**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

ESTUDO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA AMAZÔNIA

MONICA TAIS SIQUEIRA D'AMELIO

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para a obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear**

**ORIENTADORA:
Dra. LUCIANA VANNI GATTI**

**São Paulo
2006**

*À Deus e Meishu-Sama, a meus pais,
Marcio e Landry, a meu namorado,
Jorge, a minha irmã Giorgia e a minha
família, pelo apoio, compreensão e
estímulos incondicionais a mim
oferecidos*

AGRADECIMENTOS

A Deus e Meishu-Sama, por me permitirem concluir esta etapa, por estarem sempre a meu lado.

Aos meus Antepassados, pela oportunidade e confiança.

Aos meus pais, Márcio Tadeu D'Amelio e Landry Mary Siqueira, pelo apoio, oportunidade, compreensão e auxílio.

A meu namorado, Jorge Roberto dos Santos Felipe pelo apoio compreensão e carinho.

À Dra. Luciana Vanni Gatti, pela oportunidade, orientação, apoio, incentivo e amizade.

À NOAA – Nacional Oceanic and Atmosphere Administration pela infraestrutura e apoio financeiro.

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro.

À Dra. Maria Aparecida Fausto Pires, Gerente do CQMA (Centro de Química e Meio Ambiente) e ao IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela infraestrutura e oportunidade de realizar o trabalho.

Aos pesquisadores John B. Miller e Andrew Crotwell pelo auxílio e discussões técnicas.

Ao Prof. Dr. Humberto Ribeiro da Rocha pelas discussões técnicas e amizade.

Ao Cláudio Domienikan pelo apoio técnico.

Aos técnicos e funcionários do IPEN pela ajuda técnica.

Aos amigos, Lílian Polakiewicz, Elaine A. J. Martins, Liana K. O. Nakamura, Hebert Piazzon, Rosiene Costa e Silva, Amélia Yamazaki, Fernando C. Cordeiro, Nanci R. Prado, Luiz Antônio D. Costa, Angélica Pretto, Débora Alvim, Jorge Vaz, Maria Helena Santos, pela amizade.

A todos os colegas do CQMA pela colaboração na realização do trabalho.

ESTUDO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA AMAZÔNIA

Monica Tais Siqueira D'Amelio

RESUMO

A Amazônia desempenha um papel importante no ciclo global de carbono, tanto na troca, quanto no armazenamento do carbono, pois contém a maior área de floresta tropical, cerca de 50% do total. Além dos processos naturais, desmatamento e manejo do solo também são fontes de CO_2 . A Floresta Tropical Amazônica também representa uma significativa fonte de óxido nitroso (N_2O) através de processos do solo, e de metano (CH_4), o qual é emitido em altas taxas em regiões alagadas. Este projeto é parte integrante do Experimento de Grande Escala entre a Biosfera e a Atmosfera da Amazônia (LBA), denominado “Perfis Verticais de Dióxido de Carbono e outros Gases Traço sobre a Bacia Amazônica usando Aviões de Pequeno Porte”. A partir de dezembro de 2000, perfis verticais de gás carbônico (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e hexafluoreto de enxofre (SF_6), além de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio molecular (H_2), têm sido medidos sobre a Amazônia Central. Os locais escolhidos para amostragem foram a Floresta Nacional do Tapajós, no estado do Pará, por já existir uma torre de medida de fluxo de CO_2 , e uma área a leste impactada por atividades de pecuária e agricultura, para comparar a influência de uma área impactada com uma área preservada; e a Reserva Biológica de Cuieiras, no estado do Amazonas, onde também existe uma torre de medida de fluxos de CO_2 e uma área a leste distante de atividades antrópicas, para comparar com a Reserva. As coletas foram realizadas em perfis verticais de 300 a 4000 m de altitude, com o auxílio de duas malas semi-automáticas desenvolvidas pela NOAA e um avião de pequeno porte. Para a análise dos perfis, foi utilizado o sistema MAGICC (Multiple Analysis of Gases Influence Climate Change) instalado no laboratório de Química Atmosférica (LQA) do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).

Os resultados mostraram que todos os gases estudados, exceto o gás H_2 , apresentaram o mesmo comportamento observado em estações de

monitoramento mundial. No Estado do Pará, em geral, todos os anos estudados foram discretos sumidouros de CO₂. Para a comparação entre as Estações Secas e Chuvosas, removeu-se a influência global subtraindo os valores observados para o mesmo período na Ilha de Ascension, das concentrações observadas nos locais estudados. Assim, na comparação entre as Estações Chuvosas de 2004 e 2005 com a Seca de 2004, foi observado que as Estações Chuvosas apresentaram concentrações de CO₂ maior em 2 ppm que na Estação Seca 2004. No Estado do Amazonas, os perfis coletados na Estação Chuvosa apresentaram comportamento de fonte, com diferença entre acima e abaixo da CLP (Camada Limite Planetária) de 10 ppm. As concentrações nos locais estudados foram superiores às observadas na Ilha de Ascension.

As concentrações de metano apresentaram valores superiores em 80 ppb e 25 ppb sobre os Estados do Pará e do Amazonas, respectivamente, em relação à Ascension. Durante as Estações Secas foram observadas maiores concentrações de metano em relação às Estações Chuvosas estudadas. O gás N₂O apresentou comportamento das concentrações observadas no Estado do Pará semelhante ao observado sobre Ascension até 2003, ano em que a concentração deste gás na região Amazônica começou a apresentar aumento gradativo, mostrando a influência de adubação de áreas agrícolas em regiões próximas. Sua concentração foi semelhante nos dois estados estudados, apresentando discreta fonte nas Estações Chuvosas estudadas nos quatro locais. A concentração observada do gás SF₆ foi semelhante à global, e ligeiramente maior no Estado do Amazonas em relação ao Estado do Pará, sugerindo diferentes origens das massas de ar. As concentrações de CO, sobre o Estado do Pará e do Amazonas, foram maiores abaixo da CLP e apresentaram cerca de 130 ppb e 150 ppb, respectivamente, a mais na Estação Seca devido aos processos de queimada. A maior média de concentração foi observada no Estado do Amazonas, o que também sugere diferentes origens de massas de ar, uma vez que não há ação antrópica em locais próximos ao amostrado neste estado. O gás H₂ apresentou comportamento semelhante ao CO nas Estações Secas estudadas. O Estado do Amazonas desempenhou papel de sumidouro deste gás em todo o período estudado e o Estado do Pará desempenhou papel de sumidouro apenas na Estação Chuvosa.

GREENHOUSE GASES STUDY IN AMAZONIA

Monica Tais Siqueira D'Amelio

ABSTRACT

The Amazon plays an important role on the global carbon cycle, as changing as carbon storage, since Amazon Basin is the biggest area of tropical forest, around 50% of global. Natural's process, deforestation, and use land are CO₂ sources. The Amazon forest is a significant source of N₂O by soil process, and CH₄ by anaerobic process like flooded areas, rice cultures, and others sources. This project is part of the LBA project (Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia), and this project is "Vertical profiles of carbon dioxide and other trace gas species over the Amazon basin using small aircraft". Since December 2000 vertical profiles of CO₂, CH₄, CO, H₂, N₂O and SF₆ have been measured above central Amazônia. The local sampling was over Tapajós National Forest, a primary forest in Para State, where had a CO₂ flux tower and an east impact area with sources like animals, rice cultivation, biomass burning, etc, to compare the influence of an impact area and a preserved area in the profiles. The Reserva Biológica de Cuieiras, at Amazon State, is the other studied place, where there already exists a CO₂ flux tower, and an east preserved area at this State, to comparer with the Cuieiras.

The sampling has been carried out on vertical profile from 1000 ft up to 12000 ft using a semi-automated sampling package developed at GMD/NOAA and a small aircraft. The analysis uses the MAGICC system (Multiple Analysis of Gases Influence Climate Change) which is installed at the Atmospheric Chemistry Laboratory (LQA) in IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).

The results showed that all gases studied, except H₂ gas, has been following the global trend. At the Pará State, for the studied years, the Amazonian Forest performed as small CO₂ sink. To compare Wet and Dry Seasons, subtracted the Ascension concentration values in the period to remove the global influence. So that, in the 2004 and 2005 wet seasons and 2004 dry season

comparison, it was observed 2 ppm CO₂ concentration higher on Wet Seasons. At Amazon State, the Wet Season profiles had source behavior, presenting 10 ppm CO₂ concentration higher under PBL (Planetary Boundary Layer). In both states concentrations were higher than Ascension Island concentration.

CH₄ concentration over Pará and Amazon States presented higher values than Ascension in 80 ppb and 25 ppb, respectively. Dry Season concentrations have been higher than Wet Season concentrations. N₂O concentration in Para State was similar to Ascension concentration until 2003, when its concentration has been an enhancement, because of N fertilizer utilization at near area. N₂O concentration was similar in the two studied States, presenting discreet source at Wet Season. The SF₆ concentration presented the global trend, and it was a little beat higher over Amazon State, suggesting different air origin. The CO concentration was higher under PBL and presented values during Dry Season higher in 130 ppb and 150 ppb than Wet Season, for burning contribution. The highest average concentration was over Amazon State, which agrees with the different air origin hypothesis. H₂ gas presented behavior similar to CO gas in the Dry Season. The Amazon State performed a small sink role during Wet Season and in Para State is higher during dry season performed like a source and during wet season like a sink.

SUMÁRIO

Resumo	i
Abstract	iii
Sumário	v
Lista de Tabelas	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Acrônimos	xxii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 A Atmosfera Terrestre	3
1.2 Gases de Efeito Estufa	4
1.2.1 Dióxido de Carbono (CO ₂)	5
1.2.2 Metano (CH ₄)	8
1.2.3 Óxido Nitroso (N ₂ O)	9
1.2.4 Hexafluoreto de Enxofre (SF ₆)	10
1.2.5 Monóxido de Carbono (CO)	11
1.2.6 Hidrogênio Molecular (H ₂)	13
1.3 Potencial de Aquecimento Global	15
1.4 Balanço de Energia na Terra – O Efeito Estufa	16

1.6 Meteorologia	19
1.6.1. Estrutura da Atmosfera	19
1.6.2 Circulação das massas de ar na atmosfera	20
1.6.3 Camada Limite Planetária e Camada Limite Noturna	24
1.7 A Bacia Amazônica	25
1.8 O Projeto LBA	31
2 OBJETIVOS	33
3 CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS AMOSTRADOS E METODOLOGIAS DE COLETA E ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE AR ..	35
3.1 Caracterização dos locais de amostragem	36
3.1.1 Floresta Nacional do Tapajós	36
3.1.2 Reserva Biológica de Cuieiras	37
3.2. Amostragem	39
3.3 Análise	40
3.3.1 Descrição dos Equipamentos	41
3.3.2 Acuracidade dos Resultados	46
3.3.3 Curva de Calibração	48
3.3.4 Sistema Analítico	49
3.4 Limpeza e Preparação da Mala de Amostragem	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53

4.1 Floresta Nacional do Tapajós e Área Impactada a Leste	54
4.1.1 Caracterização dos Períodos Estudados	54
4.1.2 Estudo do Gás CO ₂	57
4.1.3 Estudo do Gás Metano	67
4.1.4. Estudo do N ₂ O	76
4.1.5 Estudo do SF ₆	84
4.1.6 Estudo do CO	88
4.1.7 Estudo do H ₂	98
4.2 Reserva Biológica de Cuieiras e Área Remota	106
4.2.1 Caracterização dos Períodos Estudados	106
4.2.2 Estudo do Gás CO ₂	109
4.2.3 Estudo do Gás CH ₄	114
4.2.4 Estudo do Gás N ₂ O	119
4.2.5 Estudo do Gás SF ₆	123
4.2.6 Estudo do Gás CO	125
4.2.7 Estudo do gás H ₂	130
4.3 Comparação entre estado do Pará e Amazonas	134
5 CONCLUSÕES	136
6 SUGESTÃO PARA ESTUDOS FUTUROS	143

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
---	------------

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 Composição da Atmosfera da Terra próxima a sua superfície	4
TABELA 1.2 – Balanço Global do H ₂ Troposférico estimada por Novelli et al. (1999)	15
TABELA 1.3 – Valores de PAG para os diversos gases em três distintos cenários de tempo (20, 100 e 500 anos) e suas concentrações em 1998..	16
TABELA 3.1 – Precisão das espécies gasosas analisadas no MAGICC/CMDL/NOAA e no MAGICC/LQA/BRASIL e estabilidade do sistema MAGICC	48
TABELA 3.2 – Concentrações dos padrões para a construção das curvas de calibração do CO e N ₂ O, respectivamente	49
TABELA 3.3 – Concentrações dos padrões para a construção da curva de calibração do CO ₂	49
TABELA 4.1 – Classificação dos vôos realizados nos períodos de amostragem na Flona Tapajós e na Área Impactada segundo as estações chuvosa e seca	57
TABELA 4.2 – Classificação dos vôos realizados nos períodos de amostragem na Flona Tapajós e na Área Impactada segundo as estações chuvosa e seca	109
TABELA 4.3 – Concentrações médias observadas na Estação Chuvosa de 2005 para os gases estudados	135

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Esquema do Balanço Global de Energia na atmosfera terrestre em unidades de $W.m^{-2}$	17
FIGURA 1.2 – Concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa majoritários nos últimos 300 anos. Informações obtidas de estudos com testemunhos de gelo da Antártica e Groenlândia. Linha contínua: resultados de medições atmosféricas	18
FIGURA 1.3 – Temperatura Global média na superfície terrestre	19
FIGURA 1.4 – Representação da divisão da Atmosfera em camadas considerando a altitude, a pressão e a temperatura	20
FIGURA 1.5 – Representação da Célula de Hadley na atmosfera terrestre	21
FIGURA 1.6 – Representação das principais circulações gerais da atmosfera terrestre	22
FIGURA 1.7 – Representação da circulação geral das massas de ar em Janeiro	23
FIGURA 1.8 – Representação da circulação geral das massas de ar em Julho	23
FIGURA 1.9 – Esquema das Camadas Limites Planetária, Noturna e de Mistura	25
FIGURA 1.10 – Mapa da Amazônia Legal – Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, de Rondônia, Roraima, Tocantins e parcialmente Maranhão	26
FIGURA 1.11 – Extensão de desflorestamento acumulado bruto (em km^2) de 1988 a 2003	27

FIGURA 1.12 – Taxa média de desflorestamento bruto (km ² /ano) de 1988 a 2003	27
FIGURA 1.13 – Climatologia da precipitação no Brasil integrando medidas de 1960 a 1991	30
FIGURA 1.14 – Queimadas e desmatamento na Região Amazônica	31
FIGURA 3.1 – Imagem de Satélite mostrando os locais amostrados no Estado do Pará (escala: 1:50.000)	37
FIGURA 3.2 – Imagem de Satélite mostrando os locais amostrados no estado do Amazonas (escala: 1:50.000)	38
FIGURA 3.3 – Sistema de coleta de ar semi-automático: (a) Mala de Amostragem. (b) Unidade Compressora	39
FIGURA 3.4 – Aeronave de pequeno porte utilizada na coleta das amostras (a) com enfoque no tudo coletor e (b) mostrando a disposição das malas de amostragem e compressora na mesma	40
FIGURA 3.5 – (a) Esquema de entrada e saída dos gases de referência e amostra nas células do monitor de CO ₂ (LI-COR LI-7000); (b) Esquema detalhado de uma célula do monitor de CO ₂ (LI-COR LI-7000)..	41
FIGURA 3.6 – Esquema de funcionamento do cromatógrafo HP 6890 Plus + na análise do gás metano (a) posição de espera, (b) posição de injeção da amostra no equipamento	43
FIGURA 3.7 – Esquema de funcionamento do detector FID do cromatógrafo HP 6890 Plus	43
FIGURA 3.8 – Esquema de funcionamento do monitor de CO/H ₂	44
FIGURA 3.9 – Esquema do detector do monitor de CO/H ₂	44

FIGURA 3.10 – Esquema de funcionamento do detector ECD	45
FIGURA 3.11 – Sistema MAGICC 3/Brasil – Sistema de análise de Gases de Efeito Estufa no LQA/IPEN. Onde 1: Monitor LI-COR (CO ₂); 2: Monitor de CO/H ₂ Peak Laboratories (CO/H ₂); 3: Cromatógrafo gasoso HP (N ₂ O/SF ₆ /CH ₄); 4: Controlador de fluxo dos gases; 5: Válvula “Sample select e System select”; 6: sample/CO reference; 7: Medidor de vácuo e Receptor de amostras; 8: Interface do cromatógrafo ; 9: Banho resfriador; 10: Microcomputador; 11: Painel de gases, 12: interface do monitor de CO ₂ , 13: interfaces das válvulas e do monitor CO/H ₂	46
FIGURA 3.12 – Esquema de Funcionamento do Sistema MAGICC-Brasil	50
FIGURA 3.13 – Sistema para a obtenção de ar ultra-seco com (a) manômetro, (b) um frasco com carbono ativado para remoção de água e compostos orgânicos, (c) um frasco com filtro de celulose para remover água e partículas e (d) equipamento de auto-regeneração para secagem de ar com manômetro acoplado	52
FIGURA 4.1 – Pluviometria mensal acumulada na Flona Tapajós para os anos compreendidos entre 2000 e 2005	54
FIGURA 4.2 – Número de focos de queimadas no Estado do Pará nos anos de 2000 a 2005	55
FIGURA 4.3 – Detalhamento pluviométrico do mês de janeiro de 2005	56
FIGURA 4.4 – Comparação entre as séries temporais do CO ₂ no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada	58
FIGURA 4.5 – Perfis Verticais do gás CO ₂ coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Impactada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Impactada	59

FIGURA 4.6 – Perfis Verticais do gás CO ₂ coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2002 na Área Impactada, (c) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2003 na Área Impactada	60
FIGURA 4.7 – Perfis Verticais do gás CO ₂ coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2004 na Área Impactada, (c) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2005 na Área Impactada	61
FIGURA 4.8 – Comparação entre a concentração do CO ₂ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada	62
FIGURA 4.9 – Comparação entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Impactada para o gás CO ₂ nos anos de (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002, (d) 2003, (e) 2004 e (f) 2005	64
FIGURA 4.10 – Comparação entre as estações seca de 2004 e chuvosa de 2004 e 2005 para o gás CO ₂ sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada	65
FIGURA 4.11 – Comparação entre as estações seca de 2004 e chuvosa de 2004 e 2005 para o gás CO ₂ sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada, retirando a influência global	67
FIGURA 4.12 – Comparação entre as séries temporais do CH ₄ no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada	68
FIGURA 4.13 – Perfis Verticais do gás CH ₄ coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Impactada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Impactada	69

FIGURA 4.14 – Perfis Verticais do gás CH_4 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2002 na Área Impactada, (c) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2003 na Área Impactada 70

FIGURA 4.15 – Perfis Verticais do gás CH_4 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2004 na Área Impactada, (c) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2005 na Área Impactada 71

FIGURA 4.16 – Comparação entre a concentração do CH_4 coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada 72

FIGURA 4.17 – Comparação entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Impactada para o gás CH_4 nos anos de (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002, (d) 2003, (e) 2004 e (f) 2005 73

FIGURA 4.18 – Comparação entre as estações seca de 2004 e chuvosa de 2004 e 2005 para o gás CH_4 sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada, retirando a influência global 75

FIGURA 4.19 – Comparação entre as séries históricas do N_2O no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada 77

FIGURA 4.20 – Perfis Verticais do gás N_2O coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Impactada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Impactada 78

FIGURA 4.21 – Perfis Verticais do gás N_2O coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2002 na Área Impactada, (c) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2003 na Área Impactada 79

FIGURA 4.22 – Perfis Verticais do gás N_2O coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2004 na Área Impactada, (c) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2005 na Área Impactada	80
FIGURA 4.23 – Comparação entre a concentração do N_2O coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada	81
FIGURA 4.24 – Comparação entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Impactada para o gás N_2O nos anos de (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002, (d) 2003, (e) 2004 e (f) 2005	83
FIGURA 4.25 – Comparação entre as estações seca de 2004 e chuvosa de 2004 e 2005 para o gás N_2O sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada, retirando a influência global	84
FIGURA 4.26 – Comparação entre as séries históricas do SF_6 no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada	85
FIGURA 4.27 – Perfis Verticais do gás SF_6 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Impactada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Impactada, (e) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (f) no ano de 2002 na Área Impactada	86
FIGURA 4.28 – Perfis Verticais do gás SF_6 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2003 na Área Impactada, (c) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2004 na Área Impactada, (e) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (f) no ano de 2005 na Área Impactada	87

FIGURA 4.29 – Comparação entre as séries temporais do CO no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada	89
FIGURA 4.30 – Perfis Verticais do gás CO coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Impactada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Impactada	90
FIGURA 4.31 – Perfis Verticais do gás CO coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2002 na Área Impactada, (c) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2003 na Área Impactada	91
FIGURA 4.32 – Perfis Verticais do gás CO coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2004 na Área Impactada, (c) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2005 na Área Impactada	92
FIGURA 4.33 – Comparação entre a concentração do CO coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada	94
FIGURA 4.34 – Comparação entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Impactada para o gás CO nos anos de (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002, (d) 2003, (e) 2004 e (f) 2005	95
FIGURA 4.35 – Comparação entre as estações seca de 2004 e chuvosa de 2004 e 2005 para o gás CO sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada, retirando a influência global	97
FIGURA 4.36 – Comparação entre as séries temporais do H ₂ no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada	98

FIGURA 4.37 – Perfis Verticais do gás H ₂ coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Impactada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Impactada, (e) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (f) no ano de 2002 na Área Impactada	99
FIGURA 4.38 – Perfis Verticais do gás H ₂ coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2003 na Área Impactada, (c) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2004 na Área Impactada, (e) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (f) no ano de 2005 na Área Impactada	101
FIGURA 4.39 – Comparação entre a concentração do H ₂ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada	103
FIGURA 4.40 – Comparação entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Impactada para o gás H ₂ nos anos de (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002, (d) 2003, (e) 2004 e (f) 2005	104
FIGURA 4.41 – Comparação entre as Estações Seca de 2004 e Chuvosas de 2004 e 2005 para o gás H ₂ sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Impactada, retirando a influência global	105
FIGURA 4.42 – Pluviometria mensal acumulada na Reserva Biológica de Cuieiras para os anos compreendidos entre 2004 e 2005	106
FIGURA 4.43 – Número de focos de queimadas no Estado do Amazonas nos anos de 2004 a 2005	107
FIGURA 4.44 – Detalhamento pluviométrico do mês de dezembro de 2004	108
FIGURA 4.45 – Detalhamento pluviométrico do mês de junho de 2005	108

FIGURA 4.46 – Comparação entre os valores de concentração do CO ₂ obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	110
FIGURA 4.47 - Perfis Verticais do gás CO ₂ coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras (b) na Área Remota	111
FIGURA 4.48 – Concentração de CO ₂ nas Estações Seca de 2004 e Chuvosa de 2005, subtraindo a concentração média de Ascension sobre a (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	112
FIGURA 4.49 – Comparação entre a concentração do CO ₂ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	113
FIGURA 4.50 - Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás CO ₂ em 2004 e 2005	114
FIGURA 4.51 – Comparação entre os valores de concentração do CH ₄ obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	115
FIGURA 4.52 – Perfis Verticais do gás CH ₄ coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras b) na Área Remota	117
FIGURA 4.53 – Concentração de CH ₄ nas Estações Seca de 2004 e Chuvosa de 2005, subtraindo a concentração média de Ascension sobre a (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	117
FIGURA 4.54 – Comparação entre a concentração do CH ₄ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	118

FIGURA 4.55 – Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás CH_4 em 2004 e 2005	119
FIGURA 4.56 – Comparação entre os valores de concentração do N_2O obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	120
FIGURA 4.57 – Perfis Verticais do gás N_2O coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras (b) na Área Remota	121
FIGURA 4.58 – Comparação entre a concentração do N_2O coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	122
FIGURA 4.59 – Comparação entre a concentração do N_2O coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	122
FIGURA 4.60 – Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás N_2O em 2004 e 2005	123
FIGURA 4.61 – Comparação entre os valores de concentração do SF_6 obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	124
FIGURA 4.62 – Perfis Verticais do gás SF_6 coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras (b) na Área Remota	125
FIGURA 4.63 – Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás SF_6 em 2004 e 2005	125

FIGURA 4.64 – Comparação entre os valores de concentração do CO obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	126
FIGURA 4.65 – Perfis Verticais do gás CO coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras (b) na Área Remota	127
FIGURA 4.66 – Comparação entre a concentração do CO coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	127
FIGURA 4.67 – Comparação entre a concentração do CO coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	129
FIGURA 4.68 – Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás CO em 2004 e 2005	129
FIGURA 4.69 – Comparação entre os valores de concentração do H ₂ obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	130
FIGURA 4.70 – Perfis Verticais do gás H ₂ coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras (b) na Área Remota	131
FIGURA 4.71 – Comparação entre a concentração do H ₂ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	132
FIGURA 4.72 – Comparação entre a concentração do H ₂ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota	133

FIGURA 4.71 – Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás H_2 em 2004 e 2005 .. 134

Glossário

ABLE	Amazon Boundary Layer Experiment
ABRACOS	Anglo Brazilian Amazonian Climate Observational Study
CH ₄	Metano
CLC	Camada Limite Convectiva
CLE	Camada Limite Estável
CLN	Camada Limite Noturna
CLP	Camada Limite Planetária
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
Flona Tapajós	Floresta Nacional do Tapajós.
GMD	Gases Monitoring Division
H ₂	Hidrogênio molecular
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

LBA	Experimento em Grande Escala entre a Biosfera-Atmosfera da Amazônia
LQA	Laboratório de Química Atmosférica
N ₂ O	Óxido Nitroso
NASA	National Aeronautics Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PAG	Potencial de Aquecimento Global
RBLE	Rondonia Boundary Layer Experiment
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre

1 Introdução

A intervenção humana no ciclo global do carbono vem ocorrendo há milhares de anos, entretanto, apenas nos dois últimos séculos que o fluxo de carbono antrópico passou a ser comparável ao ciclo de carbono natural (IGBP, 2003). Muitos fenômenos estão associados a este processo, tais como, aumento de temperatura (IGBP, 2003, Malhi e Wright, 2004), alteração na precipitação (Davidson et al., 2004), alteração na respiração, fotossíntese das plantas (Cowling et al., 2004), entre outros. Malhi & Wright (2004) demonstraram que, desde meados da década de 1790, vem ocorrendo um aquecimento global nas florestas tropicais de cerca de 0,26°C por década. Cramer et al. (2004) sugere, através de modelos climáticos, um aquecimento na região tropical entre 3 e 8°C para o final deste século.

A Amazônia desempenha um papel importante no ciclo global de carbono, tanto na troca quanto no armazenamento do carbono (Raich e Potter, 1995). Ela contém a maior área de floresta tropical, cerca de 50% do total (Malhi e Grace, 2000). Segundo Malhi et al. (2002), muitos modelos climáticos globais sugerem que o grande desflorestamento da Amazônia pode causar um aquecimento na superfície local de até 2°C e redução na precipitação de até 25% (Malhi et al., 2002). Mesmo após anos de estudos nesta região, muitos aspectos sobre o bioma amazônico, como a interação biosfera-atmosfera não foram esclarecidos, tais como a influência dos gases de efeito estufa na região. Desmatamento e desenvolvimento de agricultura são grandes fontes de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, enquanto que reflorestamento em áreas abandonadas e aumento do carbono absorvido, devido à fertilização do CO₂, representam sumidouros deste gás (Houghton et al., 1998). A floresta tropical amazônica representa uma significativa fonte de óxido nitroso (N₂O) (Potter et al., 1998). Outro gás de efeito estufa importante é o metano (CH₄), o qual é em grande parte emitido em altas taxas em regiões alagadas (Bartlett e Harriss, 1993) e absorvido pelo solo (Steudler et al., 1996). Recentes estudos mostram que as árvores também são uma importante fonte direta de emissão de metano, como o estudo de Keppler et al (2006) e Carmo et al (2006). O monóxido de carbono (CO), emitido pelas queimadas, não é propriamente um gás de efeito estufa, mas é importante na química da atmosfera como sumidouro de radical hidroxila (OH) e também como traçador de atividades humanas. Entretanto,

questões como a influência da Amazônia no clima regional e global permanecem. Assim, é preciso estudar mais detalhadamente a influência desses gases na atmosfera, conhecendo suas fontes e sumidouros, transporte atmosférico e sua concentração atmosférica. É neste âmbito que se desenvolve este trabalho.

1.1 A Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre é uma camada gasosa e composta principalmente por nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e água (H_2O). Esta última é encontrada nas formas sólida, líquida e gasosa. A atmosfera desempenha um papel muito importante, pois afeta diretamente o meio-ambiente em que vivemos (Brasseur et al., 1999).

Embora a atmosfera terrestre se estenda por centenas de quilômetros, 99% do total da atmosfera estão localizados nos primeiros 30 quilômetros a partir da superfície da Terra. Na TAB. 1.1 são apresentados os gases mais abundantes presentes em volume de ar perto da superfície terrestre. Nota-se que o nitrogênio e o oxigênio ocupam 78 e 21 % do total em volume, respectivamente (Ahrens, 2000). Representando a somatória de todos os demais gases apenas 1% da composição atmosférica.

Os gases nobres (Ar, Ne, He, Xe) e o hidrogênio molecular (H_2) são outros gases presentes na atmosfera que somam cerca de 0,94 % do volume total dos gases. A concentração de vapor d'água varia de lugar para lugar e é sazonal. Na região tropical, no calor, a porcentagem de vapor d'água chega a 4%, já no frio do ártico, a concentração se reduz a uma mera fração de porcentagem. Além desses, existem gases na atmosfera que estão em concentração tão pequenas que são conhecidos como gases traço. Alguns desses gases traço tem a capacidade de absorver energia na forma de calor e são conhecidos como gases de efeito estufa.

TABELA 1.1 Composição da Atmosfera da Terra próxima a sua superfície (Ahrens, 2000).

Gases Permanentes			Gases Variáveis			
Gás	Símbolo	Porcentagem (de volume)	Gás e partículas	Símbolo	Porcentagem (de volume)	Partes por milhão (ppm)
Nitrogênio	N ₂	78,08	Vapor d'água	H ₂ O	0 a 4	
Oxigênio	O ₂	20,95	Dióxido de carbono	CO ₂	0,037	368
Argônio	Ar	0,93	Metano	CH ₄	0,00017	1,7
Néon	Ne	0,0018	Óxido nitroso	N ₂ O	0,00003	0,3
Hélio	He	0,0005	Ozônio	O ₃	0,000004	0,04
Hidrogênio	H ₂	0,00006	Partículas		0,000001	0,01-0,15
Xenônio	Xe	0,000009	Clorofluorcar- bono (CFC)		0,00000002	0,0002

1.2 Gases de Efeito Estufa

Os gases de efeito estufa são capazes de absorver a energia emitida pela Terra, na faixa do infravermelho, mantendo aquecida a troposfera. São eles os responsáveis por manter a temperatura da Terra em torno de 15°C, sendo que, se estes gases não existissem na atmosfera, a temperatura média global seria -18°C.

Processo de Absorção de Energia pelos Gases de Efeito Estufa

Quando a frequência de um comprimento de onda da luz coincide com a frequência do movimento interno de uma molécula, esse comprimento de onda é absorvido por esta molécula. Na região do infravermelho (variando para cada composto na faixa de 0,8 a 20 μm), os movimentos relevantes são as vibrações entre os átomos que constituem as moléculas. Existem dois tipos de vibrações principais: o **estiramento da ligação** e a **vibração de deformação angular** (Ahrens, 2000). O estiramento da ligação angular é o movimento mais simples em uma molécula e é relativo de dois átomos, como por exemplo, X e Y, ligados entre si. Neste movimento, a distância de valor médio entre os dois átomos aumenta, retorna, contraí-se e em seguida retorna a posição inicial. Este movimento ocorre

em todas as moléculas e em todas as condições de temperatura. A frequência exata do comprimento oscilatório depende do tipo de ligação (simples, dupla ou tripla) e dos átomos envolvidos.

A vibração de deformação angular altera o ângulo médio da ligação existente entre três átomos, contraindo ou expandindo esse ângulo. Neste caso, dois átomos estão ligados a um átomo comum, mas não entre si. Para ocorrer este movimento no interior de uma molécula, é preciso que esta contenha pelo menos três átomos.

Além de a luz ser absorvida por moléculas que vibram em uma mesma frequência, um conjunto de moléculas possui a capacidade de absorver luz de frequência um pouco maior ou menor. Essa capacidade é devida não apenas à alteração da energia associada à vibração, como também, a uma variação na energia rotacional da molécula em torno de seu próprio eixo. Como consequência a esse aumento da energia absorvida pelas moléculas ocorre um aumento de sua energia cinética, com isso as colisões entre as moléculas próximas passam a ser mais frequentes.

Os principais gases de efeito estufa são: vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonos (CFCs), hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), ozônio (O_3), hexafluoreto de enxofre (SF_6), entre outros. O gás monóxido de carbono (CO), apesar de não se propriamente um gás de efeito estufa, é um traçador de atividades humana na região, como as queimadas, e também importante gás na química da atmosfera, pois caracteriza atmosferas oxidantes. O hidrogênio molecular (H_2) também é traçador de queimada além de influenciar na química da atmosfera. Neste projeto foram estudados os gases CO_2 , CH_4 , N_2O , SF_6 , CO e H_2 .

1.2.1 Dióxido de Carbono (CO_2)

As fontes e a magnitude de emissão destas fontes de CO_2 vêm mudando desde o último século, quando as emissões deste gás, devido à queima de combustíveis, ao desmatamento e à queima de biomassa aumentaram

(Schimel, 1995), principalmente a partir de 1980 (Ometto et al., 2005) aumentando, assim, a concentração de gás carbônico na atmosfera. Com a finalidade de acrescentar essas novas fontes ao ciclo global do carbono, nas últimas poucas décadas, iniciaram-se uma série de estudos a esse respeito. Os primeiros resultados mostraram que a soma das emissões pela queima dos combustíveis fósseis e de biomassa era maior que o balanço do carbono acumulado na atmosfera e absorvido pelos oceanos e pelo bioma terrestre (Houghton et al., 1998). Esse carbono, absorvido por sumidouros ainda não conhecidos, inicialmente denominado de “*missing carbon sink*”, trouxe novas hipóteses de sumidouros antes não considerados (Ometto et al., 2005). Algumas hipóteses consideravam que os oceanos absorviam mais carbono que o estimado até então (Bousquet et al., 2000; Tans et al., 1990; Conway et al., 1994) e outras consideram que esse carbono era absorvido pela biota terrestre por fotossíntese (Fan et al., 1998). Paralelo a isto, modelos atmosféricos foram desenvolvidos para calcular a real taxa do CO₂ acumulado na atmosfera (Cox et al., 2000; Ito e Oikawa 2000; White et al., 2000).

A floresta tropical desenvolve um papel muito importante no balanço global do carbono (Melillo et al., 1993; Field et al., 1998), mas a incerteza do impacto do aumento do CO₂ acumulado na atmosfera é grande (Tian et al., 2000; Schimel et al., 2001; Cox et al., 2000), pois ainda não se sabe com clareza o quão rápido a floresta tropical vai responder a esse aumento (Gash, 2004). Assim, é necessário desenvolver mais estudos em relação à absorção de CO₂ pelas florestas, bem como fatores limitantes como nutrientes e chuva (Marengo et al., 2001, Andreae et al., 2004), já que precipitação e a radiação (Procópio et al., 2004) são afetadas pela mudança climática proveniente do aumento de carbono na atmosfera (Victoria et al., 1998; Malhi e Wright, 2004). A Região Amazônica, por ter a maior área de floresta tropical do mundo, é o principal foco desta questão. Estudos para estimar as áreas desflorestadas foram desenvolvidos (Ometto et al., 2005).

Na década de 1990, o estudo sobre o “*missing carbon sink*” progrediu com evidências que reflorestamento em florestas temperadas também contribuía para o sumidouro terrestre de carbono, intensificando os estudos neste campo.

Devido à Floresta Amazônica ter alta densidade de biomassa, esta se tornou uma grande candidata natural de sumidouro de carbono. Por isso, a Amazônia é considerada potencialmente significativa no ciclo global de carbono como sumidouro ou fonte, devido à grande quantidade de carbono estocado pela sua biomassa, e também ao grande fluxo proveniente da fotossíntese, respiração, decomposição e queimadas (Ometto et al., 2005). Além disso, Houghton et al. (2000) estimou que a vegetação da Floresta Amazônica brasileira contém sozinha cerca de 70 PgC, o que corresponde de 10 a 15% da biomassa terrestre global.

Estudos do Experimento de Grande Escala entre a Biosfera-Atmosfera da Amazônia – LBA, até o momento, sugeriram que florestas primárias maduras Amazônicas podem absorver CO₂ da atmosfera estimuladas pelo seu aumento na atmosfera (Tian et al. 1998, 2000; Prentice et al., 1998; Potter et al., 2001), mas que a água seria um fator limitante no crescimento das árvores, reduzindo assim a absorção de C na estação seca (Tian et al., 1998; Botta et al., 2002).

Saleska et al. (2003) concluiu com seus estudos que na estação seca diminui consideravelmente a emissão de carbono, devido a inibição da respiração. Com o início da estação chuvosa, aumenta consideravelmente a emissão de carbono pela vegetação devido à aceleração dos processos de decomposição. A respiração do solo é inibida durante a estação seca, devido à presença de destroços de madeiras e folhas em maior quantidade na superfície nesta estação. E além desta inibição, que ocorre na estação seca, a decomposição acelerada de matéria orgânica na estação chuvosa libera carbono para a atmosfera.

Existe muita controvérsia entre os pesquisadores a respeito do fluxo total de carbono na Amazônia, devido principalmente às diferentes técnicas de medidas e de cálculos utilizados.

House et al. (2003) propôs, em trabalho recente, um balanço global de carbono, onde a queima de combustíveis fósseis emite cerca de 6,3 PgC/ano, enquanto a mudança no uso do solo, representa de 1,4 a 3,0 PgC/ano. O aumento de CO₂ na atmosfera é 3,2 PgC/ano. Os sumidouros de carbono seriam

o oceano, com 2,1 PgC/ano; solo, com 1,0 PgC/ano e o sumidouro residual terrestre que varia de 1,6 a 4,8 PgC/ano.

1.2.2 Metano (CH₄)

O metano (CH₄) é um importante gás de efeito estufa. Este gás é um forte absorvedor de luz infravermelha a 7,66 μm, região espectral que a água e o gás carbônico praticamente não absorvem (Ramanathan, 1980; Dickinson e Cicerone, 1986). Medidas de sua concentração atmosférica, a partir de “testemunhos” de gelo (icecore) extraídos da Antártida e da Groelândia, apresentam um lento crescimento antes da era pré-industrial (até 1700d.C.) (Rasmussen et al., 1984) e um rápido crescimento após essa era (Etheridge et al., 1998; Petit et al., 1994; Dlugokencky et al., 1994). A concentração deste gás na atmosfera em 1980 era aproximadamente o dobro de 100 anos atrás (Etheridge et al., 1988). Devido a seu grande aumento na atmosfera, sua contribuição para a forçante climática tem crescido cerca de 30% desde 1860 (Mitchell, 1989). A química do metano desempenha um importante papel na atmosfera e também afeta o clima indiretamente (Dlugokencky et al., 1994).

As emissões de metano variam com o clima e também, principalmente, com atividades humanas como o cultivo de arroz e a queima de biomassa (Ruddiman, 2003; Subak, 1994). Ferretti et al. (2005) classificou as fontes de emissão em três principais categorias, biogênicas, que incluem plantações de arroz (Cicerone e Shetter, 1981) e áreas alagadas (Matthews e Fung, 1986); animais ruminantes (Crutzen et al., 1986) e pirogênica, sendo queima de biomassa ou combustíveis fósseis, as quais incluem emissão natural por aeração ou combustão natural (Barns & Edmonds, 1990), vazamento em distribuição de sistemas (Barns & Edmonds, 1990) e, minas de carvão (Barns & Edmonds, 1990). Recentemente, dois trabalhos mostraram que as árvores também são importantes fontes de emissão direta de CH₄ (Keppler et al, 2006 e Carmo et al, 2006), trazendo assim uma importante questão nova a ser determinada: qual o papel da floresta na emissão do CH₄. Os sumidouros ainda não são bem conhecidos. Entre os já estudados, o principal é devido a sua oxidação na troposfera pela reação com radical hidroxila (OH), segundo apresentado na Equação (1.1)

(Dlugokencky, et al., 1994). Esta reação só é secundária se houver presença de monóxido de carbono (CO) para o consumo de OH (Logan et al., 1981).

Medidas precisas de metano atmosférico abrangendo ampla faixa de altitude mostraram que, desde que não haja completa homogeneização deste gás na atmosfera, através da ação de mistura, as concentrações mais altas estão presentes sobre regiões com fortes fontes de emissão de metano, isto é, em altitudes próximas à superfície, pois a altas altitudes não há fontes de metano (Dlugokencky, et al., 1994). Ainda segundo Ferretti et al. (2005), variações na temperatura e umidade podem influenciar as emissões naturais de áreas úmidas (alagadas e queimadas). Se temperaturas mais quentes coincidirem com condições de seca, neste período (seco e quente), espera-se elevada emissão por queimada e emissão reduzida por fonte biogênica, se comparada a períodos de clima frio e úmido, pois existe a redução de áreas alagadas devido à evaporação.

O principal indicador de queimadas é o gás CO. Assim, espera-se que o comportamento do metano, durante a estação seca, em áreas com queimadas, apresente-se semelhante ao do CO a baixas altitudes (Ferretti et al., 2005).

1.2.3 Óxido Nitroso (N₂O)

O óxido nitroso (N₂O) é um gás traço que contribui diretamente para o efeito estufa e possui tempo de vida de 120 anos (Schindlbacher, et al., 2004). Estudos realizados nos últimos 100 anos determinaram que o seu potencial no aquecimento global é de cerca de 300 vezes maior que o do CO₂ (IPCC, 2001). A maioria do N₂O é produzida por processos microbiais do solo como nitrificação e

desnitrificação (Wrage et al., 2001). A nitrificação é um processo de oxidação aeróbica de amônio a nitrito ou nitrato, e a desnitrificação é a redução anaeróbica de nitrato a dinitrogênio (Kinney et al., 2004). Pesquisas realizadas nas últimas décadas têm identificado que o nitrato e o amônio existentes no solo, o tipo e a porosidade do solo, a temperatura, o pH e a facilidade de metabolizar carbono no solo são controladores da produção de N_2O (Parton et al., 2001). A emissão de N_2O aumenta com o aumento da temperatura, pois processos enzimáticos são facilitados com o aumento da mesma (Schindbacher et al., 2004). A agricultura também exerce grande influência na emissão de N_2O , pois a fertilização aumenta a emissão de N_2O do solo (Robertson et al., 2000). Tilman et al. (2001) sugere que será significativo o aumento na emissão deste gás pelo uso de fertilizantes e pesticidas. Porém, a influência de pesticidas utilizados na agricultura é ainda pouco conhecida. Stehfest & Muller (2004) mediram a emissão de N_2O do solo em pastagem americana. A emissão total deste gás observada em um ano foi de 4,4 Kg N_2O /ha. Sendo que após a aplicação de fertilizante a base de uréia foi observado um significativo aumento na emissão deste gás.

O maior sumidouro de N_2O é a estratosfera, já que este gás está envolvido na destruição do ozônio estratosférico (Cicerone, 1987; Houghton et al., 1996).

1.2.4 Hexafluoreto de Enxofre (SF_6)

O hexafluoreto de enxofre (SF_6) é um dos gases de efeito estufa mais eficiente, pois sua capacidade de aquecimento é milhares de vezes maior que a do CO_2 (Burgess, et al., 2004). É um gás traço muito estável na atmosfera, e acredita-se ser produzido em quase toda a sua totalidade pelo homem (Koo et al., 2005; Maiss e Levin, 1994; Ko et al, 1993), embora traços possam ser originados naturalmente a partir de rochas fluoríticas (Harnisch e Eisenhauer, 1998). Suas propriedades físico-químicas únicas fazem este gás ideal para muitas aplicações, predominantemente como isolante e acionador elétrico (Maiss e Levin, 1994).

Sua contribuição para a forçante radiativa é pequena por causa da sua pequena concentração na atmosfera, que é menor de 6 ppt por volume (Rinsland

et al., 2003). Seu tempo de vida atmosférico é de cerca de 3200 anos (Maiss e Brenninkemeijer, 1998; Ravishankara et al., 1993). Assim, combinando o efeito do crescimento da produção industrial de SF₆ com o tempo de vida atmosférico, há um potencial para o gás se acumular lentamente na atmosfera e se tornar um importante contribuinte do aumento da forçante radioativa.

Segundo Lovelock (1971), a concentração deste gás em 1970 era de 0,03 ppt. Em 1895, atingiu de 1,22 ppt, com uma taxa de crescimento anual de 10,28%. Em 1994, 2,69 ppt, apresentando uma taxa de crescimento de 7,48% (Rinsland et al., 2005). Em 2003, 4,6 ppt, com crescimento anual de 6,5% (Burgess et al., 2004). Já em 2004, 5,12 ppt, com uma taxa de crescimento de 5,57% (Rinsland et al., 2005). Nota-se que a taxa de emissão tem sido mais lenta nos últimos anos, fato evidenciado já em 1998 por Maiss e Brenninkemeijer.

1.2.5 Monóxido de Carbono (CO)

O CO é um composto relativamente estável na atmosfera, com uma vida média global na troposfera que varia de um mês para os trópicos, a quatro meses nas latitudes medias (Khalil e Rasmussen, 1990; Crutzen, 1994; Prather, 1996, Seinfeld and Padis, 1998). O monóxido de carbono desenvolve um papel muito importante nas reações químicas da atmosfera, principalmente porque é o maior sumidouro de radicais hidroxilas (OH), e, portanto, influencia fortemente na capacidade oxidante da atmosfera, além de contribuir com a formação de ozônio (Kisselle et al., 2002) (EQ. 1.2 e 1.3).

Assim, a razão de mistura do CO na atmosfera tem uma relação direta com o tempo de vida de outros gases traço como o metano (CH₄) e hidroclorofluorcarbono (HCFCs) (Thompson, 1992). A relação entre CO e CH₄ na atmosfera tem sido estudada desde 1977 (Vide Sze, 1977, Thompson e Cicerone, 1986; Prather 1996; e Daniel e Solomon, 1998). A influência direta do CO na

forçante radiativa da Terra tem um efeito muito pequeno (Evans e Puckrin, 1995, Sinha e Toumi, 1996), sendo este então, um agente indireto significativo do efeito estufa global, principalmente devido ao seu impacto na razão de mistura do CH₄ atmosférico, e também devido à produção de CO₂ e O₃ (Daniel e Solomon, 1998).

A primeira determinação direta de CO troposférico foi publicada em 1950-1951 no *Jungfrau Scientific Station* (Rinsland e Levine, 1985). Bergamaschi et al. (2000) estudaram em seu trabalho, as principais fontes de CO que estão relacionadas a seguir, juntamente com a estimativa de emissão de cada uma delas. As principais são: oxidação do metano (emissão estimada em 830 TgCO/ano); fontes tecnológicas, as quais incluem emissões no tráfego, indústrias e combustão de biocombustíveis (478 TgCO/ano); queima de biomassa, as quais contribuem com de 5 a 15% das emissões de C totais (de 500 a 1500 TgCO/ano); oxidação de isopreno e monoterpeno, apesar de haver incerteza muito grande na quantidade de emissão a partir desta reação, pois esses compostos orgânicos possuem um tempo de vida muito curto, poucas horas, correspondendo a uma emissão anual de 230-940 TgCO/ano pelo isopreno e 60-240 TgCO/ano pelo monoterpeno (Crutzen et al., 1985; Jacob and Wofsy, 1990; Kanakidou and Crutzen, 1999); oxidação de hidrocarbonetos antrópicos não-metânicos (80 TgCO/ano); oceano (12,9 TgCO/ano); e emissão biogênica a partir da decomposição de biomassa (40 TgCO/ano).

Os principais sumidouros de CO, segundo Bergamaschi et al. (2000) são por remoção de CO, pela reação com radicais hidroxilas na troposfera, e no solo por deposição seca de CO, com uma taxa de velocidade estimada em 0,03 cm/s (Sanhueza et al., 1997), que corresponde a diferentes ecossistemas. Este sumidouro é controlado pelos microorganismos existentes no solo.

Em seu trabalho, Horowitz et al. (2003), estimou através do modelo MOZART, taxas de emissão (ou sumidouro) de CO nos trópicos, para algumas das fontes estudadas por Bergamaschi et al. (2000), que são: produção fotoquímica com emissão de 1215 TgCO/ano; sumidouro fotoquímico: perda de 2020 TgCO/ano; deposição seca: perda de 1 TgCO/ano; fontes tecnológicas: emissão de 537,93 TgCO/ano; queima de Biomassa: emissão de 486,63

TgCO/ano; solo: emissão de 160,10 TgCO/ano; oceano: emissão de 10,00 TgCO/ano.

Com estes dados, nota-se que as principais fontes de CO são antrópicas. E com o desenvolvimento tecnológico, aumento da frota de veículos e aumento da queima de biomassa, a razão de mistura deste gás na atmosfera vem sofrendo transformações as quais precisam ser cada vez melhor compreendidas.

1.2.6 Hidrogênio Molecular (H_2)

Hidrogênio Molecular (H_2) assim como CO, não é diretamente um gás de efeito estufa, porém pode reduzir OH e indiretamente aumentar o gás CH_4 e HFCs. As poucas publicações científicas sobre hidrogênio atmosférico (H_2) já promovem grande variação na distribuição das taxas de mistura deste gás na atmosfera global. Grupos de pesquisadores identificaram diferença na concentração de H_2 sobre áreas consideradas de ar puro, em torno de 540 a 590 ppb, e sobre áreas urbanas, local que atinge 800 ppb (Schmidt e Seiler, 1970; Ehhalt et al., 1977). Este mesmo grupo de estudo identificou diferenças de concentração de “background” entre os hemisférios norte e sul, sugerindo que o primeiro possui concentração 5% maior em relação ao segundo. Em contraste, Khalil e Rasmussen (1989, 1990), em estudo de série temporal entre 1986-1989, entre as latitudes $71^\circ N$ e $90^\circ S$, encontraram maior concentração no hemisfério sul (HS), ~520 ppb para este hemisfério contra ~490 ppb para o hemisfério norte (HN). Este estudo também mostrou um crescimento anual de 0,6 % de H_2 por ano.

No trabalho desenvolvido por Novelli et al. (1999), identificou-se sazonalidade na série temporal do H_2 . Esta é diferente entre os dois hemisférios, tanto na amplitude quanto na época de máximo e mínimo. A amplitude máxima é semelhante (530 a 550 ppb no HN e 540-560 ppb no HS). Para o HN a amplitude mínima é em torno de 20% menor que a máxima, e para o HS, a mínima é de apenas 5 a 6 % menor. A amplitude máxima no HS ocorre entre dezembro e fevereiro, enquanto que no HN, ocorre entre março e abril.

Os diversos estudos realizados identificaram quatro principais fontes de H_2 na troposfera, as quais somam 90% do total das fontes. Duas delas são fotoquímicas e duas são por combustão. Os processos fotoquímicos envolvem oxidação do metano e de hidrocarbonetos não metanos e, os processos de combustão incluem processos tecnológicos e de queima de biomassa. Os outros 10% são atribuídos a emissões por vulcões, oceano e durante a fixação de nitrogênio por leguminosas. Os principais sumidouros são as reações com hidroxilas (OH) e absorção pelo solo. Novelli et al. (1999) estudaram detalhadamente as fontes e os sumidouros desse gás.

Os três principais processos para a produção de H_2 a partir de processos fotoquímicos são: (1) a produção de formaldeído durante a oxidação do metano e compostos orgânicos não metanos (CONM); (2) a importância relativa da perda de HCHO pela fotólise na reação com OH; e (3) e através da fotólise de HCHO em função do comprimento de onda, temperatura e pressão. O caminho predominante da produção de formaldeído durante o dia é a reação de metano ou CONM com a OH, e durante a noite, da reação de metano ou CONM com NO_3 . A produção de hidrogênio a partir de hidrocarbonetos não metanos é o resultado de reações entre inúmeros compostos, com reação e taxa de fotólise dependendo de muitos parâmetros.

A queima de combustíveis fósseis é a maior fonte de hidrogênio atmosférico. A taxa de emissão de H_2 por este processo tem sido a mesma que a do CO (Warneck, 1988). Novelli et al. (1990) estimou H_2/CO em processos de combustão de CO entre 0,004 a 0,03. A combustão de florestas tropicais, savanas, agricultura e madeira é uma significativa fonte de gases traço incluindo H_2 e CO. A taxa de emissão de H_2 neste processo é baseada na emissão de CO_2 . A taxa de emissão de H_2/CO_2 foi estimada entre 0,017 a 0,037 (Crutzen e Andréa, 1990). A TAB. 1.2 apresenta a estimativa de emissão das fontes de H_2 calculadas por Novelli et al. (1999). A maior emissão de hidrogênio é devido à oxidação de metano seguida da oxidação de CONM. A queima de biomassa é a terceira principal fonte de emissão, seguida da emissão por processos tecnológicos. A emissão por processos biogênicos e pelo oceano contribui com apenas 6 Tg H_2 /ano.

A taxa remoção de H_2 da atmosfera através da reação deste com OH é proporcional à abundância desses reagentes. Outro contribuinte no balanço de H_2 para sua remoção da atmosfera é a deposição no solo. Essa perda é proporcional à concentração de H_2 na troposfera e à velocidade de deposição do mesmo. Esta última depende das condições do solo como temperatura e composição. As contribuições desses sumidouros estão apresentadas na TAB. 1.2. Nota-se que o principal sumidouro de H_2 é o solo, sendo responsável por quase 75 % da remoção total de H_2 da troposfera.

TABELA 1.2 – Balanço Global do H_2 Troposférico estimada por Novelli et al. (1999).

Fonte	Emissão (Tg H_2/ano)
Queima de Biomassa	16 ± 10
Processos Tecnológicos	15 ± 5
Oxidação do Metano	26 ± 9
Oxidação de CONM	17 ± 7
Fixação Biogênica de N_2	3 ± 1
Oceanos	3 ± 2
Sumidouros	
Oxidação pelo OH	19 ± 5
Absorção pelo Solo	56 ± 41

1.3 Potencial de Aquecimento Global

Foi elaborado um índice denominado Potencial de Aquecimento Global (PAG ou GWP, do inglês *Global Warming Potential*) para gerar uma estimativa do efeito climático que cada gás de efeito estufa pode gerar, baseado na forçante radiativa e no tempo de vida de cada gás na atmosfera. Este índice veio auxiliar no sentido de regulamentação futura das emissões dos gases de efeito estufa. O PAG foi definido como a variação na forçante radiativa na atmosfera em um determinado período de tempo (IPCC, 1990) para cada gás em função do CO_2 . Na TAB. 1.3 são mostrados os valores de PAG para os diversos gases no cenário de tempo de 20 anos, bem como a concentração desses gases em 1998 e 2005, além da porcentagem de aumento da concentração neste período. O óxido

nitroso, além de apresentar um PAG muito maior que o do CO₂ e do CH₄, possui um tempo de vida na atmosfera muito grande. Por isso contribui significativamente para o aquecimento global. Outro gás muito importante é o SF₆, que apesar de ter uma concentração relativamente pequena, apresenta maior taxa de crescimento, alto tempo de vida na atmosfera além de contribuição muito grande, cerca de 22200 vezes maior que o CO₂.

Tabela 1.3 – Valores de PAG para os diversos gases em três distintos cenários de tempo (20, 100 e 500 anos) e suas concentrações em 1998 (IPCC, 2001).

Espécies	Conc. 1998	Conc. 2005	% de aumento 2005/1998	Tempo de vida (anos)	Potencial de Aquecimento Global
					T = 20 anos
CO ₂	365 ppm	377,1 ppm	3,2%		1
CH ₄	1745 ppb	1783 ppb	2,2%	12 – 18	48 – 90
SF ₆	4,3 ppb	5,44 ppt	26,5%	3200	22200
N ₂ O	314 ppb	318,6 ppb	1,5%	121	290

1.4 Balanço de Energia na Terra – O Efeito Estufa

A quantidade máxima de energia proveniente do Sol situa-se na região da luz visível. O olho humano consegue perceber luz com comprimentos de onda entre 0,4 e 0,75 μm . A maior parte da energia emitida pelo Sol se encontra na faixa da luz visível, entretanto também há emissão em comprimentos de onda menor que 0,4 μm (ultravioleta) e maior que 0,8 μm (infravermelho – IR). A maior parte dos comprimentos de onda na faixa do ultravioleta são absorvidos na estratosfera, aquecendo o ar neste local, ao invés de aquecer a superfície da Terra. (Ahrens, 2000).

A energia emitida pela Terra se encontra na região do infravermelho apresentando comprimentos de onda que variam de 4 a 50 μm . Essa região é conhecida como **infravermelho térmico** porque sua energia é na forma de calor (Baird, 2002).

O balanço radiativo entre a radiação solar que chega à Terra e a que sai (solar refletida + infravermelho) influencia diretamente o clima do planeta. A FIG. 1.1 apresenta o Balanço Global de Energia na atmosfera terrestre, segundo dados publicados pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) em 1996.

FIGURA 1.1 – Esquema do Balanço Global de Energia na atmosfera terrestre em unidades de W.m^{-2} (IPCC, 1996).

A energia solar que penetra no sistema terrestre é, atualmente, em torno de 342 W.m^{-2} , dos quais 107 W.m^{-2} são retornados ao espaço (81 W.m^{-2} são refletidos pelas nuvens, partículas e gases e 26 W.m^{-2} são refletidos pela superfície), e 87 W.m^{-2} são absorvidos pela atmosfera. Os restantes 148 W.m^{-2} são absorvidos pela superfície terrestre. A superfície terrestre utiliza 15 W.m^{-2} para liberação de calor sensível, 78 W.m^{-2} para evapotranspiração e emite 390 W.m^{-2} na forma de radiação infravermelha. Somando o total de energia que a superfície da Terra emite tem-se 483 W.m^{-2} , contra 148 W.m^{-2} que a mesma recebe do Sol. Desta maneira a Terra deveria esfriar. Contudo isto não acontece pela presença dos gases de efeito estufa. Destes 390 W.m^{-2} emitidos pela superfície terrestre, 350 W.m^{-2} são absorvidos pelos gases de efeito estufa e apenas 40 W.m^{-2} são emitidos para o espaço. Desses 350 W.m^{-2} absorvidos pelos gases, 335 W.m^{-2} são enviados novamente para a superfície, que somados aos 148 W.m^{-2} oriundos do sol, totalizam assim, 483 W.m^{-2} de energia recebida pela superfície terrestre. Com

isso a temperatura da Terra permanece constante, em torno de 15°C. Esta temperatura está 33°C acima da temperatura que prevaleceria caso os gases de efeito estufa não existissem na atmosfera (-18°C).

Entretanto, a concentração desses gases na atmosfera tem aumentado com o tempo, como pode ser observado na FIG. 1.2. Isso faz com que a quantidade de energia retida na atmosfera também tenha aumentado como pode ser observado na FIG. 1.3 que apresenta o aumento da temperatura desde 1860.

FIGURA 1.2 – Concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa majoritários nos últimos 300 anos. Informações obtidas de estudos com testemunhos de gelo da Antártica e Groelândia. Linha contínua: resultados de medições atmosféricas (IGBP, 2003; Etheridge et al, 1992,1996; Blunier et al, 1993; Machida et al, 1995 e IPCC 2001).

Em projetos de pesquisas que começaram no início dos anos 80 e continuam até hoje, tenta-se, por meio de modelagem computacional, prever as consequências dessas mudanças no clima do planeta. Entretanto, existem algumas incertezas, dentre elas o fato de ainda não se entender integralmente todas as fontes e sumidouros dos gases. É dentro deste contexto que está inserido este projeto de pesquisa, que colocou seus esforços no estudo dos gases de efeito estufa na bacia Amazônica.

FIGURA 1.3 – Temperatura Global média na superfície terrestre (Baird, 2002; Canadian Climate Center, 1997).

1.6 Meteorologia

1.6.1. Estrutura da Atmosfera

A atmosfera terrestre é caracterizada pelas variações de temperatura e pressão com a altura. A FIG. 1.4 apresenta a divisão da atmosfera em camadas de acordo com características de temperatura e pressão. A *troposfera* é a camada mais baixa da atmosfera, que se estende da superfície até a tropopausa, altitude que pode variar de 10 a 15 Km, dependendo da latitude e da estação do ano. Suas principais características são o decréscimo da temperatura com o aumento da altitude e a rápida taxa de mistura vertical. É nesta região que ocorrem todos os fenômenos meteorológicos. A *estratosfera* inicia logo acima da tropopausa e se estende até cerca de 45 a 55 Km de altitude. Sua taxa de mistura vertical é lenta e nesta camada, a temperatura aumenta com o aumento da altitude. A camada *mesosfera*, que se estende até 80 a 90 Km de altitude, apresenta as mesmas características da troposfera, a temperatura decresce com a altitude e apresenta alta taxa de mistura. Entretanto, sua principal característica é a presença do ponto mais frio da atmosfera, em torno de -90°C e a cerca de 80 Km de altitude. A seguir, existe a camada denominada *termosfera*, devido a sua alta temperatura. Esta é resultado da absorção de radiação de comprimentos de onda curtos. Esta região também apresenta rápida taxa de mistura vertical. A

temperatura, nesta camada, aumenta com a altitude, porém sua taxa de mistura é bem menor que na troposfera. Existem outras camadas, como a ionosfera e a exosfera, as quais representam regiões extremamente elevadas da atmosfera. As regiões denominadas tropopausa e estratopausa são regiões de transição entre as camadas, caracterizadas pela cessação do aumento ou diminuição da temperatura (Seinfeld e Pandis, 1998).

FIGURA 1.4 – Representação da divisão da Atmosfera em camadas considerando a altitude, a pressão e a temperatura.

1.6.2 Circulação das massas de ar na atmosfera

A fim de compensar diferenças de pressão na atmosfera, ocorre o deslocamento de massas de ar. A direção de deslocamento, sentido de maior para menor pressão, não é o único fator dominante nesta circulação. Outras forças estão envolvidas neste processo. Os deslocamentos em larga escala da atmosfera incluem os ventos e a estrutura global, os quais são conhecidos como circulação geral. Umidade e energia são trocados entre a atmosfera e a terra e/ou o oceano. A tendência do transporte de energia dos trópicos para as regiões polares redistribui a desigualdade de energia na Terra, e é o fator global que governa a circulação geral da atmosfera (Seinfeld e Pandis, 1998). Essa desigualdade surge da diferente distribuição de radiação solar nos diferentes pontos do planeta.

Para compreender melhor uma das fases da circulação, supõem-se alguns fatores: a atmosfera terrestre está locada em um grande compartimento, a radiação solar é recebida principalmente na região do equador, a Terra não sofre rotação e sua superfície é uniforme, já que seu comprimento horizontal é muito maior que o vertical. Com isso, o ar mais quente da região central, tende a subir, e conseqüentemente, por diferença de temperatura, tende a se deslocar para a região dos pólos, o qual, ficando mais frio, tenderá a descer. Este fato gerará uma diferença de pressão que resultará no deslocamento das massas de ar mais frias, proveniente dos pólos, em direção à região equatorial. Esta circulação, representada na FIG. 1.5, é denominada *célula de Hadley*, em homenagem a George Hadley, cientista que propôs a idéia. A *célula de Hadley*, entretanto, não abrange todo hemisfério da Terra. A massa mais fria é proveniente da latitude média de 30°. O mesmo efeito desta célula ocorre entre as latitudes de 30° e 60°, e 60° e os pólos (~90°), denominadas *célula de Ferrel* e *célula Polar*, respectivamente (FIG. 1.6). As massas de ar frio são sempre provenientes das regiões de maiores latitudes.

FIGURA 1.5 – Representação da Célula de Hadley na atmosfera terrestre.

A Terra também sofre influência de uma outra força, conhecida como *Força de Coriolis*. Esta força é devido à rotação da Terra, a qual ocorre do oeste para o leste. No hemisfério sul, o movimento do ar, sofre um desvio para o oeste, quando o referencial está situado na superfície terrestre. Entretanto, se o referencial estiver no espaço, o observador verá como se nenhum desvio ocorresse. Este é o efeito proporcionado pela Força Coriolis.

FIGURA 1.6 – Representação das principais circulações gerais da atmosfera terrestre.

Os *ventos alísios* são ventos estáveis provenientes do oceano, considerados bom para navegação. As convergências dos ventos alísios provenientes dos hemisférios norte e sul produzem uma camada limite denominada Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Ela possui um deslocamento sazonal, acompanhando o ciclo anual do aquecimento terrestre (Ferreira et al., 2005). A sazonalidade dos deslocamentos em janeiro e julho está representada nas FIG. 1.7 e 1.8. Nota-se que no hemisfério Sul o deslocamento das massas de ar nos dois meses característicos de estações distintas é bastante diferente. Assim, a sazonalidade é um fator muito importante na análise da influência da atmosfera.

Os processos que envolvem deslocamento de ar através de propriedades físicas ou químicas de uma região da atmosfera para outra são coletivamente denominados transporte. A dinâmica da atmosfera é referida aos fenômenos físicos que ocorre na atmosfera terrestre e às leis físicas que os regem. Essas leis operam os processos de transporte por regular as escalas de tempo e direção do deslocamento atmosférico. Sem transporte, a produção e destruição local de espécies tenderiam ao equilíbrio, e a composição química da atmosfera se aproximaria do equilíbrio fotoquímico.

FIGURA 1.7 – Representação da circulação geral das massas de ar em Janeiro.

FIGURA 1.8 – Representação da circulação geral das massas de ar em Julho.

1.6.3 Camada Limite Planetária e Camada Limite Noturna

A Camada Limite Planetária (CLP) está localizada na troposfera e é um componente crítico do sistema do clima da Terra. Esta camada é mediadora de trocas de calor, momento, umidade e componentes químicos entre a superfície terrestre e a atmosfera livre, além de ser um grande sumidouro de energia cinética atmosférica (Medeiros et al., 2005). Os processos da CLP são também responsáveis pelas nuvens baixas e são de fundamental importância para a convecção *cumulus*. Por isso a CLP tem um papel importante nos balanços radiativos e de calor.

Os conhecimentos atuais sobre a CLP na região Amazônica são bastante limitados (Fisch, et al., 2004) e estão concentrados em medidas realizadas em experimentos iniciais como Experimento da Camada Limite na Amazônia (do inglês, *Amazon Boundary Layer Experiment* – ABLE), Estudo Observacional do Clima da Amazônia Anglo-Brasileira (do inglês, *Anglo Brazilian Amazonian Climate Observational Study* – ABRACOS) e Experimento da Camada Limite em Rondônia (do inglês - *Rondonia Boundary Layer Experiment* – RBLE). O experimento de ABLE coletou informação da CLP sobre a floresta tropical durante a Estação Seca de 1985, e obteve altitude de 1200 m. O ciclo diurno, variações de fluxo de vento, de umidade e de temperatura também afetam a altitude da CLP, mas ainda não é conhecida a magnitude desta influência.

Dois tipos de CLP são percebidos claramente sobre terra: a camada limite estável (CLE) e a camada limite convectiva (CLC). A CLE ocorre frequentemente durante a noite sobre a superfície e também é conhecida por Camada Limite Noturna (CLN). Quando o sol se põe, o resfriamento da atmosfera próxima à superfície ocorre mais rápido que o da atmosfera superior. É então iniciada uma situação de inversão de temperatura que faz com que uma camada de ar frio fique sobreposta entre uma camada de ar quente, impedindo o movimento ascendente do ar atmosférico. A CLN atinge altitude de apenas centenas de metros (100 a 300m). Neste fenômeno, os gases emitidos na superfície ficam estagnados próximo ao solo podendo ocasionar problemas de saúde e no meio ambiente (FIG. 1.9). A CLP varia sazonalmente, uma vez que

sua profundidade depende da temperatura. Além disso, existe diferença entre a CLP formada sobre a superfície e sobre o oceano (Medeiros et al., 2005).

FIGURA 1.9 – Esquema das Camadas Limites Planetária, Noturna e de Mistura.

1.7 A Bacia Amazônica

A Bacia Amazônica possui uma área estimada de 6,3 milhões de quilômetros quadrados, sendo aproximadamente 5 milhões em território brasileiro e o restante dividido entre os países da Bolívia, Colômbia, Equador, Venezuela, Peru, Suriname e Guiana. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a área de abrangência da Amazônia Legal corresponde em sua totalidade aos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins e, parcialmente, ao estado do Maranhão (a oeste do meridiano de 44°W), alcançando uma área correspondente a cerca de 61 % do território brasileiro (FIG. 1.10). Apesar de se constituir em aproximadamente 1,5% da superfície terrestre, a Amazônia possui cerca de 20 a 25% da biodiversidade do planeta e armazena mais de 100GTg de carbono na vegetação e solo (Nobre, 2002). A Amazônia é limitada a oeste pela Cordilheira dos Andes (com elevações de até 6000m), ao norte pelo Planalto das Guianas (com picos montanhosos de até 3000m), ao sul pelo Planalto Central (altitudes típicas de 1200m) e a leste pelo Oceano Atlântico, por onde toda a água captada na bacia escoar para o mar, o qual corresponde a 18% da descarga de água doce global nos oceanos ($220.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) (Nobre, 2002).

FIGURA 1.10 – Mapa da Amazônia Legal – Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, de Rondônia, Roraima, Tocantins e parcialmente Maranhão (fonte: www.ibge.gov.br)

Análises de imagens de satélites realizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) estimam que 646.154 km² da área da Amazônia Brasileira foram desmatadas até o ano de 2003 (FIG. 1.11). A FIG. 1.12 mostra a taxa média anual de desmatamento na Amazônia segundo o INPE até o ano de 2003. As áreas que mais sofreram com o desmatamento são as regiões sul e leste do Pará (após a construção da rodovia Belém-Brasília) e as regiões do norte do Mato Grosso e sul de Rondônia (devido à rodovia Cuiabá – Porto Velho) (Nobre et al., 2001). Estas rodovias foram planos do governo para facilitar o acesso na região central amazônica (Laurance et al., 2001), o que acelera o desflorestamento, devido à fixação de famílias na beira da estrada, que por sua vez desmatam para sua sobrevivência. O chamado “arco do desmatamento” concentra a maior parte das áreas desmatadas e a conseqüente emissão de gases traço e aerossóis para a atmosfera.

FIGURA 1.11 – Extensão de desflorestamento acumulado bruto (em km²) de 1988 a 2003.

FIGURA 1.12 – Taxa média de desflorestamento bruto (km²/ano) de 1988 a 2003

(Fonte: www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2003.htm).

A Região Amazônica é uma importante fonte de calor e vapor de água para a atmosfera global e tem um papel fundamental na circulação atmosférica global (Garstang e Fitzjarrald, 1999). As regiões Central e Sul da Amazônia mostram uma grande convergência da umidade, especialmente durante a estação chuvosa. A região do Atlântico tropical é uma grande fonte de umidade para a Bacia Amazônica (Marengo, 1992), da mesma forma que a Amazônia é fonte de umidade para regiões temperadas (Garreaud e Wallace, 1998; Liebmann et al., 1999; Marengo et al., 2001b). A inclusão de ar tropical nas latitudes médias está relacionada com a circulação da Alta Subtropical do Atlântico Sul e com a Baixa do Chaco através de seus efeitos nos jatos de baixos níveis (Marengo et al., 1997).

A variabilidade da precipitação sobre a Amazônia é dominada por um claro ciclo sazonal.

Os meses com altas taxas de precipitação são chamados de Estação Úmida ou Chuvosa. Já os períodos de forte estiagem são chamados de Estação Seca. A FIG. 1.13 mostra a climatologia de precipitação para o Brasil, contendo taxas de precipitação entre 1960 e 1991 (INPE, 2006). A intensa atividade convectiva associada à abundante precipitação começa no noroeste da América do Sul no mês de agosto e segue progressivamente em direção ao sudeste. O pico de atividade da Estação Chuvosa no centro da Amazônia ocorre durante o verão austral, preferencialmente entre os meses de dezembro e fevereiro. A convecção profunda começa a debilitar-se sobre a Amazônia no início de março e a Estação Seca persiste através de quase todo o inverno austral (Horel et al., 1989).

Os mecanismos que provocam precipitação na Amazônia foram caracterizados por Greco et al., (1990), como: (1) Sistemas de mesoescala a escala sinótica que se formam no interior da bacia Amazônica, cujo tamanho varia de 1.000 a 100.000 Km²; (2) Linhas de instabilidade (LIs) consistindo de aglomerados convectivos de meso a escala sinótica originadas na costa N-NE pela circulação da brisa do mar. As LIs são linhas organizadas de *cumulus nimbus* que podem se propagar a 3.500 Km e que se propagam perpendicular a

costa em direção a bacia Amazônica. A localização meridional das LIs seguem a Zona de Convergência Inter-Tropical (ZCIT); (3) Aglomerados convectivos de meso e larga escala, associados com a penetração de sistemas frontais na região S/SE do Brasil, interagem com a região Amazônica (Molion, 1987). Os sistemas frontais no SE do Brasil provocam a organização e formação de uma faixa de nuvens orientada no sentido NO/SE, que possui sua máxima intensidade nos meses de verão, aumentando o regime de precipitação da região Amazônica. A Zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um dos fenômenos mais importantes na escala intra-sazonal, ocorrendo na América do Sul durante o verão, com episódios de estiagem prolongada e enchentes que atingem diversas regiões do país (Seluchi e Marengo, 2000).

No início da Estação Chuvosa, o comportamento da precipitação é continental, variando para regime tipo marítimo durante a mesma estação. Esta variação na Estação Chuvosa está associada ao controle de larga escala, tais como a presença ou a ausência de convergência em baixos níveis, provocada pela aproximação de sistemas frontais de latitudes médias ou de estabelecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (Silva Dias et al., 2001). A precipitação é mais freqüente durante o dia, mas também ocorre durante a noite, quando as forçantes de grande escala estão presentes. Mudanças observadas entre a densidade de raios em ambos os regimes indica uma significativa diferença na estrutura vertical das nuvens (Cifelli et al., 2002).

Nos meses de Seca, ocorrem desmatamentos e queimadas, os quais constituem uma das grandes questões ambientais que o Brasil se defronta atualmente (FIG. 1.14). O fogo é utilizado pelos agricultores da Amazônia para converter florestas em áreas de plantio ou pastagens, além do combate às plantas invasoras de pastagens e atua como ferramenta no controle de pragas. A queimada na Amazônia também tem aspectos sócio-culturais (Nepstad, 1999, 2002).

FIGURA 1.13 – Climatologia da precipitação no Brasil integrando medidas de 1960 a 1991 (fonte: Climanálise, INPE).

FIGURA 1.14 – Queimadas e desmatamento na Região Amazônica.

1.8 O Projeto LBA

Para responder questões climáticas e da atmosfera, foi criado um grande projeto interdisciplinar e com parcerias internacionais, para estudar melhor a Floresta Amazônica. Sob a coordenação do INPE, foi criado o LBA (Experimento em Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia, *Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*). O LBA está centrado em torno de duas questões principais abordadas através de pesquisa multidisciplinar: (1) De que modo a Amazônia funciona, atualmente, como entidade regional? e (2) Como as mudanças no uso da terra e clima afetarão as funções química, física e biológica da Amazônia, incluindo a sustentabilidade de desenvolvimento na região e a influência da Amazônia no clima global.

O objetivo do LBA é gerar novos conhecimentos, necessários à compreensão do funcionamento climatológico, ecológico, biogeoquímico e hidrológico da Amazônia, do impacto das mudanças dos usos da terra nesse funcionamento, e das interações entre a Amazônia e o sistema biogeofísico global da Terra. O LBA tem componente Brasileira, Americana e Européia e conta com

a participação de Universidades e Institutos de Pesquisa e recursos nas três componentes.

Dentro deste grande projeto, foi desenvolvido o projeto “**Vertical profiles of carbon dioxide and other trace gas species over the Amazon basin using small aircraft**”, coordenado pelo Dr. Pieter Tans e John B. Miller, tendo como contrapartida brasileira os pesquisadores Luciana V. Gatti (IPEN), Martinelli, M.Z. (CENA/USP), P. Artaxo (IF/USP). Este projeto foi desenvolvido para confirmar os resultados do estudo de fluxo de torre e para testar extrapolações do local de medida de fluxo para escala regional. Para tal, foi necessário obter estimativas independentes de troca de CO₂ sobre grandes áreas, pois as medidas diretas de troca de CO₂ entre a atmosfera e a superfície por eddy covariância realizadas em diversas localidades na bacia Amazônica, representam uma pequena escala, tipicamente uns poucos hectares. Adicionalmente, as medidas em torre apresentam uma subestimação do fluxo de respiração noturna, como foi reportado pelos grupos que trabalham com estas medidas nos diferentes encontros científicos que ocorreram em 2001 a 2005 dentro do projeto LBA. Os dados de razão de mistura de gases traço abaixo da CLP, sobre a floresta tropical, fornecem uma importante ferramenta para o modelo estimado de fluxos em escala regional. Além disso, fornece uma estimativa independente de troca regional que é crucial para o estabelecimento de confiança em resultados a partir da escala de observações de fluxo de torre para a região toda.

2 OBJETIVOS

Os objetivos gerais deste trabalho foram:

1. Implementação do sistema MAGICC (Multiple Analysis of Gases Influence Climate Change) no LQA
2. Quantificação dos Gases de efeito estufa (dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), hexafluoreto de enxofre (SF_6), e hidrogênio (H_2), coletados em vôos quinzenais em dois locais na Amazônia: Floresta Nacional do Tapajós, Pará e Reserva Biológica de Cuieiras, Amazonas.
3. Análise e interpretação dos resultados obtidos em cooperação com os pesquisadores da NOAA, nossos parceiros neste projeto e pesquisadores Brasileiros da área. Analisando sazonalidade e efeito das queimadas nas concentrações dos gases e aumento de concentração em função do aumento global.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

1. Instalação e adequação dos equipamentos do sistema MAGICC (Multiple Analysis of Gases Influence Climate Change) de medidas de gases de efeito estufa no LQA e desenvolvimento de metodologia e estabelecimento de rotina analítica nos mesmos padrões do Laboratório de Gases de efeito estufa da NOAA/CMDL.
2. Preparação e manutenção das malas de amostragem automáticas para uso em avião, contendo 17 frascos de vidro.
3. Fornecer dados para alimentação de modelos climáticos de escala regional e global.

3 Caracterização dos Locais Amostrados e Metodologias de Coleta e Análise das Amostras de Ar

3.1 Caracterização dos locais de amostragem

As amostras foram coletadas na Floresta Nacional do Tapajós (Flona Tapajós), no estado do Pará e na Reserva Biológica de Cuieiras no estado do Amazonas. Os locais amostrados foram determinados por terem sido locais pré-estabelecidos para outros estudos realizados na região de fluxos de gases traço, a fim de permitir comparação entre os resultados coletados. Nestes locais estão situadas torres de medidas micrometeorológicas e de medidas de fluxo.

3.1.1 Floresta Nacional do Tapajós

A Floresta Nacional do Tapajós é uma floresta primária e reserva ecológica do IBAMA. Possui aproximadamente 600.000 hectares e está localizada na área centro-oeste da Amazônia, a 70 Km ao sul de Santarém. A oeste é margeada pelo Rio Tapajós e a leste pela Rodovia BR-163, conhecida como Rodovia Santarém-Cuiabá. Esta rodovia intercepta a Transamazônica, 180 Km ao sul de Santarém. A média pluviométrica anual é de 2200 mm de chuva, sendo 2000 mm apenas durante a estação chuvosa, a qual ocorre de janeiro a julho. A temperatura média anual é de 25°C (Silver et al., 2000). O dossel tipicamente fechado apresenta uma altitude aproximada de 45 m, com a presença de árvores que podem ultrapassar seu topo, atingindo 55 m de altitude. O terreno é descrito como “plano alto” ou “terra firme”. A textura do solo varia de argiloso a arenoso.

A Rodovia permitiu o acesso à área da floresta primária, o que acentuou o desflorestamento a partir de meados da década de 1970 (Asner, et al., 2003). A principal causa do desflorestamento é a pastagem, porém existem outras formas como a agricultura e extração de madeira (Scatena et al., 1996).

As coletas foram distribuídas em dois pontos. O primeiro ponto de amostragem é sobre a Torre de Fluxo de CO₂, situada a 8 km a oeste do Km 67 da Rodovia BR-163 (02°51'S, 54°58'O), onde foram amostrados 10 frascos nas altitudes de: 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7500, 9000, 10500 e 12000 pés, sendo que o vôo é realizado em espiral. O segundo ponto de amostragem fica mais a leste, fora da Floresta Nacional do Tapajós, sobre região com

influência significativa de atividades de agricultura e pecuária (denominada a partir deste ponto de Área Antropizada) ($02^{\circ}52'S$; $54^{\circ}41'O$). As altitudes amostradas nos perfis verticais neste local foram: 12000, 10000, 8000, 6000, 4000, 2500 e 1000 pés. Os locais podem ser observados na FIG. 3.1, indicados com as referências 1 e 2, respectivamente.

FIGURA 3.1 – Imagem de Satélite mostrando os locais amostrados no Estado do Pará (escala: 1:50.000).

As amostras foram realizadas de dezembro de 2000 a junho de 2005, sendo que a primeira fase da coleta compreendeu o período de 2000 a 2003. a segunda fase, período deste projeto, iniciou a partir de 2004. As coletas foram realizadas sempre entre as 12:00 e 14:00 horas, horário local, no horário de altura máxima da camada limite.

3.1.2 Reserva Biológica de Cuieiras

A Reserva Biológica de Cuieiras, localizada a 60 Km ao noroeste de Manaus, é uma floresta primária e pertence ao Instituto de Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) desde o começo da década de 70, quando um pequeno acesso por rodovia foi aberto. Devido à distância dos rios e do difícil acesso, a área é bastante preservada, além de possuir solos com baixa fertilidade natural, isto é, pobres em nutrientes e com elevada acidez (pH 4,3). A Reserva Biológica

de Cuieiras possui uma área de 22.735 ha. e o acesso é feito pela BR-174 a qual liga Manaus a Caracas. A região apresenta uma pequena variação sazonal da temperatura do ar, entre 24 a 27°C, com média anual de 26,7°C (Leopoldo et al., 1987). A média da pluviometria anual é de 2200 mm (Andrea, et al., 2002; Araújo et al., 2002). O dossel é bastante uniforme. As árvores têm a altura média de aproximadamente 40m e são bastante diversificadas.

As coletas foram divididas em dois pontos para a comparação entre os valores encontrados na Reserva Biológica de Cuieiras, onde já existe certa ocupação de atividades rurais próximas e uma região a leste mais remota, para verificarmos se os resultados estariam influenciados pelas atividades próximas. No ponto de coleta sobre a Torre K34 (2°35'S, 60°12'O), ponto A (FIG. 3.2) foram amostrados 9 frascos nas altitudes de: 12000, 10000, 8000, 6000, 5000, 4000, 3000, 2000 e 1000 pés. Na região mais a leste (Ponto B FIG. 3.2), em uma área remota de coordenada (2°30'S, 59°05'O), foram coletados 8 frascos nas altitudes de: 1000, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000 pés.

FIGURA 3.2 – Imagem de Satélite mostrando os locais amostrados no estado do Amazonas (escala: 1:50.000).

As amostras foram coletadas no período compreendido entre dezembro de 2004 a novembro de 2005. As coletas foram realizadas entre as 12 e 14 horas, horário local, no horário de altura máxima da camada limite.

3.2. Amostragem

As amostras foram realizadas utilizando um conjunto de duas malas semi-automáticas, desenvolvidas pelo CMDL/NOAA. A primeira mala contém dois compressores e baterias recarregáveis e permanece no local amostrado (FIG 3.3a). A segunda mala contém 17 frascos de vidro, válvulas para amostragem e um microprocessador que controla a amostragem e armazena informações sobre a mesma (FIG 3.3b).

FIGURA 3.3 – Sistema de coleta de ar semi-automático: (a) Mala de Amostragem. (b) Unidade Compressora.

Na coleta foram utilizadas aeronaves de pequeno porte, com teto máximo de 12.000pés. Um tubo coletor foi instalado na janela da cabine do piloto (FIG. 3.4a) de modo que não houvesse influência da emissão do avião, já que o motor é localizado na asa. A FIG. 3.4b mostra as malas de amostragem e compressora acomodadas no avião de coleta.

FIGURA 3.4 – Aeronave de pequeno porte utilizada na coleta das amostras (a) com enfoque no tudo coletor e (b) mostrando a disposição das malas de amostragem e compressora na mesma.

O tubo coletor era conectado na unidade compressora que transfere o ar para a unidade que contém os frascos. Nesta mesma unidade de coleta era conectado um equipamento, denominado “*Pilot display*”, que indica a altitude previamente programada onde deve ser feita cada coleta. Com o acionamento do equipamento, a coleta, com processo automático, era iniciada. Primeiramente eram passados 5 L de ar somente pelo “*manifold*”, seguido da abertura das válvulas do frasco correspondente à altura, local onde eram passados 10L de ar para condicionamento do frasco. Após esse condicionamento a válvula posterior era fechada e o ar amostrado comprimido até atingir a pressão de 40 psi, quando então a válvula dianteira era fechada. O “*Pilot display*” então indicava a próxima altura, e o avião conduzido até esta nova altitude. Ao atingi-la o piloto novamente acionava o botão e esse mesmo procedimento era realizado para cada altitude de coleta.

3.3 Análise

O sistema de análise dos gases CO_2 , CH_4 , CO , H_2 , N_2O e SF_6 foi desenvolvido pelo CMDL/NOAA para a análise em seqüência destes gases, denominado MAGICC (Multiple Analysis of Gases Influence Climate Change) e uma réplica foi construída e instalada no IPEN/LQA (Laboratório de Química Atmosférica). Os equipamentos de amostragem foram construídos, testados e desenvolvidos durante a Fase I deste projeto no LBA, e a Dra. Luciana Vanni

Gatti participou desta construção. A necessidade de instalar este equipamento no Brasil foi devida à dificuldade de importação e exportação das malas de amostragem. Este fato resultou em longos períodos sem amostragem, além de coletas apenas na Estação Chuvosa. Após a implementação destes equipamentos no Brasil, houve, pela primeira vez, coletas contínuas nas Estações Seca e Chuvosa.

3.3.1 Descrição dos Equipamentos

O equipamento utilizado para análise do CO_2 (LI-COR modelo LI-7000) é um analisador de gás infravermelho, diferencial, não dispersivo de alta precisão (NDIR). A fonte de infravermelho é constituída de um filamento de tungstênio e é selada a vácuo. O sistema diferencial trabalha por diferença de absorção da radiação do infravermelho o qual passa por duas células de amostragem. Como apresentado no esquema da FIG. 3.5a, na célula A é passado um gás de referência com concentração em torno de 330 ppm em um fluxo constante de 5 ml/min (Padrão Primário White Martins), sempre abaixo da concentração da amostra e dos padrões, e na Célula B é passado o gás a ser analisado. A FIG. 3.5b mostra o esquema mais detalhado de uma célula.

FIGURA 3.5 – (a) Esquema de entrada e saída dos gases de referência e amostra nas células do monitor de CO_2 (LI-COR LI-7000); (b) Esquema detalhado de uma célula do monitor de CO_2 (LI-COR LI-7000).

A radiação infravermelha é transmitida para as duas células e os detectores presentes nas duas células absorvem a radiação e a mesma é medida.

Filtros ópticos são usados para ajustar o detector de CO₂ para absorção na banda de 4,255 microns (banda emitida pelo CO₂) e rejeitar radiação em outra banda, aumentando a precisão do instrumento. A concentração do gás amostrado é calculada em relação à concentração conhecida do gás de referência.

A quantificação do CH₄ é realizada utilizando-se um cromatógrafo gasoso, da marca HP (Hewlett Packard) modelo HP 6890 series Plus +, com detector de ionização de chama (FID), com pré-coluna de 198 cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo e empacotada com Sílica Gel 60/80 mesh e uma coluna de 106 cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo, e empacotada com Peneira Molecular 5A 60/80 mesh. O sistema utiliza uma válvula de 10 vias com duas posições (Valco) e um "loop" de 12 mL para a injeção da amostra e a separação de compostos indesejados.

Quando a válvula de 10 vias está na posição "load" (FIG. 3.6a) a amostra passa pelo "loop" por 3 minutos para a descontaminação e condicionamento do mesmo, e apenas o gás carreador N₂ (6.0 – 99,9999% de pureza – White Martins) está passando pela pré-coluna e pela coluna a uma temperatura de 70°C e com fluxo de 80 ml/min. Ao mudar para a posição "inject" (FIG 3.6b), a amostra contida no "loop" é transferida para a pré-coluna com o auxílio do gás carreador. No momento em que o gás amostrado atinge a coluna, a válvula de 10 vias volta para a posição "load" e então é iniciada a limpeza da pré-coluna, através da passagem do gás carreador na mesma, em sentido oposto. No detector FID, a amostra gasosa é misturada com hidrogênio (45ml/min) e queimada no ar sintético (250 ml/min) de composição especial (60% N₂ e 40% O₂ – White Martins). Os íons e elétrons formados na chama entram no compartimento do eletrodo e provocam um decréscimo na resistência deste último, o que altera a corrente inicial, que é formada pela passagem do gás carreador no detector (FIG. 3.7). Desta maneira é quantificado o gás metano.

FIGURA 3.6 – Esquema de funcionamento do cromatógrafo HP 6890 Plus + na análise do gás metano (a) posição de espera, (b) posição de injeção da amostra no equipamento.

FIGURA 3.7 – Esquema de funcionamento do detector FID do cromatógrafo HP 6890 Plus.

O instrumento que analisa o CO e o H₂ é o monitor da Peak Laboratories CO/H₂ Monitor. Este sistema é capaz de detectar baixas concentrações em ppb. Existe um filtro com combustor catalítico que oxida o CO presente no gás carreador (Ar Sintético – White Martins) para CO₂. O gás a ser amostrado é inserido no equipamento através do *loop* pelo mesmo procedimento descrito anteriormente. O esquema deste monitor está apresentado na FIG. 3.8. O gás carreador (20 ml/min) arrasta a amostra para um sistema de duas colunas de 1/8" de diâmetro externo situadas dentro de um forno, a 100°C. Desta coluna, o gás passa por um leito aquecido (265°C) de óxido de mercúrio (HgO), e os gases CO e o H₂ contidos na amostra reagem com o óxido de mercúrio, conforme as reações (3.1) e (3.2), liberando vapor de mercúrio que é quantificado.

O vapor de mercúrio liberado é quantificado pela absorção de luz ultravioleta na banda de 254 nm, que atravessa a câmara de leitura. Pela diferença entre a radiação emitida e a que chega ao fotômetro, após entrar em contato com a amostra, tem-se um sinal proporcional à concentração de CO ou H₂ contidos na amostra (FIG. 3.9). Os gases CO e H₂ são separados nas colunas do equipamento e chegam ao detector em tempos diferentes.

FIGURA 3.8 – Esquema de funcionamento do monitor de CO/H₂.

FIGURA 3.9 – Esquema do detector do monitor de CO/H₂.

O sistema de análise do N_2O/SF_6 é composto de um cromatógrafo gasoso, da marca HP (Hewlett Packard) modelo HP 6890 series Plus +, com detector de captura eletrônica (ECD), com pré-coluna de 183 cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo e empacotada com Haysep Q 100/120 mesh e uma coluna de 183 cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo e empacotada com Haysep Q 100/120 mesh, além de um "loop" de 15 mL de volume, em um forno a 70°C. Este sistema também possui uma válvula de 10 vias com duas posições ("inject" e "load").

FIGURA 3.10 – Esquema de funcionamento do detector ECD.

O mecanismo de funcionamento deste cromatógrafo é o mesmo anteriormente descrito para o gás metano (FIG. 3.6). Neste caso o gás de arraste é uma mistura de argônio/5% metano (74 ml/min, Padrão Primário White Martins). Outra diferença é o detector, que neste caso é por captura eletrônica. O detector ECD (FIG. 3.10) utiliza uma fonte de ^{63}Ni , a qual ioniza as moléculas, e são formados elétrons lentos. Estes elétrons migram para o anodo (célula voltaica), os quais produzem uma corrente padrão. Quando a amostra ionizada entra no detector, a corrente é reduzida, e esta diferença é proporcional à quantidade de composto.

A FIG. 3.11 apresenta a disposição destes equipamentos no LQA.

FIGURA 3.11 – Sistema MAGICC 3/Brasil – Sistema de análise de Gases de Efeito Estufa no LQA/IPEN. Onde 1: Monitor LI-COR (CO_2); 2: Monitor de CO/H_2 Peak Laboratories (CO/H_2); 3: Cromatógrafo gasoso HP ($\text{N}_2\text{O}/\text{SF}_6/\text{CH}_4$); 4: Controlador de fluxo dos gases; 5: Válvula “Sample select e System select”; 6: sample/ CO reference; 7: Medidor de vácuo e Receptor de amostras; 8: Interface do cromatografo ; 9: Banho resfriador; 10: Microcomputador; 11: Painel de gases, 12: interface do monitor de CO_2 , 13: interfaces das válvulas e do monitor CO/H_2 .

3.3.2 Acurácia dos Resultados

A acurácia dos resultados é devida ao método do cálculo da concentração da amostra, que compara as amostras analisadas com gases de referência produzidos pela NOAA. A cada amostra analisada dos gases N_2O , SF_6 , CO , H_2 e CH_4 , é analisado, por duas vezes, o gás de referência, uma antes e outra depois da análise da amostra e a média é utilizada como valor referência, podendo ser representada a seqüência dos gases no cálculo da seguinte maneira:

referência – amostra – referência – amostra – referência – amostra – referência

Para o cálculo da concentração, é feita uma média dos padrões referências anterior e posterior à amostra e o valor utilizado para a quantificação é a razão da amostra pela média da referência. Esta fração é utilizada na curva de

calibração, sendo que a curva também é construída com a razão dos vários pontos de concentração e do gás referência (item 3.3.3). Normalizando assim, alterações que a variação de temperatura e pressão trariam a resposta do detector.

Para a quantificação do CO₂, é construída uma curva de calibração a cada amostra, onde são utilizados três gases de referência de concentrações diferentes para abranger a grande variação na concentração deste gás encontrada na atmosfera, o que diminui consideravelmente o erro de amostragem. Neste caso, o sistema pode ser representado da seguinte maneira:

Ref.(L) – Ref.(M) – amostra – Ref.(H) – amostra – Ref.(L) – amostra – Ref.(M) – amostra Ref.(H) – amostra – Ref.(L) – amostra – Ref.(M) – Ref.(H)

Os símbolos L, M e H significam, respectivamente, as concentrações baixa (“*low*”), média (“*médium*”) e alta (“*high*”)

A TAB. 3.1 apresenta a precisão do sistema MAGICC no Brasil e na NOAA. Nota-se que para os gases CO₂, N₂O e SF₆, a precisão é similar à precisão estipulada pela NOAA. Já para os gases CH₄, CO e H₂ os valores estão mais altos, isto é, a precisão é menor. A possível causa é a qualidade dos gases carreadores utilizados. Sistemas de purificação adicionais foram desenvolvidos para minimizar contaminações nos gases utilizados no sistema como gases carreadores e oxidantes. Para calcular a estabilidade do sistema foi utilizado um cilindro gás calibrado pela NOAA (ref. CA05558) o qual apresenta concentração padronizada para todos os gases analisados no sistema. Para tal, este cilindro foi analisado quinzenalmente durante 10 meses. A variação das concentrações obtidas representa a estabilidade do sistema. Analisando a porcentagem da precisão do sistema, percebe-se que o CO e H₂ são os gases que apresentam maior diferença do sistema MAGICC em funcionamento na NOAA, entretanto, esta ainda é muito baixa (0,18% e 0,17%, respectivamente). O sistema de análise de CO₂ é o mais preciso, pois a porcentagem da precisão em relação à concentração estudada foi de 0,01 %.

TABELA 3.1 – Precisão das espécies gasosas analisadas no MAGICC/CMDL/NOAA e no MAGICC/LQA/BRASIL e estabilidade do sistema MAGICC.

Espécies	Precisão do	Precisão do	Estabilidade do
	MAGICC/CMDL NOAA	MAGICC/LQA Brasil	Sistema MAGICC/LQA
CO ₂	0,05 ppm	0,03 ppm	0,02 %
CH ₄	< 1 ppb	1,9 ppb	0,11 %
CO	0,5 ppb	0,97 ppb	0,18 %
H ₂	0,5 ppb	3,9 ppb	0,17 %
N ₂ O	0,2 ppb	0,27 ppb	0,08 %
SF ₆	0,03 ppt	0,05 ppt	0,04 %

3.3.3 Curva de Calibração

Os gases CH₄, H₂ e SF₆ possuem relação linear da concentração com a área, para as concentrações estudadas, sendo também valores bastante estáveis. Assim, apenas um gás de referência é necessário para o cálculo da concentração desses, uma vez que o gás de referência tem uma concentração muito próxima da medida nas amostras.

Os gases N₂O e CO não possuem relação linear da concentração com a área, motivo pelo qual, as curvas de calibração são construídas com 5 e 7 padrões, respectivamente. Estudos do CCG/CMDL/NOAA recomendam calibração para o CO a cada 15 dias e para o N₂O a cada 30 dias. Os padrões utilizados na construção destas curvas foram calibrados no laboratório de calibração da CCG/CMDL/NOAA. As concentrações dos padrões utilizados na calibração desses gases estão apresentadas na TAB. 3.2.

TABELA 3.2 – Concentrações dos padrões para a construção das curvas de calibração do CO e N₂O, respectivamente.

CO			N ₂ O		
Ref	Padrão	Concentração	Ref	Padrão	Concentração (ppb)

(ppb)					
CA05938	1	0,00	FA01038	1	264,83 ± 0,23
CA03823	2	47,5 ± 0,9	FF13160	2	295,34 ± 0,16
CA03885	3	66,5 ± 0,7	FF138	3	321,15 ± 0,20
CA03801	4	70,9 ± 0,8	FF35820	4	337,36 ± 0,18
CA05558	5	137,8 ± 1,4	FF17254	5	372,89 ± 0,35
CA03900	6	199,0 ± 1,9			
CA03803	7	299,6 ± 3,0			

No caso do gás CO₂ são construídas pequenas curvas de calibração a cada análise de amostra. Assim, para a construção desta curva, são utilizados os três gases de referência, conforme explicado no item anterior. Os cilindros com as concentrações utilizadas na construção destas curvas estão apresentados na TAB. 3.3.

TABELA 3.3 – Concentrações dos padrões para a construção da curva de calibração do CO₂.

CO ₂		
Ref	Padrão	Concentração (ppb)
CA05561	L	357,40 ± 0,0
CA05614	M	380,20 ± 0,01
CA05570	H	405,13 ± 0,02

3.3.4 Sistema Analítico

A FIG. 3.12 representa o esquema dos instrumentos utilizados nas análises para facilitar o entendimento do método de análise. O sistema MAGICC é totalmente automatizado. Três válvulas de múltiplas posições compõem o sistema de separação dos gases de referência e amostras para os respectivos instrumentos de análise. Todas as válvulas possuem um sistema de funcionamento semelhante. É permitida a passagem de apenas um gás por vez.

Desta maneira é possível fazer a seleção dos gases. As válvulas “*sample select*” e “*sample/CO reference*” (vide FIG. 3.12) possuem várias entradas e apenas uma saída, selecionando qual gás (referência ou amostra) é analisado. Já a válvula “*system select*” possui apenas uma entrada e várias saídas que permitem o direcionamento de cada gás para o equipamento específico de análise.

O gás a ser analisado (amostra ou referência) é selecionado pela válvula “*sample select*” a qual direciona o mesmo para um medidor/controlador de fluxo, que controla o fluxo em 150ml/min para todos os gases, exceto para a análise do CO₂, onde é utilizado um fluxo de 200ml/min. A amostra ou padrão referência passa por um “*loop*” resfriado a $-60,0^{\circ}\text{C}$, por um banho contendo álcool, que é resfriado por processo elétrico para a remoção de possível água existente na amostra. Então é transferido para a válvula “*system select*” para direcionar o gás para o instrumento o qual analisará o mesmo.

FIGURA 3.12 – Esquema de Funcionamento do Sistema MAGICC-Brasil.

3.4 Limpeza e Preparação da Mala de Amostragem

Após a análise, a primeira etapa de preparação da mala de amostragem é a secagem dos frascos, para remover possível umidade adquirida

durante a coleta. Na secagem é utilizado ar ultra-seco produzido por um sistema de secagem de ar instalado no LQA. Esse sistema, desenvolvido no LQA, apresentado na FIG. 3.13, contém várias etapas para a secagem e limpeza do ar comprimido por um compressor de pistão, equipamento utilizado por dentistas, por produzir um ar sob pressão mais limpo, além de duas etapas de remoção de água. A primeira etapa de remoção está logo após o compressor e a segunda, antes dos demais purificadores, uma vez que na compressão uma grande quantidade de água é condensada. No item (a) da FIG. 3.13 vê-se o segundo filtro de remoção de água com um manômetro. O item (b) é um frasco com carbono ativado para remoção de compostos orgânicos. O item (c) é um frasco com filtro de celulose para remover água e partículas. O item (d) um conjunto de dois equipamentos, sendo o primeiro um manômetro, o qual tem a função de medir a pressão de entrada no equipamento com alta eficiência de secagem da Permapure, uma vez que este tem condição de pressão ótima para melhor desempenho e tempo de vida útil. O segundo é um equipamento de secagem tem duas grandes colunas com peneira molecular 5A e um sistema de auto-regeneração. A pressão ideal de trabalho para uma melhor eficiência do equipamento de secagem da PermaPure é entre 80 e 100 psi. Com este sistema é possível obter ar com umidade relativa de $0,4\% \pm 0,1\%$. Cada frasco é submetido à passagem do ar ultra-seco por 30 minutos com fluxo entre 35 e 40 l/min.

Após a secagem dos frascos, é feito o condicionamento dos mesmos utilizando um padrão de gás carbônico com concentração em torno de 330 ppm. O condicionamento é realizado para que o ar contido dentro dos frascos esteja numa concentração menor que a encontrada no ambiente coletado, evitando contaminações na amostra.

FIGURA 3.13 – Sistema para a obtenção de ar ultra-seco com (a) manômetro, (b) um frasco com carbono ativado para remoção de compostos orgânicos, (c) um frasco com filtro de celulose para remover água e partículas e (d) equipamento de auto-regeneração para secagem de ar com manômetro acoplado.

Realizados a limpeza e o condicionamento dos frascos de amostragem, é realizada a programação da mala de amostragem nas condições de vôo. Nesta programação são estipulados: o volume para condicionamento na amostragem, as pressões de condicionamento e de coleta para cada frasco, as altitudes a serem coletadas, bem como informações adicionais, como locais de amostragem e identificação da mala. Este dois últimos ficam armazenados na memória, sendo necessária sua programação apenas em caso de perda de memória da mala.

4 Resultados e Discussão

4.1 Floresta Nacional do Tapajós e Área Antropizada a Leste

Anteriormente aos vãos realizados neste projeto, foram realizados vãos de amostragem iniciados em dezembro de 2000, na primeira fase do projeto no LBA Ecology (Financiado pela NASA), entretanto nunca estudados. Este estudo foi realizado primeiramente durante o desenvolvimento deste trabalho de mestrado.

4.1.1 Caracterização dos Períodos Estudados

Na Região Amazônica existem duas estações típicas, a chuvosa e a seca, as quais são caracterizadas pela constância ou não de chuva, respectivamente. A emissão e o sumidouro dos gases em cada estação são diferentes. Portanto, para um melhor estudo das possíveis fontes e sumidouros dos gases coletados nesta região, classificaram-se os vãos realizados nestas duas estações de acordo com o índice pluviométrico e as queimadas observadas via satélite neste período. Os dados de precipitação mensal acumulada foram obtidos na estação meteorológica de Belterra no estado do Pará (Fonte: INMET) e estão apresentados na FIG. 4.1. O número de focos de queimadas no Estado do Pará (Fonte: INPE) estão apresentados na FIG. 4.2.

FIGURA 4.1 – Pluviometria mensal acumulada na Flona Tapajós para os anos compreendidos entre 2000 e 2005.

Nesta região do Estado do Pará, de uma maneira geral, pode-se dizer que a Estação Chuvosa está compreendida entre os meses de janeiro a julho, meses os quais a precipitação é acima de 50 mm. E a Estação Seca está compreendida entre os meses de agosto a dezembro, com seca mais acentuada nos meses de agosto a outubro. No período estudado, episódios anômalos ocorreram, como no caso de janeiro de 2003, mês no qual a Estação Seca de 2002 foi prolongada, como pode ser observado na FIG. 4.1. Outros meses atípicos foram janeiro de 2001, abril de 2002 e maio de 2005, meses que apresentaram pluviometria consideravelmente acima da média dos anos anteriores. Outra situação atípica foi a de dezembro de 2005, pois a Estação Chuvosa de 2006 antecipou-se, aumentando consideravelmente a pluviometria de dezembro.

Um fator interessante que auxilia na definição de períodos da Estação Chuvosa ou Seca é o número de focos de queimada, episódio característico de Estação Seca. A FIG. 4.2 apresenta o número de focos de queimada ocorridos neste período.

FIGURA 4.2 – Número de focos de queimadas no Estado do Pará nos anos de 2000 a 2005.

Comparando as FIG. 4.1 e 4.2 observa-se a concordância entre os dois fenômenos. Um exemplo é o mês de dezembro de 2005, mês que apresentou alto índice pluviométrico e consequentemente baixo índice de queimadas. Adicionalmente, na FIG. 4.2 nota-se que o mês de janeiro de 2005 apresentou número de focos de queimada maior que a médias dos anos anteriores e, na FIG. 4.1 apresentou pluviometria abaixo da média, portanto estudou-se detalhadamente este mês. A FIG. 4.3 apresenta a pluviometria diária do mês de janeiro de 2005. A precipitação em janeiro de 2005 teve início apenas na segunda quinzena deste mês. Portanto, considerou-se Estação Seca os dias anteriores a 16 de janeiro e Estação Chuvosa os dias posteriores a este.

FIGURA 4.3 – Detalhamento pluviométrico do mês de janeiro de 2005.

Segundo o critério acima descrito, classificaram-se os vôos realizados em Estação Chuvosa e Seca. Esta classificação está apresentada na TAB. 4.1. Durante o período amostrado, a quantidade de vôos realizados na Estação Chuvosa (24 vôos) foi consideravelmente maior que os realizados durante a Estação Seca (9 vôos). Isto ocorreu na primeira fase do projeto, onde praticamente foram realizados vôos de coleta de amostragem apenas durante as estações chuvosas de 2001, 2002 e 2003. A partir da instalação do Laboratório de análises no Brasil, que ocorreu em maio de 2004 as amostragens foram melhor distribuídas durante as duas estações.

TABELA 4.1 – Classificação dos vôos realizados nos períodos de amostragem na Flona Tapajós e na Área Antropizada segundo as estações chuvosa e seca.

Data	Estação	Data	Estação	Data	Estação
12/07/2000	Seca	04/29/2002	Chuvosa	08/20/2004	Seca
12/21/2000	Seca	05/06/2002	Chuvosa	10/13/2004	Seca
03/15/2001	Chuvosa	01/15/2003	Chuvosa	10/29/2004	Seca
03/22/2001	Chuvosa	05/30/2003	Chuvosa	11/19/2004	Seca
03/30/2001	Chuvosa	06/21/2003	Chuvosa	06/jan/2005	Seca
04/12/2001	Chuvosa	07/17/2003	Chuvosa	14/mar/2005	Chuvosa
05/05/2001	Chuvosa	08/20/2003	Seca	22/mar/2005	Chuvosa
05/10/2001	Chuvosa	04/01/2004	Chuvosa	06/abr/2005	Chuvosa
07/06/2001	Chuvosa	04/21/2004	Chuvosa	21/abr/2005	Chuvosa
07/12/2001	Chuvosa	05/27/2004	Chuvosa	23/mai/2005	Chuvosa
03/23/2002	Chuvosa	08/13/2004	Seca	06/jun/2005	Chuvosa

4.1.2 Estudo do Gás CO₂

A série histórica da média dos perfis coletados entre 2000 e 2005, os quais serão mais detalhados posteriormente, está apresentada na FIG. 4.4. Nesta mesma figura está apresentada a série histórica de Ascension, uma ilha localizada no Oceano Atlântico Sul de coordenadas (7°92'S; 14°42'O). Esta ilha possui uma estação de monitoramento global de gases de efeito estufa que é uma referência do valor da concentração mundial desses gases, por não ser influenciada diretamente por atividades antrópicas. Essas duas séries históricas foram construídas num mesmo gráfico para verificar se a concentração do CO₂ está acompanhando o comportamento mundial.

Analisando a FIG. 4.4 percebe-se que tanto a concentração do CO₂ coletado na Flona Tapajós, quanto a concentração do CO₂ coletado na Área Antropizada apresentam o mesmo comportamento da concentração mundial deste gás. Entretanto, alguns pontos coletados apresentaram concentração maior e outros, menor. Como os pontos do gráfico representam a média do perfil, é

preciso analisar cada perfil para concluir qual a influência da Floresta estudada na contribuição deste gás: fonte ou sumidouro.

FIGURA 4.4 – Comparação entre as séries temporais do CO₂ no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

Os perfis coletados durante o período de amostragem estão apresentados nas FIG. 4.5, 4.6 e 4.7. Em uma primeira análise da FIG 4.5 percebe-se que, nos anos de 2000 e 2001, na Área Antropizada, existe uma tendência de inclinação crescente dos perfis até a Camada Limite Planetária (CLP), em torno de 1300 m de altitude. A média das concentrações em 2000 acima da CLP para a Flona e a Área Antropizada foi de 370 ppm e 369 ppm e abaixo da CLP foram de 372 ppm e 370 ppm, respectivamente. Apesar de as médias a altitudes baixas, com maior influência local apresentarem concentração de CO₂ ligeiramente maior que altitudes altas, a inclinação indicando fonte de CO₂ foi nítida. Em 2001, a média das concentrações foi de 370 ppm acima e 369 ppm abaixo da CLP para os dois locais amostrados. Neste ano, ambos os locais apresentaram inclinação sugerindo sumidouro de CO₂.

FIGURA 4.5 – Perfis Verticais do gás CO_2 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Antropizada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Antropizada.

Analisando a FIG. 4.6 nota-se que os perfis coletados sobre a Flona Tapajós e a Área Antropizada o ano de 2002 apresentou a mesma tendência de discreto sumidouro apresentada em 2000 e 2001. A média dos perfis em ambos os locais foi de 372 ppm acima da CLP e de 371 ppm abaixo da mesma. Em 2003, essa média foi de 375 ppm acima da CLP e abaixo da CLP, e a inclinação observada sugere discreto sumidouro de CO_2 sobre a Flona Tapajós. Sobre a Área Antropizada, a média das concentrações foi de 374 ppm, entretanto o comportamento observado foi o mesmo da Flona. No ano de 2002 os vãos ocorreram apenas na Estação Seca, e em 2003, na Estação Chuvosa. Portanto, em ambas as estações observou-se discreto sumidouro de CO_2 .

FIGURA 4.6 – Perfis Verticais do gás CO_2 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2002 na Área Antropizada, (c) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2003 na Área Antropizada.

No ano de 2005 (FIG. 4.7) os perfis acima da CLP foram mais homogêneos que 2004. A altitude sugerida pelos perfis para a CLP na Estação Chuvosa seria em torno de 1000 m para a Flona Tapajós e para a Área Antropizada. A média das concentrações acima da CLP foi de 379 ppm acima da CLP e de 378 ppm abaixo da CLP, sugerindo sumidouro nos dois locais estudados. Nos perfis coletados em 2004, não foi possível identificar com clareza um ponto que sugira a altitude da CLP. Na FIG. 4.7 estão apresentados os perfis das Estações Chuvosa e Seca de 2004, mostrando uma variação grande de comportamento, mesmo entre perfis da mesma estação. Adotando como altitude da CLP a mesma utilizada nos outros anos, observou-se concentração abaixo da CLP de 377 ppm e acima da CLP, 378 ppm, nos dois locais amostrados durante a Estação Chuvosa. Na Estação Seca, os valores observados foram de 377 ppm acima da CLP e de 376 ppm abaixo da CLP, nos dois locais estudados. Nota-se

que a Estação Seca, apesar das queimadas, apresentou menor concentração de CO_2 . Isso mostra que os processos biológicos naturais devido ao estresse hídrico, apresentaram-se mais significantes que as atividades antrópicas. Nas duas estações foram observadas sugestões de sumidouro de CO_2 .

Devido à diferença de comportamento dos perfis acima e abaixo da CLP (FIG. 4.5, 4.6 e 4.7), separou-se a análise da média dos perfis dos gases coletados no Estado do Pará em acima da CLP e abaixo da CLP como apresentado na FIG. 4.8.

FIGURA 4.7 – Perfis Verticais do gás CO_2 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2004 na Área Antropizada, (c) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2005 na Área Antropizada.

Comparando os valores da média abaixo da CLP com os valores da concentração de Ascension, percebe-se que não existe um padrão para os primeiros valores em ambos os locais, pois em uma mesma estação (Seca ou

Chuvosa) a concentração pode estar acima ou abaixo da concentração de Ascension. Assim é necessário um estudo aprofundado de cada perfil, o qual é sugerido nas atividades futuras, considerando trajetória das massas de ar, pluviometria e queimada nos dias anteriores à coleta, além de dados da produção primária da Floresta, radiação, etc., visto que todos os fatores citados interferem na emissão ou acúmulo de CO_2 atmosférico. Observa-se também que existe uma variação nos valores da concentração média abaixo da CLP obtida na coleta sobre a Flona Tapajós, indicado na análise detalhada do perfil, o que comprova a grande influência da produção primária da Flona na emissão deste gás.

FIGURA 4.8 – Comparação entre a concentração do CO_2 coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

A média dos pontos coletados acima da CLP é mais homogênea nos dois locais amostrados, sendo em quase sua totalidade localizada acima da concentração global. Considerando que a massa de ar é proveniente do oceano e recebe contribuição do continente, a FIG. 4.8 sugere que esta contribuição na emissão de CO_2 é positiva, isto é, o continente está sendo fonte de CO_2 .

Comparando as FIG. 4.8b e 4.5d percebe-se que mesmo a Área Antropizada está sugerindo um sumidouro de CO₂ a baixas altitudes. Entretanto, a concentração deste gás abaixo da CLP, na maior parte dos perfis, apresentou concentração maior que a global. Motivo este que confirma a necessidade de estudo individual destes perfis.

A fim de verificar diferenças de emissão entre o local mais impactado (Área Antropizada) e o local de floresta primária (Flona Tapajós), efetuou-se a diferença entre as concentrações de cada local em cada altitude coletada. As diferenças estão apresentadas na FIG. 4.9.

Os dois perfis coletados em 2000 apresentaram comportamento bastante variado ao longo do perfil, e não se pode padronizar um ano com 2 perfis coletados num mesmo mês. Para os anos de 2001, 2002 e 2003, a média dos perfis estaria localizada no eixo positivo da concentração, sugerindo que a Flona possui concentração um pouco maior de CO₂ que a Área Antropizada, menor que 1 ppm. Entre as altitudes de 1200 e 3200 m o perfil da diferença de 2004 é uniforme com maior número de perfis do lado positivo do gráfico, indicando que a concentração de CO₂ na Flona é maior em torno de 1 ppm que na Área Antropizada. Acima da altitude de 3200 m, os perfis da diferença estão em maior número do lado negativo do eixo, indicando que a concentração de CO₂ na Área Antropizada é cerca 1 ppm maior que na Flona Tapajós. Na altitude próxima à superfície, as concentrações obtidas são bastante variáveis. Este fato ocorre pela grande influência que emissões locais exercem nesta altitude. No ano de 2005 os perfis apresentaram maior homogeneidade, o que sugere que as emissões e os sumidouros nos dois locais coletados foram mais parecidos. Acima da CLP, a Flona apresentou como média para todos os perfis realizados desde 2000, concentração ligeiramente maior que a Área Antropizada em torno de 0,5 ppm, e abaixo da CLP, apresentou concentração semelhante. Este fato sugere que em média não existe uma diferença padronizada entre a Floresta e a Área Antropizada. Foram observados tanto perfis onde a concentração é maior na floresta, próximo à superfície, quanto na Área Antropizada.

FIGURA 4.9 – Comparação entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Antropizada para o gás CO₂ nos anos de (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002, (d) 2003, (e) 2004 e (f) 2005.

Em uma análise mais detalhada separando-se as estações e os anos estudados, observa-se um padrão comum acima da CLP de maior concentração de CO₂ sobre a floresta em 0,5 ppm. No entanto, abaixo da CLP observa-se um comportamento comum nas Estações Chuvosas de 2001, 2002 e 2003 de apresentar uma concentração de CO₂ maior em 1 ppm sobre a Flona, porém nas Estações Chuvosas de 2004 e 2005 a Área Antropizada apresentou concentração

maior em 1 ppm. Uma possível explicação para isto seria um aumento das atividades agrícolas na Área Antropizada. As Estações Secas de 2000 e 2004 apresentaram também concentração maior sobre a Flona em torno de 1 ppm.

Assim, outro estudo bastante importante é analisar a diferença de concentração entre as Estações Seca e Chuvosa, a fim de verificar a influência de emissões características de cada estação na contribuição para o balanço do gás CO_2 . Analisando a FIG. 4.8 percebe-se que na primeira fase do projeto (2000-2003) não houve coleta de amostras suficientes para caracterizar um período de Seca. Apenas na Estação Seca de 2004 houve coleta suficiente de dados para uma comparação mais satisfatória das duas estações. Fato este evidencia a necessidade de continuidade da coleta de mais dados nesta região em período contínuo. A FIG. 4.10 apresenta a comparação realizada entre as Estações Chuvosa e Seca de 2004 e Chuvosa de 2005, visto que estas foram as estações onde houve amostragem nos dois períodos ininterruptamente.

FIGURA 4.10 – Comparação entre as estações seca de 2004 e chuvosa de 2004 e 2005 para o gás CO_2 sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

Analisando primeiramente as concentrações médias acima da CLP nas três estações sobre a Flona Tapajós (FIG. 4.10a), nota-se que a concentração das duas Estações de 2004 foi praticamente a mesma e entre a Estação Seca de 2004 e a Chuvosa de 2005, a média das concentrações na Chuvosa foi maior

cerca de 2 ppm. Considerando que existe a influência do aumento global médio sobre os valores de concentração de CO₂ observados sobre a floresta Amazônica, é necessário tentar separar a influência global dos resultados encontrados, para análise mais condizente com a realidade. Para tal, foram utilizados os valores observados na Ilha de Ascension, cujo aumento médio observado dos últimos quatro anos foi de 2,1 ppm/ano. Para a análise dos resultados médios encontrados nas Estações Chuvosas (2004 e 2005) e na Seca de 2004, consideraram-se os perfis subtraídos das concentrações de Ascension para avaliar-se apenas a influência local. Conforme se pode observar na Figura 4.11, a diferença entre as Estações Chuvosa e Seca de 2004 acima da CLP foi de 3 ppm, tanto acima da Flona Tapajós como sobre a Área Antropizada estudada. O resultado da diferença entre as Estações Chuvosa de 2005 e Seca de 2004, também apresentou uma concentração média maior em 1 ppm na Chuvosa de 2005, tanto para a Flona como para a Área Antropizada. Portanto observa-se um aumento real de concentração durante a Estação Chuvosa em relação à Seca acima da CLP. Considerando as diferenças observadas acima da CLP, que correspondem a uma grande área da Amazônia, uma vez que, as massas de ar se deslocam a grandes distâncias, os resultados sugerem que nesta região da Amazônia, a emissão de CO₂ na Estação Chuvosa é maior que na seca. Mesmo considerando a fonte de CO₂ oriunda das queimadas, o efeito da diminuição da respiração durante a Estação Seca deve predominar ao efeito das queimadas. Outro fator importante a ser considerado, é o fato da Estação Chuvosa de 2005 ter apresentado o menor índice pluviométrico dos últimos 40 anos e mesmo assim ter apresentado uma concentração média maior que na Estação Seca, apesar da diferença ter sido menor da que foi observada em 2004.

Abaixo da CLP, onde os processos da superfície próxima ao local de amostragem influenciam mais fortemente, observa-se uma diferença menor do que acima da CLP. A diferença da Estação Chuvosa para a Seca de 2004 foi de 2 ppm e sobre a Flona Tapajós foi de 3 ppm sobre a Área Antropizada. A diferença da Chuvosa de 2005 para a Seca de 2004 foi de 0,5 ppm nos dois locais estudados.

FIGURA 4.11 – Comparação entre as Estações Seca de 2004 e Chuvosas de 2004 e 2005 para o gás CO_2 sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada, retirando a influência global.

Concentrações de CO_2 maiores na Estação Chuvosa do que na Seca também foram observadas por Saleska et al (2003). Isto sugere que os processos de respiração do solo, das plantas e da decomposição de matéria orgânica estão predominando em relação às emissões de queimadas nesta região da Amazônia. Na Estação Seca, devido ao estresse hídrico, há uma diminuição da respiração do solo e das plantas.

4.1.3 Estudo do Gás Metano

A série histórica da média dos perfis coletados entre 2000 e 2005, os quais serão mais detalhados posteriormente, está apresentada na FIG. 4.12. Nesta mesma figura está apresentada a série histórica da Ilha de Ascension, a fim de verificar se a concentração desse gás está acompanhando o comportamento mundial. De acordo com os dados observados em Ascension apresentados na FIG. 4.12, nota-se que este gás apresenta uma clara sazonalidade, com variação de amplitude entre 1720 e 1750 ppb e que não foi observado um aumento significativo deste gás nos 5 anos estudados, descontando sua sazonalidade. Comparando a média dos dados coletados sobre a Flona com os dados coletados em Ascension (FIG. 4.12a), percebe-se que a concentração na floresta é maior cerca de 40 ppb. Nota-se também que não está clara a presença de sazonalidade

nos dados coletados sobre a Flona, tanto por ter apenas a Estação Seca em 2004, como pela oscilação dentro de uma mesma estação. A média dos dados coletados na Área Antropizada (FIG. 4.12b) apresentou o mesmo comportamento observado na Flona, isto é, apresentou concentração cerca de 40 ppb maior que a concentração observada em Ascension e a sazonalidade não é evidente. A análise individual dos perfis é importante para verificar se a média do perfil é representante de todo o perfil. As FIG. 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam os perfis individuais coletados para a Flona Tapajós e para a Área Antropizada.

FIGURA 4.12 – Comparação entre as séries temporais do CH₄ no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

Os dois perfis coletados em 2000 para ambos os locais amostrados (FIG. 4.13a e 4.13b) não apresentaram padrão de comportamento, pois são bastante diferentes entre si, além de estatisticamente não serem representativos para o ano amostrado. Os perfis coletados em 2001 para a Flona (FIG 4.13c) apresentaram concentração maior a baixas altitudes, em torno de 1768 ppb e 1766 ppm sobre a Flona e a Área Antropizada, respectivamente, indicando um fluxo crescente deste gás da superfície para a atmosfera, o que sugere que a

Flona está desempenhando o papel de fonte de CH_4 . Os perfis coletados na Área mais Impactada (FIG. 4.13d) também mostram este comportamento, com diferença entre a concentração abaixo e acima da CLP de até 150 ppb. Este gás é emitido tanto na Estação Seca, devido aos processos de queimada, quanto na Estação Chuvosa, devido à formação de alagamento, favorecendo a decomposição anaeróbica. Além dessas fontes, estudo recente (Keppler et al., 2006) descobriu que as plantas emitem metano naturalmente devido a processos biológicos, que são favorecidos em ambientes mais iluminados com luz solar. Em 2001, para os dois locais amostrados, é possível identificar a altitude da Camada Limite Planetária (CLP), devido à diferença de comportamento. Sobre a Flona e a Área Antropizada, esta altitude está entre 1000 e 1500 m.

FIGURA 4.13 – Perfis Verticais do gás CH_4 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Antropizada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Antropizada.

Os perfis coletados em 2002 (FIG. 4.14a e 4.14b) apresentaram o mesmo perfil observado em 2001, isto é, concentração de metano a baixas altitudes maior (em torno de 1800 ppb) que a altitudes mais altas (em torno de 1765 ppb), sugerindo novamente comportamento de fonte de CH_4 na superfície. Sobre a Flona, a diferença da concentração entre a menor altitude coletada e a altitude onde começa a homogeneidade, em torno de 1200 m, foi de 100 ppb, sendo mais acentuado que na Área Antropizada. Nesta última, todo o perfil apresentou inclinação indicando fonte. A variação total do perfil foi de 100 ppb. A altitude mencionada sobre a Flona pode ser definida como altitude aproximada da CLP. Sobre a Área Antropizada não é possível sugerir a altitude da CLP.

FIGURA 4.14 – Perfis Verticais do gás CH_4 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2002 na Área Antropizada, (c) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2003 na Área Antropizada.

Em 2003 (FIG. 4.14c e 4.14d) também nota-se essa maior concentração de metano na base (1790 ppb) que a altas altitudes (1760 ppb),

entretanto com intensidade menor que os anos de 2001 e 2002. No ano de 2003, a variação de concentração da base à altitude mais alta foi de apenas 60 ppb.

FIGURA 4.15 – Perfis Verticais do gás CH_4 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2004 na Área Antropizada, (c) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2005 na Área Antropizada.

Os perfis coletados sobre a Flona e a Área Antropizada em 2004 e 2005 (FIG. 4.15) mantiveram a tendência de fonte de metano. No ano de 2004, o papel da Flona como fonte de emissão foi mais acentuado se comparado à Área Antropizada. Neste ano houve coleta em ambas as estações. Os perfis que apresentaram maior concentração de metano abaixo da CLP foram os coletados na Estação Seca. Entretanto alguns dos perfis coletados nesta Estação apresentaram concentrações próximas das encontradas na Estação Chuvosa. A diferença de concentração na base variou em até 80 ppb. Sobre a Flona, a predominância de emissão foi na Estação Seca, isto é, a influência de emissão pelas queimadas adicionada às emissões por processos anaeróbicos e aeróbicos.

Sobre a Área Antropizada, a diferença das concentrações entre as Estações Seca e Chuvosa foi, em valor, semelhante à apresentada sobre a Flona. Os perfis que apresentaram maior valor também foram coletados na Estação Seca, indicando que sobre a Área Antropizada, a maior fonte de emissão deste gás é a queima de biomassa. No ano de 2005, os perfis apresentaram o mesmo comportamento, tanto sobre a Flona Tapajós quanto na Área Antropizada. A variação média entre os perfis foi de aproximadamente 100 ppb nos dois locais. Neste ano, os perfis coletados apenas durante a Estação Chuvosa apresentaram inclinação menos acentuada, o que indica menor emissão de metano em 2005 se comparada ao ano de 2004.

FIGURA 4.16 – Comparação entre a concentração do CH₄ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

Devido às diferenças de concentração observadas acima e abaixo da CLP, compararam-se separadamente as médias das concentrações acima e abaixo da mesma, com a concentração de Ascension. Estas comparações estão apresentadas na FIG. 4.16.

FIGURA 4.17 – Comparação entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Antropizada para o gás CH₄ nos anos de (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002, (d) 2003, (e) 2004 e (f) 2005.

Separando as médias das concentrações, torna-se evidente que por todo o período analisado, as concentrações de metano em altitude mais próximas à superfície foram maiores que as mesmas em altitudes mais altas. Sobre a Flona, a média da diferença das concentrações acima e abaixo da CLP foi de 18 ppb, 52 ppb, 48 ppb, 21 ppb, 60 ppb, e 19 ppb para os anos 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 e 2005, respectivamente. Sobre a Área Antropizada, essa diferença

foi de 38 ppb, 60 ppb, 45 ppb, 19 ppb, 34 ppb e 20 ppb para os mesmo anos. Esses valores foram próximos nos locais estudados. Entretanto, analisando os valores de concentração, nota-se que acima da Área Antropizada foram menores que as concentrações obtidas sobre a Flona. Para um melhor estudo desta diferença, efetuou-se a diferença dos perfis dos locais amostrados, os quais estão apresentados na FIG. 4.17.

A Flona Tapajós e a Área Antropizada desempenham o papel de fonte de metano por características diferentes. A região da Flona libera metano pela decomposição anaeróbica, durante a Estação Chuvosa, além da emissão natural pela floresta, através folhas verdes. Na Estação Seca existe o processo de queimada na Área Antropizada, o qual influencia a concentração de metano na atmosfera sobre a Flona. A Área Antropizada, por ser área de pastagem, possui outras fontes de metano, como o gado e a agricultura (de arroz e soja), a qual também influencia esta região, durante a Estação Chuvosa.

Acima da CLP, as diferenças entre as concentrações observadas, nos anos estudados de 2000 a 2005, nos perfis acima da Flona e da Área Antropizada são desprezíveis, salvo algum perfil bastante diferenciado. As diferenças estão dentro da variação de sazonalidade, variações diárias de concentração e erros analíticos.

Abaixo da CLP, os perfis variaram mais, apresentando diferenças de comportamento mais acentuadas, exceto 2001, onde a maior concentração de metano abaixo da CLP foi de 6 ppb na Área Antropizada. Nos anos de 2002, 2003, 2004 e 2005, foram observadas concentrações maiores sobre a Flona, com diferença média, de 14 ppb e 7 ppb para os dois primeiros anos e de 2 ppb para 2005. Em 2004, na Estação Chuvosa, a diferença foi muito pequena. No entanto, na Estação Seca essa diferença média foi de 31 ppb. Este resultado mostra que, além da emissão de queimada durante a Estação Seca, a Flona tem outra contribuição importante de emissão. Pois se assim não fosse, não haveria justificativa para a Flona ter concentração maior, durante o período das queimadas, que vem justamente da Área Antropizada, pois o vento predominante desta região é de leste, onde está situada a Área Antropizada. Nesta região têm-

se atividades de pecuária e agricultura que utilizam a queimada como manejo, já a Flona é uma reserva preservada. Assim sendo, este resultado indica que durante a Estação Seca, outra fonte importante de metano está contribuindo para sua concentração na atmosfera, o que colabora com os resultados de estudo recente de Keppler et al. (2006) que demonstrou que as plantas emitem metano naturalmente devido a processos biológicos, que são favorecidos em ambientes mais iluminados com luz solar.

FIGURA 4.18 – Comparação entre as Estações Seca de 2004 e Chuvosas de 2004 e 2005 para o gás CH₄ sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada, retirando a influência global.

Para verificar melhor a variação das concentrações nas Estações Chuvosas e Seca, foi inserido em um mesmo gráfico as Estações Chuvosas de 2004 e 2005 e a Estação Seca de 2004 em ambos os locais. Para uma melhor comparação foi retirada a influência global destes perfis. Esta comparação está apresentada na FIG. 4.18. Observa-se que nos anos de 2004 e 2005 a concentração de metano apresentou-se praticamente constante retirando-se a influência global. Sobre a Flona (FIG. 4.18a) a inclinação do perfil indicando forte fonte de metano, foi mais acentuada na Estação Seca de 2004. A diferença entre as concentrações médias observadas abaixo da CLP foi de 25 ppb maior que a média observada acima da CLP para esta Estação em 2004. Os perfis coletados na Estação Chuvosa apresentaram menor inclinação. Para o ano de 2005, a concentração acima da CLP foi maior em 7 ppb que o ano de 2004, mostrando

um pequeno aumento na concentração deste gás na Flona. Sobre a Área Antropizada, os perfis durante as Estações Chuvosa e Seca apresentaram concentrações bastante próximas, sugerindo que ambos os processos de emissão, biológico e de queimada, são significativos nesta região e de mesma grandeza.

Para comparar as Estações Seca e Chuvosas de 2004 e 2005, foi removida a influência global, subtraindo-se a concentração observada na Ilha de Ascension e observou-se que, abaixo da CLP, a Estação Seca de 2004, teve um aumento na concentração de metano em 20 ppb, em relação à Estação Chuvosa do mesmo ano. Comparando-se as Estações Seca de 2004 e Chuvosa de 2005, também se observou uma concentração média 27 ppb maiores que a Estação Chuvosa. Este fato condiz com as análises anteriores, as quais indicaram processos de emissão de metano mais abundantes durante a Estação Seca, o qual adiciona as emissões pela queimada às emissões naturais da floresta. Acima da CLP não foram observadas diferenças significativas entre as Estações estudadas na FIG. 4.18.

4.1.4. Estudo do gás N₂O

A série temporal dos perfis coletados do gás N₂O sobre a Flona Tapajós e sobre a Área Antropizada está apresentada na FIG. 4.19, juntamente com a série temporal de Ascension para verificar se a concentração encontrada na Amazônia, nos 5 anos estudados, apresenta o mesmo comportamento observado mundialmente em regiões remotas.

Nota-se que a concentração deste gás na região da Amazônia apresentou comportamento semelhante ao comportamento deste gás na Ilha de Ascension, além de valores de concentração muito próximos, até o ano de 2003. Em 2004 percebe-se um aumento gradativo sobre a Flona Tapajós, o qual atingiu 2 ppb em 2005. Na Estação Chuvosa este aumento é mais expressivo. Isto pode ser explicado pelos processos que ocorrem no solo de nitrificação e desnitrificação, decorrentes de ação de bactérias. A adubação do solo, com adubo a base de nitrogênio, tem intensificado estes processos, aumentando a

emissão de N_2O para a atmosfera. Sobre a Área Antropizada, por concentrar áreas de plantio, a emissão de N_2O na Estação Chuvosa é mais expressiva nas médias dos perfis. Devido à emissão deste gás ser principalmente pelo solo, a média da concentração dos perfis pode mascarar o real comportamento dos perfis de concentração. Assim, é necessário analisar os perfis individualmente. Estes estão apresentados nas FIG. 4.20, 4.21 e 4.22.

FIGURA 4.19 – Comparação entre as séries históricas do N_2O no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

Analisando a FIG. 4.20 nota-se que os perfis coletados em 2000 e 2001 apresentaram comportamento uniforme na altitude. Em 2001 percebe-se também diferença máxima de concentração entre os perfis de apenas 2 ppb, sendo que os perfis de maior concentração foram coletados no início da Estação Chuvosa (318 ppb), entre os meses de março a maio. Os perfis de menor concentração (316 ppb) foram coletados nos meses finais da Estação Chuvosa, entre final de junho a meados de julho. Na Área Antropizada em 2001, é possível perceber uma concentração discretamente maior próximo à superfície.

FIGURA 4.20 – Perfis Verticais do gás N_2O coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Antropizada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Antropizada.

Os anos de 2002 e 2003 apresentaram o mesmo comportamento homogêneo do perfil observado nos dois anos anteriores. Em 2003, sobre a Flona acima da CLP (1300 m de altitude) observa-se um aumento discreto na concentração com o aumento da altitude. Abaixo da CLP, é observada uma concentração menor próximo à superfície para os perfis coletados nos meses de Seca e uma concentração maior próximo à superfície indicando fonte de N_2O nos perfis coletados nos meses de Estação Chuvosa. Sobre a Área Antropizada não foi observado este comportamento, no entanto, durante o período observado, a concentração foi maior em torno de 1 ppb. Comparando os resultados observados sobre a Flona e Área Antropizada, observa-se que durante a Estação Chuvosa as concentrações estão semelhantes provavelmente devido ao transporte de gases das regiões de cultivo próximas à Flona, as quais utilizam adubo à base de nitrogênio.

FIGURA 4.21 – Perfis Verticais do gás N_2O coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2002 na Área Antropizada, (c) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2003 na Área Antropizada.

Os perfis coletados sobre a Flona Tapajós em 2004 e 2005 (FIG. 4.22a e 4.22c) continuaram homogêneos na altitude, com leve inclinação indicando fonte de N_2O . Sobre a Área Antropizada (FIG. 4.22c e 4.22d), observa-se, em 2004, uma grande inclinação dos perfis indicando forte fonte de N_2O na superfície, indicando que a partir deste ano, a utilização de compostos nitrogenados em locais de agricultura próximos teve provável aumento, influenciando a emissão não apenas na Estação Chuvosa, período de adubação, como também na Estação Seca. Até a altitude de 2000 m, a inclinação é homogênea. Acima desta altitude, as concentrações variam bastante, mostrando a dispersão deste gás na média troposfera.

FIGURA 4.22 – Perfis Verticais do gás N_2O coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2004 na Área Antropizada, (c) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2005 na Área Antropizada.

Em 2005, todos os perfis apresentaram grande variação de concentração na altitude, mas a inclinação destes indicando fonte de N_2O na superfície foi nítida. Houve variabilidade ao longo do perfil, acentuando-se em 2005. Os perfis coletados em março de 2005 (FIG. 4.22d) apresentaram o comportamento de fluxo positivo, sugerindo maior emissão de N_2O neste mês. Os perfis coletados em abril e maio de 2005 apresentaram comportamento com diferenças na concentração ao longo do mesmo. Os perfis coletados no início de janeiro e em junho, tiveram comportamento mais homogêneo. A partir de 2003, o aumento na concentração de N_2O próximo à superfície é evidente indicando que as atividades de adubação do solo a base de nitrogênio tornaram-se mais significativas, sendo repetidas a cada nova Estação Chuvosa, o que aumenta a quantidade de nitrogênio no solo a cada ano e consequentemente processos de nitrificação e desnitrificação no mesmo. Estes fatos reforçam a sugestão de

adubos à base de nitrogênio aplicados na região para adubação de solo de plantio aumentar a emissão de N_2O para a atmosfera.

A comparação entre os perfis coletados abaixo e acima da CLP para o gás N_2O foi realizada com a finalidade de comprovar os fatos observados na análise dos perfis individuais ano a ano. Devido a estas variações observadas abaixo da CLP a partir de 2001, estudou-se separadamente a série temporal das médias das concentrações dos perfis acima e abaixo da CLP.

FIGURA 4.23 – Comparação entre a concentração do N_2O coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

Analisando a série temporal do N_2O , considerando as médias das concentrações acima e abaixo da CLP (FIG. 4.23) com os valores observados em Ascension comprova-se o observado nos gráficos dos perfis individuais. Em 2001 já foi possível observar maior emissão abaixo da CLP, principalmente sobre a Área Antropizada. Em 2003, apesar de pequena, também se observa concentração abaixo da CLP um pouco maior que a observada acima da mesma, entretanto apenas sobre a Flona. A partir de 2004, sobre a Flona Tapajós (FIG.

4.23a), observa-se uma diferença maior entre os valores das médias das concentrações acima e abaixo da CLP, tornando-se mais evidente em 2005, sendo que neste último ano a concentração média está acentuadamente acima da concentração de Ascension, em torno de 2 ppb. Sobre a Área Antropizada, em 2004, percebe-se uma variação mais acentuada entre as médias das concentrações acima e abaixo da CLP, principalmente na Estação Seca. Em 2005, este aumento é também mais acentuado, com aumento numérico médio de 3 ppb. Devido às diferenças nos valores das concentrações observadas entre os dois locais estudou-se a diferença de concentração entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Antropizada, efetuando-se a diferença das concentrações dos perfis ponto a ponto. Essa análise está apresentada na FIG. 4.24.

Analisando a FIG. 4.24, nota-se que em 2000, 2001 e 2002, acima da CLP, a média da diferença dos perfis foi praticamente nula, indicando que nestes períodos não houve diferença significativa entre os locais estudados. Nos demais períodos estudados, apesar de pequena, a concentração na Área Antropizada foi ligeiramente maior. Abaixo da CLP, esta diferença só pode ser considerada a partir de 2003 e apresenta crescimento a cada ano. Em 2003 esta diferença foi ligeiramente maior e observou-se um gradual aumento até 2005 sobre a Flona. Este fato pode ser explicado por processos de transporte e deposição das regiões agrícolas próximas.

Outro estudo interessante realizado foi verificar a diferença das concentrações de N_2O nas duas estações características, chuvosa e seca, para analisar detalhadamente a influência de processos agrícolas e também a influência da queimada na emissão deste gás. Esta análise foi realizada através da construção de gráfico contendo os perfis coletados na Estação Seca de 2004 e nas Estações Chuvosas de 2004 e 2005. Para tal análise foi retirada a influência global, a fim de obter valores reais de acúmulos deste gás na atmosfera Amazônica.

FIGURA 4.24 – Comparação entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Antropizada para o gás N_2O nos anos de (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002, (d) 2003, (e) 2004 e (f) 2005.

É nítida a maior concentração de N_2O na Estação Chuvosa em ambos os locais coletados (FIG. 4.25), mesmo após a remoção da influência global. Na Flona, acima da CLP para o ano de 2004, a diferença entre as estações, em média, é nula. Entretanto a diferença entre a Estação Chuvosa de 2005 e a Estação Seca de 2004, foi de 1 ppb em média. Abaixo da CLP, a Estação Chuvosa de 2004 apresentou concentração similar que a Estação Seca deste ano

e a diferença entre as Estações Chuvosa de 2005 com a Seca de 2004, foi de 1 ppb. Nota-se que a diferença entre as Estações de 2004 e 2005 foi constante ao longo dos perfis. Sobre a Área Antropizada, as variações dos perfis foram maiores e menos uniformes. Em média, a Estação Chuvosa de 2004 apresentou concentração cerca de 1 ppb maior que a Estação Seca deste ano acima e abaixo da CLP. Comparando a Estação Chuvosa de 2005 com a Seca de 2004, o aumento foi de 2 ppb acima e abaixo da CLP. Nota-se que mesmo com o aumento global, a concentração de N_2O na Estação Chuvosa apresentou concentração maior que a Estação Seca, reforçando a hipótese de aumento da emissão deste gás devido à utilização de compostos nitrogenados na adubação do solo, processo que ocorre no início do plantio, durante a Estação Chuvosa.

FIGURA 4.25 – Comparação entre as Estações Seca de 2004 e Chuvosas de 2004 e 2005 para o gás N_2O sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada, retirando a influência global.

4.1.5 Estudo do SF_6

O SF_6 é um gás produzido apenas por ação antrópica, isto é, não é emitido pela natureza. Assim para verificar se o comportamento do gás SF_6 sobre esta região da Amazônia está sofrendo ou não influência de fontes antrópicas através do transporte por massas de ar, comparou-se, em um mesmo gráfico, as séries temporais deste gás entre 2000 e 2005 para a Flona Tapajós e a Área

Antropizada e, para a ilha de Ascension no mesmo período. Esta comparação está apresentada na FIG. 4.26.

FIGURA 4.26 – Comparação entre as séries históricas do SF_6 no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

Observa-se que ao longo deste período, a concentração do SF_6 coletado sobre a Flona foi bem próxima da observada em Ascension, com alguns pontos isolados acima da média. Para esses casos sugere-se estudar detalhadamente os perfis individuais em trabalhos futuros, como verificação da origem das massas de ar, processos de circulação, etc. Sobre a Área Antropizada observa-se que, até 2004, a concentração obtida nesta região foi bem próxima da observada em Ascension. Entretanto, os perfis coletados a partir de 2004 apresentaram um pequeno aumento na concentração em relação à Ascension, indicando a influência de massas de ar provenientes de outras origens na região Amazônica.

FIGURA 4.27 – Perfis Verticais do gás SF_6 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Antropizada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Antropizada, (e) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (f) no ano de 2002 na Área Antropizada.

FIGURA 4.28 – Perfis Verticais do gás SF_6 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2003 na Área Antropizada, (c) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2004 na Área Antropizada, (e) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (f) no ano de 2005 na Área Antropizada.

Não havendo emissão de SF_6 na floresta Amazônica, supõe-se que as concentrações deste gás sejam praticamente constantes no perfil. Os perfis coletados neste período estão apresentados nas FIG. 4.27 e 4.28.

Todos os perfis amostrados neste período apresentaram o mesmo comportamento homogêneo na altitude, isto é, não apresentaram variação de concentração próximo à superfície, o que sugeriria fonte ou sumidouro. Isto confirma que a concentração coletada deste gás sobre a Flona e a Área Antropizada representa a concentração proveniente de transporte das massas de ar. O aumento observado ao longo dos anos amostrados é devido ao acúmulo deste gás na atmosfera, por causa de seu grande tempo de vida na atmosfera.

O gás SF₆, apesar de ser um dos mais potentes gases de efeito estufa, devido ao seu grande potencial de aquecimento global (PAG = 22200 – ver TAB. 1.3), ele não é considerado, atualmente, um gás de efeito estufa importante devido à sua pequena concentração na atmosfera. No entanto, é observado um aumento médio de 22% na sua concentração entre 2000 e 2005, o que corresponde a um aumento médio de 0,22 ppt por ano. O aumento médio de CO₂ no mesmo período, foi de apenas 2,5%, 9 vezes menor que o crescimento de SF₆. Se a taxa de crescimento médio do SF₆ e do CO₂ continuarem com a linearidade apresentada nestes último 5 anos, em 100 anos a concentração do SF₆ na atmosfera será em torno de 45,5 ppt e seu PAG será igual ao do CO₂.

4.1.6 Estudo do CO

A série temporal compreendida entre 2000 e 2005 para o gás CO sobre a Flona Tapajós e a Área Antropizada está apresentada na FIG. 4.29, juntamente com a série temporal deste gás na Ilha de Ascension. Este estudo foi realizado com a finalidade de verificar se o comportamento deste gás observado sobre a Floresta Amazônica está seguindo a tendência observada em áreas remotas mundiais.

Nota-se que em todo o período amostrado, tanto sobre a Flona Tapajós como sobre a Área Antropizada, a concentração do gás CO sobre esta região esteve acima da concentração observada em Ascension. Nas Estações Chuvosas, sobre a Flona Tapajós, as médias das concentrações são maiores em torno de 40 ppb para 2001, 30 ppb para 2002, 50 ppb para 2003, e 30 ppb para 2005. Na Estação Seca, as concentrações são maiores em torno de 100 ppb em

2000, e 130 ppb em 2004. Nesta estação, o aumento é devido à queima de biomassa. Na Área Antropizada observa-se o mesmo comportamento das concentrações ao longo dos anos. Na Estação Chuvosa, as médias das concentrações observadas na Área Antropizada apresentam valor semelhante ao observado sobre a Flona, entretanto, as concentrações são maiores que as observadas sobre a Flona na Estação Seca, uma vez que, sobre esta última, as fontes de emissão ficam limitadas ao transporte de massas de ar e a processos naturais.

FIGURA 4.29 – Comparação entre as séries temporais do CO no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

Para avaliar a influência das emissões na altitude, estudaram-se os perfis individuais coletados sobre a Flona e a Área Antropizada no período estudado. Estes perfis estão apresentados nas FIG. 4.30, 4.31 e 4.32. Observa-se que em dezembro de 2000, a concentração de CO era alta nesse período, nas duas regiões amostradas. Este fato pode ser explicado pela baixa pluviometria neste período (FIG. 4.1) e pela existência de alguns focos de queimada (FIG. 4.2),

o que contribuem para alta taxa de emissão de CO, como observado na FIG. 4.30a e 4.30b. Observa-se também, que no começo do mês de dezembro a concentração é maior devido à maior influência do período de queimada e com menor pluviometria quando comparada com a data posterior mais próxima do final do mês. Em 2001 (FIG. 4.30c e 4.30d), a coleta foi concentrada na Estação Chuvosa, portanto a concentração do CO não ultrapassou 120 ppb em todos os perfis. Sobre a Flona Tapajós (FIG. 4.30c), a concentração média neste período foi de 90 ppb acima da CLP e de 102 ppb abaixo da mesma. Nota-se, portanto, uma tendência de fonte de CO na Flona, mesmo na Estação Chuvosa. Sobre a Área Antropizada (FIG. 4.30d), a concentração média nos perfis é de 89 ppb acima da CLP e de 102 ppb abaixo da mesma, valores muito próximos aos calculados para a Flona. Na Área Antropizada também é observada inclinação nos perfis, sugerindo fonte deste gás também nesta região.

FIGURA 4.30 – Perfis Verticais do gás CO coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Antropizada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Antropizada.

No ano de 2002, os dois locais amostrados (FIG. 4.31a e 4.31b) apresentaram inclinação nos perfis amostrados que sugere fluxo da superfície para a atmosfera, além de maior concentração de CO no perfil coletado em março deste ano. Analisando a FIG. 4.1, observa-se que em 2002, este mês apresentou baixo índice pluviométrico, e 14 focos de queimada no estado do Pará, aumentando a concentração, por transporte, deste gás tanto na Flona como na Área Antropizada. Sobre a Flona, a concentração média observada foi de 93 ppb acima da CLP e de 106 ppb abaixo da mesma.

FIGURA 4.31 – Perfis Verticais do gás CO coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2002 na Área Antropizada, (c) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2003 na Área Antropizada.

Para a Área Antropizada, a concentração média observada acima da CLP foi de 90 ppb e abaixo da mesma, foi de 104 ppb. Nota-se que mesmo um pouco menor sobre a Área Antropizada, a proporção das concentrações acima e abaixo da CLP mantiveram-se constantes nos locais estudados. O perfil de maior

concentração, coletado em março, apresentou concentração em torno de 140 ppb próximo à superfície (FIG. 4.31a e 4.31b).

FIGURA 4.32 – Perfis Verticais do gás CO coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2004 na Área Antropizada, (c) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2005 na Área Antropizada.

Em 2003, os perfis coletados sobre a Área Antropizada apresentaram esse comportamento mais nítido de fonte de CO na superfície, se comparados aos perfis coletados sobre a Flona Tapajós neste mesmo ano. Os perfis foram coletados a maior parte na Estação Chuvosa e dois deles no início da Estação Seca (FIG. 4.31c e 4.31d). O perfil coletado no início da segunda quinzena de janeiro de 2003, considerado como Estação Chuvosa de 2003, apresentou maior concentração de CO, o que indica influência da Seca de 2002. Este fato é explicado através da análise das FIG. 4.1 e 4.2, as quais indicam que neste mês o índice pluviométrico foi muito baixo, não atingindo 50 mm de precipitação e as queimadas ainda não haviam cessado. Nota-se que este perfil apresentou alta

concentração em altitudes até 1500 m sobre a Flona, o que mostra influência local. Sobre a Área Antropizada, a alta concentração foi apenas em dois pontos do perfil, reforçando a existência de pontos isolados de queimada. O perfil coletado em agosto deste ano, mês de seca, apresentou concentração semelhantes às observadas no período de chuva. Este fato pode ser explicado pela pluviometria deste mês (FIG. 4.1), a qual foi próxima a 50 mm de chuva, a qual pode ter ocorrido em dias próximos à coleta, e também pelo reduzido número de focos de queimada comparado aos outros anos amostrados (FIG. 4.2). A média das concentrações dos perfis coletados sobre a Flona foi de 106 ppb e 124 ppb, acima e abaixo da CLP, respectivamente, e 96 ppb e 112 ppb, acima e abaixo da CLP, respectivamente, sobre a Área Antropizada. Nota-se que mesmo durante a Estação Chuvosa, observou-se inclinação dos perfis sugerindo fonte de CO nos locais estudados.

Em 2004 os perfis foram amostrados em ambas as estações características da Amazônia. Analisando as FIG. 4.32a e 4.32b nota-se que é mais acentuada a concentração de CO sobre a Flona Tapajós. A concentração média na Estação Seca sobre a Flona foi de 157 ppb acima da CLP e de 176 ppb abaixo da mesma. Na Área Antropizada, a média das concentrações acima da CLP foi de 130 ppb, e de 189 ppb abaixo da mesma. Isto mostra a influência direta das queimadas sobre a Área Antropizada, devido à maior concentração de CO a baixas altitudes, e a influência do transporte sobre a Flona, uma vez que a concentração acima da CLP é maior que a da Área Antropizada. Na Estação Chuvosa, ambos os locais apresentaram perfis com concentrações bem próximas. Sobre a Flona, a concentração média foi de 95 ppb acima da CLP e de 107 ppb abaixo da mesma, e sobre a Área Antropizada, a concentração média foi de 95 ppb acima da CLP e de 104 ppb abaixo da mesma. Nota-se que a concentração média nos dois locais estudados é a mesma, o que indica uma boa mistura deste gás na atmosfera. Comparando as Estações Seca e Chuvosa, observa-se que na Flona, o aumento na Estação Seca foi de 62 ppb acima e 68 ppb abaixo da CLP, o que corresponde a 65% de aumento nas duas faixas de altitudes. Sobre a Área Antropizada, a concentração na Estação Seca aumentou 35 ppb acima e 85 ppb abaixo da CLP, o que corresponde a um aumento de 37% e 81% respectivamente.

A maioria das coletas dos perfis de 2005 (FIG. 4.32c e 4.32d) foi realizada na Estação Chuvosa, tendo apenas um perfil coletado no final da Estação Seca correspondente a 2004. A concentração média da Estação Chuvosa na Flona Tapajós foi de 83 ppb acima da CLP e de 93 ppb abaixo desta. Na Estação chuvosa, a concentração média do perfil foi de 152 ppb acima da CLP e de 240 ppb abaixo da mesma. Observa-se que mesmo na Estação Chuvosa, a concentração deste gás é maior abaixo da CLP, sugerindo fonte de CO. Comparando as duas estações, a Estação Seca de 2004 foi 74 ppb maiores nas concentrações acima da CLP e 83 ppb maiores nas concentrações abaixo da CLP. Sobre a Área Antropizada, a concentração média dos perfis na Estação Chuvosa foi de 81 ppb acima da CLP e 92 ppb abaixo da CLP. Novamente é observada uma inclinação sugerindo fonte de CO na região Amazônica. A média do perfil coletado na Estação Seca de 2004 foi de 131 ppb nas altitudes acima da CLP e de 179 ppb nas concentrações abaixo da mesma. O aumento médio na Estação Seca em relação à Chuvosa foi de 61% e 94% acima e abaixo da CLP respectivamente.

FIGURA 4.33 – Comparação entre a concentração do CO coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

FIGURA 4.34 – Comparação entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Antropizada para o gás CO nos anos de (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002, (d) 2003, (e) 2004 e (f) 2005.

Devido à diferença na concentração observada nos perfis durante a Estação Seca, compararam-se as séries temporais da média das concentrações acima e abaixo da CLP para o CO com a série temporal da concentração deste gás em Ascension (FIG. 4.33). Nestes gráficos observa-se nitidamente a diferença entre as concentrações de CO nas Estações Seca e Chuvosa. Na Estação Chuvosa sobre a Flona, a diferença entre os valores da média das

concentrações acima e abaixo da CLP para os dois locais amostrados é de 13 ppb entre as altitudes. Enquanto na Estação Seca, a média dessa diferença é de 18 ppb em 2004. Sobre a Área Antropizada, a diferença entre os valores das concentrações acima e abaixo da CLP, na Estação Chuvosa é de 12 ppb, valor próximo ao observado na Flona. Na Estação Seca, entretanto, esta diferença atinge 50 ppb em 2004. A diferença nas concentrações da altitude depende não apenas na estação, mas também do movimento das massas de ar, da quantidade de focos de queimada e do tempo decorrido do início da queimada, fatores os quais influenciam na dispersão deste gás na atmosfera.

Para conhecer a diferença de comportamento entre os locais amostrados, realizou-se um estudo comparativo entre os perfis coletados sobre a Flona Tapajós e a Área Antropizada (FIG. 4.34). Este estudo consistiu em efetuar a diferença ponto a ponto entre os perfis amostrados no mesmo dia em cada local. Nota-se que os perfis coletados durante a Estação Chuvosa, em todos os anos estudados (2001, 2002, 2003, 2004 e 2005) a diferença média entre os perfis foi pequena.

Para os anos de 2001, 2002 e 2005, não foram observadas diferenças significativas entre as concentrações na Flona e na Área Antropizada, acima e abaixo da CLP. Em 2003, a diferença foi em média 11 ppb acima da CLP e 2 abaixo da mesma. Para as duas faixas de altitudes, a maior concentração deste gás foi sobre a Flona. Em 2004, a diferença na Estação Chuvosa diminuiu para 3 ppb acima da CLP e similar abaixo da mesma, com valores de concentração maior sobre a Área Antropizada. Nas Estações Secas de 2000 e 2004, as diferenças são maiores. Em 2000, a diferença média abaixo da CLP atingiu 6 ppb maior na Área Antropizada e em 2004 atingiu 9 ppb maior sobre a Flona. Em 2003, os dois perfis coletados na Estação Seca apresentaram diferença abaixo da CLP em torno de 6 ppb maior na Flona. Acima da CLP, a diferença média foi de 3 ppb. Em 2004 essa média foi maior sobre a Flona e apresentou valor médio de 14 ppb.

FIGURA 4.35 – Comparação entre as Estações Seca de 2004 e Chuvosas de 2004 e 2005 para o gás CO sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada, retirando a influência global.

Para um melhor estudo da diferença de concentração entre as Estações Seca e Chuvosa, fez-se a comparação entre as estações através da construção de um gráfico, com vôos coletados entre as Estações Chuvosa dos anos de 2004 e 2005 e a Estação Seca de 2004, retirando a influência global. Desta maneira é possível obter a comparação dos valores reais emitidos pela Floresta Amazônica (FIG. 4.35). Sobre a Flona Tapajós, comparando as Estações Chuvosas, percebe-se que em 2005 a concentração foi maior em torno de 6 ppb, indicando a similaridade das médias obtidas nos dois anos. Comparando-se as Estações Seca e Chuvosa de 2004, observa-se que a primeira aumentou cerca de 64 ppb em relação a segunda. Comparando a Estação Seca de 2004 com a Chuvosa de 2005, a primeira foi maior em relação à segunda 78 ppb. Sobre a Área Antropizada, comparando as Estações Chuvosas, também se observa a similaridade entre as duas estações. Comparando-se as Estações Seca e Chuvosa de 2004, observa-se que a primeira aumentou cerca de 80 ppb em relação à segunda. Comprando a Estação Seca de 2004 com a Chuvosa de 2005, a primeira foi maior em relação à segunda 88 ppb. A diferença entre as estações foi menor na Flona, uma vez que este gás é, na Estação Seca, levado por transporte para esta região.

4.1.7 Estudo do H₂

Estudou-se inicialmente a série histórica do gás H₂ coletado sobre a região Amazônica, a fim de comparar o comportamento sobre esta região com o comportamento global deste gás. Para tal, construíram-se gráficos comparando as séries históricas do H₂ sobre a Flona Tapajós e sobre a Área Antropizada com a série histórica de Ascension, os quais estão apresentados na FIG. 4.36. Comparando a série temporal da Flona Tapajós, com a série Temporal de Ascension (FIG. 4.36a), percebe-se que a concentração sobre a Amazônia foi cerca de 70 ppb menor que a concentração em Ascension até o ano de 2002.

FIGURA 4.36 – Comparação entre as séries temporais do H₂ no período de 2000 a 2005 entre Ascension e (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

A partir de 2003, a concentração de H₂ sobre a Flona no período chuvoso igualou-se à concentração global, atingindo valores 30 ppb acima na Estação Seca de 2004. Este gás, por ser formado nos mesmo processos de formação do gás CO, também é liberado na queima de biomassa, a qual ocorre nos períodos de Seca. O mesmo comportamento foi observado na Área

Antropizada (FIG. 4.36b). As médias das concentrações calculadas para esta região apresentaram valores muito semelhantes aos observados sobre a Flona Tapajós. Estudaram-se também os perfis individuais do H_2 molecular para verificar a influência de emissão sobre as áreas estudadas (FIG. 4.37 e 4.38).

FIGURA 4.37 – Perfis Verticais do gás H_2 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2000 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2000 na Área Antropizada, (c) no ano de 2001 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2001 na Área Antropizada, (e) no ano de 2002 sobre a Flona Tapajós, (f) no ano de 2002 na Área Antropizada.

Os perfis de concentração de H_2 coletados em 2000 apresentaram o mesmo comportamento observado para o gás CO neste mesmo período nos dois locais estudados, uma vez que os perfis foram coletados na Estação Seca e, nesta estação, o processo predominante de emissão destes gases é a queima de biomassa, fonte de emissão destes dois gases. Sobre a Flona Tapajós, o perfil coletado no começo do mês de dezembro de 2000 teve maior influência das emissões por queimada, portanto apresentou maior concentração de H_2 , e o perfil coletado no final do mês apresentou característica de Estação Chuvosa. Os valores observados foram de 506 ppb e 480 ppb acima da CLP, respectivamente e 497 ppb e 475 ppb abaixo da mesma (FIG. 4.37a).

Os perfis coletados nas Estações Chuvosas dos anos de 2001 e 2002 (FIG. 4.37c e 4.37e) apresentaram-se bastante homogêneos e com concentrações, em geral, menores em torno de 490 ppb e 483 ppb, respectivamente, acima da CLP e 485 ppb e 471 ppb, respectivamente, abaixo da mesma. Observa-se que a concentração abaixo da CLP é menor, sugerindo sumidouro de H_2 molecular sobre a Flona. Sobre a Área Antropizada, as concentrações de H_2 para estes anos foram maiores, entretanto apresentaram o mesmo comportamento observado sobre a Flona. A média do perfil coletado em 2000 foi em torno de 492 ppb acima da CLP e de 483 ppb abaixo da mesma (FIG. 4.37b). Nos anos de 2001 e 2002 sobre a Área Antropizada (FIG. 4.37d e 4.37f), as concentrações médias observadas acima da CLP foram de 491 ppb e 487 ppb, respectivamente, e de 481 ppb e 479 ppb, respectivamente abaixo da mesma. Sobre esta região também foram observadas menores concentrações de H_2 em altitudes menores, o que sugere sumidouro deste gás também sobre a Área Antropizada. Os perfis coletados em 2003 também foram amostrados durante a Estação Chuvosa. Sobre a Flona (FIG. 4.38a), a concentração média acima da CLP foi de 534 ppb e de 526 ppb abaixo da mesma. Sobre a Área Antropizada (FIG. 4.38b) a concentração média observada acima da CLP foi de 525 ppb e de 514 ppb abaixo da mesma. Nos dois locais estudados a concentração abaixo da CLP foi menor, sugerindo sumidouro. Sobre a Área Antropizada, a concentração observada foi menor que na Flona, tanto acima como abaixo da CLP, diferentemente do observado nos anos anteriores.

FIGURA 4.38 – Perfis Verticais do gás H_2 coletados no Estado do Pará (a) no ano de 2003 sobre a Flona Tapajós, (b) no ano de 2003 na Área Antropizada, (c) no ano de 2004 sobre a Flona Tapajós, (d) no ano de 2004 na Área Antropizada, (e) no ano de 2005 sobre a Flona Tapajós, (f) no ano de 2005 na Área Antropizada.

Em 2004 foram amostrados perfis nas duas estações. Sobre a Flona Tapajós (FIG. 4.38c), a média das concentrações observadas durante a Estação Chuvosa foi de 524 ppb acima da CLP e 515 ppb abaixo da mesma. Na Estação

Seca, a concentração média foi de 548 ppb acima da CLP e de 543 ppb abaixo da mesma. Isto representou um aumento de 24 ppb na concentração média acima da CLP e de 28 ppb abaixo da mesma. Observa-se que mesmo no período de queimada, a concentração abaixo da CLP é menor. É interessante observar que o gás CO apresenta o mesmo comportamento. Sobre a Área Antropizada (FIG. 4.38d), a concentração média observada na Estação Chuvosa foi de 525 ppb acima da CLP e de 514 ppb abaixo da mesma, valores próximos aos observados sobre a Flona. Na Estação Seca, a concentração média observada foi de 541 ppb acima da CLP e de 445 ppb abaixo da mesma. Nesta região, na Estação Seca, a concentração de H_2 abaixo da CLP foi maior, diferentemente dos outros períodos estudados. Isto é explicado pelos processos de queima de biomassa que ocorrem nesta região.

Em 2005 observou-se comportamento semelhante aos anos anteriores, isto é, perfis que sugerem sumidouro de H_2 . Sobre a Flona Tapajós (FIG. 4.38e), a concentração média de H_2 acima da CLP foi de 528 ppb e de 519 ppb abaixo da CLP. Sobre a Área Antropizada (FIG. 4.38f), a concentração média observada acima da CLP foi de 533 ppb e abaixo da mesma foi de 521ppb. Os sumidouros do H_2 são a deposição seca e reação com o radical hidroxila (OH), sendo que a primeira tem o maior peso. Devido à diferença entre as concentrações médias acima e abaixo da CLP, estudaram-se separadamente as séries temporais desse gás nos dois locais amostrados, considerando as médias das concentrações acima e abaixo da CLP (FIG. 4.41).

A análise das séries temporais da FIG. 4.39a confirma o comportamento observado nos perfis individuais coletados sobre a Flona Tapajós, o qual havia sido mascarado na análise da média total do perfil. As concentrações de H_2 abaixo da CLP é, na maioria dos perfis, menor que a concentração acima da mesma. Sobre a Área Antropizada (FIG. 4.39b), também foi observado este comportamento. No ano de 2005, sobre a Área Antropizada, a diferença entre as médias acima e abaixo da CLP foi maior (FIG 4.38f).

FIGURA 4.39 – Comparação entre a concentração do H₂ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada.

A análise dos perfis individuais mostrou diferenças entre as médias das concentrações obtidas nos locais amostrados. Para estudar melhor esta diferença, construíram-se gráficos das diferenças pontuais entre os perfis dos locais coletados (FIG. 4.40).

Em 2000 (FIG. 4.40a), o perfil que sofreu maior influência das queimadas apresentou maior concentração sobre a Área Antropizada. Em 2001, acima da CLP, a média das diferenças foi similar tanto acima quanto abaixo da CLP. Em 2002, a média da diferença acima da CLP também foi similar, entretanto, abaixo da CLP, a média da diferença foi de 6 ppb maior sobre a Flona. Para o ano de 2003, as médias das diferenças foram muito pequenas, em torno de 2 ppb maior para a Área Antropizada e de 3 ppb maior para a Flona acima e abaixo da CLP, respectivamente. No ano de 2004, calcularam-se separadamente as médias das diferenças nas diferentes estações. Na Estação Chuvosa, as médias foram muito próximas de zero acima e abaixo da CLP.

FIGURA 4.40 – Comparação entre os perfis coletados na Flona Tapajós e na Área Antropizada para o gás H_2 nos anos de (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002, (d) 2003, (e) 2004 e (f) 2005.

Na Estação Seca essas médias foram um pouco maiores, 4 ppb maior para a Flona acima e abaixo da CLP. Para o ano de 2005, as médias das diferenças de concentração foram de 4 ppb acima da CLP, e praticamente nula abaixo da mesma. Analisando esses cálculos, percebe-se que eles não apresentaram padrão de comportamento. Isto porque diversos fatores influem

nesta situação. A presença de focos de queimadas próximo ao local da amostragem, a deposição seca, a direção e a velocidade do vento, a precipitação, são alguns dos fatores que interferem no comportamento deste gás na atmosfera.

Para uma melhor análise, construíram-se gráficos comparando os perfis coletados nas Estações Chuvosa e Seca de 2004 e Chuvosa de 2005 retirando-se a influência global (FIG. 4.41). Sobre a Flona Tapajós (FIG. 4.41a) observa-se um aumento de 16 ppb por todo o perfil entre as Estações Chuvosas de 2004 e 2005, mesmo retirando a influência global. Na Estação Seca de 2004, observa-se um aumento significativo na concentração de H_2 . Comparando-se as Estações Chuvosas de 2004 e 2005 com a Seca acima da CLP, obtêm-se diferenças de 31 ppb e 14 ppb respectivamente, e abaixo da CLP, diferenças de 34 ppb e 17 ppb, respectivamente. Sobre a Área Antropizada, as diferenças são mais perceptíveis entre as Estações Chuvosas de 2004 e 2005, com valores de 20 ppb por todo o perfil. Comparando-se as Estações Chuvosas de 2004 e 2005 com a Seca acima da CLP, obtêm-se diferenças de 23 ppb e 3 ppb respectivamente, e abaixo da CLP, diferenças de 37 ppb e 18 ppb respectivamente. Acima da CLP, nota-se que a Estação Chuvosa de 2005 apresentou valores muito próximos aos observados na Estação Seca de 2004. Abaixo da CLP, a Estação Seca apresentou valores muito maiores, os quais são provenientes dos processos de queimadas.

FIGURA 4.41 – Comparação entre as Estações Seca de 2004 e Chuvosas de 2004 e 2005 para o gás H_2 sobre (a) Flona Tapajós e (b) Área Antropizada, retirando a influência global.

4.2 Reserva Biológica de Cuieiras e Área Remota

Os vôos realizados no Estado do Amazonas tiveram início em dezembro de 2004, após o início da segunda fase do Projeto no LBA Ecology (Financiado pela NASA). Os estudos realizados com os dados coletados nestes locais foram iniciados durante o desenvolvimento deste trabalho de mestrado.

4.2.1 Caracterização dos Períodos Estudados

Na Região Amazônica existem duas estações características, a Chuvosa e a Seca, as quais são caracterizadas pela frequência de chuva. A emissão e o sumidouro dos gases em cada estação são diferentes. Portanto, para um melhor estudo das possíveis fontes e sumidouros dos gases coletados nesta região, classificaram-se os vôos realizados nestas duas estações de acordo com o índice pluviométrico e as queimadas observadas via satélite neste período. Os dados de precipitação mensal acumulada foram obtidos na estação meteorológica de Manaus no estado do Amazonas (Fonte: INMET) e estão apresentados na FIG. 4.42. O número de focos de queimadas no Estado do Amazonas (Fonte: INPE) estão apresentados na FIG. 4.43.

FIGURA 4.42 – Pluviometria mensal acumulada na Reserva Biológica de Cuieiras para os anos compreendidos entre 2004 e 2005.

Nesta região do Estado do Amazonas, de uma maneira geral, pode-se dizer que a Estação Chuvosa está compreendida entre os meses de novembro a maio, e a Estação Seca está compreendida entre os meses de junho a outubro. Portanto são considerados meses de Estação Seca apenas quatro meses por ano, enquanto são oito meses, o dobro, os considerados de Estação Chuvosa. Assim, conclui-se que a pluviometria nesta região do Amazonas é maior se comparada à região estudada no estado do Pará. Comparando a Pluviometria dos anos de 2004 e 2005 através da FIG. 4.42, observa-se que meses considerados de Estação Chuvosa, em 2004 apresentaram índice pluviométrico menor que 2005, diferentemente dos meses considerados de Estação Seca, os quais apresentaram índice pluviométrico maior em 2004, pois o ano de 2005 apresentou uma das piores secas registradas.

A situação observada na precipitação refletiu-se no número de foco de queimadas. No ano de 2004, devido à precipitação na Estação Seca, relativamente grande, o número de focos de queimada foi pequeno, não atingindo 700 focos de queimada, como pode ser observado na FIG. 4.43. Em 2005, o número de focos de queimada teve um aumento superior a 300% em relação ao ano anterior, atingindo em agosto, mais de 2000 focos de queimada no estado.

FIGURA 4.43 – Número de focos de queimadas no Estado do Amazonas nos anos de 2004 a 2005.

FIGURA 4.44 – Detalhamento pluviométrico do mês de dezembro de 2004.

FIGURA 4.45 – Detalhamento pluviométrico do mês de junho de 2005.

De acordo com a análise acima, classificaram-se os períodos amostrados (dezembro de 2004 a novembro de 2005) em Estação Seca e Chuvosa. O mês de novembro de 2004 apresentou baixa precipitação, enquanto que o mês de dezembro deste ano apresentou alta precipitação acumulada, assim fez-se o estudo detalhado deste último mês, o qual está apresentado na FIG. 4.44, com a finalidade de verificar o início da freqüência de chuva. A precipitação iniciou em 18 de dezembro, mas só teve constância a partir de 22 deste mês. Assim, vôos realizados anteriormente a este período foram considerados de seca e após este período, de chuvosa. A Estação Chuvosa estendeu-se até maio de 2005. O mês de junho de 2005 também precisa ser

detalhado para acompanhar o início da Estação Seca. Este detalhamento está apresentado na FIG. 4.45.

De acordo com a FIG. 4.45, junho foi um mês de transição entre a Estação Chuvosa e a Seca, porém foi considerado como pertencente a Estação Seca devido a baixa pluviometria, focos de queimada e concentração dos gases característicos de queimadas. Entretanto, nos dois dias de coleta neste mês, foram dias com precipitação em dias anteriores e no próprio dia. Por este motivo, os perfis coletados neste mês foram considerados como Estação Chuvosa. A classificação dos vôos realizados neste período, de acordo com a classificação dos períodos, está apresentado na TAB.4.2.

Durante o período amostrado, a quantidade de vôos realizados na Estação Chuvosa (8 vôos) foi consideravelmente maior que os realizados durante a Estação Seca (3 vôos), sendo que um vôo foi durante a seca de 2004 e dois na seca de 2005.

TABELA 4.2 - Classificação dos vôos realizados nos períodos de amostragem na Flona Tapajós e na Área Antropizada segundo as estações chuvosa e seca.

Data	Estação	Data	Estação
20/dez/2004	seca	07/mai/2005	chuvosa
01/jan/2005	chuvosa	01/jun/2005	chuvosa
02/fev/2005	chuvosa	21/jun/2005	chuvosa
08/mar/2005	chuvosa	03/out/2005	seca
29/mar/2005	chuvosa	01/nov/2005	seca
14/abr/2005	chuvosa		

4.2.2 Estudo do Gás CO₂

O primeiro estudo realizado para o gás CO₂ no Estado do Amazonas foi verificar se os perfis coletados estão acompanhando a tendência do comportamento global através da comparação com os resultados obtidos em Ascension. Este estudo foi realizado através da construção de gráficos para a média da concentração do perfil de CO₂ sobre a Reserva Biológica de Cuieiras e

sobre Ascension, e para a média da concentração do perfil de CO₂ sobre a Área Remota e sobre Ascension, e está apresentado na FIG. 4.46. As concentrações obtidas em Ascension estão apresentadas até o mês de junho de 2005, pois estes foram os últimos dados disponibilizados para o público até o momento.

FIGURA 4.46 – Comparação entre os valores de concentração do CO₂ obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

Analisando a FIG. 4.46, percebe-se que a tendência observada nesta área da Amazônia é semelhante à tendência observada em Ascension, entretanto com valores maiores de concentração sobre as duas Regiões da Amazônia estudadas no Estado do Amazonas. Sobre a Reserva Biológica de Cuieiras (FIG. 4.48a), os valores médios para todos os perfis analisados foram de 5 ppm acima dos observados em Ascension, tanto na Estação Chuvosa quanto na Seca. Sobre a Área Remota, a concentração média observada para o CO₂ foi de 6 ppm acima da concentração observada em Ascension na Estação Chuvosa e de 7 ppm na

Estação Seca. Os valores analisados nesta figura são valores médios da concentração de todo o perfil, o que pode mascarar o comportamento de emissão ou sumidouro de CO_2 sobre a Floresta Amazônica. Assim, estudaram-se os perfis individuais para verificar o comportamento de cada perfil e verificar a necessidade de separar a média das concentrações acima e abaixo da CLP para comparar com a concentração de Ascension (FIG. 4.47).

FIGURA 4.47 - Perfis Verticais do gás CO_2 coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras (b) na Área Remota.

Nota-se que em altitudes menores, até 1000 m sobre a Reserva Biológica de Cuieiras e até 1200 m sobre a Área Remota as concentrações foram bastante variáveis, mostrando a influência da vegetação no comportamento deste gás na atmosfera. Isto sugere que a altura da Camada Limite Planetária (CLP) está localizada entre as altitudes de 1000 e 1200 m. Os perfis coletados na Estação Chuvosa de 2005, na Reserva Biológica de Cuieiras, apresentaram valores médios de 380 ppm acima da CLP e de 382 ppm abaixo da mesma. Na Estação Seca de 2005, essas concentrações médias foram de 383 ppm e 382 ppm acima e abaixo da CLP, respectivamente. Nota-se que durante a Estação Chuvosa, a Reserva Biológica de Cuieiras desempenhou o papel de fonte de CO_2 , enquanto que na Estação Seca desempenhou papel de discreto sumidouro de CO_2 . Este fato também pode ser percebido na FIG. 4.48a, a qual apresenta os valores de concentração dos perfis coletados sobre a Reserva Biológica de Cuieiras na Estação Chuvosa de 2005, subtraída a concentração média

observada em Ascension. Nesta figura é observado claramente o comportamento de fonte de CO₂ sobre esta região.

Sobre a Área Remota os valores médios de concentração obtidos acima e abaixo da CLP, na Estação Chuvosa, foram de 380 ppm e 382 ppm, respectivamente. Na Estação Seca no mesmo período, os valores médios foram de 385 ppm e 384 ppm acima e abaixo da CLP respectivamente. Neste local também se observa fonte de CO₂ sobre a floresta na Estação Chuvosa e sumidouro deste gás na Estação Seca. Na FIG. 4.48b também é observado o comportamento de fonte de CO₂ sobre a Área Remota, entretanto com uma inclinação dos perfis menor que a observada sobre a Reserva Biológica de Cuieiras. O cenário observado nas duas estações pode ser explicado pelos processos existentes em cada estação. Na Estação Chuvosa, devido à grande quantidade de água, os processos de respiração, tanto das plantas quanto do solo, são bastante abundantes, além de a alta temperatura em regiões alagadas favorecerem a decomposição de matéria orgânica. Na Estação Seca, tanto as plantas quanto o solo, devido à escassez de água, diminuem consideravelmente os processos de respiração. Nesta estação, tem acrescido a fonte de CO₂ oriunda de queimada. Entretanto nas regiões estudadas, percebe-se pouca influência de queimadas.

FIGURA 4.48 – Concentração de CO₂ nas Estações Seca de 2004 e Chuvosa de 2005, subtraindo a concentração média de Ascension sobre a (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

Devido à grande diferença de concentração observada acima e abaixo da CLP, separaram-se as médias das concentrações em médias acima e abaixo da CLP, para evitar que a comparação com os dados de Ascension fosse mascarada. A nova comparação está apresentada na FIG. 4.49.

FIGURA 4.49 – Comparação entre a concentração do CO₂ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

Analisando a FIG. 4.49, nota-se que a média da concentração acima da CLP apresenta comportamento mais próximo da tendência global, sendo em média 2 ppm menor que os valores observados para as médias das concentrações abaixo da CLP, tanto na Reserva Biológica de Cuieiras, quanto na Área Remota, durante a Estação Chuvosa. Na Estação Seca de 2005, os valores das médias acima da CLP são maiores que os observados abaixo da CLP, nos dois locais estudados, cerca de 1 ppm. Observa-se que, novamente, as

concentrações de CO_2 são maiores sobre a Área Remota. Para uma melhor visualização desta ordem de grandeza, estudaram-se as diferenças pontuais dos perfis dos locais estudados (FIG. 4.50).

Acima da CLP, observa-se que a concentração média dos perfis foi de 1 ppm negativo na Estação Chuvosa e de 1 ppm positivo na Estação Seca. Isto indica que na Estação Chuvosa a concentração de CO_2 , sobre a Área Remota, foi 1 ppm maior que sobre a Reserva Biológica de Cuieiras e que na Estação Seca, a concentração de CO_2 sobre a Reserva Biológica de Cuieiras foi 1 ppm maior. Abaixo da CLP, o comportamento observado foi diferente. Tanto na Estação Chuvosa quanto na Seca, a Reserva Biológica de Cuieiras apresentou maior concentração de CO_2 que a Área Remota em cerca de 1 ppm 2 ppm, respectivamente.

FIGURA 4.50 - Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás CO_2 em 2004 e 2005.

4.2.3 Estudo do Gás CH_4

Com a finalidade de verificar se a tendência da concentração de CH_4 observada sobre as regiões amostradas no Estado do Amazonas está acompanhando a tendência global deste gás, construíram-se gráficos comparando as concentrações observadas sobre a Reserva Biológica de Cuieiras

(FIG. 4.51a) e sobre a Área Remota (FIG. 4.51b) com as concentrações observadas em Ascension.

FIGURA 4.51 – Comparação entre os valores de concentração do CH₄ obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

Analisando a FIG. 4.51, observa-se que tanto sobre a Reserva Biológica de Cuieiras como sobre a Área Remota, a concentração de metano acompanha a tendência global por estar constante ao longo do ano, apenas com o período da sazonalidade deslocado em mais ou menos 2 meses. As concentrações de metano coletadas sobre a Amazônia também apresentaram valor maior que o valor da concentração em Ascension em torno de 20 ppb sobre a Reserva Biológica de Cuieiras e de 30 ppb sobre a Área Remota. Este fato indica que a Área Remota apresentou concentração de metano maior que a Reserva Biológica de Cuieiras. As amostras coletadas sobre a Reserva Biológica

de Cuieiras durante a Estação Chuvosa apresentaram concentração menor em torno de 20 ppb em relação às coletadas na Estação Seca. Sobre a Área Remota a sazonalidade foi menos evidente, com apenas 10 ppb de diferença média entre as estações.

As maiores fontes de metano estão sobre a superfície devido a áreas alagadas, tanto naturais como para agricultura, além de queimadas e emissão pela própria vegetação. Assim, analisaram-se os perfis individuais para verificar a influência destas emissões ao longo do perfil vertical da atmosfera.

Analisando o comportamento dos perfis coletados individualmente sobre a Reserva Biológica de Cuieiras (FIG. 4.52a), observa-se que a concentração média dos perfis abaixo da CLP foi em torno de 1765 ppb para a Estação Chuvosa e de 1780 ppb para a Estação Seca. Acima da CLP as concentrações foram de 1754 ppb para a Estação Chuvosa e de 1768 ppb para a Estação Seca. A primeira observação relevante é que ambas as estações apresentam maior concentração de metano abaixo da CLP, indicando fonte deste gás pela Reserva Biológica de Cuieiras, o que também pode ser observado na FIG. 4.53a, a qual apresenta a concentração dos perfis coletados na Estação Chuvosa de 2005 sobre a Reserva Biológica de Cuieiras, subtraída à influência global. Outro ponto relevante é a maior concentração deste gás durante a Estação Seca, mostrando a predominância do transporte de ar oriundo de regiões com queimadas na emissão de CH_4 em relação aos processos naturais. Sobre a Área Remota (FIG. 4.52b), a média das concentrações abaixo da CLP foi em torno de 1768 ppb na Estação Chuvosa e de 1786 ppb na Estação Seca. Acima da CLP, os valores médios foram de 1756 ppb na Estação Chuvosa e de 1770 ppb na Estação Seca. Novamente observaram-se maiores concentração abaixo da CLP nas duas estações estudadas, comprovada pela FIG. 4.53b, indicando fonte de CH_4 .

FIGURA 4.52 – Perfis Verticais do gás CH_4 coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras b) na Área Remota.

Sobre a Área Remota, a concentração de metano também foi maior na Estação Seca, como observado na Reserva Biológica de Cuieiras.

FIGURA 4.53 – Concentração de CH_4 nas Estações Seca de 2004 e Chuvosa de 2005, subtraindo a concentração média de Ascension sobre a (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

Devido à grande diferença de concentração ao longo do perfil, compararam-se separadamente as tendências do comportamento das médias das concentrações acima e abaixo da CLP com as concentrações de Ascension (FIG. 4.54). Analisando a FIG. 4.54, observa-se que a média das concentrações abaixo da CLP é maior em todo o período amostrado, tanto na Reserva Biológica de

Cuieiras como na Área Remota. A diferença entre as médias foi acentuada de maio a junho, meses finais da Estação Chuvosa, para os dois locais amostrados.

Estudou-se também a diferença de concentração entre a Reserva Biológica de Cuieiras e a Área Remota através da subtração pontual das concentrações dos perfis devido à diferença de comportamento entre os dois locais amostrados, observado nas FIG. 4.52 e 4.53. Este estudo está apresentado na FIG. 4.55.

FIGURA 4.54 – Comparação entre a concentração do CH₄ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

FIGURA 4.55 – Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás CH_4 em 2004 e 2005.

Analisando a FIG. 4.55, observa-se que a média dos perfis das diferenças pontuais, durante a Estação Chuvosa, foi ligeiramente maior para a Área Remota acima e abaixo da CLP, indicando que na Estação Chuvosa a concentração de metano foi maior sobre a Área Remota, como foi mostrado anteriormente. Na Estação Seca, a média das concentrações, foi ligeiramente maior acima da CLP e mais significativa abaixo da CLP.

4.2.4 Estudo do Gás N_2O

A série histórica do gás N_2O coletado na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota entre 2004 e 2005 foi comparada com a série histórica deste gás coletado em Ascension para verificar se o comportamento observado nesta região da Amazônia está acompanhando a tendência global observada (FIG. 4.56). Sobre a Reserva Biológica de Cuieiras, a concentração amazônica acompanha a tendência global de crescimento, entretanto com inclinação um pouco maior. O aumento médio observado na Reserva foi de 2 ppb. Sobre a Área Remota, a tendência observada foi mais próxima à tendência de Ascension, com inclinação semelhante à observada em Ascension. A diferença média das concentrações foi de apenas 1 ppb. A razão mais provável de as concentrações de N_2O observada sobre a Amazônia serem maior que a de Ascension, é a influência de processos oriundos do solo (nitrificação e desnitrificação) os quais

são os maiores responsáveis pela emissão deste gás. Em locais de superfície, a emissão tende a ser maior que sobre oceanos. Adicionalmente, próximo à Reserva Biológica de Cuieiras existem locais com atividades de agricultura que utilizam fertilizante a base de nitrogênio, o que intensifica os processos oriundos do solo. Provavelmente, por este motivo a concentração sobre a Reserva é maior que sobre a Área Remota. Para analisar tais hipóteses estudaram-se os perfis individuais coletados no período estudado (FIG. 4.57).

FIGURA 4.56 – Comparação entre os valores de concentração do N_2O obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

FIGURA 4.57 – Perfis Verticais do gás N_2O coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras (b) na Área Remota.

Analisando a FIG. 4.57a, sobre a Reserva Biológica de Cuieiras, observa-se que durante a Estação Chuvosa, a concentração observada acima e abaixo da CLP foi de 320 ppb. Durante a Estação Seca, as concentrações médias observadas também foram de 320 ppb acima e abaixo da CLP. Nas duas estações estudadas foram observadas concentrações muito próximas. Entretanto, os perfis apresentaram grande variação entre eles sobre a Reserva Biológica de Cuieiras.

Sobre a Área Remota (FIG. 4.57b), durante a Estação Chuvosa, as concentrações médias observadas foram de 320 ppb acima e abaixo da CLP. Durante a Estação Seca, as concentrações médias observadas também foram de 320 ppb acima e abaixo da CLP. Também não foi observada diferença significativa de concentração entre as Estações Seca e Chuvosa.

Nos dois locais amostrados não foi observada diferença de concentração nos perfis através das médias, entretanto, analisando os perfis subtraída a concentração média de Ascension (FIG. 4.58), observa-se uma pequena inclinação indicando fonte nos dois locais amostrados.

FIGURA 4.58 – Comparação entre a concentração do N_2O coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

FIGURA 4.59 – Comparação entre a concentração do N_2O coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

FIGURA 4.60 – Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás N_2O em 2004 e 2005.

A FIG. 4.59 apresenta a nova comparação realizada entre as séries temporais para as médias dos perfis coletados sobre a Amazônia, separadas em médias acima e abaixo da CLP. Diferentemente do analisado anteriormente, as Reserva Biológica de Cuieiras e a Área Remota percebe-se certa diferença de comportamento. A diferença observada entre as médias acima e abaixo da CLP é maior sobre a Reserva, principalmente durante a Estação Chuvosa. Para uma melhor análise da diferença de comportamento entre os locais amostrados, realizou-se um estudo da diferença pontual entre os perfis coletados sobre a Reserva Biológica de Cuieiras e sobre a Área Remota (FIG. 5.60).

Observando a FIG. 5.60, nota-se que, durante a Estação Chuvosa, a diferença entre os locais amostrados foi muito pequena, podendo ser considerada dentro da variabilidade dos vários fatores que influenciam os resultados.

4.2.5 Estudo do Gás SF_6

Foram Comparadas as séries temporais do SF_6 coletado sobre a Região Amazônica, na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota, com os valores em Ascension para verificar se na Região Amazônica há emissão deste gás. As séries temporais estão apresentadas na FIG. 4.61. A média da concentração do SF_6 nos dois locais amostrados apresentou a tendência do

comportamento global, mas com valor de concentração ligeiramente acima. Entretanto, é valido ressaltar que esta região recebe massa de ar proveniente de diferentes locais, dependendo da estação do ano, local com muitas atividades antrópicas que emitem SF_6 , aumentando a concentração deste gás na Amazônia. Esta explicação pode ser comprovada analisando os perfis individuais, os quais estão apresentados na FIG. 4.62.

Analisando as FIG. 4.62a e 4.63, sobre a Reserva Biológica de Cuieiras, observa-se uma média constante dos perfis em 6 ppt acima e abaixo da CLP, durante as Estações Chuvosa e Seca. Com isso comprova-se que a floresta Amazônica não emite SF_6 . Portanto este gás não é proveniente desta região, e mostra a influência global sobre a Floresta Amazônica.

FIGURA 4.61 – Comparação entre os valores de concentração do SF_6 obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

FIGURA 4.62 – Perfis Verticais do gás SF_6 coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras (b) na Área Remota.

FIGURA 4.63 – Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás SF_6 em 2004 e 2005.

4.2.6 Estudo do Gás CO

Foram comparadas as séries históricas do CO coletado sobre a Reserva Biológica de Cuieiras e sobre a Área Remota com a série histórica de Ascension (FIG. 4.64), com a finalidade de verificar se a concentração observada de CO sobre as Florestas Amazônicas segue a tendência observada em Ascension. Em ambos os locais, percebem-se um decréscimo na concentração do CO ao longo da Estação Chuvosa. O primeiro ponto representa o perfil coletado ainda na Estação Seca, por isso seu alto valor. Sobre a Reserva

Biológica de Cuieiras seu valor atinge 300 ppb (FIG. 4.64a), enquanto que sobre a Área Remota, atinge 250 ppb (FIG. 4.64b). Nas amostras seguintes, os valores médios dos perfis foram diminuindo, até atingir o valor da concentração de Ascension, devido principalmente à diminuição do número de focos de queimadas (FIG. 4.45), do aumento da pluviometria (FIG. 4.44), e da dispersão e deposição deste gás. Após estas regiões atingirem a concentração global de CO, a concentração local acompanha o comportamento global, voltando a atingir altas concentrações na Estação Seca seguinte. Como este gás é emitido, na Estação Seca, pela queima de biomassa, estudaram-se os perfis individuais para verificar a influência das queimadas ao longo dos perfis (FIG. 4.65).

FIGURA 4.64 – Comparação entre os valores de concentração do CO obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

FIGURA 4.65 – Perfis Verticais do gás CO coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras (b) na Área Remota.

FIGURA 4.66 – Comparação entre a concentração do CO coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

Observa-se na FIG. 4.65a que na Estação Chuvosa, a concentração média observada foi de 94 ppb e de 104 ppb acima e abaixo da CLP para a Reserva Biológica de Cuieiras e de 93 ppb e de 103 ppb acima e abaixo da CLP para a Área Remota. Na Estação Seca, a concentração média dos perfis coletados foi de 226 ppb acima da CLP e de 285 ppb abaixo da mesma sobre a Reserva Biológica de Cuieiras. Sobre a Área Remota, as concentrações médias foram de 211 ppb e 291 ppb acima e abaixo da CLP, respectivamente. Nota-se que mesmo na Estação Chuvosa a concentração de CO abaixo da CLP é maior

que acima da CLP, como também é percebido na FIG. 4.66, a qual apresenta os perfis coletados, descontando a influência global.

Na Estação Chuvosa, a diferença entre as duas altitudes foi de 10 ppb para os dois locais estudados, enquanto que na Estação Seca, esta diferença atinge 60 ppb e 80 ppb sobre a Reserva Biológica de Cuieiras e Área Remota, respectivamente. Assim, pode-se constatar a influência que as queimadas exercem na emissão deste gás.

Então, compararam-se as séries temporais das concentrações de CO coletadas sobre a Amazônia com as concentrações obtidas sobre Ascension, separando as primeiras em médias acima e abaixo da CLP (FIG. 4.67). Durante todo o período estudado, a concentração abaixo da CLP foi maior. Durante a Estação Chuvosa a diferença foi pequena, nos dois locais amostrados, tornando-se maior na Estação Seca. Nota-se também que no início da Estação Seca a diferença é muito menor que a diferença entre as médias observadas durante esta Estação, uma vez que o número de focos de queimada na média é maior. Para verificar diferença de comportamento entre os dois locais estudados, efetuou-se a diferença pontual entre os perfis coletados sobre a Reserva Biológica de Cuieiras e sobre a Área Remota (FIG. 4.68).

Observa-se que durante a Estação Chuvosa, a média da diferença dos perfis foi praticamente nula. Na Estação Seca, a média da diferença foi de 14 ppb maior sobre a Área Remota acima da CLP e nula abaixo da mesma. Esta média mascara um pouco a condição real observada no gráfico uma vez que não há um padrão de comportamento, dependendo muito da quantidade e da localização dos focos de queimada na região.

FIGURA 4.67 – Comparação entre a concentração do CO coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

FIGURA 4.68 – Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás CO em 2004 e 2005.

4.2.7 Estudo do gás H_2

As séries temporais do gás H_2 coletado sobre a Reserva Biológica de Cuieiras e sobre a Área Remota estão apresentadas na FIG. 4.69 juntamente com a série temporal deste gás coletado na Ilha de Ascension. Os perfis foram coletados em sua maioria na Estação Chuvosa, estação na qual a concentração do H_2 , entre os locais comparados, foi bastante semelhante. Os perfis coletados na Estação Seca apresentaram concentração de 40 ppb maior que a média global sobre a Reserva Biológica de Cuieiras, e cerca de 45 ppb sobre a Área Remota. Este gás, na Estação Seca é liberado nos mesmos processos os quais emitem CO , portanto, queimadas.

FIGURA 4.69 – Comparação entre os valores de concentração do H_2 obtidos em Ascension e (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

Assim, para verificar a influência desta emissão ao longo do perfil vertical da atmosfera, foram analisados os perfis individuais coletados no período amostrados, tanto para a Reserva Biológica de Cuieiras quanto para a Área Remota (FIG. 4.70). Observou-se que os perfis coletados durante a Estação Seca, apresentaram concentração maior nos dois locais estudados. A média observada, nesta estação, sobre a Reserva Biológica de Cuieiras, foi de 568 ppb acima da CLP e de 565 ppb abaixo da mesma.

FIGURA 4.70 – Perfis Verticais do gás H_2 coletados no Estado do Amazonas nos anos de 2004 e 2005 (a) na Reserva Biológica de Cuieiras (b) na Área Remota.

Sobre a Área Remota, a média das concentrações foi de 573 ppb acima da CLP e de 571 ppb abaixo da CLP. Observa-se que nos dois locais estudados, a concentração observada abaixo da CLP foi ligeiramente menor. Observa-se também, que sobre a Área Remota, a concentração foi maior, tanto na média acima como na média abaixo da CLP. Este fato também foi observado para o gás CO (FIG. 4.65), comprovando a emissão destes gases nos mesmos processos. Durante a Estação Chuvosa, as médias observadas sobre a Reserva Biológica de Cuieiras acima e abaixo da CLP foram de 530 ppb e de 506 ppb, respectivamente. Sobre a Área Remota, as médias acima e abaixo da CLP nesta estação foram de 527 ppb e de 512 ppb, respectivamente. Nesta estação também foram observadas maiores concentrações de H_2 acima da CLP. Isto também pode ser observado na FIG. 4.71, gráfico apresentando os perfis coletados na Amazônia, retirando a concentração de Ascension. Nesta figura, as concentrações abaixo da CLP são menores que as concentrações médias em

Ascension. Conclui-se, portanto, que as regiões amostradas sobre o estado do Amazonas desempenharam o papel de sumidouro de H_2 , e que este papel foi mais marcante na Estação Chuvosa.

Devido à diferença de comportamento acima e abaixo da CLP, analisaram-se as séries históricas acima e abaixo da CLP separadamente para a Reserva Biológica de Cuieiras e para a Área Remota (FIG. 4.72). Sobre a Reserva, observa-se grande diferença entre as médias das concentrações acima e abaixo de CLP, sendo que os perfis coletados durante a Estação Chuvosa apresentaram média de concentração abaixo da CLP menor que a concentração observada em Ascension, o que pode ser explicado pela grande quantidade de H_2 sobre Ilhas no Oceano. Na Estação Seca, as médias tanto acima quanto abaixo da CLP, apresentaram valores acima das concentrações observadas em Ascension, o que sugere que o processo de queimada é o maior emissor deste gás.

FIGURA 4.71 – Comparação entre a concentração do H_2 coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

Sobre a Área Remota, as médias das concentrações acima e abaixo da CLP apresentaram valores mais próximos, entretanto menores que os observados em Ascension para as duas altitudes. Na Estação Seca, o comportamento observado sobre a Área Remota é semelhante ao observado sobre a Reserva Biológica de Cuieiras.

FIGURA 4.72 – Comparação entre a concentração do H₂ coletado em Ascension e a média das concentrações acima e abaixo da CLP coletados sobre (a) Reserva Biológica de Cuieiras e (b) Área Remota.

Estudou-se, também, a diferença de concentração entre os dois locais amostrados através da diferença pontual dos perfis coletados sobre a Reserva Biológica de Cuieiras e sobre a Área Remota (FIG. 4.73). A média dos perfis das diferenças no período de chuva foi de 5 ppb maior sobre a Reserva acima da CLP e de 10 ppb maior sobre a Área Remota abaixo da mesma. Isto indica que abaixo da CLP a concentração sobre a Área Remota é maior que sobre a Reserva Biológica de Cuieiras. Na Estação Seca esses valores foram de 4 ppb e de 6 ppb maior sobre a Área Remota. Observa-se também que independente da estação do ano, a diferença acima da CLP permanece semelhante, enquanto que abaixo da mesma, varia muito. Isto mostra que processos locais exercem muita influência na concentração de H₂.

FIGURA 4.71 – Comparação entre os perfis coletados na Reserva Biológica de Cuieiras e na Área Remota para o gás H_2 em 2004 e 2005.

4.3 Comparação entre estado do Pará e Amazonas

Foram Comparados os valores médios das concentrações acima e abaixo da CLP, de todos os gases estudados, nos quatro locais amostrados, durante a Estação Chuvosa de 2005. Este período foi escolhido para comparação, uma vez que é o único período em que houve coleta em todos os locais, e seus valores médios estão apresentados na TAB. 4.3.

Não houve diferença de concentração de CO_2 dos locais dentro de um mesmo estado, entretanto, o Estado do Amazonas apresentou concentração de CO_2 4 ppm maior que o Estado do Pará acima da CLP, e 5 ppm maior abaixo da CLP (1,3%). O mesmo comportamento foi observado para o gás CO , o qual apresentou em média 11 ppb (12%) de concentração a mais no Estado do Amazonas acima e abaixo da CLP. Uma possível explicação para esta diferença na Estação Chuvosa é a influência de massas de ar de origens diferentes para os dois estados. Para tal é necessário estudar detalhadamente a trajetória das massas de ar e o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical, o que é sugerido para estudos futuros.

Para o gás metano, em geral a concentração sobre o Estado do Pará foi ligeiramente maior, com diferenças de concentração menores que 5 ppb

(menor que 0.5%), mostrando que os dois ambientes têm comportamento similar. No caso do gás H_2 , a concentração foi, em geral, maior sobre o Estado do Pará, em torno de 5 ppb (~1%). O gás SF_6 também apresentou maior concentração no Estado do Amazonas (8%). Pelo fato deste gás não ser emitido pela Floresta, a hipótese de que a causa da maior concentração de CO e CO_2 sobre o Estado do Amazonas é a diferença de origem das massas de ar para os dois estados fica reforçada. O gás N_2O apresentou a mesma concentração para todos os locais coletados, mostrando que os dois ambientes têm comportamento similar, durante a Estação chuvosa.

TABELA 4.3 – Concentrações médias observadas na Estação Chuvosa de 2005 para os gases estudados, separando as médias acima e abaixo da Camada Limite Planetária.

	CO_2 (ppm)	CH_4 (ppb)	N_2O (ppb)	SF_6 (ppt)	CO (ppb)	H_2 (ppb)
Acima Flona Pará	378	1756	320	5,5	83	528
Abaixo Flona Pará	377	1773	320	5,5	93	519
Acima Impactada Pará	378	1751	320	5,5	81	533
Abaixo Impactada Pará	377	1774	320	5,5	91	521
Acima Reserva Amazonas	380	1754	320	6	94	530
Abaixo Reserva Amazonas	382	1765	320	6	104	506
Acima Remota Amazonas	380	1756	320	6	93	527
Abaixo Remota Amazonas	382	1768	320	6	103	512

5 CONCLUSÕES

Durante a fase de instalação e implementação do sistema MAGICC no Laboratório de Química Atmosférica, desenvolveram-se metodologias para adequação deste sistema nas condições de operação do Brasil, considerando-se diferença de temperatura, pressão, umidade e qualidade dos gases carreadores fornecidos no Brasil. Deste desenvolvimento, concluiu-se que:

1. A utilização de um gás padrão referência antes e depois de cada amostra permite um alcance de alta acurácia e estabilidade do sistema, pois normaliza possíveis variações de resposta do equipamento.
2. A contaminação dos gases carreadores utilizados nas análises dos gases CH_4 , N_2O , SF_6 , CO e H_2 provocam variações significativas nas respostas dos equipamentos.
3. Umidade presente nos frascos de coleta proporciona problemas durante a amostragem, pois prejudicam o funcionamento das válvulas dos frascos. A secagem desses frascos com ar ultra-seco (umidade relativa do ar menor de 1%) diminuiu problemas durante a coleta.

A seguir, estão apresentadas as conclusões referentes à interpretação dos dados obtidos. No período de Dezembro de 2000 até final de 2003, foram realizados vários perfis verticais que estão incluídos neste trabalho, para uma melhor interpretação dos resultados até o momento, no entanto, estas coletas ocorreram em maioria durante as Estações Chuvosas destes anos. Em função deste histórico já registrado nas Estações Chuvosas a partir de 2001, já foi possível identificar um padrão de comportamento para esta estação, no entanto, as amostras em período de Estação Seca ocorreram muito raramente no período de 2000 a 2003. Apenas após o início deste projeto, foram realizadas coletas em número significativo para se caracterizar uma estação seca, no entanto, tem-se ainda apenas uma Estação Seca no ano de 2004. Portanto as conclusões são limitadas ao comportamento de um específico ano, que não necessariamente corresponde a um padrão geral, o que mostra a necessidade da continuidade deste projeto.

Gás CO₂

A concentração do CO₂ coletado na Floresta Amazônica apresentou o mesmo comportamento da evolução da concentração Global, quando comparado com as concentrações observadas na Ilha de Ascension, localizada no Oceano Atlântico Sul de coordenadas (7°92'S; 14°42'O). No Estado do Pará, nas Estações Chuvosas em geral, em todos os anos estudados foram observados discretos sumidouros, com diferenças entre as concentrações acima e abaixo da Camada Limite Planetária (CLP) em torno de 1 ppm. Além deste fato, a partir de 2004, no Estado do Pará, foram observadas diferenças de concentração em torno de 1 ppm maior na Área Impactada em relação à Flona Tapajós, devido principalmente ao aumento das atividades agrícolas realizadas na Área Impactada. Comparando as Estações Seca de 2004 com as Chuvosas de 2004 e 2005 no Estado do Pará, após a retirada da influência global, através da subtração da concentração de Ascension das concentrações da Floresta Amazônica, observou-se concentração maior nas Estações Chuvosas em torno de 2 ppm. No Estado do Amazonas, realizando o mesmo procedimento de subtração da influência global, a Estação Chuvosa de 2005 apresentou comportamento de fonte, com concentrações abaixo da CLP maior em 10 ppm em relação às concentrações observadas acima da CLP. A Estação Seca deste ano apresentou comportamento de sumidouro, com média de concentrações acima da CLP maior em 7 ppm em relação às concentrações observadas abaixo da CLP. Os resultados de concentração de CO₂ no continente foram, em geral, acima da concentração observada em Ascension, existindo uma contribuição do continente na emissão deste gás. Comparando os dois Estados no período da Estação Chuvosa de 2005, observou-se maior concentração no Estado do Amazonas, em torno de 2 ppm acima da CLP e de 5 ppm abaixo da CLP.

Gás CH₄

O metano não apresentou aumento significativo nos anos estudados, tanto sobre a Floresta Amazônica, quanto sobre a Ilha de Ascension, mostrando que o comportamento da Floresta está seguindo a tendência global. Entretanto, a concentração observada nos dois estados da Amazônia e para todos os períodos

estudados, foi maior que Ascension, indicando fonte de CH₄ na Amazônia. Considerando a concentração observada abaixo da CLP, a qual mostra a influência local, o aumento observado foi em torno de 65 ppb (4%) para o Estado do Pará em relação à Ascension e em torno de 40 ppb (3%) para o Estado do Amazonas. No Estado do Pará a média das concentrações de metano, nos anos compreendidos entre 2000 e 2003, foi praticamente a mesma sobre a Flona e sobre a Área Impactada. Nos anos de 2004 e 2005, a média das concentrações sobre a Flona foi levemente maior que a Área Impactada em torno de 10 ppb abaixo da CLP, mostrando a influência da emissão natural de metano. No Estado do Amazonas a concentração de metano em 2005 foi maior sobre a Área Remota, em torno de 10 ppb abaixo da CLP em relação à Reserva Biológica de Cuieiras, mostrando novamente que regiões com maior densidade florestal e menor influência antrópica, a concentração de metano na atmosfera é maior. Comparando a Estação Chuvosa de 2004 com a Estação Seca de 2004 para as médias abaixo da CLP, no Estado do Pará, a concentração foi maior na Estação Seca em torno de 20 ppb e muito semelhante acima da CLP. Na comparação entre as Estações Chuvosa de 2005 e Seca de 2004, a concentração média acima da CLP foi de 27 ppb maior da Estação Chuvosa, sendo muito próxima abaixo da CLP. Na comparação entre as Estações Seca e Chuvosa de 2005 no Estado do Amazonas, a concentração da Estação Chuvosa foi maior em 10 ppb em todo o perfil sobre a Área Remota em relação à Reserva Biológica de Cuieiras, indicando que em regiões com maior densidade de floresta a concentração de metano na atmosfera é maior. Na Estação Seca a concentração sobre a Reserva Biológica de Cuieiras foi maior em 20 ppb em todo o perfil em relação à Área Remota, mostrando que nesta Estação, a contribuição da emissão de metano, oriunda de focos de queimada somada às fontes naturais é significativa. Comparando os Estados do Pará e do Amazonas, na Estação Chuvosa de 2005, a concentração acima da CLP foi praticamente a mesma, com apenas 10 ppb maior abaixo da CLP, no Estado do Pará.

Gás N₂O

A concentração de N₂O sobre o Estado do Amazonas apresentou comportamento semelhante ao comportamento das concentrações observadas

em Ascension, entretanto com valores de concentração média dos perfis cerca de 2 ppb maior sobre esta região da Amazônia. No Estado do Pará, até o ano de 2003, as concentrações observadas foram semelhantes às observadas em Ascension. Entretanto, a partir de 2003, observou-se um aumento gradativo da concentração de N_2O decorrente, principalmente, de processos de nitrificação e desnitrificação oriundos do solo, os quais foram acentuados devido à utilização de adubo a base de nitrogênio na Área Impactada. Este fato mostra a contribuição do continente na emissão de N_2O . A concentração de N_2O nas Estações Chuvosas de 2004 e 2005 foi levemente maior, em torno de 1 ppb em todo o perfil, em relação à Estação Seca de 2004 no Estado do Pará, período de adubação. No Estado do Amazonas não foi observada diferença de concentração entre as Estações Seca e Chuvosa, uma vez que nesta região a influência de processos agrícolas é muito pequena. Em todas as Estações Chuvosas estudadas, nos dois estados, foi observada uma leve inclinação indicando fonte de N_2O da superfície, com diferença de concentração entre as concentrações observadas acima e abaixo da CLP até 1 ppb, mostrando que nesta Estação os processos oriundos do solo são favorecidos. Na comparação entre os Estados do Pará e do Amazonas durante a Estação Chuvosa do ano de 2005, observou-se que a diferença de concentração entre eles é similar.

Gás SF_6

A concentração do gás SF_6 coletado sobre as duas regiões Amazônicas estudadas foi bem próxima da concentração observada sobre Ascension, seguindo a tendência de aumento observada na ilha de Ascension. Não foi observada variação de concentração ao longo dos perfis, confirmando que sobre a Floresta Amazônica não há emissão deste gás e que a concentração observada nesta região é proveniente de massas de ar de origem não local. Foi observada uma diferença (8%) entre os Estados do Pará e do Amazonas na comparação realizada na Estação Chuvosa de 2005, sugerindo que a origem das massas de ar que alimentam os dois estados pode ser diferente nesta época do ano. A influência de SF_6 para o efeito estufa atualmente poderá se tornar equivalente à contribuição de CO_2 , daqui a 100 anos, se o aumento da

concentração de ambos os gases continuarem na mesma tendência de crescimento global apresentada até o momento.

Gás CO

Durante as Estações Chuvosas estudadas nos Estados do Pará e Amazonas, a concentração do CO sobre as duas regiões da Floresta Amazônica seguiu a tendência observada em Ascension. Entretanto, no Estado do Pará, as concentrações das Estações Chuvosas em todos os anos estudados apresentaram valores médios de concentração maiores que as concentrações de Ascension em torno de 40 ppb (60%). Na Estação Seca de 2004 neste estado, as concentrações foram maiores em torno de 130 ppb em relação à Ascension (200%). No Estado do Amazonas, na Estação Seca de 2005, a média das concentrações foi maior em 150 ppb em relação à Ascension (215%), e na Estação Chuvosa de 2005, a concentração de CO diminuiu gradativamente até atingir, no final desta Estação, concentração similar a de Ascension. A concentração média na Estação Chuvosa foi 50 ppb acima da concentração média de Ascension (70%). Em todos os perfis amostrados das Estações Chuvosas no Estado do Pará, foram observadas maiores concentrações de CO acima da CLP, e na Estação Seca, maior abaixo da CLP. No Estado do Amazonas, as concentrações abaixo da CLP foram levemente maiores em todos os perfis amostrados. Comparando as Estações Seca de 2004 e Chuvosas de 2004 e 2005 para o Estado do Pará, foi observada abaixo da CLP, maior concentração na Estação Seca em torno de 64 ppb, em relação à Chuvosa de 2004, e de 78 ppb em relação à Chuvosa de 2005. Comparando as Estações Chuvosa e Seca de 2005 no Estado do Amazonas, a Estação Seca apresentou maior concentração em 150 ppb abaixo da CLP. Comparando os Estados do Pará e do Amazonas durante a Estação Chuvosa de 2005, o Estado do Amazonas apresentou maior concentração que o Estado do Pará em torno de 10 ppb. Uma das causas desta maior concentração no Estado do Amazonas pode ser a diferença de origem de massas de ar que alimentam esses estados nesta estação.

Gás H₂

Este gás, no Estado do Pará até 2002, apresentou valores de concentração sobre a Floresta, menores que os valores de concentração média observados em Ascension no mesmo período em torno de 50 ppb. A partir de 2003, a concentração média de H₂ no Estado do Pará atingiu valores semelhantes aos da média de Ascension. No Estado do Amazonas a tendência observada foi semelhante à tendência observada em Ascension, entretanto com valores 40 ppb maior para esta região da Amazônia. Durante a Estação Seca, em 2004 no Estado do Pará e 2005 no Estado do Amazonas, foram observadas maiores concentrações de H₂ em relação à Ascension e às Estações Chuvosas. No Estado do Pará, o aumento em relação à Estação Chuvosa foi de 20 ppb, enquanto que no Estado do Amazonas, esse aumento foi de 30 ppb. Nas Estações Chuvosas dos períodos estudados para o Estado do Pará, as concentrações abaixo da CLP foram menores que as concentrações acima da CLP em torno de 10 ppb e em todo o período estudado no Estado do Amazonas, as concentrações abaixo da CLP foram menores em 15 ppb, mostrando um padrão de comportamento de sumidouro para este gás. Comparando os dois estados durante a Estação Chuvosa de 2005, observou-se maior concentração no Estado do Pará em torno de 5 ppb.

6 Sugestões para Estudos Futuros

Como sugestões para estudos futuros, têm-se:

- Continuidade de coleta de dados nos dois locais amostrados para formação de série temporal de no mínimo 3 anos;
- Estudo de caso para os perfis que apresentaram comportamento fora da média dos outros perfis de uma determinada estação;
- Estudo de trajetórias para a determinação da origem das massas de ar.
- Estudo detalhado de condições meteorológicas, como precipitação, direção do vento local, localização dos focos de queimada, entre outros, em dias anteriores ao dia da coleta;
- Determinação do posicionamento da Zona de Convergência Intertropical e mapeamento da direção dos ventos;
- Estudar as prováveis estações de monitoramento global, considerando as variações das origens das massas de ar e definir qual estaria melhor representando a concentração das massas de ar que adentram o continente;
- Retirar a influência global das concentrações obtidas sobre a região Amazônica pela subtração das concentrações observadas em regiões remotas do globo terrestre que estejam na rota das massas de ar que alimentam a região estudada.

Referências Bibliográficas

- 1 AHRENS, C. D. **Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere**. 3.ed. Brooks/Cole Thomson Learning, Canadá, 2000.
- 2 ANDREAE M.O.; ROSENFELD D.; ARTAXO P.; COSTA A.A.; FRANK G.P.; LONGO K.M.; SILVA-DIAS M.A.F. Smoking rain clouds over the Amazon. **Science**, n.303, p. 1337-1342, 2004.
- 3 ASNER, G.P.; BUSTAMANTE, M.M.C.; TOWNSEND, A.R. Scale dependence of biophysical structure in deforested areas bordering the Tapajós National Forest, Central Amazon. In: **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 507-520, 2003.
- 4 BAIRD, C.; RECIO, M.A.L. (trad.); CARRERA, L.C.M. (trad.). **Química Ambiental**. 2.ed. Bookman, São Paulo, 2002.
- 5 BARTLETT, K.B.; HARRISS, R.C. Review and Assessment of methane emission from wet lands. **Chemosphere**, n.26, p.261-320, 1993.
- 6 BERGAMASCHI P.; HEIN, R.; HEIMANN, M.; CRUTZEN, P. Inverse modeling of the global CO cycle: Inversion of CO mixing ratios. **Journal of Geophysical Research**, v.105, p.1909-1927, 2000.
- 7 BINGEMER, H.G.; CRUTZEN, P.J. The production of methane from solid wastes. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, p.2181-2187, 1987.
- 8 BOTTA, A.; RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J.A. Long-term variations of climate and carbon fluxes over the Amazon basin. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n.1319, 2002.
- 9 BLUNIER, T.; CHAPPELLAZ, J.A.; SCHWANDER, J.; BARNOLA, J-M.; DESPERTS, T.; STAUFFER, B.; RAYNAUD, D. Atmospheric methane record from a Greenland ice core over the last 1000 years. **Geophysical Research Letters**, v.20, p.2219-2222, 1993.
- 10 BOUSQUET P.; PEYLIN P.; CIAIS, P.; LÊ QUERE, C.; FRIEDLINGSTEIN, P.; TANS, P.P. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. **Science**, n.290, p.1342-1346, 2000.
- 11 BRASSEUR, G.P.; ORLANDO J.J.; TYNDALL, G.S. **Atmospheric Chemistry and Global Change**. Oxford University Press, 1999.
- 12 BURGESS, A.B.; GRAINGER, R.G.; DUDHIA, A.; PAYNE, V.H. MIPAS measurement of sulphur hexafluoride (SF₆). **Geophysical Research Letters**, v. 31, n.L05112, 2004.
- 13 CANADIAN CLIMATE CENTER, **CO₂/ Climate Report**, Environment Canada Ottawa, 1997.
- 14 CARMO, J.B.; KELLER, M.; DIAS, J.D.; CAMARGO, P.B.; CRILL, P. A Source of Methane from Upland Forest in the Brazilian Amazon. **Geophysical Research Letters**(submetido em Dezembro de 2005).
- 15 CICERONE, R.J.; SHETTER, R.D. Sources of atmospheric methane: Measurements in paddies and a discussion. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, p.7203-7209, 1981.
- 16 CICERONE, R.J. Changes in stratospheric ozone. **Science**, n.237, p.35-42, 1987.
- 17 CIFELLI, R.C.; PETERSEN, W.A.; CAREY, L.D.; RUTLEDGE, S.A.; SILVA DIAS, M.A.F. Radar observations of the kinematic, microphysical and precipitation characteristics of two MCSs in TRMM/LBA. **Journal of Geophysical Research**, v.107(D20), n. 8077, 2002.
- 18 CONWAY, T.J.; TANS, P.P.; WATERMAN, L.S.; THONING, K.W.; KITZIS, D.R.; MASARIE, K.A.; ZHANG, N. Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory global air sampling network. **Journal of Geophysical Research**, v.99, p.22831-22855, 1994.
- 19 CORREIA A.; FREYDIER R.; DELMAS R.J.; SIMOES J.C.; TAUPIN J.D.; DUPRE B.; ARTAXO P. Trace elements in South America aerosol during 20th century inferred from a Nevado Illimani ice core, Eastern Bolivian Andes (6350m asl). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.3, p.1337-1352, 2003.

- 20 COWLING, S. A.; BETTS, R. A.; COX, P. M.; ETTWEIN, V. J.; JONES, C. D.; MASLIN, M. A.; SPALL, S. A. Contrasting simulated past and future responses of the Amazonian forest to atmospheric change. *Phil. Trans. R. Soc. Lond*, v.B359, p.539-547, 2004.
- 21 COX, P.M.; BETTS, R.A.; JONES, C.D.; SPALL, S.A.; TOTTERDELL, I.J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a couple climate model. *Nature*, v.408, p.184-187, 2000.
- 22 CRAMER, W.; BONDEAU, A.; SCHAPHOFF, S.; LUCHT, W.; SMITH, B.; SITCH, S. Tropical forests and the global carbon cycle: impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. *Phil. Trans. R. Soc. Lond*, v.B359, p.331-343, 2004.
- 23 CRUTZEN, P.J.; DELANY, A.C.; GREENBERG, J.; HAAGENSON, P.; HEIDT, L.; LUEB, R.; POLLOCK, W.; SEILER, W.; WARTBURG, A.; ZIMMERMAN, P. Tropospheric Chemical-Composition Measurements in Brazil During The Dry Season. *Journal of Atmospheric Chemistry*, v.2, p.233-256, 1985.
- 24 CRUTZEN, P.J.; ASELMANN, I.; SEILER, W. Methane production by domestic animals, wild ruminants, other herbivorous fauna, and humans. *Tellus*, v.38B, p.271-284, 1986.
- 25 DANIEL, J.S.; SOLOMON, S. On the climate forcing of carbon monoxide. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p.13,249-13,260, 1998.
- 26 DAVIDSON E.A.; ISHIDA, F.Y.; NEPSTAD, D.C. Effects of na experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical Forest. *Global Change Biology*, v.10, p.718-730, 2004.
- 27 DICKINSON, R.E.; CICERONE, R.J. Future global warming from atmospheric trace gases. *Nature*, v.319, p.109-115, 1986.
- 28 DLUGOKENCKY, E.J.; STEELE, L.P.; LANG, P.M.; MASARIE, K.A. The growth rate and distribution of atmospheric methane. *Journal of Geophysical Research*, v.99, p.17,021-17,043, 1994.
- 29 EHHALT, D.H.; SCHMIDT, U.; HEIDT, L.E. Vertical profiles of molecular hydrogen in the troposphere and stratosphere. *Journal of Geophysical Research*, v.82, p. 5907-5911, 1977.
- 30 ETHERIDGE, D.M.; PEARMAN, G.I.; DE SILVA, F. Atmospheric trace-gas variations as revealed by air trapped in an ice core from Law Dome, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, v.10, p.28-33, 1988.
- 31 ETHERIDGE, D.M.; PEARMAN, G.I.; FRASER, P.J. Changes in Tropospheric methane between 1841 and 1978 from a high accumulation-rate Antarctic ice core. *Tellus*, v.44B, p.282-294 1992.
- 32 ETHERIDGE, D.M.; STEELE, L.P.; LANGENFELD, R.L.; FRANCEY, R.J.; BARNOLA, J-M.; MORGAN V.I. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Journal Of Geophysical Research*, v.101, p.4115-4128, 1996.
- 33 ETHERIDGE, D.M.; STEELE, L.P.; FRANCEY, R.J.; LANGENFELDS, R.L. Atmospheric methane between 1000 AD and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability. *Journal of Geophysical Research*, v.103, p.15979-15993, 1998.
- 34 EVANS, W.F.J.; PUCKRIN, E. An observation of the greenhouse radiation associated with carbon monoxide. *Geophysical Research Letters*, v.22, p.925-928, 1995.
- 35 FAN S.; GLOOR, M.; MAHLMAN, J.; PACALA., S.; SARMIENTO, J.; TAKAHASHI, T.; TANS, P.P. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and Oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, v.282, p.442-446, 1998.
- 36 FERREIRA, N.S.; REPELLI, C.A.; ALVES, J.M.B.; SOUZA, E.B. LOCZCIT – Um Procedimento para Localização do Eixo Central da Zona de Convergência Intertropical no Atlântico Tropical. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.2, p.159-164, 2005.
- 37 FERRETTI, D.F.; MILLER, J.B.; WHITE, J.W.C.; ETHERIDGE, D.M.; LASSEY, K.R.; LOWE, D.C.; MACFARLING MEURE, C.M.; DREIER, M.F.; TRUDINGER, C.M.; VAN OMMEN, T.D.; LANGENFELDS, R.L. Unexpected Changes to the Global Methane Budget over the Past 2000 Years. *Science*, v.309, p.1714-1717, 2005.

- 38 FIELD, C.B.; BEHRENFELD, M.J.; RANDERSON, J.; FALKOWSKI. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. **Science**, v.281, p.237-240, 1998.
- 39 FISCH, G.; TOTA, J.; MACHADO, L.A.T.; DIAS, M.A.F.S.; LYRA, R.F.D.; NOBRE, C.A.; DOLMAN, A.J.; GASH, J.H.C. The convective boundary layer over pasture and forest in Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology** (LBA Special Issue), vol.78, p.47-59, 2004.
- 40 GARREAU, R.D.; WALLACE, J.M. Summertime incursions of midlatitude air into subtropical and tropical South America. **Mon. Wea. Rev.**, v. 126, p. 2713-2733, 1998.
- 41 GARSTANG, M.; FITZJARRALD, D.R. **Observations of Surface to Atmosphere Interactions in the Tropics**, Oxford Univ. Press, New York, 459, 1999.
- 42 GASH, J.H.C.; HUNTINGFORD, C.; MARENGO, J.A.; BETTS, R.A.; COX, P.M.; FISCH, G.; FU, R.; GANDU, A.W.; HARRIS, P.P.; MACHADO, L.A.T.; VON RANDOW, C.; SILVA DIAS, M.A. Amazonian climate: results and future research, **Theoretical and Applied Climatology** (LBA Special Issue), v.78, p.187-193, 2004.
- 43 GRECO, S.; SWAP, R.; GARSTANG, M.; ULANSKI, S.; SHIPHAM, M.; HARRISS, R.C.; TALBOLT, R.; ANDREA, M.O.; ARTAXO, P. Rainfall and surface kinematic conditions over central Amazonia ABLE 2B. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, 17, p. 1-17, 1990.
- 44 HARNISCH, J.; EISENHAUER. Natural CF_4 e SF_6 on Earth. **Geophysical Research Letters**, v.25, p.2401-2404, 1998.
- 45 HOREL, J.D.; HAHMANN, A.N.; GEISLER, J.E. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. **Journal of Climate**, v. 2, p. 1388-1403, 1989.
- 46 HOROWITZ, L.W.; WALTERS, S.; MAUZERALL, D.L.; EMMONS, L.K.; RASCH, P.J.; GRANIER C.; TIE, X.; LAMARQUE, J-F.; SCHULTZ, M.G.; TYNDALL, G.S.; ORLANDO, J.J.; BRASSEUR, G.P. A global simulation of tropospheric ozone and related tracers: Description and evaluation of MOZART, version 2. **Journal of Geophysical Research**, v.108, n.4784, 2003.
- 47 HOUGHTON, J.T., ET AL., **Climate Change 1995**, Cambridge Univ. Press, New York, 1996.
- 48 HOUGHTON, R.A.; DAVIDSON, E.A.; WOODWELL, G.M. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. **Global Biogeochemistry Cycles**, v.12(1), p.25-34, 1998.
- 49 HOUGHTON, R.A.; SKOLE, D.L.; NOBRE, C.A.; HACKLER, J.L.; LAWRENCE, K.T.; CHOMENTOWSKI, W.H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, v.403, p.301-304, 2000.
- 50 HOUSE, J.I.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; HOUGHTON, R.A.; HEIMANN, M. Reconciling apparent inconsistencies in estimates of terrestrial CO_2 , sources and sinks. **Tellus**, v.55B, p.345-363, 2003.
- 51 IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) - www.ibge.gov.br
- 52 IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) – **Atmospheric Chemistry in a Changing World: An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research**, Springer, Alemanha, 2003.
- 53 INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) – www.cepetc.inpe.br Acesso em fevereiro de 2006.
- 54 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), **Climate Change 2001: The Scientific Basis – Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, edited by J.T. Houghton et al., 881 pp., Cambridge Univ. Press, New York, 2001.
- 55 ITO, A.; OIKAWA, T. A model analysis of the relationship between climate perturbations and carbon budget anomalies in global terrestrial ecosystems: 1970 to 1997. **Climate Res.**, v.15, p.161-183, 2000.
- 56 JACOB, D.J.; WOFSY, S.C. Budgets Of Reactive Nitrogen, Hydrocarbons, And Ozone Over The Amazon-Forest During The Wet Season. **Journal of Geophysical Research**, v. 95(D10), p. 16737-16754, 1990.

- 57 KANAKIDOU, M.; CRUTZEN, P.J. The photochemical source of carbon monoxide: Importance, uncertainties and feedbacks. **Chemosphere – Global Change Science**, v. 1, p. 91-109, 1999.
- 58 KEPPLER, F.; HAMILTON, J.T.G.; BRAB, M.; RÖCKMANN, T. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. **Nature**, v. 439, p. 187-191, 2006.
- 59 KHALIL, M.A.K.; RAMUSSEN, R.A.; ELKINS, J.W. (ed.); ROSSON, R.R. (ed.). Distribution and mass balance of molecular hydrogen in the Earth's Atmosphere. **Geophysical Monitoring for Climatic Change**, Summary Report 1988, n.17, p. 111-113, 1989.
- 60 KHALIL, M.A.K.; RAMUSSEN, R.A. Global increase of atmospheric molecular hydrogen. **Nature**, n. 347, p. 743-745, 1990.
- 61 KINNEY, C.A.; MOISER, A.R.; FERRER, I.; FURLONG, E.T.; MANDERNACK, K.W. Effects of the herbicides prosulfuron and metolachlor on fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ in a fertilized Colorado grassland soil. **Journal of Geophysical Research**, v.109, n.D05304, 2004.
- 62 KISSELLE K.W.; ZEPP, R.G.; BURKE, R.A.; PINTO, A.S.; PINTO A.D.; BUSTAMANTE, M.M.C.; OPSAHL, S.; VARELLA, R.F.; VIANA, L.T. Seasonal soil fluxes of carbon monoxide in burned and unburned Brazilian savannas. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n.8051, 2002.
- 63 KO, M.; SZE, N.D.; WANG, W.-C.; SHIA, G.; GOLDMAN, A.; MURCARY, D.; RINSLAND, C. Atmospheric sulfur hexafluoride: Sources, sinks and greenhouse warming. **Journal of Geophysical Research**, v.98, p.10,499-10,507, 1993.
- 64 KOO, C.M.; LEE, K.; KIM, M.; KIM, D.-O. Automated System for fast and accurate analysis of SF₆ injected in the surface ocean. **Environ. Sci. Technol.**, v.39, p.8427-8433, 2005.
- 65 LAURENCE, W.F.; COCHRANE, M.A.; BERGEN, S.; FEARNSIDE, P.M.M.; DELAMONICA, P.; BARBER, C.; D'ANGELO, S.; FERNANDES, T. The future of the Brazilian Amazon. **Science**, v.291, p.438-439, 2001.
- 66 LIEBMANN, B.; KILADIS, G.; MARENGO, J.; AMBRIZZI, T.; KLICK, J. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 12, p. 1877-1891, 1999.
- 67 LOGAN, J.A.; PRATHER, M.J.; WOFSY, S.C.; MCELROY. Tropospheric chemistry: A global perspective. **Journal of Geophysical Research**, v.86, p.7210-7254, 1981.
- 68 LOVELOCK, J.E. Atmospheric fluorine compounds as indicators of air movements. **Nature**, v.230, p.379, 1971.
- 69 MACHIDA, T.; NAKAZAWA, T.; FUJII, Y.; AOKI, S.; WATANABE, O. Increase in atmospheric nitrous oxide concentrations during the last 250 years. **Geophysical Research Letters**, v.22, p.2921-2924, 1995.
- 70 MAISS, M.; BRENNINKMEIJER, C. A. M. Atmospheric SF₆: trends, sources, and prospects. **Environmental Science & Technology**, v.32, p.3077-3086, 1998.
- 71 MAISS, M.; LEVIN, I. Global increase of SF₆ observed in the atmosphere, **Geophysical Research Letters**, v.21, p.569-572, 1994.
- 72 MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide, **Trends Ecol. Evol.**, v.15(8), p.332-337, 2000.
- 73 MALHI Y.; PEGORARO, E.; NOBRE, A.D.; PEREIRA, M.G.P.; GRACE, J.; CULF, A.Z. Energy and water dynamics of a Central Amazonian rain Forest. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n.8061, 2002.
- 74 MALHI, Y.E.; WRIGHT, J. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **Phil. Trans. R. Soc. Lond.**, v.359B, p.311-329, 2004.
- 75 MARENGO, J.A. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. **Int. J. Clim.**, v. 12, 8, p. 853-863, 1992.
- 76 MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; CULF, A.D. Climatic impacts of "Frigidens" in forested and deforested areas of Amazon Basin. **Journal of Applied Meteorology**, v. 36, p. 1553-1566, 1997.

- 77 MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; McCLAIN, M.E.(ed.); VICTORIA, R.L.(ed.); RICHEY, J.E.(ed.). **General characteristics and variability of climate system**. The biogeochemistry of the Amazon basin, Oxford University Press, New York, 2001.
- 78 MARENGO, J.A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V.E.; FILIZOLA, N.P.; WAINER, I.C. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, p. 833-852, 2001b.
- 79 MATTHEWS, E.; FUNG, I. Methane emissions from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. **Global Biogeochemistry Cycles**, v.1, p.61-86, 1987.
- 80 MEDEIROS, B.; HALL, A.; STEVENS, B. What controls the mean depth of the PBL? **American Meteorological Society**, v. 18, p. 3157-3172, 2005.
- 81 MELILLO, J.M.; MCGUIRE, A.D.; KICKLIGHTER, D.W.; MOORE, B. III; VROSMARTY, C.J.; SCHLOSS, A.L. Global climate change and terrestrial net primary production. **Nature**, v.363, p.234-240, 1993.
- 82 MITCHELL, J.F.B. The "greenhouse" effect and climate change. **Ver. Geophys.**, v.27, p.115-139, 1989.
- 83 MOLION, L.C.B. Climatologia Dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, 1, p. 107-117, 1987.
- 84 NEPSTAD, D.C.; VERISSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTNHO, P.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKS, V. Large scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, p. 505-508, 1999.
- 85 NOBRE, C.A.; WICKLAND, D.E.; KABAT, P. The Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). **IGBP Global Change Newsletter** (LBA Special Issue) p. 1-8, 2001.
- 86 NOBRE, C.A. Amazonia in the Global System. **International LBA Scientific Conference**, 7-10 de julho, Manaus, AM, Brasil, 2002.
- 87 NOVELLI, P.C.; LANG, P.M.; MASARIE, K.A.; HURST, D.F.; MYERS, R.; ELKINS, J.W. Molecular hydrogen in the troposphere: Global distribution and budget. **Journal of Geophysical Research**, v.104
- 88 OMETTO, J.P.H.B.; NOBRE, A.D.; ROCHA, H.R.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L.A. Amazônia and the modern carbon cycle: lessons learned. **Oecologia**, v.143, p.2119-2130, 2005.
- 89 PARTON, W.J.; HOLLAND, E.A.; DEL GROSSO, S.J.; HARTMAN, M.D.; MARTIN, R.E.; MOSIER, A.R.; OJIMA, D.S.; SCHIMEL, D.S. Generalized model for NO_x and N₂O emissions from soils. **Journal of Geophysical Research**, v.106, p.17,403-17,419, 2001.
- 90 PETIT, J.R.; JOUZEL, J.; RAYNAUD, D.; BARKOV, N.I.; BARNOLA, J.M.; BASILE, I.; BENDER, M.; CHAPPELLAZ, J.; DAVIS, M.; DELAYGUE, G.; DELMOTTE, M.; KOTLYAKOV, V.M.; LEGRAND, M.; LIPENKOV, V.Y.; LORIUS, C.; PEPIN, L.; RITZ, C.; SALTZMAN, E.; STIEVENARD, M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. **Nature**, v.399, p.429-436, 1999.
- 91 POTTER, C.S.; DAVIDSON, E.A.; KLOOSTER, S.A.; NEPSTAD, D.C.; DE NEGREIROS, G.H.; BROOKS, V. Regional application of an ecosystem production model for studies of biogeochemistry in Brazilian Amazonia. **Global Change Biology**, v.4, p.315-333, 1998.
- 92 POTTER, C.; KLOOSTER, S.; DE CARVALHO, C.R.; GENOVESE, V.B.; TORREGROSA, A.; DUNGAN, J.; BOBO, M.; COUGHLAN, J. Modeling seasonal and interannual variability in ecosystem carbon cycling for the Brazilian Amazon region. **Journal of Geophysical Research**, v.106, p.10423-10446, 2001.
- 93 PRATHER, M.J. Time scales in atmospheric chemistry: Theory, GWPs, for CH₄ and CO, and runaway growth. **Geophysical Research Letters**, v.23, 2597-2600, 1996.
- 94 PRENTICE, I.C.; LLOYD, J. C-quest in the Amazon Basin. **Nature**, v.396, p.619-620, 1998.

- 95 PROCÓPIO, A.S.; ARTAXO, P.; KAUFMAN, Y.J.; REMER, L.A.; SCHAFER, J.S.; HOLBEN, B.N. Multiyear analysis of Amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. **Geophysical Research Letters**, vol.31, n.L03108, 2004.
- 96 RAICH, J.W.; POTTER, C.S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemistry Cycles*, v.9, p.23-36, 1995.
- 97 RAMANATHAN, V.; CICERONE, R.J.; SINGH, H.B.; KIEHL, J.T. Trace gas trends and their potential role in climate change. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.5547-5566, 1985.
- 98 RASMUSSEN, R.A.; KHALIL, M.A.K. Atmospheric methane in the recent and ancient atmospheres - concentrations, trends, and interhemispheric gradient. **Journal of Geophysical Research**, v.89, p.1599-1605, 1984.
- 99 RAVISHANKARA, A.R.; SOLOMON, S.; TURNISPEED, A.A.; WARREN, R. F. Atmospheric lifetimes of long-lived halogenated species. **Science**, v.259, p.194-199, 1993.
- 100 RINSLAND, C.; GOLDMAN, A.; STEPHEN, T.; CHIOU, L.; MAHIEU, E.; ZANDER, R. SF₆ ground-based infrared solar absorption measurements: Longterm trend, pollution events, and a search for SF₅CF₃ absorption. **J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.**, v.78, p.41-53, 2003.
- 101 RINSLAND, C.P.; LEVINE, J.S. Free tropospheric carbon monoxide concentrations in 1950 and 1951 deduced from infrared total column amount measurements. **Nature**, v.318, p.250-254, 1985.
- 102 RINSLAND, C.; BOONE, C.; NASSAR, R.; WALKER, K.; BERNATH, P.; MAHIEU, E.; ZANDER, R.; MCCONNELL, J. C.; CHIOU, L. Trends of HF, HCl, CCl₂F₂, CCl₃F, CHClF₂ (HCFC-22), and SF₆ in the lower stratosphere from Atmospheric Chemistry Experiment (ACE) and Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy (ATMOS) measurements near 30°N latitude. **Geophysical Research Letters**, v.32, n.L16S03, 2005.
- 103 ROBERTSON, G.P.; PAUL, E.A.; HARWOOD, R.R. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere, **Science**, v.289, p.1922-1925, 2000.
- 104 RUDDIMAN, W.F. The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. **Climate Change**, v.61, p.261-293, 2003.
- 105 SALESKA, S.R.; MILLER, S.D.; MATROSS, D.M.; GOULDEN, M.L.; WOFSY, S.C.; ROCHA, H.R.; CAMAGO, P.B.; CRILL, P.; et al. Carbon in Amazon Forests: Unexpected Seasonal Fluxes and Disturbance-induced Losses, **Science**, v.302, p.1554-1557, 2003.
- 106 SANHUEZA, E.; DONOSO, L.; SCHARFFE, D.; CRUTZEN, P.J. Carbon monoxide fluxes from natural, managed or cultivated savannah grasslands. **Journal of Geophysical Research**, v.99, p.16,421-16,427, 1994a.
- 107 SCHMIDT, U.; SEILER, W. A new method for recording molecular hydrogen in atmospheric air. **Journal of Geophysical Research**, v.75, p.1713-1716, 1970.
- 108 SCHIMMEL, D.S. Terrestrial ecosystems and the carbon-cycle. **Global Change Biology**, v.1, p.77-91, 1995.
- 109 SCHIMMEL, D.S.; HOUSE, J.I.; HIBBARD, K.A.; BOUSQUET, P.; CIAIS, P.; PEYLIN, P.; et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. **Nature**, v.414, p.169-172, 2001.
- 110 SCHINDLBACHER, A.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S.; BUTTERBACH-BAHL, K. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂ and N₂O emissions from European forest soils. **Journal of Geophysical Research**, v.109, n.D17302, 2004.
- 111 SEINFELD, J.H.; PANDIS, S.N. Atmospheric **Chemistry and Physics**: From air pollution to climate change. "a Wiley-Interscience publication" – John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- 112 SELUCHI, M.E.; MARENGO, J.A. Tropical-midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: Climatic aspects and examples of intense events. **International Journal of Climatology**, v. 20(10), p. 1167-1190, 2000.
- 113 SILVA DIAS, M.A.F.; RUTLEDGE, S.; KABAT, P.; SILVA DIAS, P.L.; NOBRE, C.; FISCH, G.; DOLMAN, A.J.; ZIPSER, E.; GARSTANG, M.; MANZI, A.; FUENTES, J.D.; ROCHA, H.;

- MARENGO, J.; PLANA-FATTORI, A.; SÁ, L.; ALVALÁ, R.; ANDREAE, M.O.; ARTAXO, P.; GIELOW, R.; GATTI, L.V. Clouds and rains processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region. **Journal of Geophysical Research**, v. 107(D20), p. 8072-8092, 2002.
- 114 SINHA, A.; TOUMI, R. A comparison of climate forcing due to chlorofluorocarbons and carbon monoxide. **Geophysical Research Letters**, v.23, p.65-68, 1996.
- 115 STEHFEST, E.; MÜLLER, C. Simulation of N₂O emissions from a urine-affected pasture in New Zealand with the ecosystem model DayCent. **Journal of Geophysical Research**, v.109, n.D03109, 2004.
- 116 STEUDLER, P.A.; MELILLO, J.M.; FEIGL, B.J.; NEILL, C.; PICCOLO, M.C.; CERRI, C.C. Consequence of Forest-to pasture conversion on CH₄ fluxes in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Geophysical Research**, v.101, p.18,547-18,554, 1996.
- 117 STULL, R.B. Mean Boundary Layer Characteristics. In: **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Boston, EUA: Kluwer Academic Publishers, 1991. cap. 1, p. 2-26.
- 118 SUBAK, S. Methane from the house-of-tudor and the ming-dynasty - anthropogenic emissions in the 16th-century **Chemosphere**, v.29, p.843-854, 1994.
- 119 SZE, N.D. Anthropogenic CO emissions: Implications for the atmospheric CO-OH-CH₄ cycle. **Science**, v.195, p.673-675, 1977.
- 120 TANS, P.P.; FUNG, I.Y.; TAKAHASHI, T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. **Science**, v.247, p.1431-1438, 1990.
- 121 THOMPSON, A.M. The oxidizing capacity of the Earth's atmosphere: Probable past and future changes. **Science**, v.256, p.1157-1165, 1992.
- 122 THOMPSON, A.M.; CICERONE, R.J. Possible perturbations to atmospheric CO, CH₄ e OH. **Journal of Geophysical Research**, v.91, p.10,853-10,864, 1986.
- 123 TIAN, H.Q.; MELILLO, J.M.; KICKLIGHTER, D.W.; MCGUIRE, A.D.; HELFRICH, J.V.K.; MOORE, B.; VOROSMARTY, C.J. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems **Nature**, n.396, p.664-667, 1998.
- 124 TIAN, H.; MELILLO, J.M.; KICKLIGHTER, D.M.; MCGUIRE A.D.; HELFRICH III, J.; MOORE III, B.; VOROSMARTY, C.J. Climating and biotic controls on annual carbon storage in Amazonian ecosystems. **Global Ecol. Biogeogr.**, v.9, p.315-335, 2000.
- 125 TILMAN, D.; FARGIONE, J.; WOLFF, B.; D'ANTONIO, C.; DOBSON A.; HOWARTH A.; SCHINDLER, D.; SCHLESINGER, W.H.; SIMBERLOFF, D.; SWACKHAMER. Forecasting agriculturally driven global environmental change. **Science**, v.292, p.281-284, 2001.
- 126 VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.A.; MORAES, J.M.; BALLESTER, M.V.; KRUSCHE A.V.; PELLEGRINO, G.; ALMEIDA, R.M.B.; RICHEY, J.E. Surface air temperatures variations in the Amazon region and its borders during this century. **Journal of Climate**, v.11, p.1105-1110, 1998.
- 127 WHITE A.; CANNEL, M.G.R.; FRIEND A.D. CO₂ stabilization, climate change and the terrestrial carbon sink. **Global Change Biology**, v.6, p.817-833, 2000.
- 128 WRAGE, N.; VELTHOF, G.L.; OENEMA, O. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. **Soil Biol. Biochem.**, v.33, p.1723-1732, 2001.