (Tabela 4) os organismos vivos (processos biogênicos) e outros processos (processos abiogênicos). Os processos biogênicos são resultantes de reações bioquímicas envolvendo bactérias durante a decomposição da matéria orgânica (CICERONE e OREMLAND 1988). Entretanto, estas bactérias são estritamente anaeróbicas as quais requerem ambientes reduzidos para crescerem (TYLER 1991), como por exemplo em locais alagados, intestino de animais domésticos (ex. gado) e outros animais (KHALIL e RASMUSSEM 1995). Combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural) são fontes abiogênicas de CH_4 quando provem de reações termocatalíticas. O metano é removido da atmosfera principalmente pela reação

com OH e em pequenas quantidades por solos secos e processos na troposfera e estratosfera (KHALIL 1995).

Tabela 4. Identificação da fontes e potencial anual para produção de metano.

Fontes de CH ₄	Variação numérica (Tg de CH ₄ ano ⁻¹)
Radiocarbono vivo	
Áreas naturalmente alagadas	120-200
Arroz alagado	70-170
Gado	80-100
Termites (cupins)	25-150
Desperdícios sólidos	5-70
Queima de biomassa	10-40
Oceanos	1-20
Tundra	1-15
Subtotal	312-755
Radiocarbono morto	
Mina de carvão	10-35
Perdas naturais	15-30
Perdas industriais	5-25
Perdas de gaseoduto	10-20
Hidrato de metano	2-4
Vulcões	0,5
Automóveis	0,5
Subtotal	43-115
Total	355-870

Fonte: TYLER (1991)

1.5. Objetivos do Trabalho e Resultados Esperados

Cálculos feitos pelos modelos de circulação geral (*General Circulation Models-GCM's*), levando-se em conta que os efeitos antropogênicos no clima podem ser avaliados e projetados, e assumindo apenas que a concentração de CO₂ poderá duplicar no próximo século o GCM's prevê em média um aquecimento global entre 1,5 e 4,5 °C com profundas mudanças na quantidade e distribuição da chuva (BRETHERTON et al. 1990; MITCHELL et al. 1990). Também regionalmente, com uma possível diminuição da

evapotranspiração na floresta Amazônica, através do processo de desmatamento, aumenta a possibilidade de um decréscimo na quantidade de chuva e de uma possível mudança na intensidade e no padrão de distribuição das chuvas nestes ecossistemas (SALATI 1985; NOBRE et al. 1991).

Estudos indicam que no futuro a região Amazônica tenderá a um aumento da temperatura, com sérias mudanças no balanço global de CO_2 (ODUM 1983, MYERS 1989; HOUGHTON et al. 1990; SHUKLA et al. 1990; BROWN e LUGO 1992; FEARNSIDE et al. 1993), e possivelmente de NO, N_2O e CH_4 (DAVIDSON comunicação pessoal). A nível global os ciclos biogeoquímico destes gases e o hidrológico são provavelmente os de maior importância para a humanidade, sendo vulneráveis as perturbações antropogênicas, e por sua vez, podem mudar a temperatura e o clima (ODUM 1983, WOODWELL 1989, DAVIDSON e ACKERMAN 1993, DAVIDSON e TRUMBORE 1995, KHALIL e RASMUSSEN 1995, MACKENZIE 1995, WOODWELL 1995).

Considerando a importância dos gases traçadores (CO_2 , N_2O , NO e CH_4) para as mudanças climáticas globais e levando-se em conta a tendência da diminuição das chuvas e aumento da temperatura na região Amazônica, este trabalho tem como objetivo principal tentar responder o quanto a produção dos gases traçadores é alterada em tratamentos de restrição de água dentro de um ecossistema de floresta primária na Amazônia. Para tanto, usamos tratamento de restrição da entrada de água da chuva com objetivo de aumentar o déficit hídrico do solo durante o período de menor precipitação. Nossa hipótese é que, com a diminuição das chuvas em florestas tropicais, e, portanto, uma conseqüente queda no potencial hídrico do solo (*déficit hídrico*), ocorrerá uma menor atividade microbiana e menor decomposição de matéria orgânica, em conjunto com uma queda no metabolismo radicular, provocando um menor crescimento das raízes e conseqüentemente uma queda na produção total de CO_2 . Devido ao solo estar mais seco prevemos um aumento no consumo de CH_4 atmosférico pelos microorganismos do solo. Também esperamos uma maior produção de NO e de N_2O dentro do tratamento de seca devido ao aumento de NH_4^+ -orgânico.

2. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Município de Paragominas

O município de Paragominas fica, a uma distância, em linha reta, de aproximadamente 250 km a sudeste de Belém (Figura 1), possuindo uma área 27.000 km² (WATRIN e ROCHA 1992). Durante as duas últimas décadas, esta região faz parte de um dos maiores pólos madeireiro da Amazônia (MATTOS e UHL 1994). Esta atividade causa uma remoção de 50% do dossel (UHL e VIEIRA 1989), diminuindo a evapotranspiração e aumentando as condições favoráveis à entrada do fogo (UHL e KAUFFMAN 1990). Interagindo com isto, existe a abertura de grandes fazendas para criação de gado (24% do município), onde toda a floresta é substituída por pasto (modificando o comportamento evapotranspirativo); áreas degradadas (devido ao abandono das pastagens); e capoeiras de várias idades (WATRIN e ROCHA 1992).

2.2. Fazenda Vitória

A Fazenda Vitória localiza-se 7 km a noroeste de Paragominas (2° 59' S, 47° 31' W, Figura 1). Possui uma área de 3.500 ha, representativa da região, com um mosaico de floresta madura, floresta explorada, capoeiras, pasto

degradados e pastos reformados. A área de estudo se localiza na área de 1.000 ha de floresta madura em terra firme, altitude média de 140 m acima do nível do mar, e declividade de 6%, cercada por floresta explorada, pastos reformados, pastos degradados e capoeiras de diferentes idades.

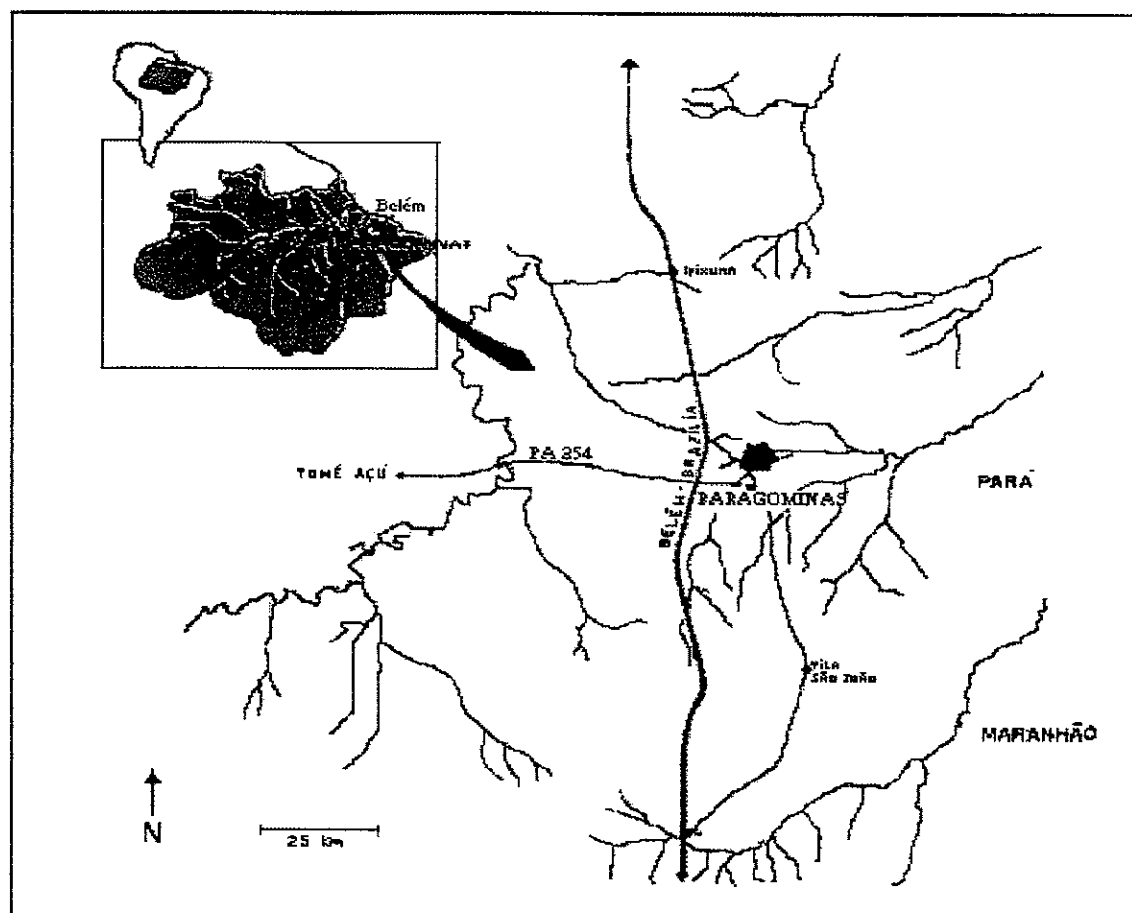


Figura 1² - Localização de Paragominas no leste Amazônico. A pequena se indica a localização da Fazenda Vitória.

² Adaptado de Nepstad et al. (1991).

3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Clima

Paragominas localiza-se numa região com um padrão marcante de sazonalidade de chuva. A precipitação média anual num período de 22 anos (JIPP et al. 1996) foi de $1.803 \pm 555 \text{ mm ano}^{-1}$ (média $\pm$ desvio padrão). O período seco se estende de junho a novembro com uma precipitação total $< 16\%$ da média anual. Esta marcante sazonalidade ocupa uma área bem extensa da região amazônica indo de noroeste ao sudoeste da Amazônia (Figura 2). Coincidentemente, estas áreas são as que atualmente vem recebendo as maiores pressões de desmatamento (NEPSTAD et al. 1994)

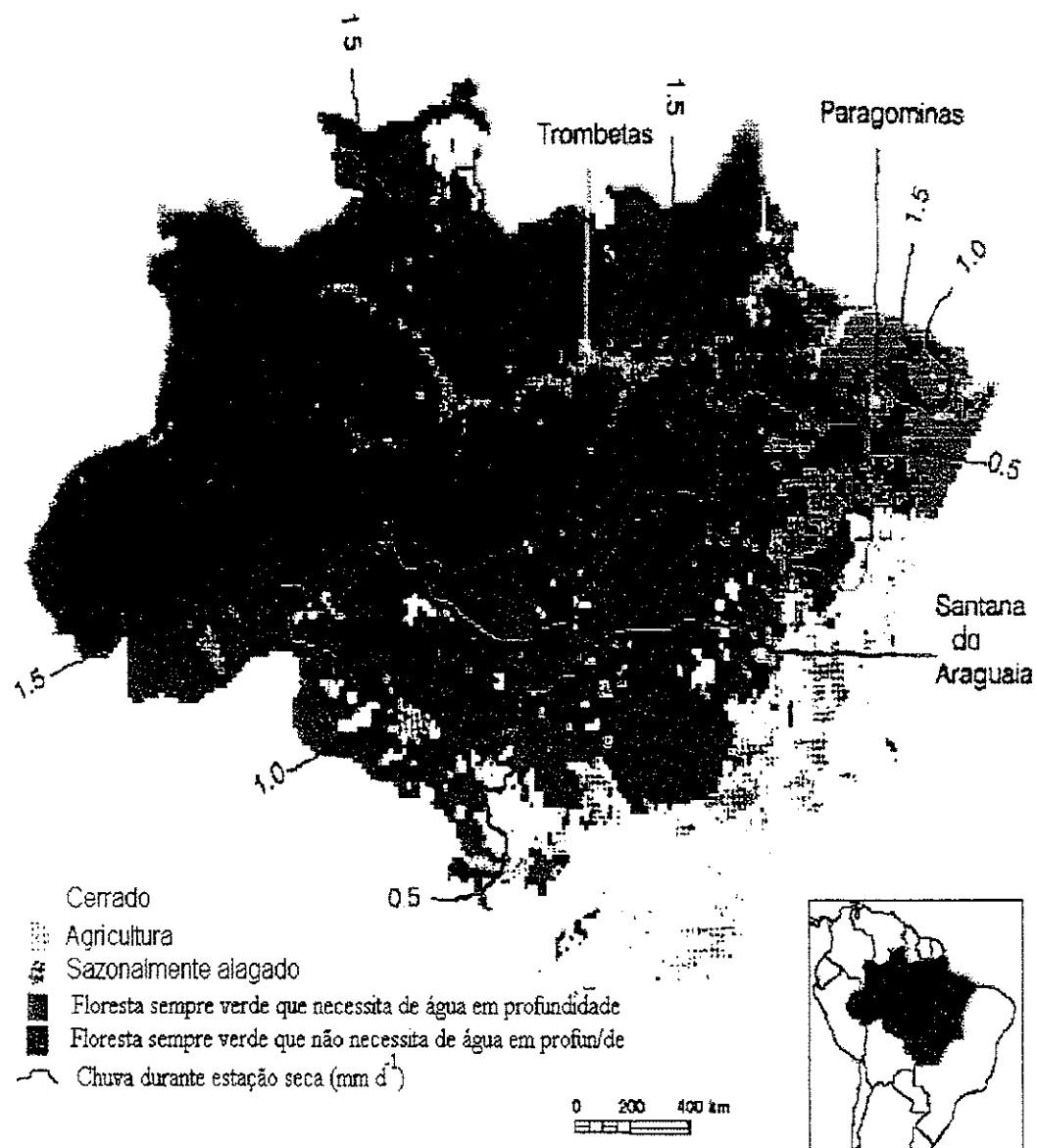


Figura 2³. - Tipos de florestas e uso da água em relação a estação seca na floresta Tropical Amazônica⁴.

³ Extraído de Nepstad et al. (1994). Savanas e florestas decíduas (14%) foram separadas de florestas sempre verde (75%) baseado nos padrões de sazonalidade da intensidade de verde das copas das árvores (visto de satélite) e um mapa de vegetação. Florestas sempre verdes incluem áreas as quais não ocorrem depressão sazonal no índice de normatização para diferentes vegetações durante as estações secas de 1986-88. Estação seca refere-se aos três meses mais secos do ano.

⁴ Adaptado de Nepstad et al. (1994).

3.2. Geologia e Solos

A região possui um relevo plano a suavemente ondulado com locais bem sucessivo a erosão. Os solos são predominantemente formados a partir de sedimentos caolíníticos da formação Barreiras (SOMBROEK 1986). A superfície plana dos terrenos são freqüentemente interrompidas por pequenos vales (20 a 100 m de depressão) criando ondulações suaves os quais quando desmatados ou cortado por estradas possibilitam o aparecimento de intensas erosões.

Os solos são profundos, bem drenados e ácidos (SOMBROEK 1986). Na área de estudo predomina latossolo vermelho-amarelo (Haplustox) com predominância de argilas kaoliniticas (70 a 80% do peso seco) e em menor proporção (10 a 20%) gibisita (NEPSTAD 1989).

3.3. Vegetação

Floristicamente, em 5 ha de floresta levantados por NEPSTAD (1989), foram encontradas 171 espécies e 40 famílias de árvores com dap $\geq$ 20 cm. A família com maior índice de valor de importância foi a Leguminosae, com 48 espécies, seguida da Sapotaceae com 28 espécies. As duas espécies mais comuns nesta floresta foram *Tetragastris altissima* (Aubl.) Swartz e *Lecythis idatimon* Aubl.. A biomassa aérea viva desta floresta foi de 264 Mg ha⁻¹ (1 Mg = 10³ g), sendo que 68% é proveniente de árvores com dap $\geq$ 20 cm (NEPSTAD 1989). A floresta estudada apresenta um dossel visualmente dividido em dois estratos arbóreos, tendo um estrato superior (árvores emergentes) chegando a uma altura média de 30 a 40 m, podendo-se encontrar árvores de até 55 m (ex: *Tabebuia serratifolia*), e um estrato médio de 20 a 30 m. Freqüentemente se encontra clareiras de diversos tamanhos nesta área.

NEPSTAD (1989, et al. 1994) estudando esta vegetação a caracterizou por apresentar raízes profundas, com sistema radicular podendo

chegar até 18 m de profundidade. Entretanto, do total do volume de raízes num perfil de 9 m, 35,4 Mg ha⁻¹ ou 61%, ocorrem no primeiro metro de profundidade (NEPSTAD 1989). Contudo as raízes profundas parecem ter papel fundamental na manutenção das folhas verdes nas copas das árvores durante o período mais seco (NEPSTAD et al. 1994). Ou seja, a média da precipitação diária, durante os três meses mais secos, é inferior a 1,5 mm, a qual é 2,5 mm dia⁻¹ menor do que a razão do potencial de vapor d'água perdido para a atmosfera pela evapotranspiração neste ambiente (NEPSTAD et al. 1995). JIPP et al. (1996) constataram que a floresta parece estar retirando água em profundidade, e aproximadamente 3 mm dia⁻¹ são retirados em um perfil de 8 m, durante o período sazonal seco. Devido a este fator, essas florestas têm a capacidade de apresentarem-se "sempre verde", conservando a umidade da liteira a níveis elevados (>18%), mesmo nos períodos mais secos, impedindo assim, a entrada do fogo (UHL e KAUFFMAM 1990, NEPSTAD et al. 1995). Atualmente impactos hidrológicos já causados pelo aumento das áreas desmatadas, podem estar afetando a reposição de água em profundidade nas áreas de floresta (JIPP e NEPSTAD 1993), principalmente na região de Paragominas, prejudicando a manutenção das folhas durante períodos de menor precipitação.

4. FLUXO DE DIÓXIDO DE CARBONO

4.1. Introdução

Os Trópicos cobrem aproximadamente um terço da superfície terrestre do globo, além de conter uma grande diversidade de ecossistemas e possuir uma alta razão de respiração dos solos, a qual é correlacionada positivamente com a razão da produtividade média destes biomas. Entretanto, existem ainda poucas medições do fluxo anual da respiração do solo (RAICH e SCHLESINGER 1992), contudo, esta respiração é um importante processo dentro do ciclo de carbono em ecossistemas terrestres (BOWDEN et al. 1992; NORMAN e VERMA 1992; DAVIDSON 1994).

Atualmente admite-se um ganho líquido de carbono pela floresta tropical primária, ou seja, algumas florestas sequestram mais carbono pela fotossíntese do que produzem pela respiração (GRACE et al. 1995). Medições do fluxo de CO₂ em florestas têm sido feitas para uma larga variedade de ecossistemas florestais (RAICH e NADELHOFFER 1989, RAICH e SCHLESINGER 1992). Contudo estas têm-se limitado a um número restrito de locais em cada ecossistema, isto se deve a limitação dos equipamentos portáteis para medição da produção de gases (HANSON et al. 1992), principalmente nas regiões tropicais (FUNG et al. 1987; RAICH e SCHLESINGER 1992).

Em escala global, a respiração do solo é positivamente correlacionado com a média anual da temperatura do ar e da precipitação, sendo estimada num total de 68 Pg C ano⁻¹ (RAICH e SCHLESINGER 1992). Contudo o montante de carbono estocado acima de um metro em solos de florestas tropicais é estimado em 13-17% do estoque global de carbono no solo (SOMBROEK et al. 1993). O CO₂ produzido no solo, provém da respiração de raízes e organismos vivos, com uma pequena parte proveniente da oxidação química de compostos carbônicos (BOWDEN et al. 1992, NORMAN e VERMA 1992; RAICH e SCHLESINGER 1992).

A razão pela qual o CO₂ movimenta-se através do solo para a atmosfera é controlada pela produção de CO₂ no solo (razão de respiração), e pelo gradiente de concentração de CO₂ entre o solo e atmosfera, bem como depende das características de porosidade do solo, temperatura do ar e velocidade do vento (RAICH e SCHLESINGER 1992). SHARKOV (1987) afirma que são também importantes a temperatura do solo e o de tempo após a ocorrência da precipitação, pois quando a água da chuva preenche os poros do solo contendo ar, pode promover a liberação de gases para fora do solo (NORMAN e VERMA 1992). Entretanto, as propriedades do solo variam tanto temporariamente e espacialmente como horizontalmente e verticalmente (DAVIDSON e TRUMBORE 1995). Recentemente, um modelo para ciclo de carbono em solos de floresta tropical Amazônica, proposto por TRUMBORE et al. (1995) estudando esta mesma floresta, revela que o tempo de movimento do carbono para fora do solo ("*turnover time*"), acima de um metro é < 12 anos.

Levando em consideração os três principais componentes da respiração do solo: i) respiração de raízes, ii) respiração proveniente da decomposição da liteira e iii) respiração proveniente da decomposição da matéria orgânica do solo (incluindo detritos de raízes), é difícil dar uma específica importância para cada um desses componentes devido a expressiva variação relacionada ao local, principalmente em áreas tropicais. Devido a esta variação,

têm-se dificultado a determinação da contribuição em separado para o fluxo total do solo, além do que, a maioria dos métodos não separa estes componentes no perfil do solo (RAICH e SCLESINGER 1992). Entretanto, estudos em floresta decídua (EDWARDS e SOLLINS 1973) revelam que proporcionalmente existe uma produção diferencial de CO₂ entre raízes (35%), liteira (48%) e solo (17%) mostrando que grande parte da respiração do solo provem da decomposição da matéria orgânica (RAICH e SCHLESINGER 1992), entretanto, existe uma variação considerável entre os biomas (RAICH e SCHLESINGER 1992). Também parece existir uma sazonalidade na produção de CO₂ na respiração do solo (REINERS 1968, EDWARDS e SOLLINS 1973, HANSON et al. 1993).

Em ecossistemas naturais uma restrição ao conteúdo de água no solo, temporal ou permanente, constitui um fator seletivo para o curso da evolução das espécies vegetais e um estímulo para o desenvolvimento de adaptações morfológicas e fisiológicas que permitam a sobrevivência das plantas superiores em "*habitats*" onde a água se escassa (MEDINA 1983). Em muitas espécies um baixo crescimento radicular durante períodos secos promove uma grande variação na arquitetura de raízes entre as espécies (KUMMEROW 1980, RUNDEL e BECKER *in press*), tendo com isto grandes implicações sobre a fenologia das plantas e suas relações hídricas (KUMMEROW 1980). Também podemos prever alterações na velocidade de decomposição de materiais carbônicos e na ciclagem de nutrientes, devido a uma diminuição na densidade e atividade da fauna microbiana do solo.

Sabendo-se das possíveis alterações no clima da Amazônia (SHUKLA et al. 1990, NOBRE et al. 1991) é importante sabermos as fontes sovedoras globais de carbono e, principalmente, predizer algumas possíveis alterações no fluxo de carbono dos solos devido à possível diminuição das chuvas dentro deste importante ecossistema. Com isto poderemos inserir dados para se tentar diminuir a falta de informação sobre o balanço de carbono, e a maneira como o ciclo deste responde á uma alteração no ciclo da água neste ecossistema. Portanto este trabalho tem como objetivo entender as pováveis alterações no

fluxo de CO_2 do solo de uma floresta tropical na Amazônia em relação a uma simulação da intensificação da sazonalidade. A nossa hipótese é que com a intensificação da sazonalidade haverá uma diminuição do metabolismo radicular (com possível aumento na mortalidade de raízes) e provável diminuição do metabolismo microbiano, consequentemente esperamos encontrar uma diminuição no fluxo de CO_2 do solo.

4.2. Material e Métodos

4.2.1 Delineamento Descritivo

No início de 1993 uma parcela de 10 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 2,0 m do chão. Para não cortar a vegetação que passava pelo telhado, foi aberto um buraco na telha do diâmetro aproximado do caule. No tronco das árvores de maior diâmetro, foram amarradas, com fita de borracha, folhas plásticas de forma que a água da chuva que escorra pelo tronco passe para a folha plástica e caia sobre o telhado. O objetivo da cobertura é 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, foi demarcada aleatoriamente uma outra área (testemunha), distante aproximadamente 20 m da área coberta.

Para se tentar entender melhor, possíveis alterações na estrutura radicular com o tratamento de estresse e, conseqüentemente, alterações no fluxo superficial de gases do solo, foi escavado manualmente um buraco (1,3 x 0,6 m), com 4,0 m de profundidade em cada uma das duas áreas (tratamento de exclusão da chuva e testemunha). Todas as raízes grossas (> 2,0 mm de diâmetro) foram retiradas nas profundidades de 0-20, 20-50, 50-100, 100-150, 150-200, 200-300, 300-400 cm. Dentro do mesmo buraco foram feitas três amostragens com trado

(10 cm de profundidade), nas mesmas profundidades anteriores, para quantificação de raízes finas (diâmetro $\leq 2,0$ mm), conforme metodologia utilizada por NEPSTAD (1989).

Com o objetivo de verificar a possível existência de um crescimento radicular diferencial entre os dois tratamentos, foram confeccionadas 5 bolsas de material de tela plástica (volume de $15,71 \times 10^2 \text{ cm}^3$), contendo terra de subsolo peneirada e sem compactação. Estas bolsas foram colocadas no solo (Abril de 1995) em duas profundidades (20 cm e 350 cm), num total de 10 bolsas por buraco. Para isto, furos de trado, com diâmetro igual ao das bolsas contendo terra, e comprimento de 40 cm, foram abertos horizontalmente nas paredes dos buracos, e subseqüentemente as bolsas foram colocadas nestes furos os quais foram novamente preenchidos com terra. As bolsas foram retiradas em fevereiro de 1996, e todo o material de dentro foi lavado e coado em peneira de malha fina. No laboratório o material de raízes vivas foi separado manualmente do restante de material orgânico com auxílio de lupa, e este foi seco a uma temperatura de 65°C por 72 horas, e posteriormente pesado em balança analítica.

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 - conforme metodologia descrita por JIPP et al. 1996). Este aparelho quando ligado à um computador portátil é utilizado para quantificar mudanças no conteúdo volumétrico de água (CAV)⁵. As leituras se baseia em emissões de ondas de radar através de hastes de metal, relacionando ao tempo de movimentação destas ondas através do solo (comparando á uma curva de calibração feita em laboratório). As medições, no início e no final do experimento, foram convertidas em CAV.

⁵ 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. (1996)

4.2.2 Fluxo de CO₂

Oito anéis de “*polyvinyl chloride*” (PVC) foram espalhados ao redor do buraco dentro da parcela coberta, e do mesmo modo, outros oito anéis foram espalhados na parcela testemunha. As medições de CO₂ foram mensais para cada uma das câmaras. O material de liteira depositado no telhado foi espalhado manualmente dentro da parcela. O fluxo superficial de CO₂ foi medido, durante o estação seca de 1995 (junho a dezembro), através da circulação de ar entre uma câmara de fluxo e uma célula de amostragem do analisador de gás infravermelho (LiCor - modelo LI - 6252). Cada câmara se constituiu de um anel de PVC com 20 cm de diâmetro por 10 cm de altura e uma tampa ventilada de PVC (10 cm de altura) ligadas ao aparelho por duas mangueiras. Os anéis de PVC foram afixados previamente no solo (4 meses antes) entre 2 a 3 cm de profundidade, evitando distúrbios. Todo o material verde foi retirado de dentro da câmara antes de cada medição. O fluxo de CO₂ foi determinado pela inclinação de uma linha adaptada ao aumento da concentração dentro da câmara depois que a tampa fechou o anel, por um período aproximado de 3 minutos. A razão do fluxo de ar entre a câmara de solo e o aparelho foi de 0,5 L min⁻¹, conforme metodologia descrita por DAVIDSON e TRUMBORE (1995).

Tubos de aço inoxidável (3 mm de diâmetro e 120 cm de comprimento) foram também instalados nos dois buracos em furos abertos com trado horizontalmente, nas profundidades de 20, 30, 50, 100, 150, 200, 300 e 400 cm. Estes tubos tem como objetivo a retirada de amostras de gases (CO₂, N₂O e CH₄) para quantificação da concentração no perfil do solo⁶. Estas amostras foram retiradas no campo com seringas e injetadas em laboratório em cromatógrafo. A concentração de cada gás em estudo, foi obtida pela comparação da leitura da amostra coletadas no campo e a leitura de amostras padrões em diferentes concentrações.

⁶ Esta metodologia foi descrita por Davidson e Trumbore (1995).

4.2.3. Delineamento em Blocos

Para uma análise estatística, foram construídas coberturas com lona plástica transparente em armações de madeira inclinadas, a uma altura média de 0,5 m do chão. Estas parcelas, implantadas no mês de fevereiro de 1995, foram espalhadas em 5 blocos casualizados, com 3 tratamentos de umidade: i) $T_1 \rightarrow$ 100% de água da chuva que passa pelo dossel ("throughfall"), ii) $T_2 \rightarrow$ 50% da água da chuva que passa pelo dossel e iii) $T_3 \rightarrow$ sem água da chuva. Para acompanhamento da *throughfall* foi colocado no meio de cada bloco um pluviômetro⁷, sendo que o total de água colocada nas parcelas foi a média dos cinco pluviômetros. As regas foram feitas com regador manual a partir do momento em que a quantidade de *throughfall* (Figura 3) chegasse a um total acumulado 100 mm para período chuvoso (março a maio de 1995) e 50 mm para o período de menor precipitação (junho a dezembro 1995). Aproximadamente 80% da água colocada nas parcelas foi coletada em coletores dentro da floresta e o restante, devido ao baixo índice pluviométrico durante o período sazonal seco, foi água de poço.

Embaixo de cada cobertura plástica foram fixados dois anéis de PVC (denominados de Unidades Experimentais -UE), um ao lado do outro, do mesmo modo descrito no *experimento descritivo*. Entretanto, de dentro de um dos dois anéis foi retirado todo o material de liteira superficial e o outro foi deixado intacto. A liteira depositada na cobertura plástica foi espalhada embaixo desta, tendo o cuidado de não deixar cair dentro da câmara sem liteira.

Amostras de solo foram retiradas, tendo como objetivo quantificar o efeito da cobertura sobre a umidade do solo, em uma profundidade de até 20 cm dentro da área coberta (todos os tratamentos) ao final do experimento. Após a quantificação do peso úmido, o solo foi seco a uma temperatura de 105 °C por 72 horas, e posteriormente pesado em balança de precisão. Através destes dados,

⁷ O total da chuva foi medido através da média da quantidade de água coletadas em três pluviômetros, elevados a 1,5 m do solo na estação meteorológica da Fazenda Vitória.

calculamos a umidade gravimétrica para cada parcela. Medições com TDR foram também feitas seqüencialmente, na superfície do solo, dentro e fora de cada local de amostragem de fluxo de gases. 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.

4.2.4 Análise estatística

Para análise estatística dos resultados foi utilizado, em um experimento randomizado, uma análise de parcelas divididas (*split-plot*). Este delineamento foi escolhido devido a necessidade de associar os tratamentos e o tempo (t) com medidas repetidas para cada UE, assim como o t é uma sub-unidade de medida para cada UE (HICKS 1973, GUMPERTZ e BROWNIE 1992). Portanto, se k tratamentos são usados em n UEs por tratamento, em um desenho experimental randomizado, F_1 (Tabela 5) testa para cada tratamento o seu efeito principal, assim como F_2 e F_3 testa o efeito principal para o tempo, e a interação entre o tratamento e o tempo, respectivamente (MEREDITH e STEHMAN 1991). Para isto adotamos a seguinte equação, separadamente para as UE com material de liteira e as que não continham este material:

Tabela 5. ANOVA para análise variância de parcelas divididas*

Fonte de variação	gl	QM	F
Bloco	$a - 1$	QM_a	
Tratamento	$k - 1$	$QM(\text{tratamento})$	$F_1 = QM(\text{tratamento})/QME\ a$
Erro a	$k (n - 1)$	$QME\ a$	
Tempo	$t - 1$	$QM(\text{tempo})$	$F_2 = QM(\text{tempo})/QME\ b$
Tempo x tratamento	$(k - 1) (t - 1)$	$QM(\text{tratamento} \times \text{tempo})$	$F_3 = QM(\text{tratamento} \times \text{tempo})/QME\ b$
Erro b	$k (n - 1) (t - 1)$	$QME\ b$	

Extraído de GUMPERTZ e BROWNIE (1992).

Modelo:

$$\text{Fluxo} = \underbrace{\text{bloco} + \text{tratamento} + \text{bloco} * \text{tratamento}}_{\text{toda a parcela}} + \underbrace{\text{tempo} + \text{bloco} * \text{tempo} + \text{tratamento} * \text{tempo} + \text{bloco} * \text{tratamento} * \text{tempo}}_{\text{parcela dividida}}$$

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 o termo *bloco x tempo* é considerado não existente e é combinado com o termo de *bloco x tratamento x tempo* na forma de *erro (Erro b)*.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1 Pluviosidade

Dados publicados por JIPP et al. (1996) 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 neste mesmo período, e um total anual de 1.750 mm. Para o ano de 1995 tivemos um total anual de 2.002 mm de chuva com uma precipitação média de 1,3 mm dia⁻¹ 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 ($n = 5$), aproximadamente 1,0 mm dia⁻¹ de água da chuva chegou ao solo da floresta nesta forma (Figura 3). Estes dados, levando-se em consideração que existe perda de água da chuva pela evaporação nas folhas, absorção e escoamento pelo tronco, parecem estar dentro do padrão de 20 anos apresentado por JIPP et al. (1996).

4.3.2. Delineamento descritivo

Devido à falta de repetibilidade da parcela de 100 m², o que nos impede de aprofundar em uma análise estatística, a usaremos de uma forma descritiva, apresentando resultados de uma área de floresta madura de terra firme, a qual, por um período de quatro anos consecutivos, vem sofrendo restrição aproximada de 80% da chuva que chega ao solo da floresta. Para tanto, foi feita uma análise de variância inteiramente casualizada (ANOVA) nos dados de biomassa de raízes finas ($n = 3$ para cada profundidade amostrada) e fluxo de CO₂ ($n = 8$) durante os sete meses do estudo.

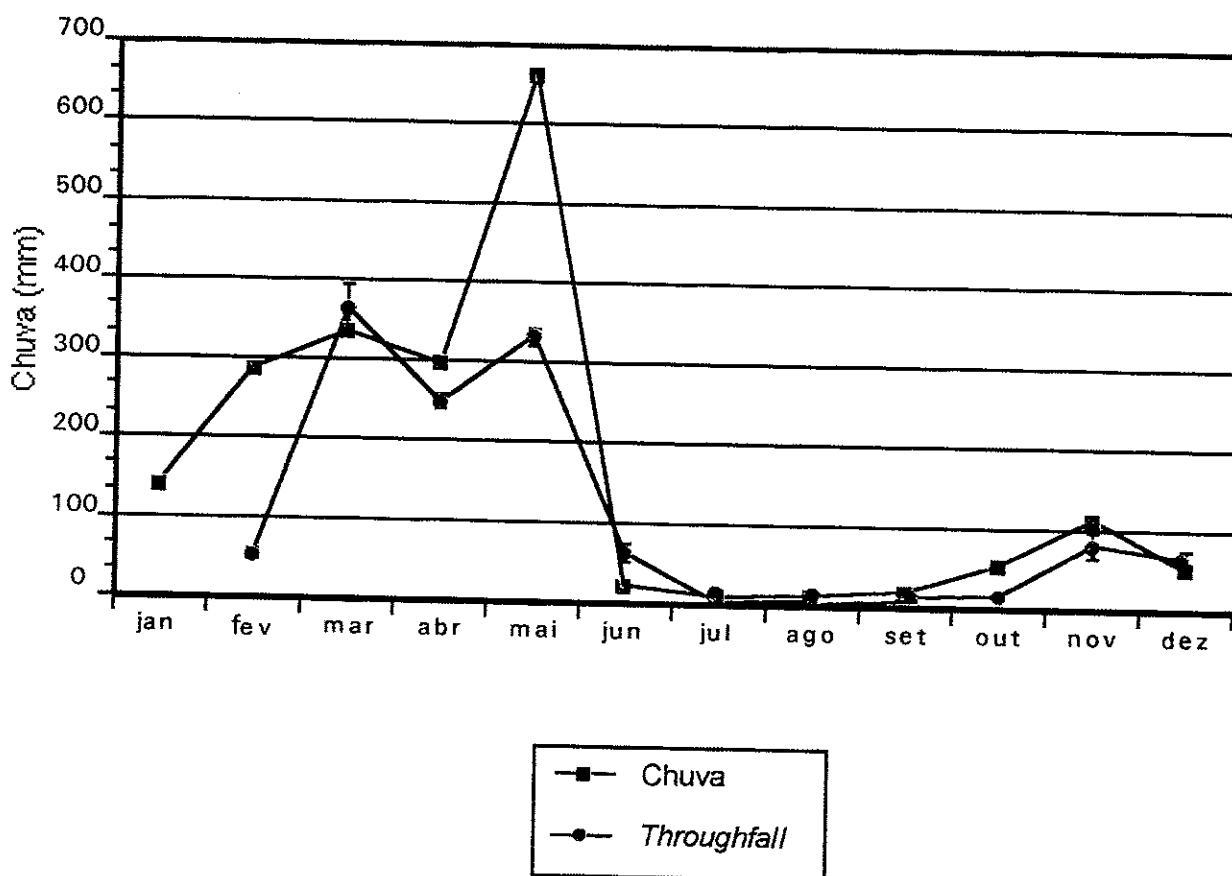


Figura 3. Média mensal da chuva total e "throughfall", durante o ano de 1995 na Fazenda Vitória (Paragominas-Pa.).

4.3.2.1. Umidade do solo

Os dados de umidade do solo (Anexo 9.1), medidos através de sensores de TDR ($n = 2$ para cada profundidade), mostraram que existe uma visível diferença (Figura 4) na umidade do solo, entre o início e o final da estação seca na parcela de exclusão da chuva e testemunha, por todo o perfil estudado. Estes mesmos resultados mostram uma maior diminuição no total do CAV⁸ para o tratamento testemunha (total de $0,502 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em comparação com o tratamento de restrição da água da chuva (total de $0,210 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), ou seja, a diminuição de

⁸ Total do CAV se refere a soma dos valores numéricos do CAV no perfil estudado (Tabela 6).

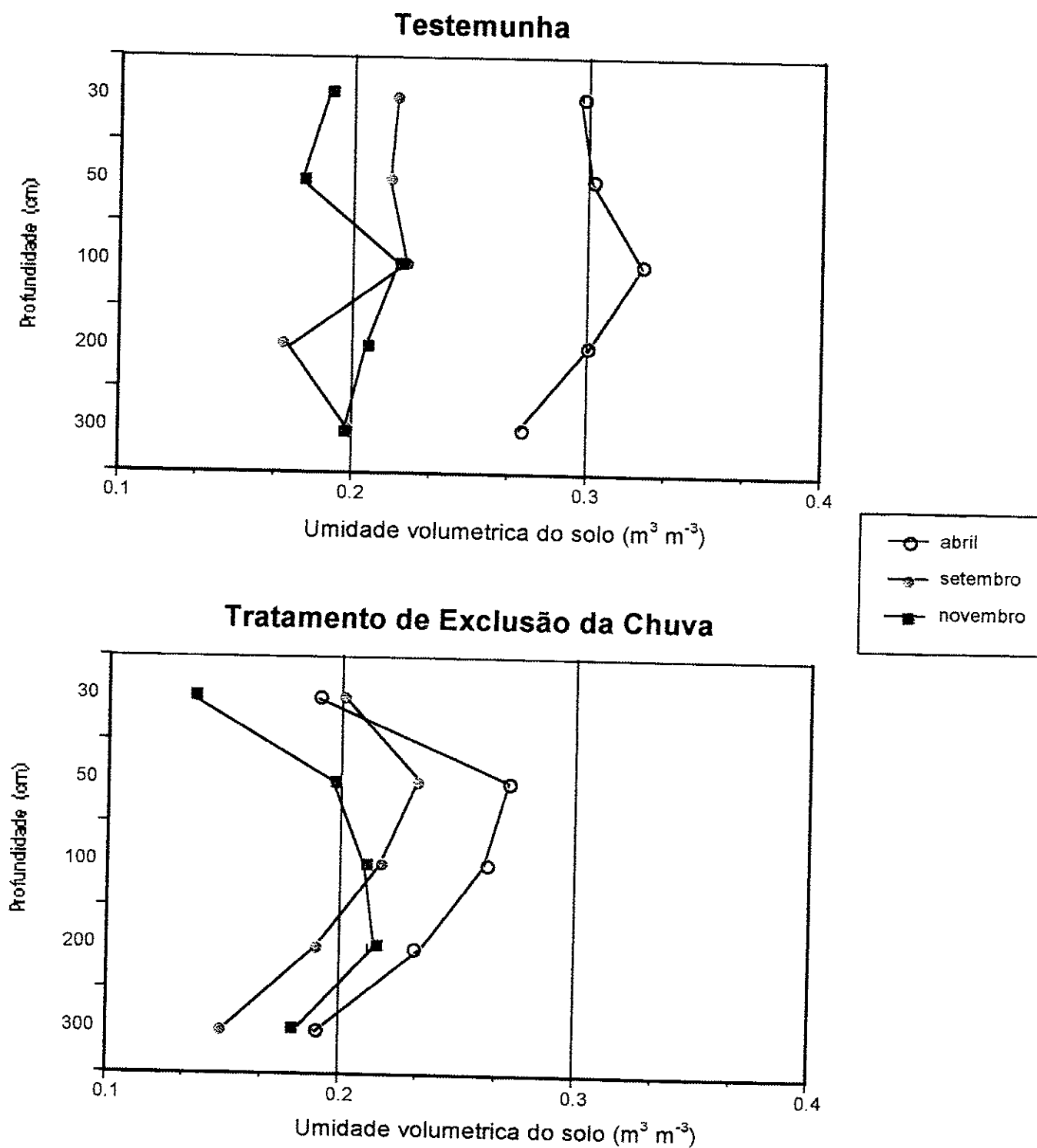


Figura 4. Conteúdo de umidade volumétrica média do solo em várias profundidades, no tratamento testemunha e exclusão da chuva, durante três meses de 1995 na fazenda Vitória (Paragominas-PA.)

água por todo o perfil foi 58,2% menor na parcela coberta do que na área testemunha. Entretanto, no final da estação seca, a partir de 0,5 m de profundidade parece não existir diferença visível no CAV entre os dois tratamentos (Figura 4).

É interessante notar que dentro da parcela coberta existe um uso do CAV maior (uma média de 85,7% menor do CAV entre o início e o final do período seco), nos primeiros 100 cm de solo, em comparação com o restante do perfil (uma média de 66,5% menor do CAV entre o início e o final do período seco). Com isto, parece existir um uso maior de água volumétrica, para o primeiro metro de solo em comparação ao restante do perfil, no tratamento de exclusão da chuva. Este padrão não foi encontrado para a parcela testemunha, a qual apresentou uma diminuição na umidade do solo aparentemente homogênea por todo o perfil. Talvez isto se deva a uma possível entrada de água que ainda esteja passando pelo telhado, durante a estação chuvosa, umidecendo a camada de liteira e os primeiros centímetros de solo.

4.3.2.2. Biomassa de raízes

O total encontrado de raízes grossas mortas (Tabela 6) foi 4,2 vezes maior dentro do exclusão da chuva ($1.431,9 \text{ g m}^{-3}$) em relação à testemunha ($343,7 \text{ g m}^{-3}$). Mais de 95% desta biomassa encontra-se nos primeiros meio metro de solo para as duas áreas estudadas. Entretanto, o total de raízes grossas vivas apresenta uma variação de $241,0 \text{ g m}^{-3}$ a mais para o tratamento de exclusão da chuva em comparação à testemunha (Figura 5). Também, quase que a totalidade da biomassa de raízes vivas se encontra no primeiro metro de solo para os dois tratamentos (Tabela 6). Portanto, quando somamos o total de raízes grossas mortas com o total das vivas, parece que a biomassa de raízes grossas era expressivamente maior dentro do tratamento de exclusão da chuva, em comparação à testemunha.

Tabela 6. Peso de raízes finas e grossas (g m^{-3}) divididas em vivas e mortas dentro dos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha, nas respectivas profundidades (cm).

Profundidade (cm)	Raiz Fina				Raiz Grossa			
	<u>Exclusão da Chuva</u>		<u>Testemunha</u>		<u>Exclusão da Chuva</u>		<u>Testemunha</u>	
	Viva	Morta	Viva	Morta	Viva	Morta	Viva	Morta
00	195,1(51,0)^a	652,1(25,8)	244,0(36,6)	553,8(27,1)	4783,5^b	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	NE
200	15,9(10,2)	7,3(2,2)	5,2(3,4)	2,3(0,9)	NE^c	8,7	59,0	NE
300	7,4(3,4)	6,5(3,1)	1,3(0,5)	1,1(0,1)	22,3	2,0	28,9	NE
400	1,8(1,1)	1,0(0,7)	0,6(0,1)	0,5(0,0)	NE	NE	37,5	0,8
Total	407,2	916,3	489,5	912,3	14713,9	1432,0	14472,0	343,6

^a Números em negritos para raízes finas correspondem a média de três tradagens e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média.

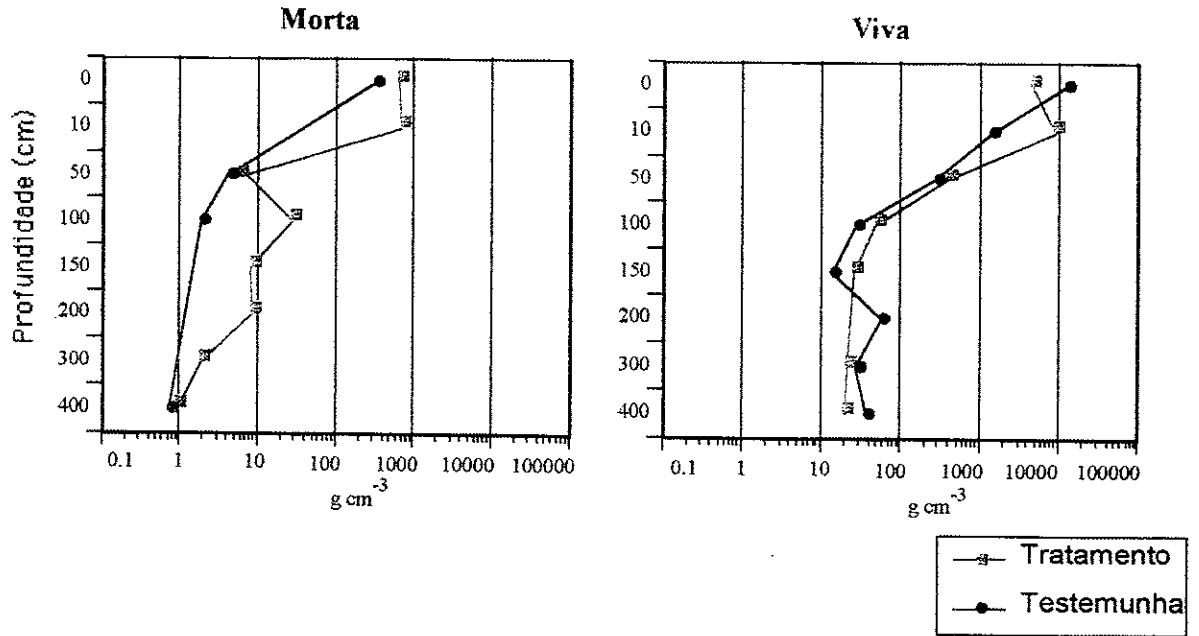
^b Números em negritos para raízes grossas correspondem ao total de raízes no intervalo de profundidade inicial até a próxima profundidade (ex.: 00 → 0 a 20 cm).

^c NE = Não encontrado raízes na amostra

O mesmo padrão, de distribuição no perfil do solo, foi encontrado com as raízes finas mortas, o qual não apresentou uma grande diferença estatística (Teste t , $p > 0,05$), entre os dois tratamentos (916,3 g m^{-3} para o exclusão da chuva e 912,1 g m^{-3} para a testemunha). Porém, quando comparamos a cada profundidade, existe uma massa de raízes finas mortas significativamente (Teste t , $p < 0,05$) maior para a exclusão da chuva, abaixo dos 10 cm de profundidade (Tabela 6). Apenas na profundidade de 150 cm a testemunha apresentou uma massa de raízes finas morta visivelmente maior.

Os resultados apresentaram uma ligeira variação no total de raízes finas vivas (Figura 5) entre os dois tratamentos (407,2 g m^{-3} para o exclusão da chuva e 489,6 g m^{-3} para a testemunha). Entretanto, quando comparamos a cada profundidade, apenas para os 150 cm de profundidade a biomassa de raízes finas vivas foi maior para o tratamento testemunha. É interessante notar que do total de raízes finas vivas 90,8% e 76% desta biomassa se localiza no primeiro metro de solo no tratamento de exclusão da chuva e na testemunha, respectivamente.

Densidade Raízes Grossas



Densidade Raízes Finas

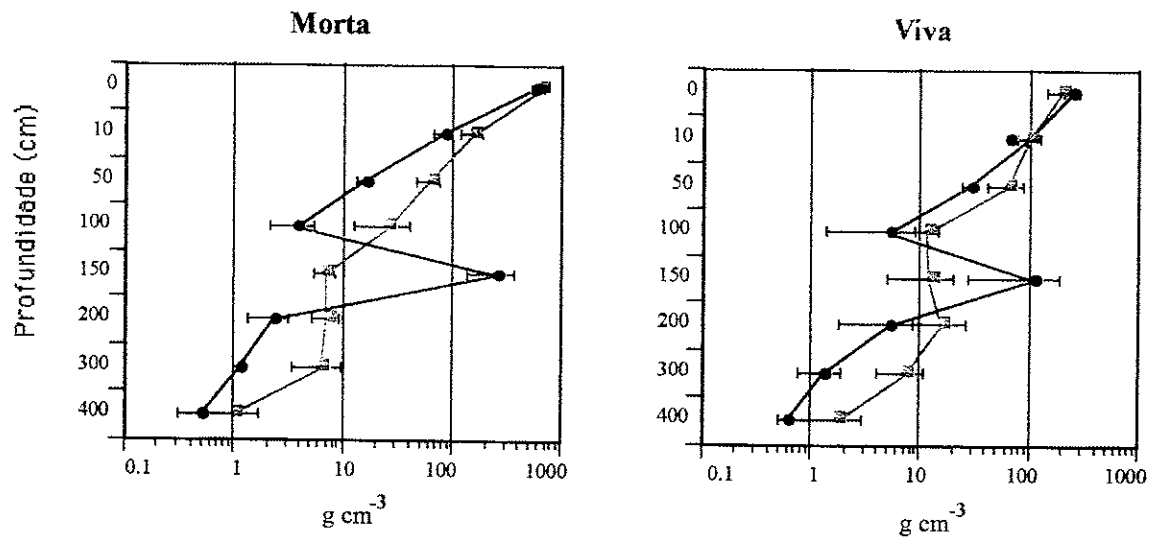


Figura 5. Densidade de raízes grossas e raízes finas, divididas em mortas e vivas, em várias profundidades, no tratamento de exclusão da chuva e testemunha, em floresta primária (Paragominas-PA.)

Estes resultados de biomassa de raízes diferem das nossas expectativas. Devido à menor disponibilidade de água durante quatro anos de tratamento de exclusão de chuva, esperávamos encontrar uma maior massa de raízes mortas no tratamento de seca, o que foi observado, e conseqüentemente uma biomassa de raízes vivas significativamente menor, em comparação ao testemunha, o que não foi observado.

Os dados de biomassa de raízes parecem concordar com NEPSTAD et al. (1994), quando este revela que 65-70% 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.

A diferença na dinâmica radicular entre diferentes espécies⁹, e/ou de uma possível adaptação dos indivíduos à necessidade de captação de água fora da parcela coberta, e conseqüente ampliação de seu sistema radicular no sentido de aumentar a superfície de absorção da água na superfície do solo (KUMMEROW 1980), pode estar influenciando no resultado. Parece claro que, pelo menos um destes fatores estão auxiliando as plantas positivamente na captação de água, pois analisando o comportamento hídrico das folhas (potencial hídrico de folhas e condutância estomática) de uma das espécies que ocorre na área com exclusão da chuva (*Lecytis idatimom*), esta não apresentou nenhum padrão de restrição a perda de água por transpiração durante quatro anos de estudo (NEPSTAD e CATTÂNIO em preparação). Portanto, de alguma forma, ou estas plantas estão conseguindo retirar água residual deste solo, como também buscar água de fora da parcela, ou existe um fluxo lateral da água do solo de fora para dentro da parcela, principalmente nas profundidades mais superficiais, onde se localiza a maior biomassa de raízes finas, durante a época chuvosa.

⁹ Dentro da área coberta ocorrem dois indivíduos de *Lecytis idatimom*. Espécie com possíveis adaptações a sazonalidades, sendo que esta espécie não ocorre na parcela testemunha.

Dados de crescimento radicular, durante 10 meses (fevereiro/95 a janeiro/96), mostram existir um crescimento significativamente (ANOVA, $p < 0.01$) diferenciado, nas duas profundidades estudadas (20 e 350 cm), e entre as duas áreas estudadas (Figura 6). O crescimento de raízes finas (nas duas profundidades estudadas) foi 54,4% ($284,6 \pm 64,4 \text{ g m}^{-3}$ para o exclusão da chuva e $623,8 \pm 79,59 \text{ g m}^{-3}$ para o testemunha)¹⁰ e 85,5% ($84,0 \pm 25,1 \text{ g m}^{-3}$ para o exclusão da chuva e $581,9 \pm 275,9 \text{ g m}^{-3}$ para o testemunha) menor no tratamento de exclusão da chuva nas profundidades de 20 e 350 cm, respectivamente.

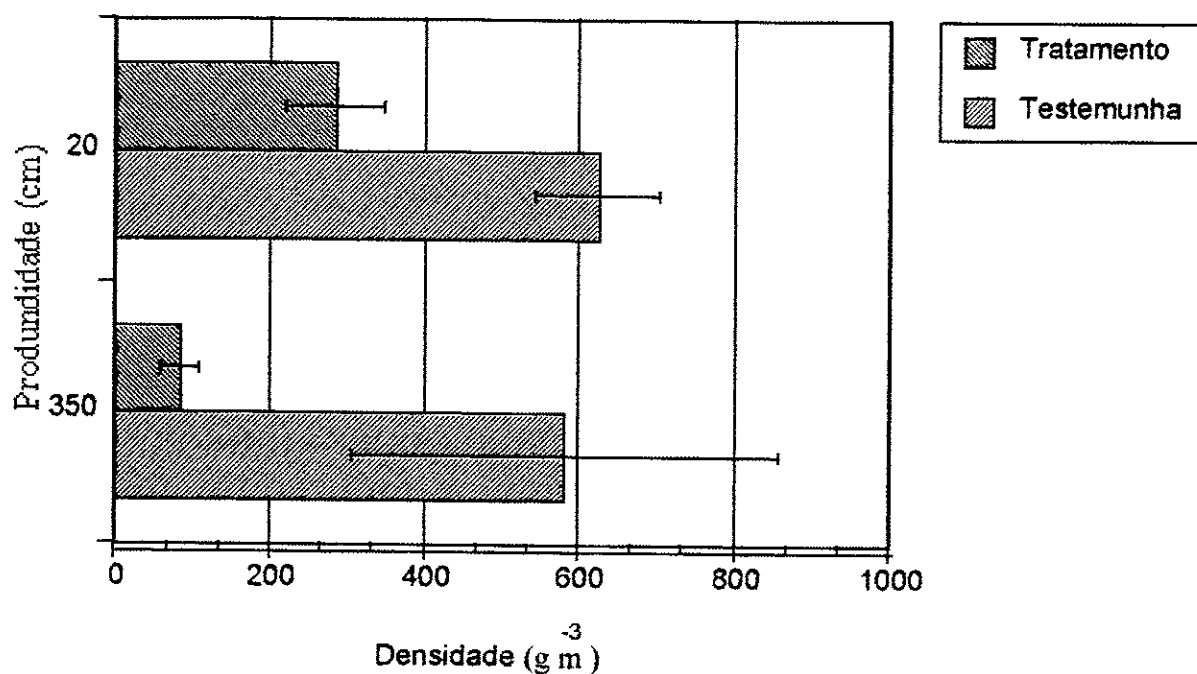


Figura 6. Aumento na densidade de raízes em solo de floresta primária, em duas profundidades no tratamento de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa).

Estes dados indicam que as plantas da parcela coberta, após 4 anos de tratamento de restrição das chuvas, parecem estar investindo uma menor

¹⁰ Os números correspondem a média $\pm$ erro padrão da média

quantidade de energia no crescimento radicular em comparação à testemunha. Conseqüentemente, isto nos induz a pensar na existência de uma menor atividade metabólica das raízes dentro da área de tratamento, principalmente na profundidade de 350 cm (Figura 6). Talvez isto pode ajudar a explicar o menor consumo de água da plantas dentro do tratamento de exclusão da chuva, comparativamente à testemunha.

4.3.2.3. Fluxo de CO₂

O fluxo total de CO₂ (Anexo 9.2), durante o período seco (junho a dezembro/95), foi significativamente (Teste *t*, $p < 0,01$) maior na área de testemunha (1.071,5 g CO₂ m⁻²) em comparação à que recebeu a exclusão da chuva (617,9 g CO₂ m⁻²). Os dados mostram que não existe uma correlação significativa ($r = 0,678$) entre o fluxo de CO₂ e a precipitação mensal para a testemunha, bem como para o tratamento de exclusão da chuva ($r = 0,321$).

Durante os meses de menor índice pluviométrico, o fluxo superficial de CO₂, para a testemunha foi maior do que a área de exclusão da chuva, sendo que apenas para o mês de setembro não houve uma expressiva diferença entre os dois tratamentos (Figura 7). Nitidamente existe uma ligeira queda no fluxo de CO₂ do início do período seco até setembro, acompanhando a diminuição das chuvas, com posterior elevação deste para a parcela testemunha, cujo padrão não foi bem nítido para a área sob estresse (Figura 7).

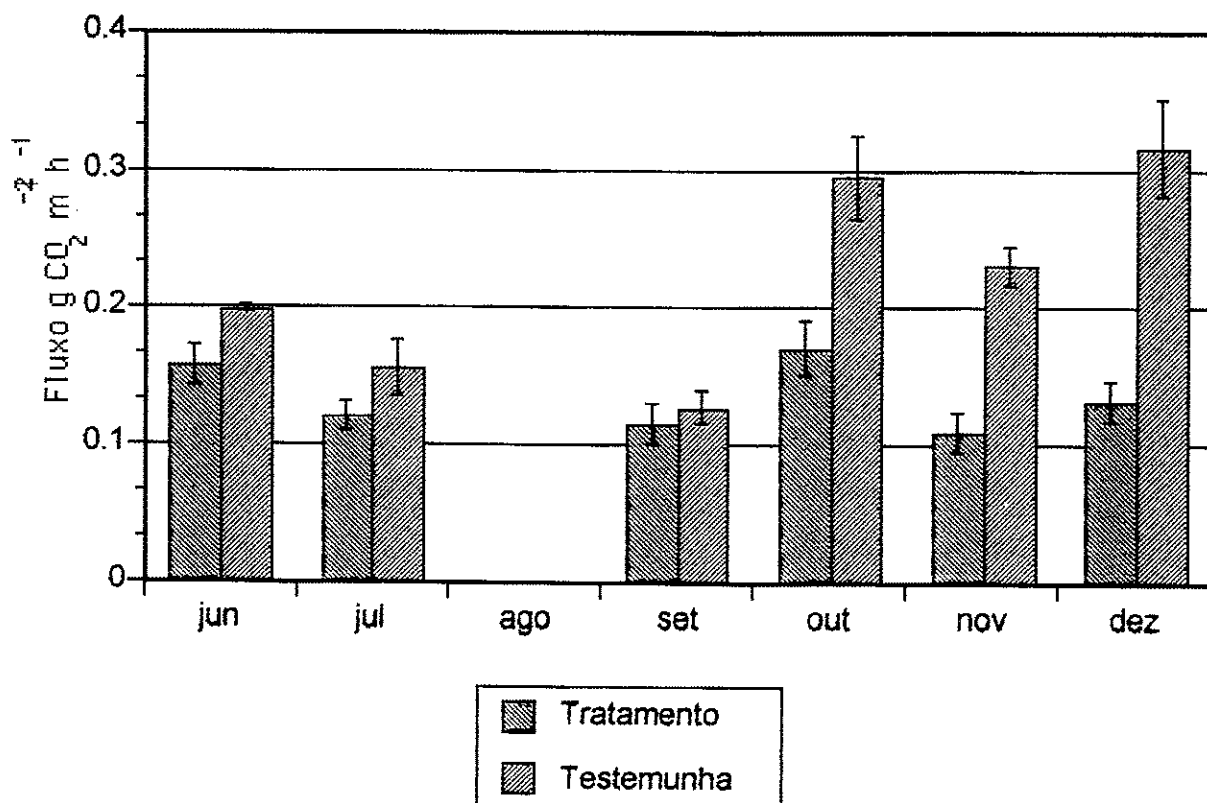


Figura 7. Fluxo superficial de CO₂ do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-PA.).

Uma das conseqüências para um fluxo diferencial de CO₂ do solo para a atmosfera, entre a área de exclusão da chuva e à testemunha, é a menor concentração de CO₂ por todo o perfil do solo no tratamento de exclusão da chuva (Figura 8). Analisando este gráfico, notamos que ao final do período sazonal seco, existe uma concentração de CO₂ nitidamente menor na parcela de exclusão da chuvas em comparação à testemunha.

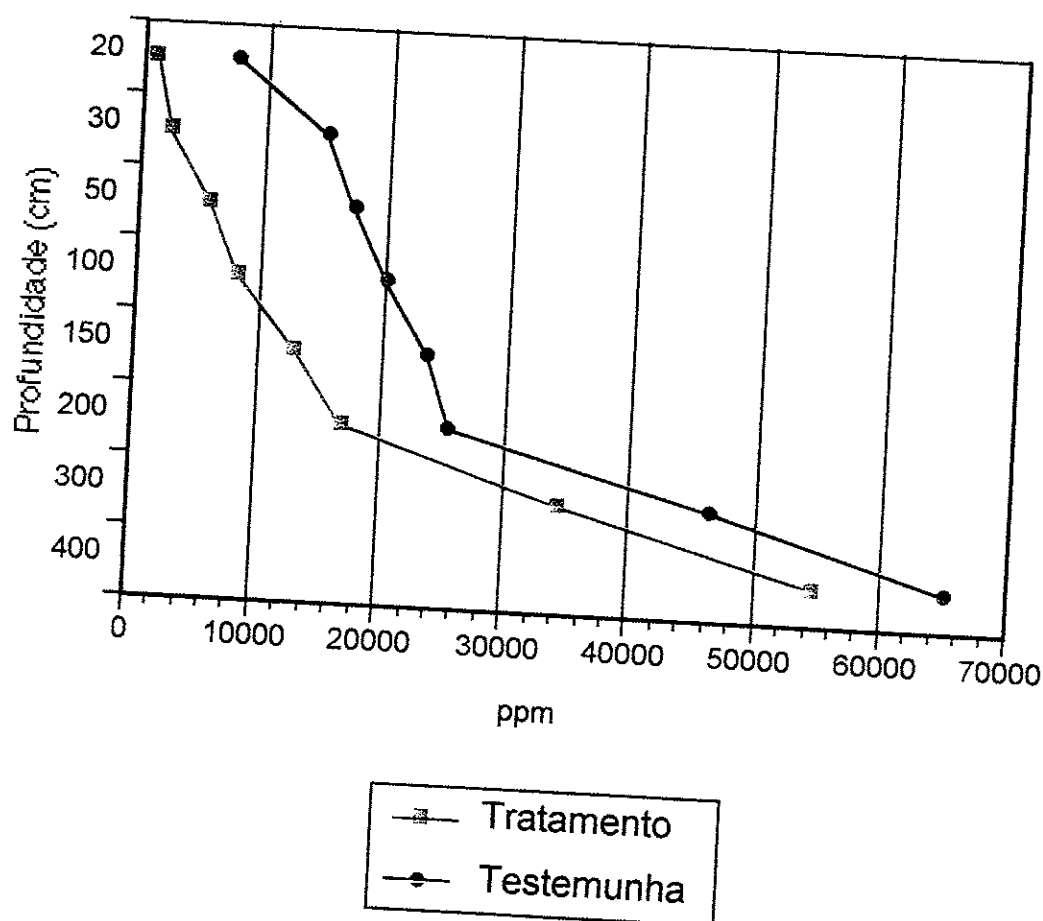


Figura 8. Concentração de CO_2 no perfil do solo de uma floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha na fazenda Vitoria (Paragominas-Pa.).

As chuvas durante o período seco (Figura 3), parecem ter importante influência sobre o fluxo de CO_2 , devido à ação que exercem principalmente sobre a umidade da camada de liteira e do solo, e conseqüentemente nas atividades metabólica da raiz e microbiana, bem como na movimentação do CO_2 no perfil e na temperatura do solo, fatores estes importantes para o fluxo do CO_2 do solo para a atmosfera (EDWARDS e SOLLINS 1973, SHARKOV 1987, HANSON et al. 1992, NORMAN e VERMA 1992, RAICH e SCHLESINGER 1992). Apesar do solo da área coberta se apresentar ao final da

estação chuvosa mais seco, o solo da área testemunha, no tratamento descritivo, mostrou uma maior diminuição de umidade, ficando ao final da estação seca no mesmo nível de umidade que o solo da área coberta (Anexo 9.1). Portanto, a produção de CO_2 de dentro da parcela coberta pode estar influenciada, principalmente, pelo menor crescimento radicular e pela menor atividade metabólica das raízes, devido a menor disponibilidade de água. Também não descartamos uma menor atividade microbiana na decomposição da matéria orgânica da liteira como também no material orgânico do solo, bem como da diminuição do número de plantulas, devido ao sombreamento na área coberta (dados não quantificados).

4.3.3. Delineamento em Blocos

4.3.3.2. Umidade do solo

Para o acompanhamento da umidade do solo não foi possível fazer mensalmente, em amostras destrutivas, pois a retirada de amostras poderia interferir na estrutura do solo dentro da área de estudo (2 x 2 m). Entretanto, ao final do experimento, foram retiradas amostras de solo e colocado sensores de TDR seqüencialmente, dentro e fora da parcela.

Analisando a umidade superficial do solo, pelos dois métodos (TDR e gavimétrico) ao final do experimento, notamos uma nítida interferência da cobertura sobre os tratamentos (Tabela 7). As parcelas que não receberam água ficaram 8,3% mais seca e com um conteúdo de água volumétrica 10,8% menor em comparação a que foi colocado o total da água da chuva que chega ao chão da floresta. No tratamento que representa as condições normais não encontramos uma visível diferença entre o CAV dentro das parcelas e fora das parcelas (Tabela 7). Mostrando que, apesar da pequena área coberta, houve uma certa interferência local no conteúdo de água no solo apenas para os tratamentos de restrição da água da chuva.

Tabela 7. Conteúdo de água volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), umidade relativa do solo (%) e a diferença percentual da umidade gavimétrica da superfície do solo (20 cm de profundidade), dentro dos tratamentos de umidade de 100% (testemunha), 50% e 0% de água da chuva, ao final do experimento (Novembro/95).

<i>Tratamentos</i>	<i>Dentro da área coberta ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)</i>	<i>Fora da área coberta ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)</i>	<i>Umidade gavimétrica do solo (%)</i>	<i>Perda da umidade gavimétrica do solo em relação à testemunha (%)^b</i>
100% de água da chuva	0,125 (0,15) ^a	0,127 (0,02)	40,13 (1,42)	—
50% de água da chuva	0,116 (0,01)	0,137 (0,01)	37,85 (1,01)	5,68 mais seco
0% de água da chuva	0,111 (0,01)	0,124 (0,01)	36,81 (1,92)	8,26 mais seco

^a Os números em negrito correspondem as média ($n = 5$) e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média.

^b Perda da Umidade do solo (%) = $100 - [(Umidade\ Gavimétrica\ do\ solo\ a\ X\ \% \text{ de água da chuva} \times 100) / Umidade\ Gavimétrica\ do\ solo\ no\ tratamento\ de\ 100\% \text{ de água da chuva}]$.

4.3.3.2. Fluxo de CO_2

Através da análise estatística descrita acima (parcelas divididas), notamos que para as UEs que continham liteira houve um diferença significativa (ANOVA, $p < 0,01$) entre os tratamentos, ou seja, aqueles tratamentos que receberam menos água tiveram um fluxo significativamente menor do que o tratamento testemunha (Tabela 8, Anexo 9.3.1). Também encontramos uma variação significativa (ANOVA, $p < 0,01$) durante o tempo e ainda existiu uma interação significativa (ANOVA, $p < 0,05$) entre o tratamento e o tempo.

Entretanto, para as UEs que não continham liteira não foi encontrada uma variação significativa (ANOVA, $p > 0,05$) entre os tratamentos de umidade, bem como entre a interação entre tratamento e tempo (Tabela 8). Contudo, para as UEs que não continham liteira foi encontrada uma variação estatística significativa (ANOVA, $p < 0,01$) no fluxo de CO_2 em relação ao tempo

Tabela 8. Fluxo de CO_2 (g m^{-2}) mensal e total para o período seco, nas unidades experimentais com liteira e sem liteira dentro de tratamentos de umidade.

Meses	<i>Com Liteira</i>			<i>Sem Liteira</i>		
	T_1^a	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
junho	155,6(19,2) ^b	115,9(10,1)	149,1(14,1)	141,8(7,7)	113,9(14,3)	139,1(11,4)
julho	109,4(26,2)	116,2(13,0)	119,7(16,8)	113,9(25,9)	157,6(19,7)	140,1(25,9)
agosto	96,3(16,6)	98,3(19,4)	83,0(8,0)	82,5(17,7)	91,2(21,2)	100,9(31,4)
setembro	86,3(2,4)	64,2(9,5)	78,8(11,0)	103,7(26,7)	93,8(44,5)	59,1(16,6)
outubro	170,0(34,5)	130,3(18,7)	100,3(16,1)	129,7(19,8)	136,2(11,1)	121,9(15,6)
novembro	120,8(10,7)	74,5(5,2)	97,0(20,3)	89,7(8,1)	72,8(5,3)	88,0(17,7)
dezembro	134,9(33,5)	66,0(7,0)	102,4(23,0)	97,6(18,8)	88,2(11,7)	86,3(10,4)
Total ^c	873,3	665,4	730,3	758,9	753,7	735,4

^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 Os números em negrito correspondem as média e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média.

^c Corresponde a média do período seco (7 meses), sendo que para o mês de agosto foi feito uma extrapolação em relação aos meses de julho e setembro.

(Anexo 9.3.1). Estes resultados revelam que a diminuição da umidade dentro desta área de estudo acarreta principalmente numa diminuição da produção de gás carbônico relacionado à atividade de decomposição do material de liteira (Figura 9).

A cobertura plástica nos blocos, apesar da pequena área e do tempo relativamente curto do experimento (quando comparamos com a área descritiva), também parece ter provocado uma variação na umidade do solo, quando comparamos com a parcela maior (100 m^2). Contudo, a falta de acompanhamento detalhado da umidade do solo, expressa uma carência expressiva quando na tentativa de comparação dos dados dos blocos entre os tratamentos estudados. Todavia, admitindo-se que todas as parcelas dentro dos blocos se encontravam no mesmo estado de umidade quando do início do experimento, a umidade do solo superficial tendeu a variar entre os tratamentos, e o fluxo de CO_2 mostrou-se correlacionado com a precipitação, o que possibilitou fazer uma comparação estatística em relação ao tempo.

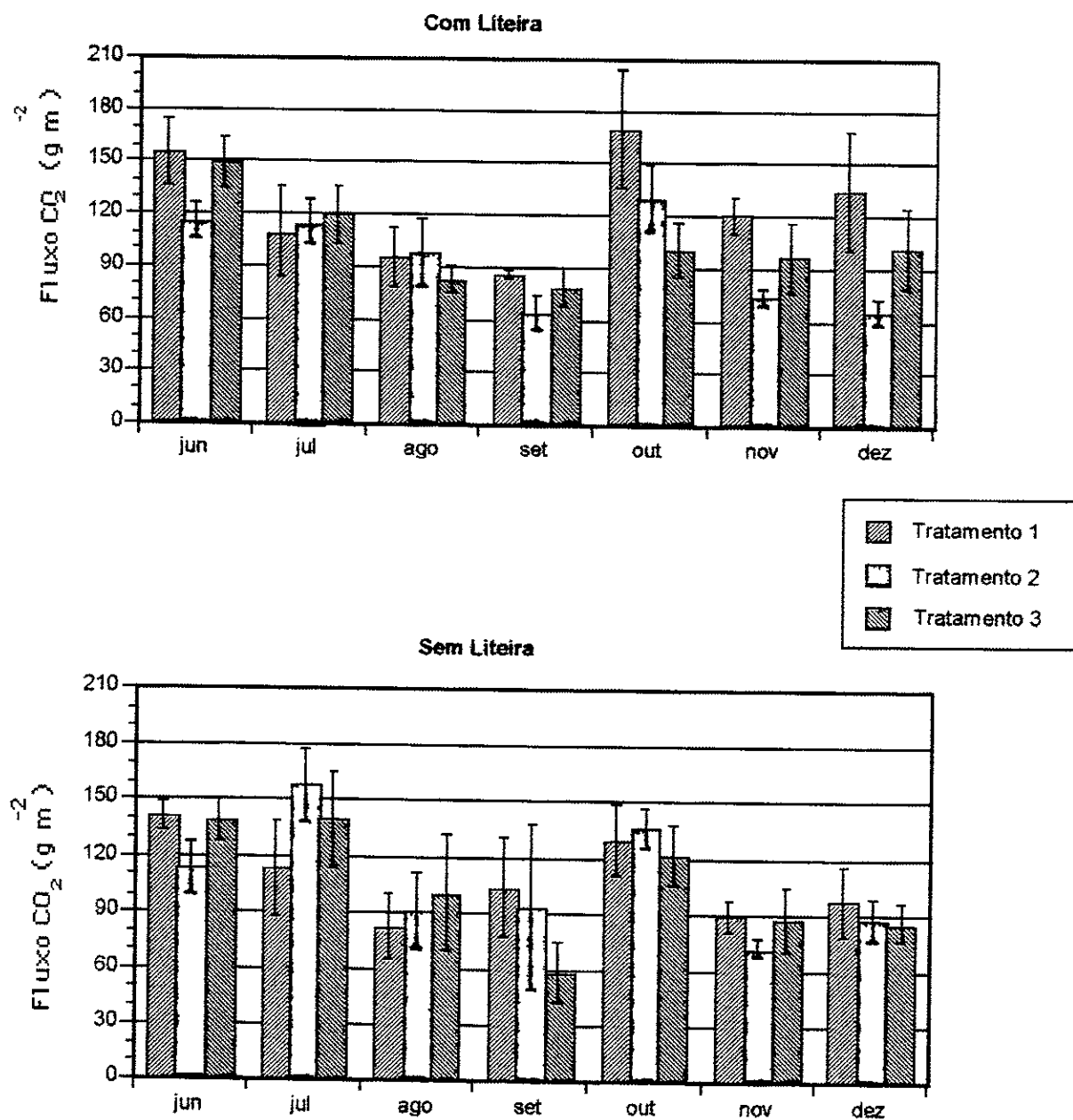


Figura 9. Fluxo superficial de CO₂ do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), submetido a tratamento de 100% da precipitação (Tratamento 1), 50% da precipitação (Tratamento 2) e 0% da precipitação (Tratamento 3), em unidades experimentais com littera e sem littera (Paragominas-Pa.).

DAVIDSON e TRUMBORE (1995) revelaram que o CO_2 produzido abaixo de 1 m de profundidade contribui com 20-30% do fluxo superficial médio de $240 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, para a época seca. Estes dados estão bem próximos dos apresentados em nosso trabalho ($220 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), para a mesma floresta. Entretanto, a produção média para os blocos com tratamento de 100% da água da chuva ($120 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) foi menor (perto de 50% menor) do que as descritas acima. Uma avaliação da variabilidade espacial feita nesta mesma floresta, por Verchot et al. (dados não publicados), mostra existir uma grande variação espacial dentro de uma área de 2.500 m^2 , a qual pode responder à esta expressiva diferença entre os resultados. Acreditamos que também se deve levar em conta a interferência da cobertura plástica sobre principalmente as trocas de umidade entre solo atmosfera, principalmente durante os períodos noturnos. Contudo esta interferência foi a mesma para todos os tratamentos.

Também DAVIDSON e TRUMBORE (1995) revelaram que 50-60% do fluxo superficial da floresta é proveniente da respiração das raízes. O maior incremento de carbono orgânico dentro do solo (devido à mortalidade das raízes), no tratamento de exclusão da chuva, parece não estar influenciando a concentração de CO_2 dentro do solo e conseqüentemente no fluxo superficial do solo. Isto parece estar bem relacionado com o menor crescimento de raízes, e uma menor atividade microbiana do solo e na camada de liteira.

Em nosso experimento a contribuição da camada de liteira para o fluxo de CO_2 do solo foi de aproximadamente 13% do fluxo total do solo para as condições que representaram as condições naturais, durante o período sazonal seco. A diminuição de umidade da liteira parece influenciar negativamente o fluxo de CO_2 (Figura 9). Estes resultados nos levam a pensar, primeiramente, em uma diminuição na atividade microbiana envolvida na decomposição da liteira, ou seja a produção de CO_2 proveniente da decomposição da liteira é extremamente afetada pela exclusão da chuva. Também quando o solo mineral seca parece haver uma maior mortalidade de raízes (Figura 5), e um menor crescimento destas (Figura 6), diminuindo a produção de CO_2 via respiração radicular e,

consequentemente, diminuindo a concentração de CO_2 no perfil do solo (Figura 8).

Entretanto, nossos experimentos em blocos revelam que, num primeiro momento, a diminuição na umidade do solo, não resultou em uma variação no fluxo de CO_2 provinda do solo mineral. Apenas o fluxo do solo contendo a camada de liteira respondeu positivamente a esta diminuição de umidade (Figura 9). Todavia, com o prolongamento da secagem do solo mineral (como ocorreu no tratamento de exclusão da chuva), alguns efeitos mais complexos, se evidenciam, incluindo morte de raízes e diminuição do metabolismo celular das raízes (diminuição do crescimento - Figura 6), com conseqüente queda na produção de CO_2 proveniente da respiração radicular. Também, como conseqüência do aumento de tecidos de raízes mortas (Figura 5), pode ocorrer um aumento na decomposição microbiana deste material, ocasionando um aumento na produção de CO_2 , via respiração microbiana. Talvez o menor tempo de secagem seja o motivo pelo qual não encontramos um efeito líquido no fluxo de CO_2 nos tratamentos de exclusão da chuva, quando retirando a camada de liteira. Contudo, um significado ecológico importante é que a exclusão da chuva resulta em uma redução na produção de CO_2 dentro do perfil do solo e da camada de liteira, provada estatisticamente pela análise dos blocos.

Portanto, na floresta de Paragominas uma diminuição nas chuvas pode resultar em uma diminuição no fluxo de CO_2 . Esta diminuição superficial do solo bem como da menor concentração de CO_2 dentro do perfil, parece ser principalmente devida a uma diminuição da atividade microbiana na decomposição do material orgânico, em conjunto a diminuição provinda da respiração das raízes e possivelmente da diminuição na fauna microbiana do solo.

Levando em consideração algumas possíveis tendências previstas por modelos, na modificação no padrão das chuvas e intensificação da sazonalidade nestes ecossistemas, podemos imaginar que uma possível

diminuição da umidade do solo neste ecossistema, poderá refletir em uma menor atividade das raízes e/ou de microorganismos do solo, com aumento da mortalidade e diminuição no crescimento das raízes.

Se esta tendência de intensificação da sazonalidade neste ecossistema se confirmar podemos, no futuro, considerar estes ecossistemas como uma “*bomba relógio de carbono*” para a atmosfera. Pois, imaginando uma reação em cadeia, a diminuição das chuvas poderá resultar em uma menor atividade radicular (menor crescimento e metabolismo), aumentar a mortalidade de raízes, podendo refletir em uma maior produção de liteira (perda de material de copa na época seca), devido à demanda evapotranspirativa. Se isto ocorrer, podemos esperar um possível aumento no acúmulo de liteira, intensificado pela diminuição da atividade microbiana na decomposição deste material. Se esta camada de liteira tornar-se mais seca, devido a diminuição do índice de área foliar e aumento da entrada de luz dentro do ecossistema, podendo chegar a níveis abaixo de 12% de umidade da liteira, podendo com isto aumentar expressivamente a entrada de fogo nestes ecossistemas (UHL e KAUFFMAN 1990), o que provocará a liberação de grande quantidade de CO_2 para atmosfera.

5. FLUXO DE ÓXIDO NITROSO E NÍTRICO DO SOLO

5.1. Introdução

Vários biomas apresentam uma marcante sazonalidade com distintos períodos secos e chuvosos os quais produzem variação na umidade do solo. Mesmo com uma expressiva sazonalidade e flutuação inter-anual no total das chuvas, principalmente pela ocorrência do fenômeno *El Niño* (*El Niño Southern Oscillation-ENSO*)¹¹, algumas florestas primária amazônica mantêm-se sempre verde por todo ano (NEPSTAD et al. 1994) e as folhas das copas ativas, em relação as demanda evapotranspirativa (JIPP et al. 1996). Para que isto ocorra atribui-se a existência de raízes profundas nestes ecossistemas (NEPSTAD et al. 1994).

Os solos são fontes biogênica muito importante de NO e N₂O para a atmosfera, principalmente em ecossistemas tropicais (MACELROY e WOFSY 1986, DAVIDSON 1991). As florestas tropicais têm uma maior abundância relativa de nitrogênio em comparação a outros biomas (VITOUSEK e SANFORD

¹¹ 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 e KILADIS 1992)

1986). Elevados pulsos de NO e N₂O foram observados em solo com baixa umidade relativa da floresta tropical seca após o umedecimento (DAVIDSON et al. 1991). Devido a sazonalidade das florestas tropicais e o grande tamanho de área ocupada, a emissão do solo de NO, o qual afeta regionalmente a química do ozônio na troposfera (LOGAN 1983), e de N₂O, que contribuem para o aquecimento global (LASHOF e AHUJA 1990, KHALIL e RASMUSSEN 1995) e destruição do ozônio na estratosfera (LOGAN 1983, CICERONE 1987, KHALIL 1995), parece ser fonte relevante para as mudanças climáticas regionais e globais (MATSON e VITOUSEK 1990, DAVIDSON 1992, KHALIL 1995).

Os microorganismos do solo produzem e consomem NO e N₂O (DAVIDSON e SCHIMMEL 1995), e são reconhecidas muitas fontes abiológicas e biológicas de NO e N₂O (Figura 10). Devido a isto, tem sido difícil a real identificação da fonte mais influente em cada condição do ecossistema. Para tanto, cabe a necessidade de definir algumas vias de produção para os ecossistemas (extraído de DAVIDSON e SCHIMMEL 1995 e DAVIDSON 1992) : Denitrificação: é resultante de uma respiração anaeróbica em bactérias, as quais promovem a redução do óxido de nitrogênio ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$), geralmente está ligado ao transporte de elétrons na fosforilação, dentro do processo de respiração e geração de ATP. É um importante processo heterotrófico¹² dentro do ciclo de N na biosfera, o qual usualmente utiliza carbono orgânico como fonte redutora. Muitos gêneros de bactérias (principalmente as *Pseudomonas*) são denitrificantes; a maioria são aeróbicas, as quais utilizam o O₂, quando este é disponível, como aceptor de elétrons, e quando a concentração do O₂ diminui, passam a utilizar óxidos de nitrogênio.

¹² Algumas bactérias e fungos heterotróficos oxidam organicamente tanto nitrogênio e /ou NH₄⁺.

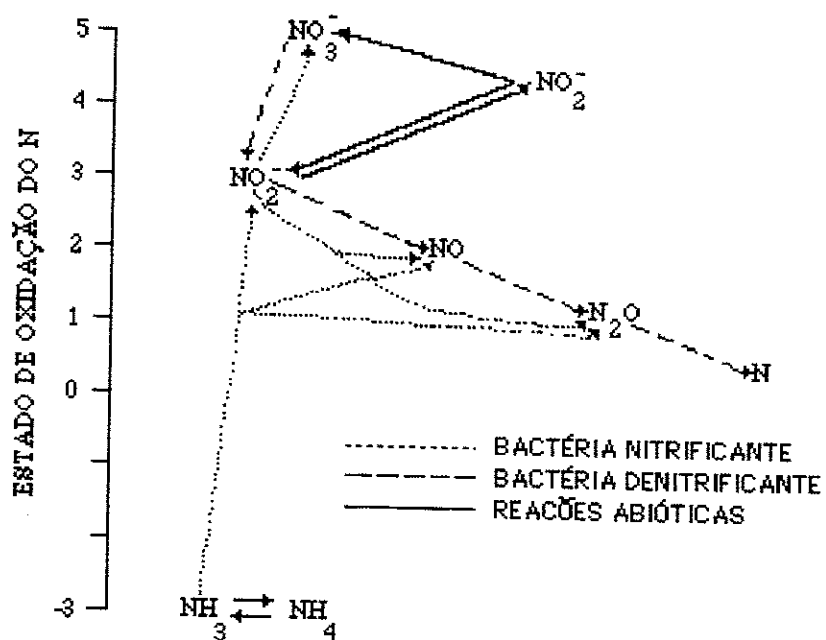


Figura 10. Processos biológicos da produção e consumo de NO e N_2O (Fonte: Davidson e Schinel 1995)

No geral, a denitrificação ocorre na falta ou na presença de pequena pressão parcial do O_2 , resultando na produção de NO , N_2O e N_2 . Também representa um processo biológico para consumo de NO e N_2O (DAVIDSON 1991).

Nitrificação: é a oxidação biológica das formas redutíveis de nitrogênio (NH_4^+) resultando em NO_2^- e NO_3^- . A maioria da nitrificação é realizada por bactérias quimioautotróficas (família das *Nitrobacteriaceae*), as quais obtêm energia desta oxidação, principalmente, do NH_4^+ para NO_2^- (gêneros *Nitrossomonas* e *Nitrospira*) e do NO_2^- para NO_3^- (gênero *Nitrobacter*). Também tem sido encontrado produção de NO e N_2O via produto secundário de nitrificação heterotrófica.

Quimiodenitrificação: a mais importante destas reações, é um conjunto de autodecomposição abiológica do HNO_2 , bem como de reações deste com grupos fenólicos da matéria orgânica do solo, os quais resultam na formação do NO e N_2O . O Nitrito (NO_2^-) do solo está envolvido neste processo devido ao equilíbrio existente entre NO_2^- e HNO_2 . Quimicamente é dependente do pH do solo, e tem uma razão de ocorrência em $pH < 5$ significativamente maior.

DAVIDSON (1992) sugere que se os processos biológicos requerem tempo para se restabelecer após passar por um período de estresse, e que fluxos de NO e N_2O , observados após períodos prolongados de seca, provavelmente são resultantes de processos abiológicos. Entretanto, evidências de fontes abiológicas não descartam a ocorrência de processos biológicos e nem a interação dos dois processos (DAVIDSON 1992). Dois mecanismos relativos a quantidade de água no solo são importantes para a regulação da nitrificação e denitrificação (DAVIDSON e SCHIMMEL 1995): *i*) o suprimento de substrato para os microorganismos, via difusão na película de água do solo; e *ii*) conteúdo de água nos poros, a qual tem um controle efetivo sobre a difusão dos gases dentro do solo e deste para a atmosfera.

Também, como já visto, a nitrificação como um processo oxidativo requer O_2 , entretanto, este se comporta como inibidor da denitrificação. DAVIDSON (1993) sugeriu que a nitrificação é uma fonte mais importante de NO

e N_2O do que a denitrificação quando WFPS^{13} (espaço dos poros ocupado por água, "Water-filled pore space") $< 60\%$, também quando $\text{WFPS} > 60\%$ a denitrificação parece ser a fonte mais importante de NO e N_2O . Este mesmo autor mostra que a razão de emissão de $\text{N}_2\text{O}:\text{NO}$ do solo foi < 1 quando $\text{WFPS} < 60\%$, e esta razão é > 1 quando $\text{WFPS} > 60\%$. Concluiu-se então que a produção de NO via nitrificação ou uma combinação de nitrificação e reações abiológicas são dominantes em solos secos, e quando estes solos atingem um conteúdo de umidade intermediário tanto NO como N_2O são produzidos por nitrificação e denitrificação e, finalmente, quando o solo fica em condições acima de uma umidade moderada a maioria de NO produzida é consumido antes de escapar do solo e N_2O 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 consumo do O_2 (PAPENDICK e CAMPEBELL 1981) e, com isto, uma variação na proporção de anaerobiose dentro do solo permite tanto nitrificação e denitrificação ocorrerem em diferentes microsítios (DAVIDSON 1992).

A diminuição da água no solo provoca a concentração de íons, incluindo H^+ e NO_2^- , num fino filme de água (BLACKEMER e CERRATO 1986, DAVIDSON 1991, HUTCHINSON e DAVIDSON 1993). A nitrificação ocorre em solo seco, ainda que em baixa proporção (VITOUSEK et al. 1989), e tanto H^+ e NO_2^- são produzidos por bactérias que oxidam o NH_4^+ (DAVIDSON 1991). Também, produção abiológica de NO pode ocorrer onde NO_2^- e H^+ estão concentrados em um fino filete de água perto dos locais de oxidação do NH_4^+ (BLACKEMER e CERRATO 1986, VITOUSEK et al. 1989, DAVIDSON e SCHIMMEL 1995).

Um modelo conceptual proposto por FIRESTONE e DAVIDSON (1989) demonstra três níveis da regulação da emissão do solo de NO e N_2O (

¹³ $\% \text{WFPS} = [100 * (\theta * \text{BD})] / [1 - (\text{BD}/\text{PD})]$, onde BD é densidade do solo (g de solo seco cm^{-3}), e PD é a densidade das partículas ($2,65 \text{ g}$ solo seco cm^{-3} para a maioria dos solos)

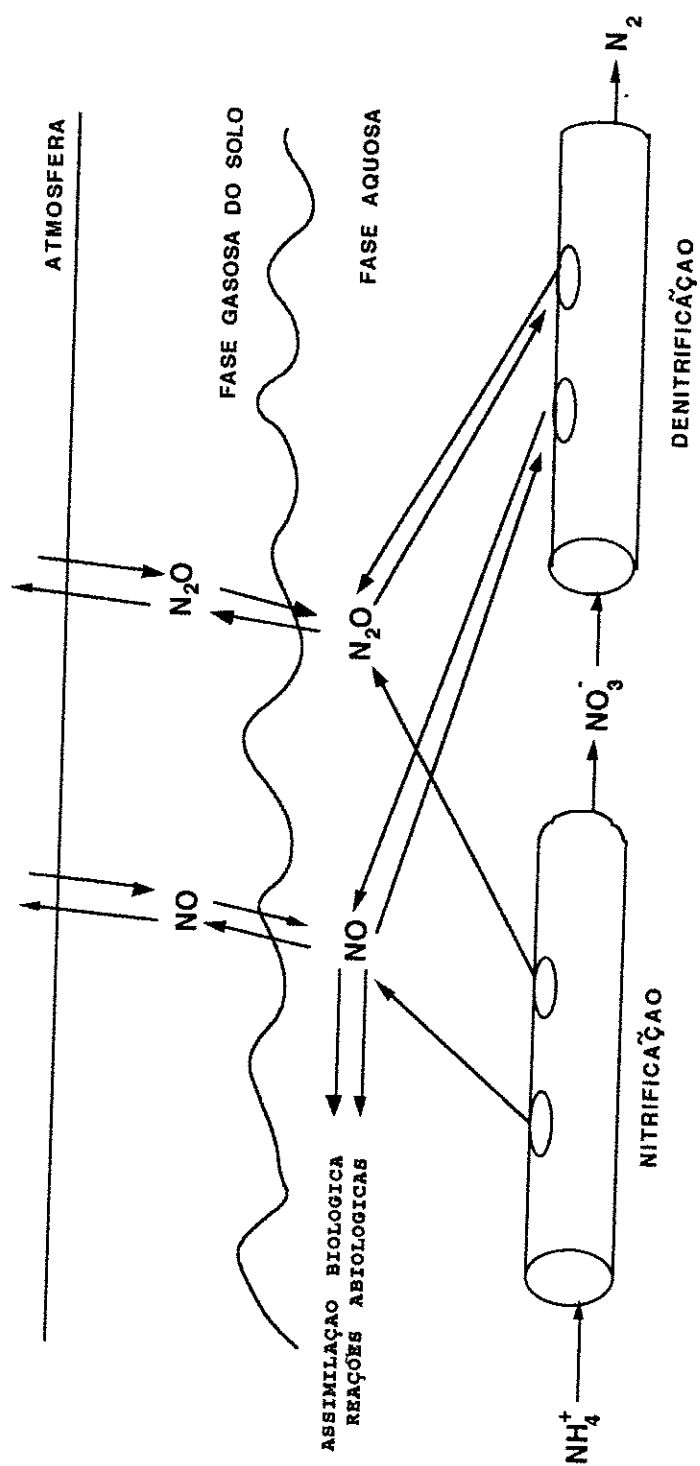


Figura 11. Três níveis de regulação do fluxo de NO e N₂O: (i) a razão de nitrificação e denitrificação; (ii) a razão do produto final; e (iii) difusão e consumo dos gases de N antes de sair do solo para a atmosfera.

representada pelo nitrogênio fluindo através dos dois canos; *ii*) os fatores que afetam o produto final destes processos, representada como o controle do tamanho dos tubos através do qual NO e N₂O escoam; e *iii*) os fatores que afetam a difusão destes gases no solo e o possível consumo depois de alcançando a superfície do solo.

Como já vimos, 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 N₂O (Davidson et al. 1991). Com isto nosso objetivo é tentar entender a dinâmica do fluxo de NO e N₂O, bem como da relativa proporção de variação em uma floresta tropical submetida a tratamento de intensificação da sazonalidade, investigando para isto o fluxo destes dois gases traçadores durante o período de menor índice pluviométrico. A nossa hipótese é que exista um fluxo diferencial entre os dois gases dentro dos tratamentos, com maior produção destes dois gases com a intensificação da sazonalidade em comparação à testemunha, e ainda, que a produção de NO seja comparativamente maior do que N₂O nos tratamentos.

5.2. Material e Métodos

5.2.1 Fluxo de NO e N₂O do solo

O fluxo superficial de NO e N₂O foi medido nos meses de junho a dezembro 1995 durante o estação seca. Cada local foi amostrado seqüencialmente, procurando ter a mesma 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 por VISTOUSEK et al. (1989). Os mesmos anéis para fluxo de CO₂ (descritos acima), fixos no solo numa profundidade de 2 a 3 cm, e uma tampa ventilada de PVC (10 cm de altura) foi utilizada para fazer uma

câmara de fluxo. O anel foi fechado com a tampa durante cada período de medição, o qual foi de aproximadamente 3 min para NO e 30 min para N₂O¹⁴. Primeiramente foi feita a medição de NO depois disto a tampa do anel foi retirada e iniciava, após alguns minutos, a medição do fluxo de N₂O (ou vice versa).

Para medição do fluxo de NO, uma circulação de ar $\approx 0,5 \text{ L min}^{-1}$ foi drenada da câmara ventilada de solo a qual estava ligada ao equipamento por duas mangueiras (promovendo um fluxo fechado). Este fluxo passou primeiramente por um controlador de fluxo, indo por uma mangueira especial, a qual se constitui de duas mangueiras. Uma externa, onde passa ar seco proveniente de uma câmara contendo sílica gel, e outra mais interna, a qual deixa passar apenas umidade do ar proveniente da câmara, tendo como finalidade secar o ar que entra no aparelho. Após a entrada do ar dentro do aparelho, este penetra em uma câmara contendo CrO₃ onde NO é oxidado para NO₂. O NO₂ foi detectado pela quimioluminescência, usando detector de NO₂ *Scintrex LMA-3*.

Para as medições do fluxo de N₂O, quatro amostras de gás, retiradas com seringas especiais (não possuem N₂O na sua constituição), de cada câmara com 10 min de intervalo, foram posteriormente injetadas no laboratório em um cromatógrafo com detector de captura de elétron (*"gas chromatograph with an electron capture detector"*). A razão de acumulação de NO e N₂O para cada câmara de solo foi calculada por um quadrado mínimo de uma regressão linear.

Para a amostragem do perfil, com objetivo de quantificar a concentração de N₂O, foi seguido o mesmo procedimento descrito para CO₂, e quantificado a concentração deste gás nas mesmas profundidades. Também, tanto para NO como para N₂O, utilizamos o mesmo desenho experimental descrito no estudo de CO₂.

¹⁴ Esta diferença de tempo para os dois gases se deve a maior sensibilidade de equipamentos para NO em relação ao N₂O. 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.

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1. Delineamento descritivo

5.3.1.1. Fluxo de NO

Em média o fluxo de NO durante o período sazonal seco (Anexo 9.4) foi, aproximadamente, 4 vezes maior para o tratamento de exclusão da chuva ($47,06 \text{ mg m}^{-2}$) em comparação à testemunha ($10,73 \text{ mg m}^{-2}$), havendo uma diferença estatística significativa (e Teste t , $p < 0,01$) entre os dois locais. Também existe uma variação estatística entre os meses dentro de cada tratamento (ANOVA, $p < 0,05$).

Os resultados apresentados acima sobre o CO_2 , tanto em relação ao fluxo superficial como a concentração no perfil do solo no tratamento de exclusão da chuva, mostraram existir uma queda na produção deste gás quando comparadas à testemunha. Admitindo-se que esta diminuição esteja correlacionada a uma diminuição no metabolismo de raízes e/ou, principalmente, a diminuição na atividade microbiana (da liteira e matéria orgânica do solo), em um primeiro momento, pode nos induzir, devido a possível menor atividade microbiana no tratamento de exclusão da chuva, a pensar que o excedente da produção de NO no tratamento de exclusão da chuva, comparativamente à testemunha, é proveniente de quimiodenitrificação, ou seja, de atividades abióticas.

Notamos que a diminuição da chuva e, conseqüentemente da umidade do solo (Figuras 3 e 4), acarreta em uma diminuição significativa (ANOVA, $p < 0,05$) na produção de NO do solo (Figura 12), observada nitidamente no tratamento de exclusão da chuva, contudo, na testemunha isto não ocorreu,. Apenas com o aumento das chuvas (Figura 3), após o período seco, mesmo não tendo observado um aumento na umidade do solo (Figura 4), foi observado um aumento no fluxo de NO (Figura 12).

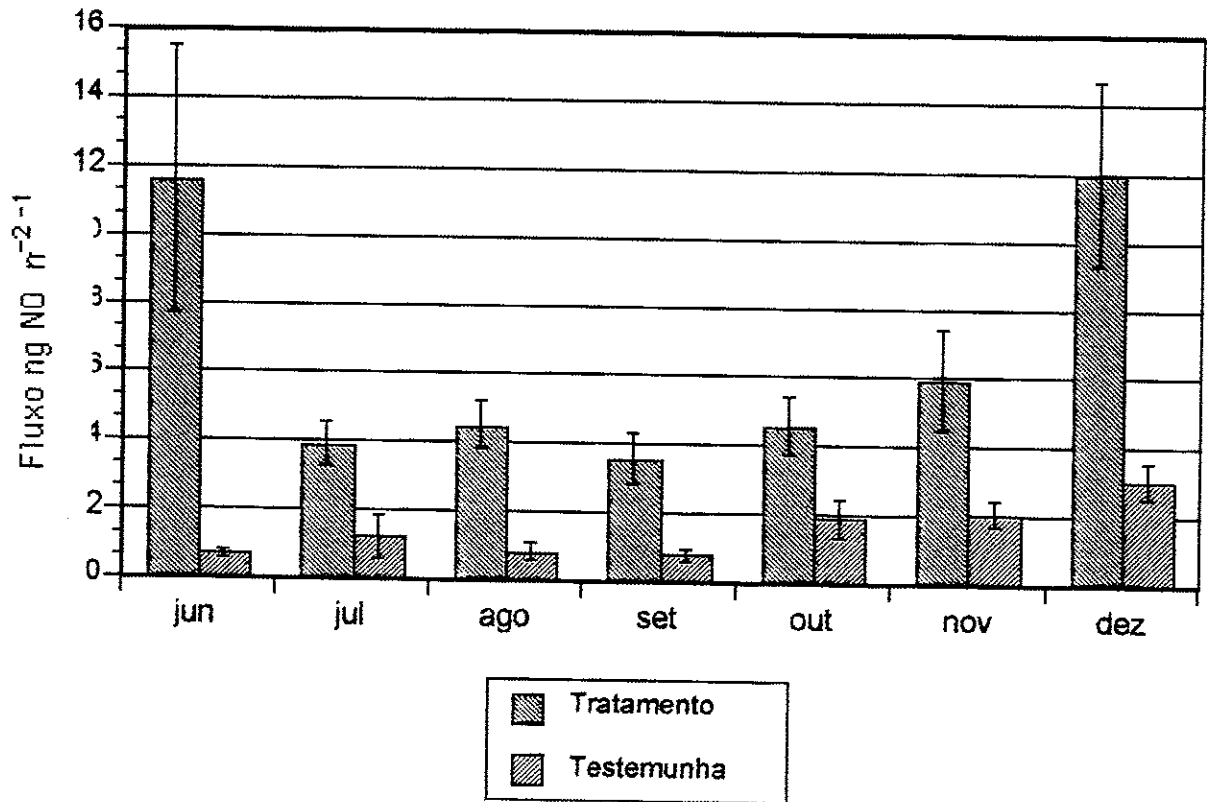


Figura 12. Fluxo superficial de NO do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

Pela análise da literatura, estudos em solos secos mostram ocorrer uma concentração de ions, H^+ e NO_2 em finos filmes de água (GARCIA-MENDES et al. 1991), e bactérias nitrificantes sobrevivem a solos extremamente secos (DAVIDSON et al. 1991). Com isto a nitrificação pode existir em solos secos em uma baixa razão, e tanto H^+ e NO_2 (N inorgânico) são produzidos a partir do NH_4^+ através de oxidação bacteriana (DAVIDSON et al. 1991). Este acúmulo de NO_2^- pode dar condições para uma produção biológica de NO perto dos locais de oxidação de NH_4^+ . Se o NO_2^- e H^+ são adsorvido pelas superfícies das argilas, uma forte produção de NO ocorre quando estes são desorvidos após

umidecimento (DAVIDSON 1991, 1992). Isto é devido ao consumo do N inorgânico ser limitado pelo reduzido crescimento microbiano e ausência da atividade metabólica das raízes das plantas. Quando o solo é molhado, a difusão não é rapidamente restabelecida e o N inorgânico acumulado torna-se repentinamente disponível para a atividade microbiana, resultando na formação de grandes pulsos de gás (DAVIDSON 1992).

Portanto, podemos imaginar também que devido ao solo da área do tratamento de exclusão da chuva estar relativamente mais seco, em comparação à testemunha, ocorre um maior acúmulo de N inorgânico e conseqüentemente um potencial maior para produção de NO. Com a diminuição da umidade, no decorrer do período seco, existe uma diminuição da atividade microbiana, acarretando em uma diminuição no processo de nitrificação. A partir do restabelecimento das chuvas (Figura 3) inicia-se um aumento na produção de NO (Figura 12), principalmente devido a um aumento na atividade microbiana. Também devido ao solo da parcela coberta estar mais seco do que da testemunha, a difusão de gás pode estar sendo facilitada dentro da parcela para a atmosfera.

5.3.1.2. Fluxo de N₂O

Em média o fluxo mensal de N₂O (Anexo 9.6), para o período de estudo, foi 5 vezes maior no tratamento de exclusão da chuva (56,97 mg m⁻²) em comparação com a testemunha (10,80 mg m⁻²), exibindo uma diferença significativa (Teste *t*, $p < 0,01$) entre os dois locais (Figura 13). Entretanto, não foi encontrada diferença estatística significativa (ANOVA, $p > 0,05$) entre os meses estudados para, cada local.

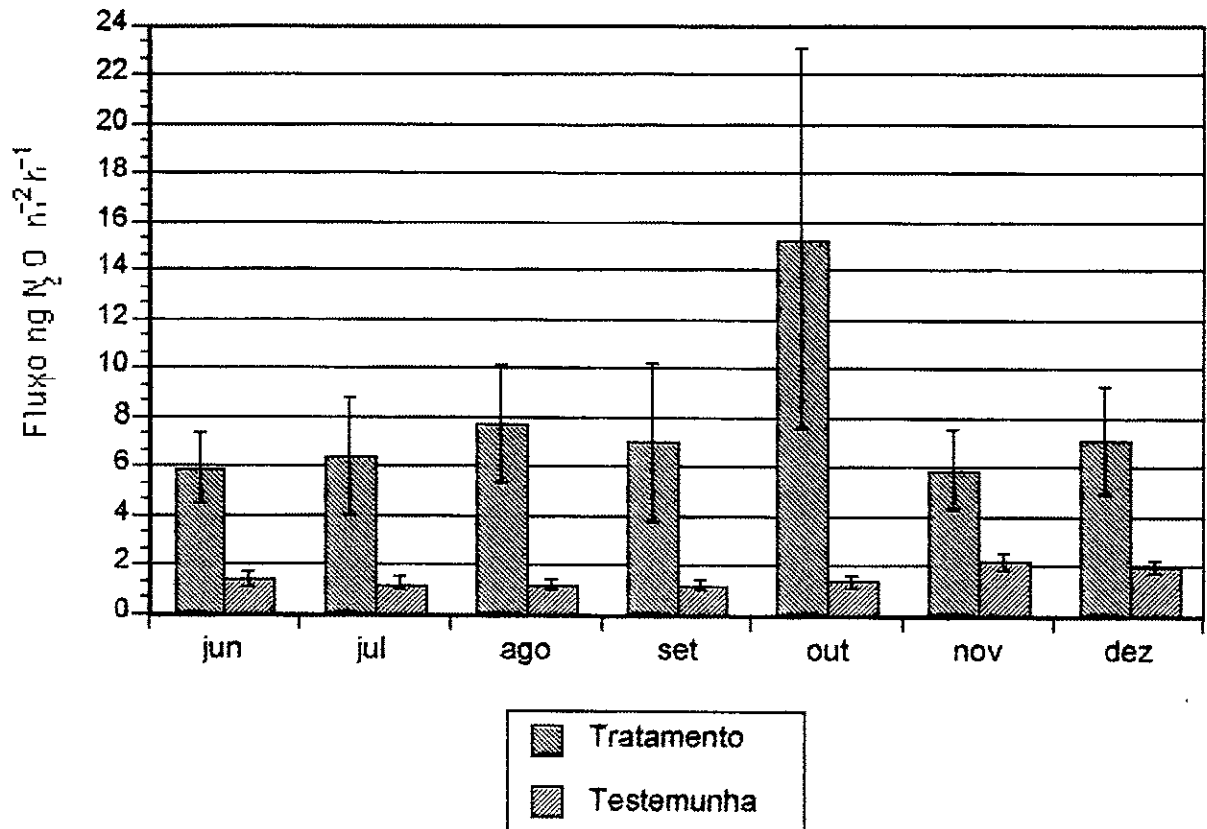


Figura 13. Fluxo superficial de N₂O do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

Quando analisamos os dados (Anexo 9.6), parece não existir uma tendência do fluxo de N₂O em relação a chuva, para o tratamento de exclusão da chuva. Contudo, na testemunha, o fluxo de N₂O parece diminuir com o decorrer do período seco até o mês de setembro (menor precipitação). A partir deste ponto ocorre um aumento do fluxo de N₂O, o qual parece estar relacionado com o aumento das chuvas. Isto indica que uma possível entrada da chuva no tratamento de exclusão da chuva, durante o período seco, não influenciou significativamente o fluxo de N₂O para a atmosfera. Entretanto, quando analisamos a testemunha, mesmo não tendo uma diferença significativa entre os meses, o fluxo de N₂O parece responder ao aumento da umidade (aumento da

chuva) após passar por um período seco, conforme descrito por DAVIDSON et al. (1993).

Considerando o mesmo critério usado na análise de NO em relação ao CAV do solo, o fluxo de N_2O no tratamento de exclusão da chuva não apresentou um padrão de diminuição no fluxo do solo com a diminuição da umidade do solo. Isto parece estar de acordo com DAVIDSON (1991), pois em solos moderadamente molhados, tanto nitrificação como denitrificação podem ser fontes biológicas de N_2O . Quando o solo seca a nitrificação passa a ser a fonte principal de N_2O .

A amostragem de N_2O do perfil¹⁵ (até 4 m de profundidade), ao final do período seco foi feita (Figura 14), revela que em média concentração de N_2O , 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 N_2O ficou 16% menor no tratamento de exclusão da chuva. Isto indica que existe uma maior concentração de N_2O em profundidade para o tratamento de exclusão da chuva, entretanto, a menor concentração relativa na camada superficial pode estar correlacionada a uma maior difusão para a atmosfera (conforme mostram 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, pode provocar um aumento na mineralização do Nitrogênio (NH_4^+), incentivando a atividade das bactérias nitrificantes e, com isto, resultar em uma maior produção de N_2O via nitrificação. Entretanto, não temos dados suficientes para afirmar que a maior produção de N_2O seja devido a fatores biológicos ou que fatores abióticos não estejam ocorrendo simultaneamente.

¹⁵ Mesma metodologia usada por Davidson e Trumbore (1995) para análise da concentração de CO_2 no perfil do solo.

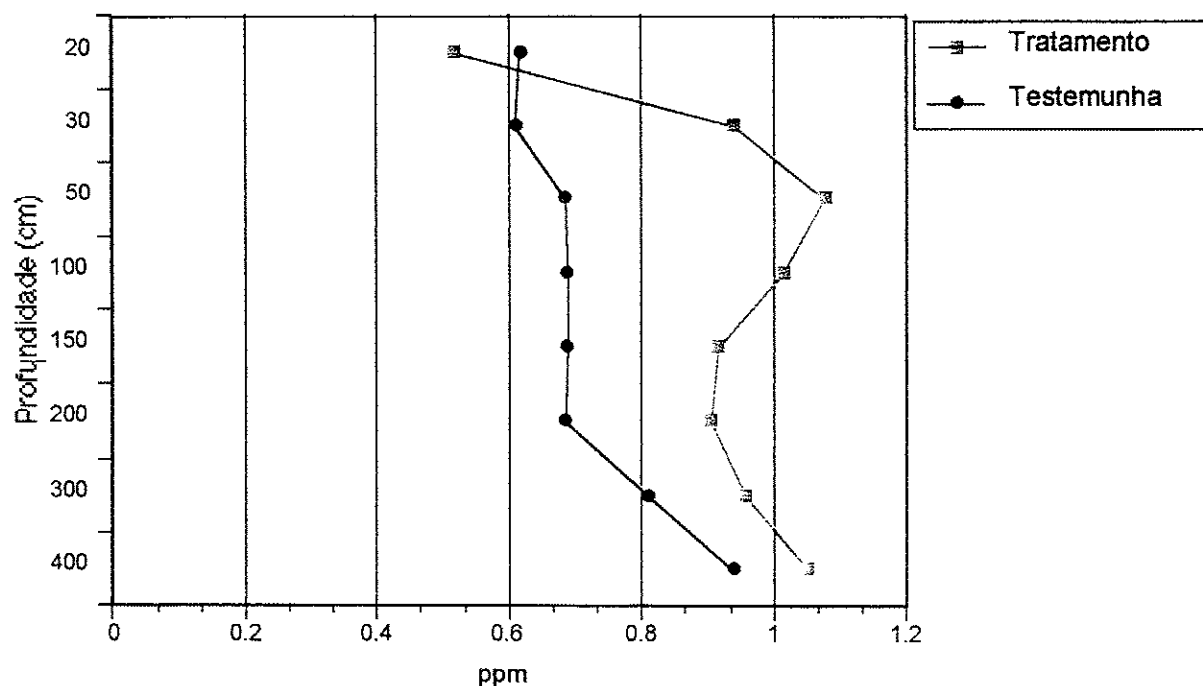


Figura 14. Concentração de N_2O no perfil do solo de uma floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

5.3.1.3. Relação entre o fluxo de $NO:N_2O$

A relação $NO:N_2O$ teve um comportamento estatisticamente diferenciado (Teste t , $p < 0,05$), nos quatro primeiros meses do estudo, entre o tratamento de restrição da água da chuva em comparação à testemunha (Figura 15). Esta relação (Anexo 9.8), para os dados mensais médios, foi sempre maior que um para o tratamento de exclusão da chuva, não havendo diferença significativa entre os meses (Teste t , $p < 0,05$). Entretanto, para a testemunha, esta relação é < 1 durante os meses de baixa precipitação (Anexo 9.8), e quando do aumento da precipitação, a relação $NO:N_2O$ torna-se > 1 , com uma diferença significativa entre o primeiro e derradeiro mês do período seco (Teste t , $p < 0,05$). Estes resultados estão de acordo com o que DAVIDSON (1993) discutiu em seu trabalho.

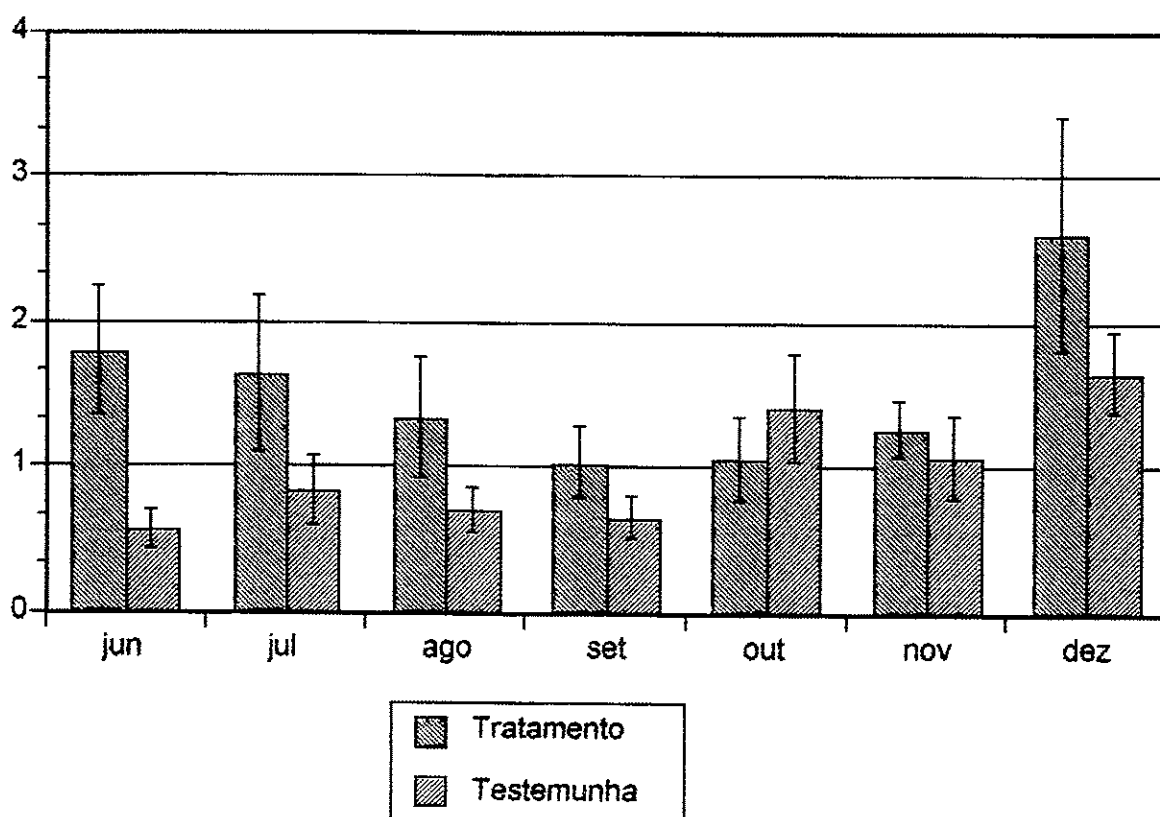


Figura 15. Relação NO:N₂O do fluxo superficial do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamento de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

DAVIDSON (1992), através de estudos de laboratório (utilizando C₂H₂ como inibidor), revela que após umedecimento de um solo que passou por um período seco, a maior produção de NO em comparação a N₂O esta ligada a uma maior atividade de bactérias nitrificantes e/ou a um aumento na produção de NO₂ através de processos abiológicos. Quando existe uma maior produção de N₂O do que NO, é geralmente associada a uma maior atividade denitrificante e talvez até a um consumo de NO pelos microorganismos do solo.

5.3.2. Delineamento em blocos

O mesmo teste estatístico para análise dos blocos para fluxo de CO_2 foi empregado para análise dos resultados de NO e N_2O , como também os mesmo dados de umidade de solo das parcelas. Entretanto, existe um fator importante a influenciar nos resultados deste delineamento experimental, ao qual devemos levar em consideração. Estudos feitos nestes locais por Davidson et al. (dados não publicados), 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, encontrou elevados pulsos de NO do solo seco após umedecimento (2 a 6 horas após 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.

5.3.2.1. Fluxo de NO

Em média o fluxo total de NO^{16} (Tabela 9), para o período de seca, nas UE que continham liteira, apresentou uma variação significativa (ANOVA, $p < 0,01$), entre os fluxos do T_2 ($147,016 \text{ mg m}^{-2}$) em comparação ao T_1 ($77,285 \text{ mg m}^{-2}$) e T_3 ($75,326 \text{ mg m}^{-2}$), respectivamente (Anexo 9.5.1). 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, $p <$

¹⁶ Considera fluxo total como a soma dos fluxos médios mensais

0,05), com um fluxo maior para o T_2 (191,4 mg m⁻²) em comparação ao T_3 (114,3 mg m⁻²) e T_1 (50,2 mg m⁻²), respectivamente (Anexo 9.5.2).

Tabela 9. Fluxo mensal de NO (ng cm⁻² h⁻¹) do solo de floresta tropical em unidades experimentais com liteira e sem liteira, dentro de três tratamentos de umidade^a.

Meses	<i>Com Liteira</i>			<i>Sem Liteira</i>		
	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)

^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 periodicamente por rega manual, dentro da parcela.

^b Os números em negrito correspondem as média mensal e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média.

Mensalmente ocorreu uma variação estatisticamente significativa (ANOVA, $p < 0,01$) no fluxo de NO (Figura 16), tanto para as UE que continham liteira (ANOVA, $p < 0,01$) como também para as UE que não continham este componente (Anexo 9.5), parecendo ter uma ligação ao comportamento pluviométrico (quantidade de água colocada) do período estudado (Figura 3). Também encontramos uma interação significativa (Anexo 9.5) 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, a qual corresponde a quantidade de chuva, naquele período.

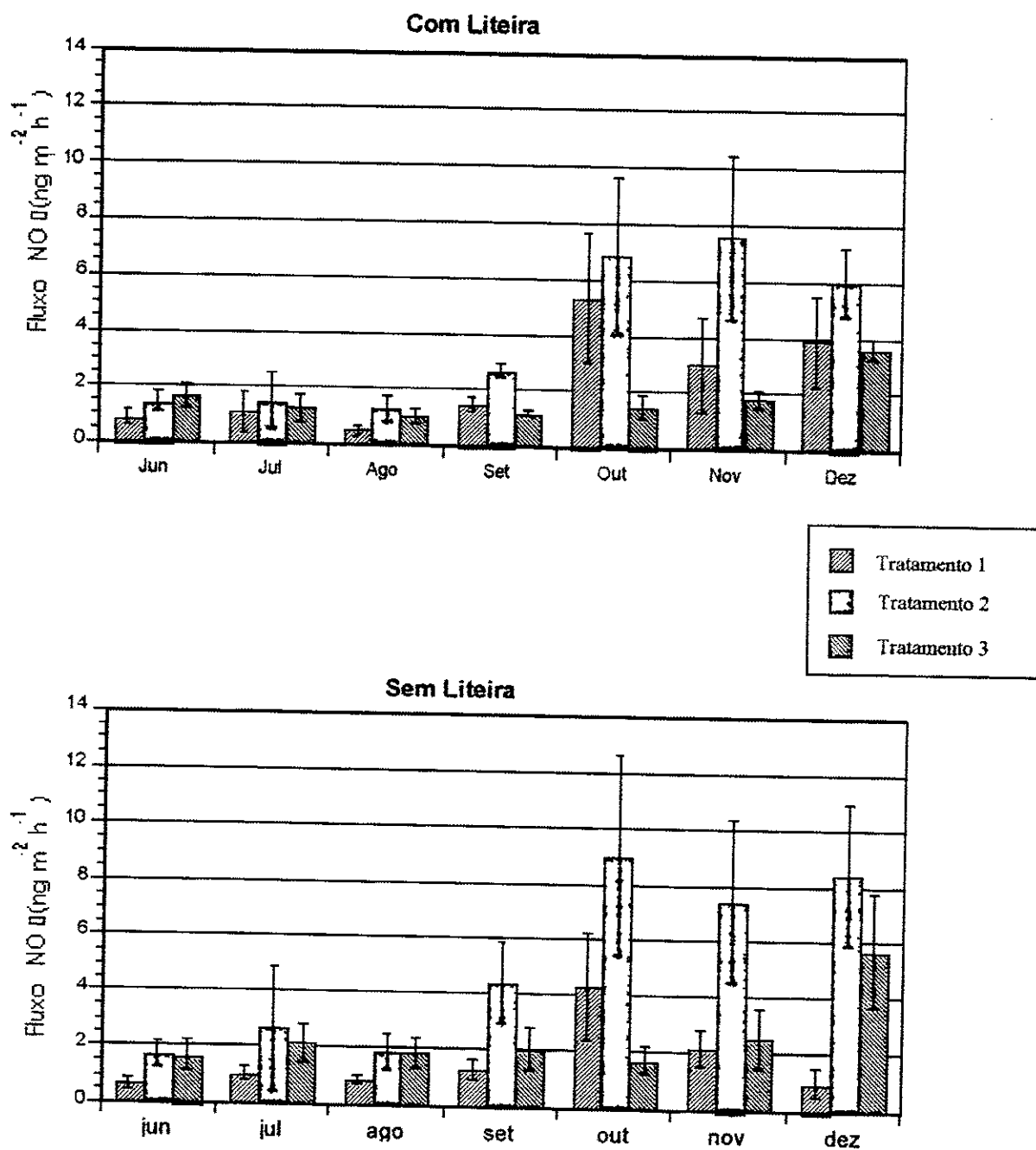


Figura 16. Fluxo superficial de NO do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), submetido à tratamento de 100% da precipitação (Tratamento 1), 50% da precipitação (Tratamento 2) e 0% da precipitação (Tratamento 3), em unidades experimentais com liteira e sem liteira (Paragominas-Pa.).

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 mostram que uma diminuição na quantidade de água pode provocar um aumento na produção de NO, confirmando o que foi observado quando na análise dos resultados da parcela maior de exclusão da chuva (*delineamento descritivo*).

Pode estar ocorrendo o que sugere DAVIDSON (1993), o qual revela que a diminuição da água no solo provoca uma concentração de íons, incluindo H^+ e NO_2^- , num fino filme de água (DAVIDSON 1991, HUTCHINSON e DAVIDSON 1993) e que esta concentração pode provocar um aumento da atividade microbiana e com isto a um aumento no fluxo de NO. Entretanto, isto não exclui uma possível influência de fontes abióticas no fluxo de NO do solo.

5.3.2.2. Fluxo de N_2O

O fluxo total médio de N_2O (Tabela 10), para as UE que continham liteira bem como para as UE que não continham liteira, não apresentaram diferença estatística (ANOVA, $p > 0,05$) entre os tratamentos (Anexo 9.7). Também não foi encontrada variação estatística significativa (ANOVA, $p > 0,05$) entre os meses dentro dos tratamentos (Figura 17), para as UE que continham liteira. Entretanto, para as UE que não continham este material, encontramos uma variação significativa (ANOVA, $p < 0,05$) no fluxo mensal de NO dentro dos tratamentos de umidade (Anexo 9.7.2). Não ocorreu interação significativa (ANOVA, $p > 0,05$) entre os tratamentos e os meses para as duas UE (Anexo 9.7).

Tabela 10. Fluxo mensal de N_2O ($ng\ cm^{-2}\ h^{-1}$) do solo de floresta tropical em unidades experimentais com liteira e sem liteira, dentro de três tratamentos de umidade^a.

Meses	<i>Com Liteira</i>			<i>Sem Liteira</i>		
	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)

^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 Os números em negrito correspondem as média mensal e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média.

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, parece não ter tido tempo suficiente (10 meses) para interferir no fluxo de N_2O do solo. Isto parece ser confirmado quando comparamos o fluxo mensal médio durante o período seco entre o tratamento de 100% de água da chuva (T_1) e à testemunha (condições naturais) e observamos 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 pode indicar que o tempo e/ou a área necessária para o tratamento não foi suficientes, ou ainda, não ocorreu uma mortalidade de raízes suficiente e com isto a quantidade de N-mineralizado não é suficiente para um aumento na produção de N_2O .

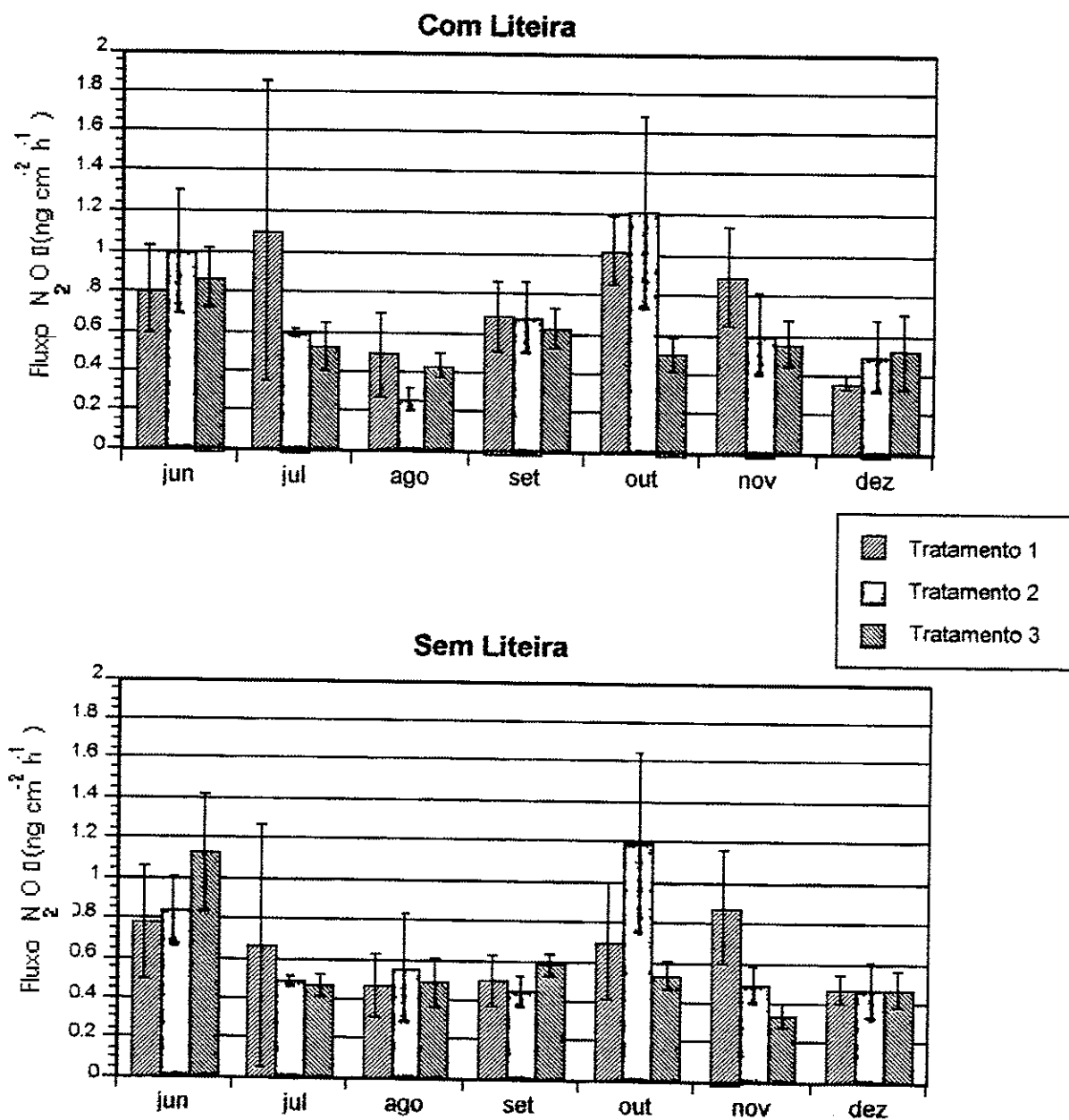


Figura 17. Fluxo superficial de N_2O do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), submetido à tratamento de 100% da precipitação (Tratamento 1), 50% da precipitação (Tratamento 2) e 0% da precipitação (Tratamento 3), em unidades experimentais com liteira e sem liteira (Paragominas-Pa.).

5.3.2.3. Relação entre o fluxo de NO:N₂O

Como já foi discutido anteriormente, notamos que a relação NO:N₂O em média > 1 (menos no T₁ sem liteira no mês de junho). para todos os tratamentos e meses estudados (Tabela 11), confirmando nossa hipótese de que a maior mortalidade de raízes encontrada no tratamento de exclusão da chuva, parece ter um papel importante nesta relação. Portanto, podemos interpretar pela análise dos dados, que a secagem do solo num primeiro momento parece interferir positivamente no fluxo de NO, provavelmente devido a diminuição na umidade do solo e aumento da difusibilidade bem como numa maior atividade de bactérias nitrificantes. A partir de um tempo de secagem maior, pode acarretar em um aumento na quantidade de matéria orgânica morta (aumento na biomassa de raízes mortas), isto pode interferir positivamente e mais intensamente na produção de N₂O, pelo aumento da mineralização do nitrogênio.

Tabela 11. Relação fluxo mensal de NO:N₂O do solo de floresta tropical em unidades experimentais com liteira e sem liteira, dentro de três tratamentos de umidade^a.

Meses	<i>Com Liteira</i>			<i>Sem Liteira</i>		
	<i>T₁</i>	<i>T₂</i>	<i>T₃</i>	<i>T₁</i>	<i>T₂</i>	<i>T₃</i>
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)

^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 Os números em negrito correspondem as média mensal e os números entre parênteses correspondem ao erro padrão da média.

Considerando a existência de uma interferência dentro do desenho estatístico utilizado por nós, em uma observação pessoal, acredito que o fluxo do solo para a atmosfera, tanto de NO como de N₂O, possuem uma dinâmica correlacionada com a precipitação (concordando com DAVIDSON 1992). Na

tentativa de padronizar a entrada de água dentro dos tratamentos de 100 e 50% de água de água da chuva, todas as parcelas foram cobertas com lona plástica, e a água foi colocada na forma de rega manual. Isto geralmente foi feito uma semana antes da leitura dos gases. Entretanto, no mês de outubro, a leitura foi feita no dia posterior à colocação da água, o que provocou uma súbita elevação do fluxo de NO.

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 (conforme DAVIDSON et al. 1991). Também, a menor produção de N₂O, 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. (dados não publicados) revela que a variabilidade do fluxo destes gases dentro desta floresta é muito grande e a diferença encontrada aqui entre os tratamentos de exclusão da chuva e o que representam as condições naturais (testemunha), por ser distantes uma da outra, pode ser reflexo desta variabilidade espacial.

Contudo, os nossos dados revelam que a diminuição das chuvas e/ou concentração da mesma pode provocar aumento no fluxo de NO e N₂O do solo, mesmo que para este último, necessite de um tempo maior de estresse, para que um aumento significativo do fluxo aconteça. Também nossos dados parecem confirmar uma maior dinâmica na produção do NO correlacionada com o comportamento de umidade do solo.

6. FLUXO DE METANO

6.1. Introdução

Estudos sobre o balanço global de CH_4 tem mostrado um importante aumento na atmosfera, em uma razão de 1% por ano na ultima década, e devido a isto tem aumentado sua importância na intensificação do efeito estufa (TYLER 1991, KHALIL e 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 e OREMLAND 1988, DUXBURY et al. 1993, KHALIL e RASMUSSEN 1995).

O principal consumo de metano da atmosfera, de um fluxo total (540 Tg ano^{-1}), é pela reação com OH (85%), produzindo CO_2 , H_2O , CO, H_2 e outros produtos intermediários (CICERONE e OREMLAND 1988, TYLER 1991). Aproximadamente, $60 \text{ Tg CH}_4 \text{ ano}^{-1}$ reage na estratosfera com $\text{O}(^1\text{D})$ e Cl (KHALIL e RASMUSSEN 1995). Contudo, existe um consumo adicional de metano por organismos do solo, oxidação bacteriana (SCHÜLTZ et al. 1990, TYLER 1991), de aproximadamente $5 \text{ a } 58 \text{ Tg CH}_4 \text{ ano}^{-1}$ (DÖRR et al. 1993) e, em uma estimativa mais recente, de $17 \text{ a } 23 \text{ Tg CH}_4 \text{ ano}^{-1}$ (POTTER et al. 1996). Solos de

florestas tropicais mostraram-se tanto como produtores como consumidores de CH_4 (KELLER et al. 1986) e com isto são um importante componente no balanço global deste gás (POTTER et al. 1996). Entretanto, as suas fontes e locais de consumo são pouco caracterizados (SCHÜLTZ et al. 1990), bem como o efeito da sazonalidade sobre a sua produção e o consumo (KELLER et al. 1990).

A produção de metano no solo por fontes biogênicas (metanogênese) é resultante de complexas e restritas reações bioquímicas envolvendo bactérias (*Archaeobacteria*), as quais são estritamente anaeróbicas¹⁷, durante a decomposição da matéria orgânica (CICERONE e OREMLAND 1988, BÉDARD e KNLOWLES 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 e OREMLAND 1988). Também pode ocorrer seu desenvolvimento em ambientes extremos, caracterizados por alta temperatura, hipersalinidade ou extremos de pH. Contudo os organismos se tornam ativos apenas em ambientes anóxicos (CICERONE e OREMLAND 1988). Vários fatores físicos, químicos e biológicos podem influenciar a fisiologia das bactéria metanogênicas e a ecologia dos ecossistemas anaeróbios e, portanto, influenciar na produção de metano (CICERONE e 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 e 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

¹⁷ requerem condições de redução para de desenvolverem

bactérias que oxidam amônia (família *Nitrobacteraceae*) podem oxidar metano (BÉDARD e 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 e 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, podendo induzir anaerobiose em alguns microsítios. Também, a retirada (oxidação) de CH_4 pelo solo é inibida por concentrações elevadas de NH_4^+ do solo (STEUDLER 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 2 enzimas microbianas: a) metano monooxigenase, encontrada em bactérias metanotróficas, e b) amônia monooxigenase encontrada em bactérias nitrificantes (BÉDARD e KNOWLES 1989). Bactérias nitrificantes podem oxidar CH_4 . Entretanto, são incapazes de se desenvolverem apenas com este elemento, e bactérias metanotróficas requerem unicamente CH_4 para se desenvolverem (DAVIDSON e SCHIMMEL 1995).

A produção de CH_4 em floresta tropical provavelmente é esporádica e deve ocorrer durante a estação chuvosa (DAVIDSON comunicação pessoal). Isto porque a alta razão de respiração do solo pode criar microsítios de anaerobiose, onde a metanogenese pode ocorrer. O solo da floresta quando está mais aerado, durante a estação seca, deve consumir metano. O nosso objetivo é saber o quanto muda o consumo de CH_4 em solo de floresta tropical quando da intensificação da sazonalidade. Nossa hipótese é que, com a diminuição da umidade do solo, aumente o consumo de metano atmosférico.

6.2. Material e Métodos

Foi utilizada a mesma metodologia descrita acima para estudo de N_2O , tanto no fluxo superficial como na amostragem da concentração no perfil do solo, entretanto, as amostras de gás retiradas no campo foram analisadas em cromatógrafo de gás com detector de ionização por chama (*"gas chromatography with a flame ionization detector"*). O mesmo intervalo de tempo de retirada das amostras, bem como o mesmo desenho experimental e análise estatística utilizado para estudo de N_2O foi usado para as medições de CH_4 .

6.3. Resultados e Discussão

6.3.1. Delineamento descritivo

6.3.1.1 Fluxo CH_4

Inesperadamente, em média, durante o período estudado, houve uma produção mensal de CH_4 (Anexo 9.9) dentro do tratamento de exclusão das chuvas ($58,3 \text{ mg m}^{-2}$), a qual foi significativamente maior (Teste t , $p < 0,05$) do que o consumo de CH_4 na testemunha ($-94,4 \text{ mg m}^{-2}$). Também, existiu uma variação significativa dentro de cada tratamento em relação aos meses de estudo (Teste t para testemunha $p < 0,05$ e exclusão da chuva $p < 0,01$). É interessante notar que durante o período sazonal seco, à diminuição das chuvas na testemunha provoca um aumento no consumo de metano pelo solo e à medida que, novamente, as chuvas vão se iniciando, o consumo de CH_4 começa a diminuir (Figura 18). Entretanto, no tratamento de exclusão da chuva, ao contrário do que era esperado, ocorreu uma produção deste gás (Figura 18), na maioria dos meses estudados.

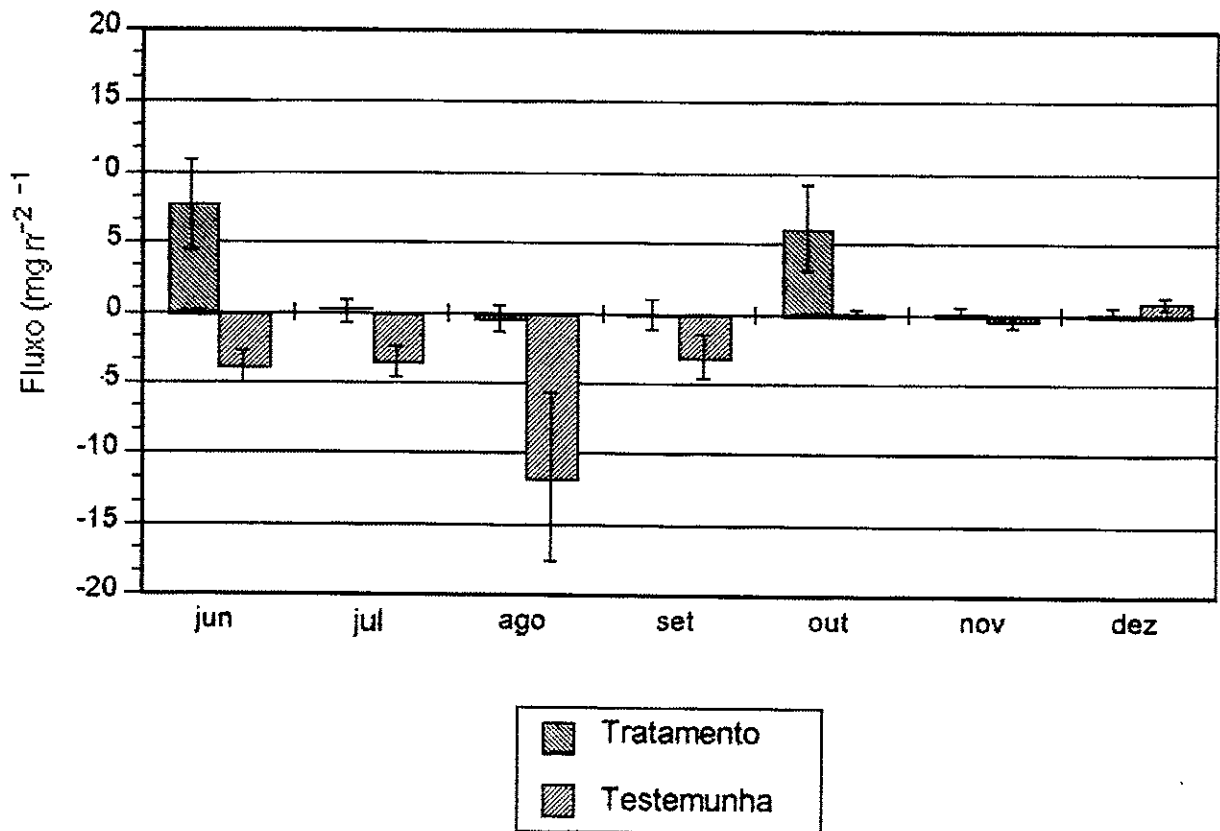


Figura 18. Fluxo superficial de CH_4 do solo de uma floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

Analisando o perfil do solo (Figura 19), notamos que a concentração de CH_4 não se altera para a testemunha, 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), num total de 4 metros estudados. Devido à concentração no perfil ser maior que a concentração atmosférica, parece existir uma produção deste gás em profundidade. Notamos também que por todo o perfil, a concentração de metano foi maior no tratamento de restrição de água da chuva em comparação ao testemunha (Figura 19).

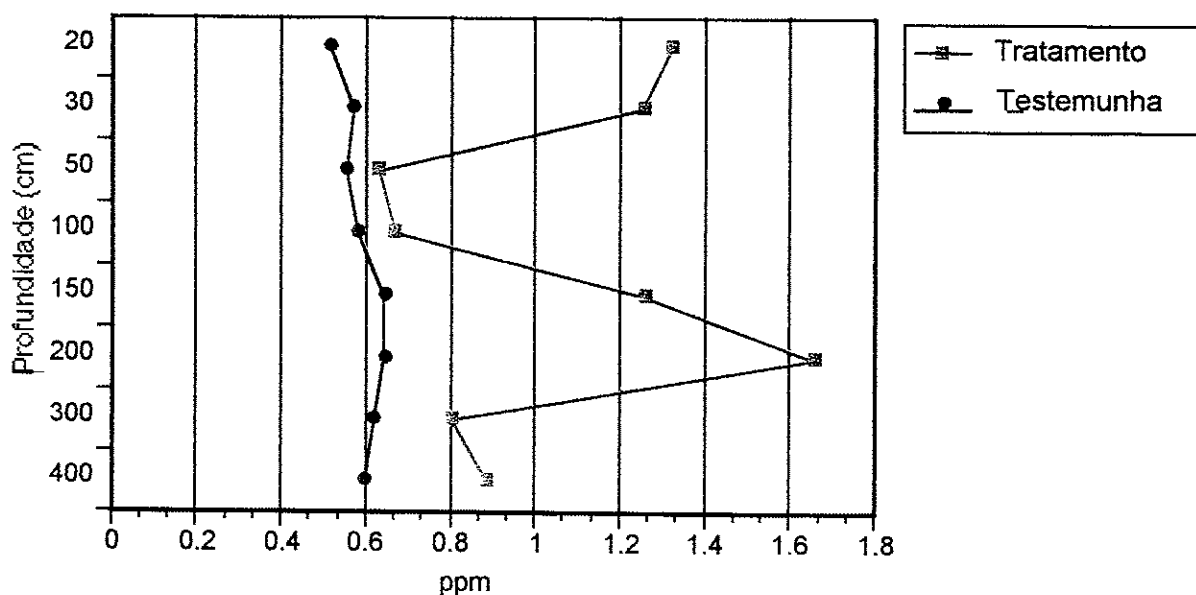


Figura 19. Concentração de CH_4 no perfil do solo de uma floresta tropical primária, durante o período sazonal seco (1995), nos tratamentos de exclusão da chuva e testemunha (Paragominas-Pa.).

Em trabalho citado por TYLER (1991), o metano emitido por cupins (térmita) varia de 2 Tg ano^{-1} a 150 Tg ano^{-1} . Devido a uma maior concentração de madeira morta, ocasionado pelo tipo de sustentação da cobertura utilizado para excluir a entrada de água na parcela (ver metodologia acima), bem como da alta taxa de mortalidade de raízes no solo, a produção 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 podemos falar sobre uma maior concentração, e até de uma produção deste gás em profundidade.

6.3.2 Delineamento em Blocos

6.3.1.1. Fluxo de CH₄

Em média mensal, o fluxo de CH₄ (Tabela 12), para o período de seca, nas UE que continham liteira, apresentou uma variação significativa (ANOVA, $p < 0,01$) entre os tratamentos de umidade (Anexo 9.10.1), com uma produção de metano para o T_3 (66,06 mg m⁻²) em comparação aos outros dois tratamentos nos quais encontramos um consumo de CH₄ ($T_1 = -96,96$ mg m⁻² e $T_3 = -78,20$ mg m⁻²). Também para as UE sem liteira, em média, o fluxo mensal de CH₄, para o período seco, apresentou uma variação estatisticamente significativa (ANOVA, $p < 0,05$) entre os tratamentos de umidade (Anexo 9.10.2). Seguindo o mesmo padrão das UEs que continham liteira, ou seja, em média houve uma maior produção de CH₄ para o tratamento com exclusão da água ($T_3 = 33,13$ mg m⁻²), sendo que nos outros tratamentos ocorreu um consumo deste da atmosfera pelo solo ($T_1 = -103,90$ mg m⁻² e $T_2 = -34,09$ mg m⁻²). Mensalmente (Figura 20) foi encontrada uma variação estatisticamente significativa (Anexo 9.10) para as UEs que continham liteira (ANOVA, $p = 0,05$), entretanto, não encontramos uma interação significativa (ANOVA, $p > 0,05$) entre os tratamentos e os meses.

Tabela 12. Fluxo de CH₄ (mg m⁻² d⁻¹) do solo de floresta tropical em unidades experimentais com liteira e sem liteira, dentro de três tratamentos de umidade^a.

Meses	<u>Com Liteira</u>			<u>Sem Liteira</u>		
	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)

^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 periodicamente por rega manual, dentro da parcela.

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

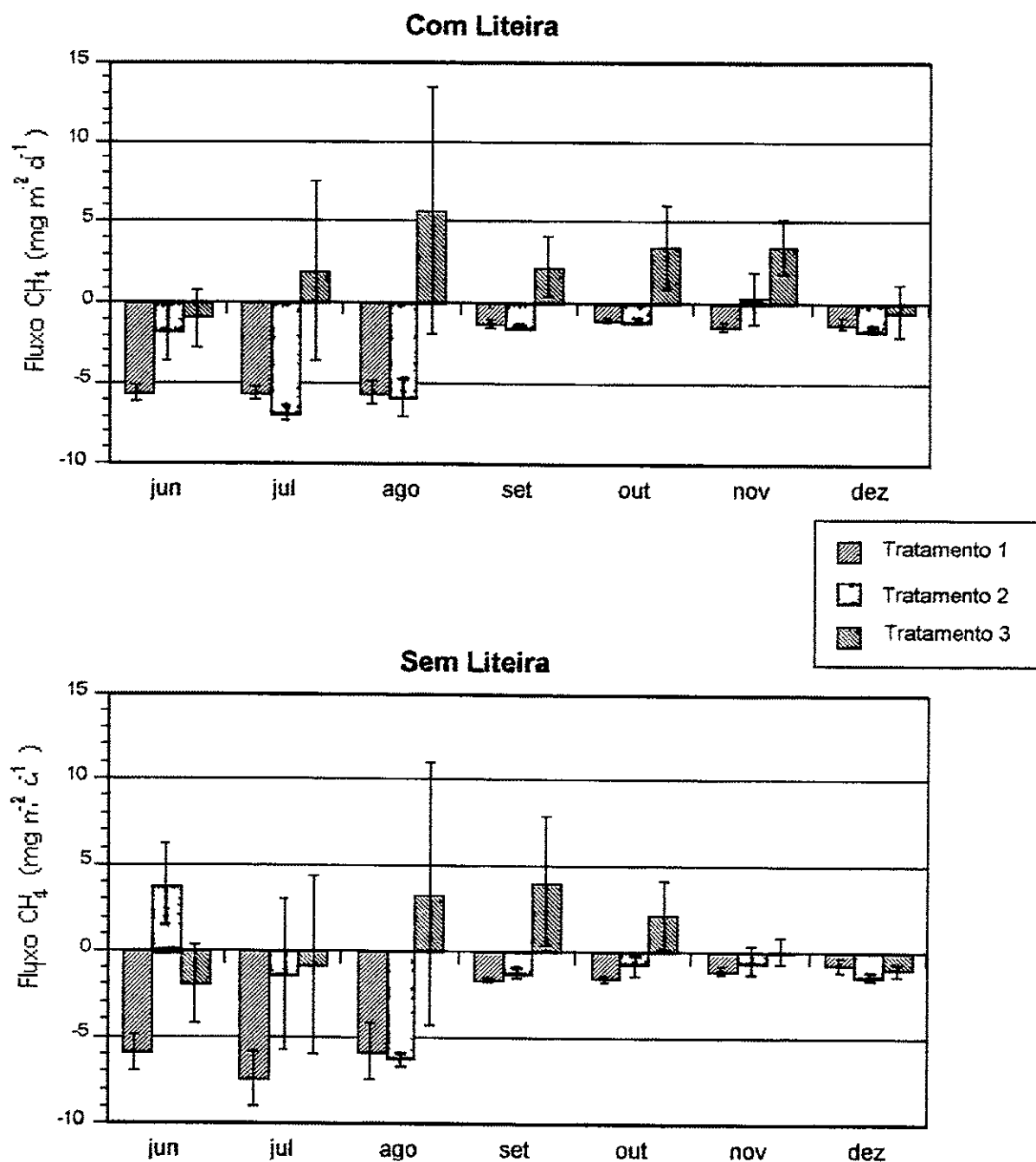


Figura 20. Fluxo superficial de CH_4 do solo de floresta primária, durante o período sazonal seco (1995), submetido à tratamento de 100% da precipitação (Tratamento 1), 50% da precipitação (Tratamento 2) e 0% da precipitação (Tratamento 3), em unidades experimentais com liteira e sem liteira (Paragominas-Pa.).

Parece não haver uma variação estatística entre as UEs que continham liteira e as UE que não continham estes elemento, tanto nos tratamentos em que ocorreu um consumo, bem como no tratamento (T_3) onde ocorreu uma produção de CH_4 . Estes resultados mostram que uma diminuição na quantidade de água pode alterar completamente 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 se manter o 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 (Figuras 18, 19 e 20). Também como pode ser observado no gráfico (Figura 20), a diminuição da umidade, pelos tratamentos (T_1 e T_2), provoca uma diminuição no consumo de CH_4 pelo solo.

Alguns fatores podem estar influenciando os resultados e não apenas um em específico. A diminuição da umidade pode provocar um aumento de material seco, e com isto, acarretar em um aumento do ataque de cupins. Isto fica fácil de se imaginar quando enfocamos o delineamento descritivo (10x10 m), devido à introdução de madeira seca na parcela, bem como da alta taxa de mortalidade de raízes no solo. 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, 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, como já discutido na análise dos gases nitrogenados, provavelmente no delineamento em blocos, parece que não tivemos tempo suficiente para fazermos tal afirmação.

Pela análise da literatura podemos supor 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 bactéria metanotróficas, ou seja exista uma expressiva 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 bactéria nitrificantes passem a dar preferência apenas para este elemento, o que pode provocar uma diminuição na oxidação do CH_4 (STEUDLER et al. 1989, MOSIER et al. 1991). Entretanto, para que exista um aumento na concentração de CH_4 dentro das UEs, conforme observado no perfil da parcela de exclusão da chuva, deve estar ocorrendo uma produção deste gás em profundidade (observado na análise do perfil, Figura 19).

Contudo, o que podemos realmente observar, 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 podem estar acontecendo simultaneamente. Para nós, 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 mudanças climáticas resultantes de uma possível diminuição na umidade do solo em floresta primária do leste amazônico.

7. CONCLUSÃO

Nossos dados mostram que a diminuição da umidade do solo na floresta de terra firme em Paragominas pode provocar:

1. Aumento na biomassa total de raízes mortas e diminuição do crescimento das raízes.
2. Diminuição do CO_2 no solo e conseqüente diminuição no fluxo deste gás para a atmosfera.
3. Um aumento no fluxo de NO e N_2O , como também uma maior concentração de N_2O no perfil do solo.
4. Uma diminuição no consumo do CH_4 atmosférico pelos microorganismos do solo e até uma possível produção deste gás.

Portanto, através destas evidências, podemos concluir que a diminuição da umidade nas florestas primárias semelhantes às de Paragominas, pode influenciar no clima regional, e, principalmente, nas mudanças globais do clima, com possível intensificação do “efeito estufa”.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADGER, W. N. e BROWN, K. 1994. **Land Use and Global Environmental Change: A Social Science Perspective**. John Wiley & Sons, New York. 271p.
- BÉDARD, C. e KNOWLES, R. 1989. Physiology, biochemistry, and specific inhibitors of CH_4 , NH_4^+ , and CO oxidation by methanotrophs and nitrifiers. **Microbiological Reviews**, **53**: 68-84.
- BLACKEMER, A. M. e CERRATO, M. E. 1986. Soil properties affecting formation of nitric oxide by chemical reaction of nitrite. **Soil Science Society America Journal**, **50**: 1215-1218.
- BLAKE, D. R. e ROWLAND, F. S. 1988. Continuing worldwide increase in tropospheric methane, 1978 to 1987. **Science**, **239**: 1129-1131.
- BRETHERTON, F. P.; BRYAN, K. e WOODS, J. D. 1990. Time-dependent greenhouse gas induced climate change. Em: J.T. HOUGHTON et al. (eds.), **Climate Change: The IPCC Scientific Assessment**. Cambridge Univ. Press, Cambridge. p. 179-193.
- BOWDEN, R. D.; NADELHOFFER, K. J.; BOONE, R. D.; MELILLO, J. M. e GARRISON, J. B. 1992. Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. **Canadian Journal. Forest Research**, **23**, 1402-1407.
- BROWN, S. e LUGO, A. E. 1992. Biomass of Brazilian Amazonian forest: the need for good science. **Interciencia** **17(4)**, 201-203.
- CICERONE, R. J. 1987. Changes in stratospheric ozone. **Science**, **237**, 35-42.
- CICERONE, R. J. e OREMLAND, R. S. 1988. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. **Global Biogeochemic Cycles** **2**, 299-327.

- DAVIDSON, E. A. 1991. Fluxes of Nitrous Oxide and Nitric Oxide from terrestrial ecosystems. Em J. E. ROGERS e W. B. WHITMAN (eds.), **Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides, and Halomethanes**. American Society for Microbiology, Washington. p. 219-235.
- DAVIDSON, E. A.; VITOUSEK, P. M.; MATSON, P. A.; RILEY, R.; GARCIA-MENDEZ, G. e MAASS, J. M. 1991. Soil emissions of nitric oxide in a seasonally dry tropical forest of Mexico. **Journal of Geophysical Research**, **96(D8)**, 15,439-15,445.
- DAVIDSON, E. A. 1992. Sources of Nitric Oxide and Nitrous Oxide following wetting of dry soil. **Soil Science Society of America Journal** **56(1)**, 95-102.
- DAVIDSON, E. A. 1993. Soil water content and the ratio of nitrous oxide to nitric oxide emitted from soil. Em R.S. OREMLAND (ed.), **The Biogeochemistry of Global Change: Radiatively Active Trace Gases**, Chapman & Hall, New York. p 369-386.
- DAVIDSON, E. A. e ACKERMAN, I. L. 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. **Biogeochemistry**, **20**:161-193.
- DAVIDSON, E. A.; MATSON, P. A.; VITOUSEK, P. M.; RILEY, R.; DUNKIN, K.; GARCIA-MENDEZ, G. e MAASS, J. M. 1993. Processes regulating soil emissions of NO and N₂O in a seasonally dry tropical forest. **Ecology** **74(1)**, 130-139.
- DAVIDSON, E. A. 1994. Climate change and soil microbial processes: secondary effects are hypothesized from better known interacting primary effects. Em M.D.A. ROUNSEVELL e P.J. LOVELAND (eds.); **Soil Responses to Climate Change**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. p 155-168.
- DAVIDSON, E. A. e SCHIMEL, J. P 1995. Microbial processes of production and consumption of nitric oxide, nitrous oxide and methane. Em P.A. MATSON e R.C. HARRISS (eds.), **Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water**. Blackwell Science, Oxford. p. 327-357.
- DAVIDSON, E. A. e TRUMBORE, S. E. 1995. Gas diffusivity and production of CO₂ in deep soils of the eastern Amazon. **Tellus** **47B**, 0-16.
- DIAZ, H. e KILADIS, G. N. 1992. Atmospheric teleconnections associated with the extreme phases of the Southern Oscillation. Em H.F. DIAZ e V. MARKGRAF (eds.), **El Niño, Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation**. p. 7-28.

- DÖRR, H., KATRUFF, L. e LEVIN, I. 1993. Soil texture parameterization of methane uptake in aerated soils. **Chemosphere**, **26**: 697-713.
- DUXBURY, J. M., HARPER, L. A. e MOSIER, A. R. 1993. Contributions of agroecosystems to global climate change. Em **Agriculture Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change**. ASA Special Publication, **55**. p. 1-18.
- EDWARDS, N. T. e SOLLINS, P. 1973. Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components. **Ecology**, **54**(2): 406-412.
- FEARNSIDE, P. M.; LEAL Jr., N. e FERNANDES, F. M. 1993. Rainforest burning and global carbon budget: biomass, combustion efficiency, and charcoal formation in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research**, **98**(D9): 16,733-16,743.
- FIRESTONE, M. K. e DAVIDSON, E. A. 1989. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. Em M.O. ANDREAE e D.S. SCHIMEL (eds.); **Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and Atmosphere**. John Wiley & Sons, Chichester, England. p. 7-21.
- FUNG, I. Y.; TUCKER, C. J. e PRENTICE, K. C. 1987. Application of advanced very high resolution radiometer vegetation index to study atmosphere-biosphere exchange of CO₂. **Journal of Geophysical Research** **93**(D3): 2,999-3,015.
- GARCÍA-MÉNDEZ, G., MAASS, J. M., MATSON, P. A. e VITOUSEK, P. M. 1991. Nitrogen transformations and nitrous oxide flux in a tropical deciduous forest in Mexico. **Oecologia**, **88**: 362-366.
- GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A. C.; MEIR, P.; MIRANDA, H. S.; NOBRE, C.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; MALHI, Y.; WRIGHT, I. e GASH, J. 1995. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992 to 1993. **Science**, **270**: 778-780.
- GUMPERTZ, M. L. e BROWNIE, C. 1992. Repeated measures in randomized block and split-plot experiments. **Canadian Journal of Forestry Research** **23**: 625-639.
- HANSON, P. J. ; WULLSCHLEGER, S. D.; BOHLMAN, S.A. e TODD, D. E. 1992. Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest. **Tree Physiology** **13**: 1-15.
- HICKS, C. R. 1973. **Fundamental Concepts in the Design of Experiments**. Holt, Rinehart and Winston, New York. 350 p.

- HOUGHTON, R. A.; BOONE, B. D.; FRULI, J. R.; HOBBIE, J. E.; MELILLO, J. M.; PALM, C. A.; PETERSON, B. J.; SHAVER, G. R. e WOODWILL, G. M. 1987. The flux the carbon from terrestrial ecosystems to the atmosphere in 1980 due to changes in land use: geographic distribution of global flux. **Tellus**, **316**, 617-620.
- HOUGHTON, J. T.; JENKINS, G. J. e EPHRAUMS, J. J. 1990. **Climate Change: The IPCC Assessment**. Cambridge/UK; Cambridge Univ. Press. 365 p.
- HUTCHINSON, G. L. e DAVIDSON, E. A. 1993. Processes for production and consumption of gaseous nitrogen oxides in soil. Em. R.D. Segoe e W.I. Madison (eds.), **Agriculture Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change**. American Society of Agronomy (Special Publication, **55**). p. 79-93.
- JIPP, P. H.; NEPSTAD, D. C. e CASSEL, D. K. 1996. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally-dry Amazonia. **Climatic Change** (submetido).
- JIPP, P. H. e NEPSTAD, D. C. 1993. Reduced deep soil water uptake through forest conversion to pasture in Amazonia. Publish in **Woods Hole Research Center**.
- KELLER, M., KAPLAN, W. A. e WOFSY, S. C. 1986. Emissions of N_2O , CH_4 and CO_2 from tropical soils. **Journal Geophysical Research**. **91**: 11791-11802.
- KELLER, M., MITRE, M. E. e STALLARD, R.F. (1990). Consumption of atmospheric methane in soils of central Panama: Effects of agricultural development. **Global Biogeochemical Cycles**, **4**: 21-27.
- KHALIL, M. A. K. e RASMUSSEM, R. A. 1994. Global Emissions of methane during the last several centuries. **Chemosphere**, **29(5)**: 833-842.
- KHALIL, M. A. K. 1995. **Greenhouse Gases in the Earth's Atmosphere**. Encyclopedia of Environmental Biology, Academic Press Inc. 265 p.
- KHALIL, M. A. K. e RASMUSSEM, R. A. 1995. The changing composition of the Earth's atmosphere. Em B. S. HANWANT (ed.), **Composition Chemistry, and Climate of the Atmosphere**. Van Nostrand Reinhold. p 50-87.
- KING, G. M. 1984. Utilization of hydrogen, acetate and "non-competitive" substrates by methanogenic bacteria in marine sediments. **Geomicrobiological Journal**, **3**: 275-306.
- KUMMEROW, J. 1980. Adaptation of roots in water-stressed native vegetation. Em N.C. TURNER e P. J. KRAMER (eds.), **Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress**, Wiley, New York. p. 57-73.

- LASHOF, D. A. e AHUJA, D. R. 1990. Relative contribution of greenhouse gas emissions to global warming. **Nature**, **344**, 529-531.
- LOGAN, J. 1983. Nitrogen oxides in the troposphere: global and regional budgets. **Journal Geophysics Research**, **88**: 10785-10807.
- MACELROY, M. B. e WOFSY, S. C. 1986. Tropical forest: interactions with the atmosphere. Em G. T. PRANCE (ed.), **Tropical Rain Forest and the World Atmosphere**, Westview, Boulder, Colo. p 33-60.
- MACKENZIE, F. T. 1995. Global climatic change: climatically important biogenic gases and Feedback's. Em G.M. WOODWELL e F. T. MACKENZIE (eds.), **Biotic Feedback's in the Global Climatic System: Will the Warming Feed the Warming?** Oxford University Press, New York.. p. 22-46.
- MARLAND, G. e ROTT, R. M. 1984. Carbon dioxide emissions from fossil fuels: a procedure for estimation and results from 1950-1982. **Tellus**, **36B**, 232-261.
- MATSON, P. A. e VITOUSEK, P. M. 1990. Ecosystem approach to a global nitrous oxide budget. **Bioscience**, **40**: 667-672.
- MATTOS, M. e UHL, C. 1994. Economical and ecological perspectives on ranching in the eastern Amazon. **World Development**, **22(2)**:145-158.
- MEDINA, E. 1983. Adaptations of tropical trees to moisture stress. Em F.B. GOLLER (ed.), **Tropical Rain Forest Ecosystems: Structure and Function**, Elsevier, Amsterdam. 340 p.
- MEREDITH, P. M. e STEHMAN, S. V. 1991. Repeated measures experiments in forestry: focus on analysis of response curves. **Canadian Journal of Forest Research**, **21**: 957-965.
- MITCHELL, J. F. B.; MANABE, S.; MELESHKO, V. e TOKIOKA, T. 1990. Equilibrium climate change and its implications for the future. Em J.T. HOUGHTON et al. (ed.), **Climate Change: The IPCC Scientific Assessment**. Cambridge Univ. Press, Cambridge. p. 137-164.
- MOORE, T. R. e KNOWLES, R. 1989. The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. **Canadian Journal of Soil Science**, **69**: 33-38.
- MOSIER, A., SCHIMEL, D., VALENTINE, D., BRONSON, K. e PARTON, W. 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. **Nature**, **350**: 330-332.
- MYERS, N. 1989. **Deforestation Rates in Tropical Forest and Their Climatic Implications**. Friends of the Earth, London. 116 p.

- NEPSTAD, D. C. 1989. **Forest Regrowth in Abandoned Pastures of Eastern Amazonia: Limitations to Tree Seedling Survival and Growth**. Tese de Doutorado, Yale University.
- NEPSTAD, D. C., UHL, C. e SERRÃO, E. A. 1991. Recuperation of a degraded Amazonian landscape: forest recovery and agricultural restoration. **Ambio**, **20**(6): 248-255.
- NEPSTAD, D. C.; 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. e VIEIRA, S. 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature**, **372**: 666-669.
- NEPSTAD, D. C.; JIPP, P.; MOUTINHO, P.; NEGREIROS, G. and VIEIRA, S. 1995. Forest redovery following pasture abandonmente in Amazonia: canopy seasonality, fire resistance and ants. Em Rapport et al. (ed.), **Evaluating and Monitoring the Health of Large-Scale Ecosystems**. Spring-Verlag, Berlin. p. 333-349.
- NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J. e SHUKLA, J. 1991. Amazonian deforestation and regional clime change. **Journal of Climate**, **4**: 957-988.
- NORMAN, J. M. e VERMA, R.G. 1992. Soil surface CO₂ fluxes and the carbon budget of a Grassland. **Journal of Geophysical Research**, **97**(D17): 18,845-18,853.
- ODUM, E. P. 1983. **Basic Ecology**. College Publishing. 434 p.
- PHILANDER, S. G. 1990. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation**. Academic Press, London. 293 p.
- POTTER, C. S., DAVIDSON, E. e VERCHOT, L. V. 1996. Estimation of global biogeochemical controls and seasonality in soil methane consumption. **Chemosphere** (in press).
- RAICH, J. W. e NADELHOFFER, K. J. 1989. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. **Ecology**, **70**:1346-1354.
- RAICH, J. W. e SCHLESINGER, W. H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**, **44**(B):81-99.
- RASMUSSEM, R. A. e KALIL, M. A. K. 1981. Atmospheric methane: trends and seasonal cycles. **Journal of Geophysical Research**, **86**: 9825-9832.
- REINERS, W. A. 1968. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests. **Ecology**, **49**(3): 471-483.

- RUNDEL, P. N. e BECKER, P. F. (in press). Seasonal plant water relations and vegetative phenology in the tropical forest understory of Barro Colorado Island, Panama. **Review Biological Tropical**.
- SALATI, E. 1985. The climatology and hydrology of Amazônia. Em G.T. PRANCE e T.E. LOVEJOY (eds.), **Key Environment's: Amazonia**. Pergamon Press, Oxford.
- SHARKOV, I. N. 1987. An improved absorption method for measuring CO₂ evolution from soil under field conditions. *Pochvovedeniye*, **Engl. Transl.**, 1: 127-133.
- SCHÜLTZ, H., SEILER, W. e RENNENBER, H. 1990. Soil and land use related sources and sinks of methane (CH₄) in the context of the global methane budget. Em A.F. BOUWMAN (ed.), **Soil and the Greenhouse Effect**, John Wiley and Sons, N. York. p. 269-288.
- SHUKLA, J.; NOBRE, C. A. e SELLERS, P. 1990. Amazon deforestation and climate change. **Science**, **247**: 1322-1325.
- SOMBROEK, W. G. 1986. Soil of the Amazon region. Ed. H. SIOLI, **The Amazon Basin: Landscape Ecology and Hydrology of a Mighty River**. p. 122-135.
- SOMBROEK, W. G.; NACHTERGAELE, F. O. e HEBEL, A. 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. **Ambio**, **22**: 417-426.
- STEELE, L. P.; FRASER, R. A.; RASMUSSEN, M. A. K.; KHALIL, T. J.; CONWAY, T. J.; CRAWFORD, A. J.; GAMMON, R. H.; GAMMON, R. H.; MASARIE, K. A. e THONING, K. W. 1987. The global distribution of methane in the troposphere. **Journal of Atmosphere Chemistry**, **5**: 125-171.
- STEUDLER, P. A., BOWDEN, R.D. , MELILLO J. M. e ABER, J. D. 1989. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. **Nature** **341**: 314-316.
- TRUMBORE, S. E.; DAVIDSON, E. A.; CAMARGO, P. B. DE; NEPSTAD, D.C. e MARTINELLI, L. A. 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, **9(4)**: 515-528.
- TYLER, S. C. 1991. The global methane budget. Em J.E. ROGERS e W.B. WHITMAN (eds.), **Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides, and Halomethanes**. American Society for Microbiology, Washington. p. 7-37.

- UHL, C. e VIEIRA, I. C. G. 1989. Ecological impacts of selective logging in the Brazilian Amazon: a case study from Paragominas Region of State of Pará. **Biotropica**, **21**(2): 98-106
- UHL, C. e KAUFFMAN, J. B. 1990. Deforestation effects on fire susceptibility and the potential response of tree species to fire in the rain forests of the eastern Amazon. **Ecology**, **71**:437-449.
- WATRIN, O. dos S. e ROCHA, A. M. A. da 1992. Levantamento da vegetação natural e do uso da terra no Município de Paragominas (PA) utilizando imagens de TM/LANDSAT. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/CPATU), **Boletim de Pesquisa**, 124, 40p.
- WOODWELL, G. M. 1989. The warming of the industrialized middle latitudes 1985-2050: causes and consequences. **Climatic Change**, **15**:31-50.
- WOODWELL, G. M. 1995. Biotic feedback's from the warming of the earth. Em G.M. WOODWELL e F.T. MACKENZIE (eds.), **Biotic Feedback's in the Global Climatic System: Will the Warming Feed the Warming?** Oxford University Press, New York. p. 3-21.
- VITOUSEK, P. M. e SANFORD, R. L. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forests. **Annual Review Ecological Systems**, **17**: 137-167.
- VITOUSEK, P. M.; MATSON, P. A.; VOLKMANN, C.; MAASS, J. M. e GARCIA, G. 1989. Nitrous oxide flux from dry tropical forests. **Global Biogeochemical Cycles**, **3**: 375-382.

9. ANEXOS

Anexo 9.1. Conteúdo de água volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em cinco profundidades para os tratamentos de exclusão da chuva e testemunha, ao final da estação chuvosa (abril/95) e fim da estação seca (novembro/95).

Profundidade (cm)	Conteúdo de água volumétrica (CAV) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
	<u>Exclusão da chuva</u>		<u>Testemunha</u>	
	abril/95	novembro/95	abril/95	novembro/95
30	0,190	0,136	0,297	0,190
50	0,271	0,196	0,302	0,179
100	0,261	0,210	0,324	0,220
200	0,235	0,215	0,300	0,206
300	0,190	0,180	0,272	0,198

Anexo 9.2. Fluxo de CO_2 (g m^{-2}) do solo de floresta tropical submetida a tratamento de exclusão da chuva e testemunha, e a precipitação (mm), mensal e total para o período seco.

Meses	<i>Exclusão da chuva</i> (g m^{-2})	<i>Testemunha</i> (g m^{-2})	<i>Precipitação</i> (mm)
junho	113,0 (10,8)	142,6 (2,2)	20,0
julho	89,3 (8,2)	115,3 (15,6)	10,0
agosto	<i>NA^a</i>	<i>NA</i>	12,0
setembro	82,1 (10,8)	90,7 (8,6)	19,0
outubro	126,5 (14,9)	219,5 (22,3)	54,6
novembro	77,8 (10,8)	165,6 (10,1)	111,0
dezembro	97,5 (11,2)	235,1 (26,0)	51,8
Total ^b	671,9	1071,5	278,4

^aNA→ Não houve amostragem devido à quebra do aparelho.

^bCorresponde a soma do período sazonal (7 meses), sendo que para o mês de agosto foi feito uma extrapolação em relação aos meses de julho e setembro.

9.3. Análise Split-unit para fluxo de CO₂.

Anexo 9.3.1. Resultados do teste ANOVA para análise "split-unit" para o fluxo de CO₂ nas unidades experimentais com liteira em relação aos tratamentos de umidade.

Fonte de variação	GL	QM	F
Bloco	3	0,877E-2	5,589 *
Tratamento	2	0,197E-1	12,548 **
<i>erro a</i>	6	0,123E-2	
Tempo	6	0,161E-1	10,234 **
Tempo*Tratamento	12	0,351E-2	2,240 *
<i>erro b</i>	36	0,157E-2	

Anexo 9.3.2. Resultados do teste ANOVA para análise "split-unit" para o fluxo de CO₂ nas unidades experimentais sem liteira em relação aos tratamentos de umidade.

Fonte de variação	GL	QM	F
Bloco	3	0,444E-2	4,361 *
Tratamento	2	0,277E-3	0,273
<i>erro a</i>	6	0,169E-2	
Tempo	6	0,183E-1	17,983 **
Tempo*Tratamento	12	0,164E-2	1,609
<i>erro b</i>	36	0,102E-2	

Anexo 9.4. Fluxo mensal de NO ($\text{ng cm}^{-2} \text{h}^{-1}$) do solo de floresta tropical, submetido a tratamento de exclusão da chuva e testemunha, e a precipitação mensal (mm) para o período seco.

Meses	<i>Exclusão da Chuva</i>	<i>Testemunha</i>	<i>Chuva</i>
junho	11,58 (3,91) ^a	0,68 (0,13)	20,0
julho	3,87 (0,65)	1,22 (0,63)	10,0
agosto	4,43 (0,71)	0,82 (0,25)	12,0
setembro	3,50 (0,74)	0,76 (0,17)	19,0
outubro	4,52 (0,87)	1,87 (0,56)	54,6
novembro	5,91 (1,47)	2,05 (0,37)	111,0
dezembro	11,94 (2,67)	3,02 (0,51)	51,8

^aCorresponde ao fluxo mensal médio e o respectivo erro padrão da média (entre parêntese).

9.5. Análise Split-unit para fluxo de NO.

Anexo 9.5.1. Resultados do teste ANOVA para análise "split-unit" para o fluxo de NO nas unidades experimentais com liteira em relação aos tratamentos de umidade.

Fonte de variação	GL	QM	F
Bloco	3	8,316	3,371 *
Tratamento	2	23,375	9,474 **
erro a	6	0,685	
Tempo	5	35,293	14,304 **
Tempo*Tratamento	10	5,921	2,400 *
erro b	30	2,467	

Anexo 9.5.2. Resultados do teste ANOVA para análise "split-unit" para o fluxo de NO nas unidades experimentais sem liteira em relação aos tratamentos de umidade.

Fonte de variação	GL	QM	F
Bloco	3	24,886	6,361 **
Tratamento	2	61,579	15,740 **
erro a	6	11,922	
Tempo	5	22,676	5,796 **
Tempo*Tratamento	10	8,896	2,274 *
erro b	30	3,912	

Anexo 9.6. Fluxo de N_2O ($\text{ng cm}^{-2} \text{h}^{-1}$) do solo de floresta tropical, submetida a tratamento de exclusão da água da chuva e testemunha, comparando ao total da chuva (mm) mensal durante o período seco.

Meses	<i>Exclusão da Chuva</i>	<i>Testemunha</i>	<i>Chuva</i>
junho	5,92 (1,47) ^a	1,38 (0,28)	20,0
julho	6,39 (2,44)	1,24 (0,25)	10,0
agosto	7,72 (2,43)	1,17 (0,20)	12,0
setembro	7,04 (3,23)	1,21 (0,19)	19,0
outubro	15,29 (7,74)	1,35 (0,25)	54,6
novembro	5,91 (1,63)	2,18 (0,36)	111,0
dezembro	7,12 (2,21)	1,97 (0,28)	51,8

^aCorresponde a média mensal com o respectivo erro padrão (entre parêntese), durante o período seco.

9.7. Análise Split-unit para fluxo de N_2O .

Anexo 9.7.1. Resultados do teste ANOVA para análise "split-unit" para o fluxo de N_2O nas unidades experimentais com liteira em relação aos tratamentos de umidade.

Fonte de variação	GL	QM	F
Bloco	3	0,403	4,254 *
Tratamento	2	0,158	1,687
<i>erro a</i>	6	0,224	
Tempo	5	0,396	4,182 **
Tempo*Tratamento	10	0,131	1,382
<i>erro b</i>	30	0,947E-1	

Anexo 9.7.2. Resultados do teste ANOVA para análise "split-unit" para o fluxo de N_2O nas unidades experimentais sem liteira em relação aos tratamentos de umidade.

Fonte de variação	GL	QM	F
Bloco	3	0,341	2,749
Tratamento	2	0,883E-1	0,712
<i>erro a</i>	6	0,911E-1	
Tempo	5	0,330	2,657 *
Tempo*Tratamento	10	0,109	0,879
<i>erro b</i>	30	0,121	

Anexo 9.8. Relação NO:N₂O do fluxo do solo de floresta tropical, submetida a tratamento de exclusão da chuva e testemunha, e total da chuva (mm) mensal durante o período seco.

Meses	<i>Exclusão da Chuva</i>	<i>Testemunha</i>	<i>Chuva</i>
junho	1,79 (0,45) ^a	0,57 (0,14)	20,0
julho	1,63 (0,55)	0,83 (0,24)	10,0
agosto	1,33 (0,42)	0,70 (0,15)	12,0
setembro	1,03 (0,25)	0,65 (0,14)	19,0
outubro	1,06 (0,29)	1,42 (0,38)	54,6
novembro	1,26 (0,20)	1,08 (0,29)	111,0
dezembro	2,60 (0,80)	1,66 (0,29)	51,8

^aCorresponde a média mensal com o respectivo erro padrão (entre parêntese), durante o período seco.

Anexo 9.9. Fluxo mensal de CH₄ (mg m⁻² d⁻¹) do solo de floresta tropical, submetido a tratamento de exclusão da chuva e testemunha, e precipitação mensal (mm), para o período seco.

Meses	<i>Exclusão da Chuva</i>	<i>Testemunha</i>	<i>Chuva</i>
junho	7,678 (3,174) ^a	-3,960 (1,088)	20,0
julho	-0,005 (0,791)	-3,504 (1,091)	10,0
agosto	-0,448 (0,897)	-11,690 (6,359)	12,0
setembro	-0,079 (1,110)	-3,140 (1,562)	19,0
outubro	6,150 (3,119)	0,074 (0,330)	54,6
novembro	0,151 (0,240)	-0,500 (0,414)	111,0
dezembro	0,162 (0,218)	0,745 (0,438)	51,8

^a Corresponde ao fluxo mensal médio e o respectivo erro padrão da média (entre parêntese).

9.10. Análise Split-unit para fluxo de CH₄.

Anexo 9.10.1. Resultados do teste ANOVA para análise "split-unit" para o fluxo de CH₄ nas unidades experimentais com liteira em relação aos tratamentos de umidade.

Fonte de variação	GL	QM	F
Bloco	3	51,713	3,650 *
Tratamento	2	241,626	17,054 **
erro a	6	60,345	
Tempo	6	32,859	2,319 *
Tempo*Tratamento	12	20,204	1,426
erro b	36	14,168	

Anexo 9.10.2. Resultados do teste ANOVA para análise "split-unit" para o fluxo de CH₄ nas unidades experimentais sem liteira em relação aos tratamentos de umidade.

Fonte de variação	GL	QM	F
Bloco	3	22,786	0,859
Tratamento	2	128,045	4,827 *
erro a	6	49,532	
Tempo	6	23,141	0,872
Tempo*Tratamento	12	32,688	1,232
erro b	36	26,525	