AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DETERMINAÇÃO DA EMISSÃO DE METANO DA BACIA AMAZÔNICA

LUANA SANTAMARIA BASSO

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para a obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Materiais**

**Orientadora:
Profa. Dra. Luciana Vanni Gatti**

**São Paulo
2014**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade De São Paulo

DETERMINAÇÃO DA EMISSÃO DE METANO DA BACIA AMAZÔNICA

LUANA SANTAMARIA BASSO

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para a obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Materiais**

**Orientadora:
Profa. Dra. Luciana Vanni Gatti**

Versão Corrigida
Versão original disponível no IPEN

São Paulo
2014

*Dedico este trabalho aos meus
pais, Vivian e Wilson...*

AGRADECIMENTOS

À meus pais, Wilson e Vivian, que além de me darem a vida, me educaram e me ensinaram a buscar pelos meus sonhos, com dedicação e respeito ao próximo. A meu irmão, Leandro, pelo carinho e apoio.

À meu namorado, amigo e companheiro Anaor, pelo amor, carinho, apoio, dedicação e compreensão incondicionais, durante esta etapa acadêmica.

À minha família e amigos pelo carinho, apoio e torcida para mais esta conquista.

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

À FAPESP pelo apoio financeiro para a realização deste projeto, com a concessão da bolsa de Doutorado.

À FAPESP, NERC, CNPq e MCT pelo apoio financeiro ao projeto.

Ao Dr. Manuel Gloor, a Universidade de Leeds, ao Dr. John B. Miller e a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) pela oportunidade de aprimoramento do meu conhecimento durante minha estadia em Leeds e em Boulder, pelo apoio e ajuda na realização deste trabalho.

Ao IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e ao CQMA (Centro de Química e Meio Ambiente) pela infraestrutura e oportunidade de realizar o trabalho.

Aos amigos e colegas do LQA pela amizade, apoio e colaboração na realização do trabalho.

À todos os colegas do IPEN e amigos pelo apoio e pela torcida para que eu pudesse cumprir mais esta etapa da minha vida acadêmica.

DETERMINAÇÃO DA EMISSÃO DE METANO DA BACIA AMAZÔNICA

Luana Santamaria Basso

RESUMO

No panorama atual de mudanças climáticas, o Metano (CH_4) é considerado o segundo principal gás de efeito estufa antrópico. Este trabalho teve como objetivo estudar o papel da Amazônia na emissão global de CH_4 , sendo esta a maior floresta tropical do mundo. Neste estudo foram realizados perfis verticais, utilizando aviões de pequeno porte, desde 150 m da superfície até 4,4 km, em quatro localidades da Bacia Amazônica, formando um grande quadrante abrangendo toda a Bacia. Os locais foram: próximo a Santarém (SAN; 2,8°S, 54,9°O), Alta Floresta (ALF; 8,8°S, 56,7°O), Rio Branco (RBA; 9,3°S, 67,6°O) e Tabatinga (TAB; 5,9°S, 70,0°O). Foram realizados quatro anos (2010-2013) de medidas contínuas em escala regional, quinzenalmente, totalizando 293 perfis verticais. Até o presente momento estas medidas são únicas e representam uma nova abordagem nas emissões nesta escala. Foram calculados os fluxos de CH_4 nestas quatro localidades por meio do Método de Integração de Coluna e os fluxos anuais foram calculados através de média proporcional, considerando a área de influência de cada localidade. Os anos de 2010 e 2012 foram anos de seca, enquanto 2011 e 2013 foram anos com precipitação acima da média na Amazônia. Dos quatro anos de estudo apenas 2011 apresentou uma temperatura inferior a média. Os resultados obtidos mostraram que a Amazônia atua como uma importante fonte de CH_4 , com uma emissão de $25,4 \text{ Tg ano}^{-1}$ (4% - 5% da emissão global), considerando a área da Amazônia Brasileira (4,2 milhões de km^2). As emissões nesta região apresentaram variações regionais e anuais, com maiores emissões nos anos de seca. A emissão pela queima de biomassa não foi significativa nas regiões de estudo, enquanto as estimativas de emissões por fermentação entérica e manejo dos dejetos de animais foram significativas na maioria destas regiões. Os resultados obtidos ressaltam a importância da realização de estudos em escala regional para esclarecer o comportamento de toda a área da Bacia Amazônica Brasileira.

DETERMINATION OF METHANE EMISSION OF THE AMAZON BASIN

Luana Santamaria Basso

ABSTRACT

In the current scenario of climate change, Methane (CH_4) is the second main anthropogenic greenhouse gas. This work aimed to study the role of Amazon in the global CH_4 emission, which is the largest rainforest in the world. In this study vertical profiles were performed using small aircraft, from 150 m from the surface to 4.4 km in four sites in the Amazon Basin, forming a large quadrant covering the entire basin. The sites were: near Santarem (SAN, 2.8°S, 54.9°W), Alta Floresta (ALF, 8.8°S, 56.7°W), Rio Branco (RBA, 9.3°S, 67.6°W) and Tabatinga (TAB, 5.9°S, 70.0°W). Were made four years (2010-2013) of continuous measures on a regional scale, every two weeks, with a total of 293 vertical profiles. Until now these measures are unique and represent a new approach in emissions on this scale. The CH_4 fluxes were calculated in these four locations through the Column Integration Technique and annual fluxes were calculated using proportional average, considering the area of influence of each location. The years 2010 and 2012 were years of drought, while 2011 and 2013 were years with total precipitation higher than the average in the Amazon. In these four years of study only in 2011 showed a lower average temperature. The results showed that the Amazon was a source of CH_4 , with an annual emission of 25.4 Tg (4% - 5% of global emission), considering the Brazilian Amazon area (4,2 millions km^2). Emissions in this region presented regional and annual variations, with more emissions during drought years. Emissions from biomass burning was not significant, while emissions from enteric fermentation was significant in the study areas. The results obtained highlight the importance of make studies with regional scale and long temporal series to clarify the behavior of the entire Brazilian Amazon area.

SUMÁRIO

Página

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
SUMÁRIO	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS	xix
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo geral	6
2.2 Objetivos específicos	6
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 Metano (CH ₄)	8
3.2 Concentração de CH ₄ na atmosfera	9
3.3 Fontes e Sumidouros de CH ₄	13
3.4 Emissões de CH ₄ no Brasil	20
4 METODOLOGIA	23
4.1 Locais de estudo	23
4.2 Amostragem	24

4.3	Quantificação dos GEE	29
4.4	Sistema analítico.....	30
4.5	Precisão e Acurácia dos resultados	35
4.5.1	Curva de calibração	36
4.5.2	Estabilidade do sistema analítico.....	37
4.6	Cálculo do Fluxo de CH ₄ por meio do Método de Integração de Coluna.....	38
4.7	Simulação das trajetórias das massas de ar.....	42
4.8	Estimativa da Emissão de CH ₄ por meio da Queima de Biomassa .	43
4.9	Estimativa da Emissão de CH ₄ pela fermentação entérica de ruminantes, pelo manejo dos dejetos de animais e pelo cultivo de arroz.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Estudo das trajetórias das massas de ar utilizando os modelos HYSPLIT, BRAMS e FLEXPART	46
5.1	Área de representatividade de cada local de estudo	61
5.2	Estudo da precipitação, temperatura e focos de queimada nos anos de 2010, 2011, 2012 e 2013	67
5.3	Estudo das concentrações de SF ₆	75
5.4	Concentrações de entrada no continente	76
5.5	Concentrações de CH ₄ na Bacia Amazônica	77
5.6	Fluxo de CH ₄ nos locais de estudo	81
5.7	Concentrações e fluxo de CO na Bacia Amazônica	82
5.7.1	Concentrações de entrada no continente de CO.....	82
5.7.2	Concentrações de CO nos perfis verticais.....	83
5.7.3	Fluxo de CO na Bacia Amazônica	86

5.8	Razão CO/CH ₄ utilizada para estimar o fluxo de CH ₄ das queimadas	88
5.9	Fluxo de CH ₄ biogênico e de queima de biomassa.....	90
5.10	Perfis verticais com medidas até aproximadamente 7,5 km de altura	105
5.11	Estimativa do fluxo de CH ₄ para a área da Bacia Amazônica.....	107
5.12	Contribuição da Bacia Amazônica no aumento da concentração global	111
6	CONCLUSÕES	115
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	116
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1. Estimativas globais das emissões e sumidouros de CH ₄ (Tg CH ₄ ano ⁻¹)	17
Tabela 2. Sumário das emissões antrópicas de CH ₄ no Brasil (<i>Adaptada de MCT, 2010 e MCTI, 2013</i>)	21
Tabela 3. Estimativa das emissões de CH ₄ para a Amazônia e áreas tropicais ...	22
Tabela 4. Coordenadas dos locais de estudo e das estações globais da NOAA..	28
Tabela 5. Plano de voo utilizado em SAN, ALF, RBA e TAB	29
Tabela 6. Concentrações dos padrões das curvas de calibração de CO.....	37
Tabela 7. Precisão dos gases analisados no laboratório de GEE da GMD/ESRL/NOAA e no LAGEE/LQA	38
Tabela 8. Fatores de emissão de CH ₄ para cada categoria animal utilizados na estimativa (Fonte: IPCC, 2006)	44
Tabela 9. Tempo médio das trajetórias para cada local de estudo, simuladas pelos modelos HYSPLIT, BRAMS e FLEXPART	47
Tabela 10. Dados de população, rebanho de animais e área de cultivo de arroz para cada área de influência	66
Tabela 11. Número de perfis realizados anualmente em cada um dos locais de estudo	77
Tabela 12. Diferença média, para cada ano, entre as concentrações médias acima de 3,8 km e abaixo de 1,5 km, para cada um dos locais de estudo	80
Tabela 13. Fluxos médios anuais de CO (mg CO m ⁻² dia ⁻²) para cada um dos locais de estudo	87

Tabela 14. Fluxo natural de CO ($\text{mg CO m}^{-2} \text{ dia}^{-2}$) calculado para cada um dos locais de estudo	87
Tabela 15. Razões CO/CH ₄ encontradas nos perfis selecionados na estação seca.....	89
Tabela 16. Fluxos médios anuais, precipitação, temperatura e número de focos de queimada para a área de influência de RBA.....	92
Tabela 17. Fluxos médios anuais, precipitação, temperatura e número de focos de queimada para a área de influência de ALF.....	95
Tabela 18. Fluxos médios anuais, precipitação, temperatura e número de focos de queimada para a área de influência de TAB	97
Tabela 19. Fluxos médios anuais, precipitação, temperatura e número de focos de queimada para a área de influência de SAN.....	99
Tabela 20. Médias anuais dos fluxos de CH ₄ de 2010, 2011, 2012 e 2013.....	100
Tabela 21. Médias dos fluxos de CH ₄ para a estação chuvosa e seca.....	102
Tabela 22. Correlação entre os fluxos de CH ₄ (para o ano todo) com a precipitação e temperatura.....	103
Tabela 23. Correlação entre os fluxos de CH ₄ (de janeiro a julho) com a precipitação e temperatura.....	105
Tabela 24. Correlação entre os fluxos biogênicos de CH ₄ com a precipitação e temperatura para a Amazônia.....	105
Tabela 25. Estimativa da emissão de CH ₄ para a área da Amazônia Sulamericana (6,82 milhões de km^2) e Brasileira (4,20 milhões de km^2).....	109
Tabela 26. Estimativas das emissões de CH ₄ encontradas na literatura para a área da Amazônia Brasileira, recalculando para a área de 4,20 milhões de km^2	109
Tabela 27. Estimativa das emissões de CH ₄ provenientes dos rebanhos animais, considerando emissões por fermentação entérica e manejo de dejetos, e proveniente do cultivo de arroz (entre parênteses quanto representa do fluxo Biogênico de cada região em %)	111

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Balanço radiativo sem o efeito estufa e com o efeito estufa.	1
Figura 2. Média anual global do balanço de energia da Terra (2000-2010). Os fluxos solar (amarelo) e infravermelho (rosa) são medidos em W m^{-2} . As caixas (lilás) representam as principais componentes do balanço de energia.	2
Figura 3. Concentrações atmosféricas históricas de CO_2 , CH_4 e N_2O e a partir da era industrial (à direita) e de ano 0 até o ano de 1750 (à esquerda), determinado a partir de medidas de núcleos de gelo (símbolos) e de medições atmosféricas diretas (linhas azuis, representam as medições do observatório Grim Cape).	4
Figura 4. Variações de deutério (δD) no gelo antártico, que é um indicador para a temperatura local, e as concentrações atmosféricas dos GEE, tais como: CO_2 , CH_4 e N_2O no ar preso dentro de núcleos de gelo e das recentes medições atmosféricas. Os dados abrangem 650.000 anos e as bandas sombreadas indicam os períodos interglaciais quentes anteriores e atual.....	5
Figura 5. Rede de monitoramento de gases de efeito estufa da NOAA, considerando apenas os locais ativos.....	5
Figura 6. Faixa de absorção de luz infravermelha do gás CH_4	9
Figura 7. (a) Concentração global do CH_4 atmosférico e (b) sua taxa de crescimento de 1984 até o final de 2012.....	10
Figura 8. Concentração média mensal de CH_4 para o período entre 1984 e 2012 para cada 30° latitude (em preto) e sua tendência de longo tempo sem sazonalidade (em vermelho).	11

- Figura 9. Tendências sem sazonalidade ao longo do tempo para cada 30° de latitude (direita) e suas taxas de crescimento (esquerda).11
- Figura 10. Ciclos sazonais médios da concentração de CH₄ para cada 30° de latitude obtido subtraindo-se as tendências de longo tempo a partir da série temporal média da região. As barras de erro verticais representam a variação de ± 1 sigma que foi calculado para cada mês.13
- Figura 11. Balanço Global de CH₄ com fontes naturais e antrópicas.....15
- Figura 12. Imagem do Brasil destacando os quatro locais de estudo na Bacia Amazônica.23
- Figura 13. Avião, modelo Sertanejo, utilizado para a realização das amostragens em SAN e, em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, o tubo coletor e a acomodação do sistema de coleta.24
- Figura 14. Avião utilizado para a amostragem em RBA e TAB, modelo Seneca II, e em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, o tubo coletor e a acomodação do sistema de coleta.25
- Figura 15. Avião Cessna 210, utilizado na amostragem em ALF, e, em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, a localização do tubo coletor e a acomodação do sistema de amostragem.....25
- Figura 16. Sistema de amostragem de ar versão II utilizado em SAN onde: 1) PFP com 17 frascos de vidro; 2) PCP; 3) Painel do piloto; 4) Minicomputador para registro de dados no local; 5) GPS.26
- Figura 17. Sistema de amostragem de ar versão III, utilizado em RBA, TAB e ALF, onde: 6) PFP com 12 frascos de vidro; 7) PCP; 8) Painel do piloto; 9) Minicomputador para registro de dados no local; 10) GPS (2 modelos utilizados).27
- Figura 18. Esquema da trajetória em formato helicoidal descendente realizada pelo avião de pequeno porte durante a amostragem de ar.28
- Figura 19. LAGEE: (1) monitor CO₂; (2) cromatógrafo CO; (3) cromatógrafo N₂O/SF₆/CH₄; (4) controlador de fluxo; (5) válvula de seleção; (6) amostra/CO referência; (7) medidor de vácuo e receptor de amostras;

(8) interface do cromatógrafo; (9) banho resfriador; (10) microcomputador; (11) painel de gases; (12) interface monitor CO ₂ ; (13) interfaces das válvulas e cromatógrafo CO.....	30
Figura 20. Esquema de funcionamento do Sistema LAGEE-Brasil.....	31
Figura 21. Esquema de funcionamento do cromatógrafo na análise do CH ₄ (a) posição de espera e (b) posição de injeção da amostra no equipamento.	32
Figura 22. Esquema do detector DIC.....	33
Figura 23. Esquema de funcionamento do detector DCE.....	33
Figura 24. Esquema de funcionamento do cromatógrafo de CO.	34
Figura 25. Esquema do detector do cromatógrafo de CO.....	34
Figura 26. Calibração do gás CH ₄ de cilindro de intercomparação da WMO (azul) com 30 análises ($1820,59 \pm 2,15$ ppb) e o gás referência (vermelho)..	35
Figura 27. Intercomparação entre o LQA (BRA-IPEN) com outros laboratórios filiados a NOAA.....	36
Figura 28. Tanque de calibração do cilindro CA04533, para CH ₄	38
Figura 29. Simulação da emissão de SF ₆ no planeta. A marcação em vermelho destaca a área de estudo, a qual não possui emissão deste gás	39
Figura 30. Concentrações medidas para os GEE em ASC e RPB e as curvas ajustadas dessas concentrações realizadas pela NOAA.	40
Figura 31. Representação do modelo de caixa simplificado utilizado para o cálculo de fluxo pelo Método de Integração de Coluna.	41
Figura 32. Trajetórias calculadas para a região de SAN a 500 m com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	49
Figura 33. Trajetórias calculadas para a região de SAN a 2000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	50
Figura 34. Trajetórias calculadas para a região de SAN a 4000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	51

Figura 35. Trajetórias calculadas para a região de ALF a 500 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	52
Figura 36. Trajetórias calculadas para a região de ALF a 2000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	53
Figura 37. Trajetórias calculadas para a região de ALF a 4000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	54
Figura 38. Trajetórias calculadas para a região de RBA a 500 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	55
Figura 39. Trajetórias calculadas para a região de RBA a 2000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	56
Figura 40. Trajetórias calculadas para a região de RBA a 4000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	57
Figura 41. Trajetórias calculadas para a região de TAB a 500 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	58
Figura 42. Trajetórias calculadas para a região de TAB a 2000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	59
Figura 43. Trajetórias calculadas para a região de TAB a 4000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.	60
Figura 44. Variabilidade sazonal da posição da ZCIT observada e simulada para a região do Atlântico Tropical, próximo à costa sulamericana.	61
Figura 45. Posições sazonais da Zona de Convergência Intertropical costeira. ...	61
Figura 46. Mapa do Brasil mostrando a região de representatividade de cada local de estudo, (a) TAB; (b) SAN; (c) RBA; (d) ALF, calculadas pelo FLEXPART.....	62
Figura 47. Mapa da região Amazônica, em verde área florestal intacta, em vermelho a área desmatada 2000-2010, em cinza escuro a área desmatada antes de 2000, e nas áreas não-florestadas cinza claro. Detalhe: mapa da América do Sul destacando o bioma Amazônico, dentro dos limites da Amazônia Legal brasileira. As linhas pretas indicam os limites políticos de estados amazônicos.	63

Figura 48. Mapa do Brasil mostrando a região de influência de cada região de estudo, TAB, SAN, RBA e ALF, calculadas pelo FLEXPART considerando apenas as áreas com cobertura florestal.	64
Figura 49. Representação dos quadrantes utilizados para o cálculo da precipitação, temperatura e dos focos de queimada para cada local de estudo.	65
Figura 50. Mapas de precipitação acumulada no Brasil (dados do satélite TRMM).	68
Figura 51. Mapas de precipitação mensal acumulada no Brasil no ano de 2010 (dados do satélite TRMM).	69
Figura 52. Mapas de precipitação mensal acumulada no Brasil no ano de 2011 (dados do satélite TRMM).	70
Figura 53. Mapas de precipitação mensal acumulada no Brasil no ano de 2012 (dados do satélite TRMM).	71
Figura 54. Mapas de precipitação mensal acumulada no Brasil no ano de 2013 (dados do satélite TRMM).	72
Figura 55. Precipitação mensal acumulada na Bacia Amazônica (dados do satélite TRMM).	73
Figura 56. Mapas de temperatura média da superfície no Brasil (dados GLDAS).	73
Figura 57. Mapas de focos de queimada na América do Sul (dados CPTEC/INPE).	74
Figura 58. Séries temporais de SF ₆ para SAN, RBA, ALF e TAB, para RPB representando o Hemisfério Norte, e ASC representando o Hemisfério Sul, entre 2010 e 2013.	75
Figura 59. Série temporal das concentrações BKG de CH ₄ calculadas para cada perfil realizado, em ALF, RBA, SAN e TAB, e as concentrações nas estações de ASC e RPB.	77
Figura 60. Concentração de CH ₄ (em ppb) nos perfis verticais para cada local de estudo, em azul os perfis realizados na estação chuvosa (meses com	

- precipitação acima de 100 mm) e em vermelho os perfis realizados na estação seca (meses com precipitação abaixo de 100 mm).79
- Figura 61. Concentrações médias mensais dos perfis verticais abaixo de 1,5 km e acima de 3,8 km, entre 2010 e 2013 para cada região de estudo, e as concentrações de ASC e RPB. As barras em cinza representam a estação chuvosa na Amazônia (meses com precipitação acima de 100 mm).80
- Figura 62. Fluxos médios mensais de CH_4 ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para os quatro locais de estudo, de 2010 a 2013, a linha preta representa a média dos quatro anos e os desvios padrões (linhas tracejadas).82
- Figura 63. Série temporal das concentrações BKG de CO calculadas para cada perfil realizado e as concentrações nas estações de ASC e RPB.83
- Figura 64. Concentração de CO (em ppb) nos perfis verticais para cada local de estudo, em azul os perfis realizados na estação chuvosa (meses com precipitação acima de 100 mm) e em vermelho os perfis realizados na estação seca (meses com precipitação abaixo de 100 mm).84
- Figura 65. Concentrações médias mensais dos perfis verticais de CO abaixo de 1,5 km e acima de 3,8 km, entre 2010 e 2013 para cada região de estudo, e as concentrações de ASC e RPB. As barras em cinza representam a estação chuvosa na Amazônia (meses com precipitação acima de 100 mm).85
- Figura 66. Mapa da Amazônia Legal com destaque para a região do Arco do Desflorestamento, ou também conhecida como Arco do Fogo.86
- Figura 67. Fluxos médios mensais de CO ($\text{mg CO m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para os quatro locais de estudo, de 2010 a 2013.87
- Figura 68. Perfis onde foram observadas plumas de queima de biomassa que foram utilizados para o cálculo da razão, onde em destaque estão as altitudes que foram consideradas.88
- Figura 69. Médias mensais dos fluxos, da precipitação, temperatura e dos focos de queimada, para a região de RBA, para o anos de 2010, 2011, 2012 e 2013.92

Figura 70. Médias mensais dos fluxos, da precipitação, temperatura e dos focos de queimada, para a região de ALF, para o anos de 2010, 2011, 2012 e 2013.	95
Figura 71. Médias mensais dos fluxos, da precipitação, temperatura e dos focos de queimada, para a região de TAB, para o anos de 2010, 2011 e 2012.	97
Figura 72. Médias mensais dos fluxos, da precipitação, temperatura e dos focos de queimada, para a região de SAN, para o anos de 2010, 2011, 2012 e 2013.	99
Figura 73. Locais com medidas de fluxo realizadas em diferentes épocas do ano e os afluentes do Rio Amazonas. Os números entre parênteses na legenda indicam quantos locais foram medidos em cada época. Em destaque os locais de coleta no Rio Xingú e no Rio Tapajós, que influenciam a região de SAN.	101
Figura 74. Comparação dos perfis verticais até 4,4 km e até 7,5 km realizados em RBA.	106
Figura 75. Fluxos de CH ₄ calculados para cada perfil realizado nos quatro locais de estudo e a média ponderada destes fluxos onde as barras representam o desvio padrão.	107
Figura 76. a) Séries temporais de CH ₄ de ASC (linha preta), RPB (linha cinza) e a concentração média acima de 3,8 km (círculos vermelhos) e abaixo de 1,5 km (losangos verdes) em SAN. b) Série temporal do fluxo de CH ₄ , entre 2000 e 2013 (triângulos pretos), e os círculos verdes representam a média anual. As barras vermelhas representam os períodos de El Niño e as barras azuis representam os períodos de La Niña.	113
Figura 77. Série temporal das médias de cada perfil menos o BKG (círculo preto) e as médias anuais das concentrações menos o BKG (círculo azul). Média anual da concentração global (triângulos vermelhos), dados obtidos dos boletins anuais de GEE da GAW/WMO de 2004 a 2013.	114

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

ALF	Alta Floresta – MT (perfil vertical de avião)
ASC	Ilha de Ascension
BKG	Concentração de entrada no continente (<i>background</i>)
BRAMS	<i>Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System</i>
CCG	<i>Carbon Cycle Gases</i>
CQMA	Centro de Química e Meio Ambiente
CMDL	<i>Climate Monitoring & Diagnostics Laboratory</i>
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DCE	Detector de Captura Eletrônica
EDGAR	<i>Emissions Database for Global Atmospheric Research</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ESRL	<i>Earth System Research Laboratory</i>
DIC	Detector de Ionização de Chama
FR	Forçante Radiativa
GDAS	<i>Global Data Assimilation System</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GISS	<i>Goddard Institute for Space Studies</i>
GLDAS	<i>Global Land Data Assimilation System</i>
GMD	<i>Global Monitoring Division</i>
GPCP	<i>Global Precipitation Climatology Project - Monthly Global Precipitation</i>
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
HYSPLIT	<i>Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IR	Radiação Infravermelha

LAGEE	Laboratório de Análise de Gases de Efeito Estufa
LQA	Laboratório de Química Atmosférica
MAGICC	<i>Multiple Analysis of Greenhouse Gases Influence Climate Change</i>
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NAT	Natal/Maxaranguape – RN
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NOAA	<i>National Oceanic & Atmospheric Administration</i>
PAG	Potencial de Aquecimento Global
RBA	Rio Branco – AC (perfil vertical de avião)
RPB	Ilha de Barbados (<i>Ragged Point Barbados</i>)
SAL	Salinópolis – PA
SAN	Santarém – PA (perfil vertical de avião)
TAB	Tabatinga – AM (perfil vertical de avião)
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

1 INTRODUÇÃO

Durante milhões de anos a Terra passou por ciclos naturais de aquecimento e resfriamento. Processos naturais, além de processos de intensa atividade geológica, lançaram à superfície gases com capacidade de absorver energia na faixa de calor (infravermelho), criando um efeito estufa natural, com uma temperatura média de 15 °C. Caso não existissem estes gases a temperatura do planeta seria -18 °C (Figura 1).

Figura 1. Balanço radiativo sem o efeito estufa e com o efeito estufa.

(Adaptada de Ahrens, 2000)

O efeito estufa deve-se à existência de gases na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o vapor d'água (H_2O), o ozônio (O_3) entre outros, os quais absorvem energia na forma de calor, que é emitida pela crosta terrestre, impedindo assim que a radiação da superfície regresse ao espaço, mantendo a troposfera aquecida e fazendo com que a temperatura média global aumente (BAIRD, 2002).

O clima terrestre é determinado pelos fluxos de energia que entram e saem do planeta, e pelos fluxos para a superfície terrestre e a partir dela. As distribuições geográficas destes fluxos de energia na superfície são particularmente importantes, pois dirigem as circulações oceânicas, alimentam a evaporação da água da superfície da Terra e governam o ciclo hidrológico do planeta. Alterações no balanço de energia da superfície finalmente também

controlam a forma como o ciclo hidrológico responde aos pequenos desequilíbrios energéticos que forçam a mudança climática (STEPHENS *et al.*, 2012).

A média anual global do balanço de energia da Terra entre o período de 2000 a 2010 é representada na Figura 2. A evaporação da superfície ($88 \pm 10 \text{ W m}^{-2}$) é o principal processo que consome a maior parte do excesso da energia radiante ($165 \pm 6 \text{ W m}^{-2}$) seguido pela emissão a partir da superfície ($398 - 345 = 53 \pm 9 \text{ W m}^{-2}$) e do calor sensível ($24 \pm 7 \text{ W m}^{-2}$). O calor transferido para a atmosfera através do calor latente e sensível equilibra a perda de energia radiante da atmosfera ($-112 \pm 15 \text{ W m}^{-2} = 74 + 398 - 239 - 345$). O efeito das nuvens sobre os fluxos no topo da atmosfera, chamado de efeito albedo das nuvens, aumenta o fluxo solar refletido ($47,5 \pm 3 \text{ W m}^{-2}$), enquanto as nuvens reduzem o fluxo de onda longa em relação ao céu claro em aproximadamente $26,4 \pm 4 \text{ W m}^{-2}$ (medida do seu efeito estufa), dando uma perda de radiação da Terra por nuvens de $21,1 \pm 5 \text{ W m}^{-2}$ (STEPHENS *et al.*, 2012).

Figura 2. Média anual global do balanço de energia da Terra (2000-2010). Os fluxos solar (amarelo) e infravermelho (rosa) são medidos em W m^{-2} . As caixas (lilás) representam as principais componentes do balanço de energia.

(Adaptada de Stephens *et al.*, 2012)

As atividades humanas contribuem para as alterações climáticas, provocando mudanças na atmosfera da Terra, nas concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa (GEE) e aerossóis. A radiação solar que penetra no sistema terrestre e a radiação infravermelha que é emitida pela Terra podem ser alteradas pelos GEE e aerossóis, afetando o balanço de energia da Terra e o

clima, alterando a abundância na atmosfera ou as propriedades desses gases e partículas podendo levar a um aquecimento ou resfriamento do sistema climático.

A intervenção humana no clima da Terra ocorre há milhares de anos, entretanto somente nos dois últimos séculos estas intervenções passaram a ser comparáveis ao ciclo natural do carbono (MALHI *et al.*, 2002), acelerando o processo natural de aquecimento global e do efeito estufa. Um crescimento acentuado da população mundial vem sendo observado principalmente neste último século, acarretando uma industrialização em grande escala, expansão das áreas urbanas, aumento das atividades agrícolas e pecuárias e principalmente o aumento da queima de combustíveis fósseis, como o petróleo, o gás natural, o carvão mineral e a biomassa, que vem afetando significativamente o clima global. Algumas consequências destas mudanças climáticas vêm sendo observadas, como o derretimento de geleiras nos polos e o aumento de dez centímetros no nível do mar em um século. Essas mudanças climáticas podem provocar também doenças, mortes, elevação da temperatura, prejuízos ao fornecimento de água em várias regiões do mundo, etc. (MARENGO, 2007).

A Figura 3 apresenta a concentração na atmosfera dos três principais GEE CO_2 , CH_4 e N_2O , ao longo dos anos, nota-se que desde 1750 estas concentrações apresentaram um crescimento, e esta é a principal causa da mudança climática. Este aumento das concentrações é causado por emissões antrópicas, principalmente a utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia e de alterações do uso da terra, em especial a agricultura. A variação observada na concentração atmosférica do CO_2 , CH_4 e N_2O resulta do equilíbrio dinâmico entre as emissões antropogênicas, e a perturbação dos processos naturais que leva a uma remoção parcial destes gases a partir da atmosfera (IPCC, 2013).

Dados de testemunhos de gelo, tanto Ártico como Antártico, fornecem registros das concentrações dos gases da atmosfera durante os últimos milhares de anos (Figura 4). Em função da circulação de ar, as precipitações de neve aprisionam bolhas de ar, registrando os anos mais frios, mais quentes, assim como concentrações maiores ou menores de gás carbônico, oxigênio e outros gases das diferentes eras geológicas. As concentrações atuais de CO_2 atmosférico, CH_4 e N_2O ultrapassam qualquer nível medido durante pelo menos os últimos 800 mil anos, o período abrangido por núcleos de gelo. Além disso, a

taxa média de crescimento destes três gases observados durante o último século ultrapassou qualquer taxa observada de mudança ao longo dos 20.000 anos anteriores. Baseados nessas evidências, os cientistas chegaram à conclusão de que o aumento da concentração dos GEE na atmosfera é o responsável pelo atual aquecimento do planeta (IPCC, 2013).

Figura 3. Concentrações atmosféricas históricas de CO_2 , CH_4 e N_2O e a partir da era industrial (à direita) e de ano 0 até o ano de 1750 (à esquerda), determinado a partir de medidas de núcleos de gelo (símbolos) e de medições atmosféricas diretas (linhas azuis, representam as medições do observatório Grim Cape).

(Adaptada de IPCC, 2013)

A Figura 5 apresenta a atual rede de monitoramento de GEE da NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*), a maior rede do gênero, que revela grandes lacunas nas medidas destes gases sobre a região tropical e, especificamente, a Bacia Amazônica. O balanço de CH_4 de fontes e sumidouros pode ser quantificado com precisão em escala global com a atual rede de observações, mas o conhecimento dos balanços nacionais, regionais e locais ainda é limitado (DLUGOKENCKY *et al.*, 2011). Observando a importância do CH_4 como um importante GEE, e a ausência de estimativas regionais da emissão de

CH₄ nas regiões tropicais, principalmente na Bacia Amazônica, este projeto tem como motivação estudar a contribuição da Amazônia na emissão do CH₄ em escala regional, por meio da determinação do fluxo de CH₄ utilizando medidas atmosféricas de perfis verticais de avião.

Figura 4. Variações de deutério (δD) no gelo antártico, que é um indicador para a temperatura local, e as concentrações atmosféricas dos GEE, tais como: CO₂, CH₄ e N₂O no ar preso dentro de núcleos de gelo e das recentes medições atmosféricas. Os dados abrangem 650.000 anos e as bandas sombreadas indicam os períodos interglaciais quentes anteriores e atual.

(Adaptada de IPCC,2007)

Figura 5. Rede de monitoramento de gases de efeito estufa da NOAA, considerando apenas os locais ativos.

(Adaptada de NOAA website)

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar a emissão de CH_4 da Bacia Amazônica, por meio do cálculo de fluxo, em escala regional, pelo Método de Integração de Coluna, utilizando os perfis verticais de avião que foram realizados em quatro localidades da Bacia Amazônica.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Interpretar os resultados das análises dos perfis verticais, de frequência quinzenal, realizados nos locais: Santarém (SAN); Tabatinga (TAB); Rio Branco (RBA); e Alta Floresta (ALF), de 2010 a 2013.

- ✓ Determinar a concentração de entrada do CH_4 no continente brasileiro, utilizando o cálculo matemático (MILLER *et al.*, 2007), a partir da média do perfil vertical do hexafluoreto de enxofre (SF_6), realizado em cada um destes locais de amostragem, e determinar sua fração em relação às concentrações encontradas nas estações Globais da NOAA na Ilha de Ascension (ASC: 8°S, 14°O; Oceano Atlântico Sul) e Barbados (RPB: 13°N, 59°O; Oceano Atlântico Norte).

- ✓ Calcular trajetórias de massas de ar, a cada 500 metros, para todos os perfis verticais realizados nos quatro locais, utilizando o modelo de trajetórias HYSPLIT (DRAXLER & ROLPH, 2013) e compará-las com as calculadas pelo CPTEC, através de parceria com o Dr. Saulo Freitas, utilizando o modelo BRAMS e com as calculadas pelo Dr. John B. Miller pelo modelo FLEXPART.

- ✓ Calcular os fluxos de CH_4 , utilizando o Método de Integração de Coluna do Perfil Vertical, para os quatro locais de estudo, para o período de quatro anos. Neste caso serão observadas características como sazonalidade, uso e ocupação do solo, precipitação, focos de queimada, entre outras características que possam interferir no fluxo de emissão para cada local estudado.

- ✓ Determinar o fluxo de CH_4 oriundo da queima de biomassa, utilizando o monóxido de carbono (CO) como traçador, a partir da relação CO/CH_4

obtida nas plumas de queima de biomassa, observadas nos perfis verticais nos locais estudados e assim também determinar a fração biogênica da emissão do CH₄.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Metano (CH₄)

O CH₄ é considerado entre os gases primários como o segundo GEE mais importante, devido a sua concentração na atmosfera e ao seu Potencial de Aquecimento Global (PAG), que é 25 vezes maior que o CO₂ em um cenário de 100 anos, e sua forçante radiativa (FR) de $0,48 \pm 0,05 \text{ W m}^{-2}$ (aproximadamente 18% da média total global), que representa um aumento de $0,01 \text{ W m}^{-2}$ desde o IPCC 2007, devido ao aumento de 29 ppb na concentração atmosférica do CH₄, impulsionado pelo aumento das emissões naturais e antrópicas líquidas, mas suas contribuições relativas não estão bem quantificadas. Seu tempo de vida atmosférico é estimado em 12 anos (IPCC, 2013).

A oxidação do CH₄ pelo radical hidroxila (OH) na troposfera leva à formação de formaldeído (CH₂O), de monóxido de carbono (CO) e de ozônio (O₃), na presença de níveis suficientemente altos de óxidos de nitrogênio (NO_x). Junto com o CO, o CH₄ ajuda a controlar a quantidade de OH na troposfera. Na estratosfera, o CH₄ afeta também as concentrações de vapor de água e de O₃, e desempenha um papel fundamental na conversão de cloro reativo a ácido clorídrico (HCl) menos reativo (WUEBBLES & HAYHOE, 2002).

Foi detectado na atmosfera em 1948 por Marcel V. Migeatte, mas sua importância para o clima só foi recentemente revelada por três importantes descobertas. Em 1976, Wei-Chyung Wang e colaboradores do GISS (*Goddard Institute for Space Studies*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) revelaram que o CH₄ é um GEE de importância significativa na atmosfera. A segunda descoberta resultou da análise de núcleos de gelo da Groelândia e Antártida, retirados através de perfuração profunda da camada de gelo, onde os pesquisadores conseguiram isolar gases capturados em minúsculas bolhas de ar. Os gases CO₂ e CH₄ dentro destas bolhas mostraram que suas concentrações vêm sofrendo um rápido crescimento desde o período pré-industrial, sendo que a concentração de CH₄ aumento mais que 100% nos últimos 150 anos. E a terceira descoberta é resultado de uma investigação feita por Jeff

Severinghaus usando técnicas em geoquímica baseadas nos isótopos de nitrogênio que reagem a mudanças rápidas de temperatura, mostrando que o CH_4 aumenta rapidamente com o aquecimento climático, com um pequeno atraso em relação à temperatura. Assim, o CH_4 não somente afeta o clima através do efeito estufa, como também é afetado por ele (SCHIMIDT G., 2004).

Uma molécula de CH_4 contém quatro ligações C—H (carbono - hidrogênio). Embora as vibrações de estiramento da ligação C—H ocorram fora da região do infravermelho (IR) térmico, as vibrações de deformação angular da ligação H—C—H absorvem a $7,7 \mu\text{m}$ (Figura 6), próximo do limite da janela do IR térmico, consequentemente o CH_4 absorve IR nesta região (BAIRD, 2002).

Figura 6. Faixa de absorção de luz infravermelha do gás CH_4 .
(Adaptada de Ahrens, 2000)

3.2 Concentração de CH_4 na atmosfera

No período pré-industrial sua concentração global na atmosfera era de aproximadamente 700 ppb, com um crescimento ao longo dos anos devido ao aumento das emissões por fontes antropogênicas, sendo que em 2012 sua média global foi de 1819 ± 2 ppb, um aumento de 5 ppb em relação ao ano anterior, Figura 7. As taxas de crescimento de sua concentração variam em uma escala global. As variações sazonais desta concentração são maiores no Hemisfério Norte (HN) do que no Hemisfério Sul (HS) (WMO, 2014), e uma característica fundamental de sua taxa de crescimento global é a sua variabilidade interanual atual (Figura 7b) (IPCC, 2007).

Figura 7. (a) Concentração global do CH₄ atmosférico e (b) sua taxa de crescimento de 1984 até o final de 2012.

(Adaptada de WMO, 2014)

As taxas de crescimento da concentração do CH₄ variam em uma escala global. As variações sazonais desta concentração são maiores no HN do que no HS, e este aumento no HN se estende para o HS (Figura 7). Esta grande variação latitudinal na concentração de CH₄ das latitudes médias do HN e nos trópicos, sugerem maiores fontes de CH₄ nas altas e médias latitudes do HN e sumidouros nos trópicos, onde a concentração de radicais OH é maior (WMO, 2014).

A Figura 8 mostra a concentração média mensal de CH₄ para o período entre 1984 e 2011 para cada região de 30° de latitude. Observa-se que a menor magnitude das variações sazonais está registrada na região entre o equador e 30°S. A Figura 9 resume tendências sem sazonalidade ao longo do tempo para cada 30° de latitude e suas taxas de crescimento. Como pode ser melhor observado nas tendências sem sazonalidade ao longo do tempo, existe um gradiente latitudinal claramente evidenciado, onde entre o Norte e médias

latitudes, com concentrações maiores, e as latitudes do sul, com concentrações inferiores (WMO, 2014).

Figura 8. Concentração média mensal de CH_4 para o período entre 1984 e 2012 para cada 30° latitude (em preto) e sua tendência de longo tempo sem sazonalidade (em vermelho).

(Adaptada de WMO, 2014)

Figura 9. Tendências sem sazonalidade ao longo do tempo para cada 30° de latitude (direita) e suas taxas de crescimento (esquerda).

(Adaptada de WMO, 2014)

Na década de 1990, a taxa de crescimento por ano diminuiu, porém manteve-se positiva, especialmente durante o período entre 1992 e 1996, quando estas taxas foram inferiores a 5 ppb ano^{-1} . Em 1998, a taxa de crescimento global aumentou para cerca de 11 ppb ano^{-1} . Este incremento ocorreu nas altas e médias latitudes do HN, onde as taxas de crescimento foram maiores que 15 ppb ano^{-1} . Em 2000 e 2001, esta taxa diminuiu para cerca de -1 ppb ano^{-1} , e entre 2002 e 2003, estas taxas foram maiores no HN, especialmente nas altas e médias latitudes, onde atingiu cerca de 10 ppb ano^{-1} . A taxa de crescimento global foi de -3 ppb ano^{-1} em 2004 e de 1 ppb ano^{-1} em 2005. Apesar das grandes taxas de crescimento em 1998 e entre 2002 e 2003, durante os eventos de El

Niño, a concentração média global foi relativamente estável entre 1999 e 2006. Entretanto, a concentração média global voltou a aumentar, um total de 29 ppb desde 2007 (WMO, 2013).

O grande aumento na taxa de crescimento de CH_4 em 1991 pode ter sido causado pela diminuição dos níveis de radicais OH na atmosfera devido à redução da radiação UV (ultravioleta) resultante da erupção do Monte Pinatubo em 1991 (DLUGOKENCKY *et al.*, 1996), e a consequente redução em 1992 pode ter sido devido a um aumento de radicais OH, resultantes da depleção do ozônio estratosférico na sequência desta erupção (BEKKI *et al.*, 1994). Em 1998, as taxas de crescimento foram elevadas em todo o globo, o que pode ter ocorrido devido ao aumento das emissões em altas latitudes do norte e nas áreas alagadas tropicais causadas por altas temperaturas e pelo aumento da precipitação, bem como pela queima de biomassa nas florestas boreais, principalmente na Sibéria (DLUGOKENCKY *et al.*, 2001). As taxas de crescimento foram baixas entre 1999 e 2006, com uma exceção durante o evento El Niño entre 2002 e 2003. As causas destas diminuições nas taxas de crescimento do CH_4 continuam incertas. Desde 2007, a concentração do CH_4 na atmosfera voltou a aumentar e as razões prováveis são: uma emissão média maior em áreas alagadas nas altas latitudes do HN durante o ano de 2007, devido a temperaturas excepcionalmente quentes e emissões tropicais durante 2007 e 2008, relacionadas a um aumento da precipitação em áreas alagadas durante um episódio de La Niña. Porém, as razões para o aumento da concentração de CH_4 não são completamente compreendidas e há uma incerteza com relação à continuidade deste aumento neste ritmo (DLUGOKENCKY *et al.*, 2009; WMO, 2013).

A Figura 10 mostra os ciclos sazonais na concentração de CH_4 para cada 30° de latitude, que são dirigidos principalmente pela reação com radicais OH, um grande sumidouro deste gás na atmosfera. Seus ciclos sazonais são afetados pela magnitude e tempo das emissões de CH_4 a partir de fontes como as áreas alagáveis e a queima de biomassa, bem como pelo seu transporte na atmosfera. Os ciclos sazonais são de grande amplitude no HN, sazonalmente, o HN mostra mínimos no verão, e máximos no inverno, enquanto o HS mostra um ciclo sazonal depois de dois terços a três quartos do ano. As variações sazonais

na concentração de CH_4 eram quase consistentes com as do radical OH que reage com o CH_4 (WMO, 2013).

Figura 10. Ciclos sazonais médios da concentração de CH_4 para cada 30° de latitude obtido subtraindo-se as tendências de longo tempo a partir da série temporal média da região. As barras de erro verticais representam a variação de ± 1 sigma que foi calculado para cada mês.

(Adaptada de WMO, 2014)

3.3 Fontes e Sumidouros de CH_4

As fontes antrópicas de CH_4 para a atmosfera excedem as fontes naturais, aproximadamente 60% da emissão global de CH_4 para a atmosfera é proveniente de fontes antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis e de biomassa, os ruminantes, a cultura de arroz, dentre outros, enquanto as fontes naturais, como as áreas alagadas, representam cerca de 40% (WMO, 2014). Devido à variedade de suas fontes, as emissões de CH_4 são afetadas por vários fatores, incluindo o uso de energia, a distribuição da população humana, as práticas agrícolas e o clima (WUEBBLES & HAYHOE, 2002).

Embora a maioria das fontes e sumidouros de CH_4 tenha sido identificada, suas contribuições em relação aos níveis de CH_4 na atmosfera são incertas. Como tal, os fatores responsáveis pela estabilização observada dos níveis atmosféricos de CH_4 no início de 2000, e o aumento após 2006, permanecem incertos (KIRSCHKE, *et al.*, 2013).

O CH_4 é produzido fundamentalmente em condições de anaerobiose encontradas em áreas alagadas e em ecossistemas sedimentares por meio de duas vias principais que são a fermentação do acetato (CH_3COOH) e a redução

do CO₂ com o hidrogênio (H₂) como fonte de elétron (SUGIMOTO & WADA, 1995). A produção de CH₄ é a etapa final do carbono em habitats anaeróbicos, e a conversão da matéria orgânica a CH₄ ocorre sob anaerobiose através da cooperação entre diferentes culturas microbianas.

As arqueias metanogênicas, microrganismos anaeróbios obrigatórios que requerem condições anóxicas de crescimento e altamente redutoras, convertem uma extensão relativamente limitada de substratos simples para CH₄, em habitats com substratos orgânicos complexos, interagem com outros microrganismos anaeróbios que catabolizam substratos complexos em substratos simples (PAZINATO, 2007).

Em contraste com as diversas fontes de CH₄, há apenas três sumidouros deste na troposfera. Uma vez emitido o CH₄ permanece na atmosfera por cerca de 8 anos antes da sua remoção, principalmente por oxidação química da troposfera (IPCC, 2007). A reação com o radical livre OH é o sumidouro dominante de CH₄ atmosférico, responsável por cerca de 90% de sua perda para o ar. A quantidade de CH₄ removida é limitada pelos níveis OH e pela constante de velocidade da reação. As concentrações de OH não são afetadas apenas pelas emissões diretas de CH₄, mas por seus produtos de oxidação, especialmente o CO (WUEBBLES & HAYHOE, 2002). Os outros sumidouros são consumo por microrganismos do solo e a perda para a estratosfera (BAIRD, 2002; IPCC, 2007). A absorção de CH₄ pela oxidação dos solos sob vegetação natural (incluindo terra firme e matas ciliares) por microrganismos é estimada em 30 Tg CH₄ ano⁻¹ (EPA, 2010).

Kirschke *et al.* (2013) construíram um balanço global de CH₄ para as últimas três décadas, combinando estimativas *bottom-up* e *top-down* de fontes e de sumidouros de CH₄ (Figura 11). Incertezas associadas aos balanços por década são expressas pelo intervalo mínimo-máximo entre estas diferentes estimativas, devido ao pequeno número de estudos disponíveis para o cálculo do desvio padrão de confiança.

Figura 11. Balanço Global de CH₄ com fontes naturais e antrópicas.

(Adaptada de *Global Carbon Project*, 2013)

A diferença entre o total de CH₄ emitido e o total de CH₄ consumido vem diminuindo com o passar do tempo, entre 1980-1989 era de 30 Tg CH₄ ano⁻¹ e entre 2000-2009 era de 8 Tg CH₄ ano⁻¹, assim como a taxa de crescimento atmosférico, que entre 1980-1989 era de 34 Tg CH₄ ano⁻¹ e entre 2000-2009 era de 6 Tg CH₄ ano⁻¹. Os balanços resultantes sugerem que as abordagens baseadas em dados e modelos de ecossistemas naturais superestimam as emissões totais (KIRSCHKE, *et al.*, 2013).

Observa-se na Figura 11 que as áreas alagadas contribuem com a maior parte das emissões naturais (32% das emissões totais), seguida pela queima de combustíveis fósseis e pelas emissões dos ruminantes, para a década de 2000 a 2009. Já o consumo de CH₄ pela reação com o radical OH na troposfera corresponde a 83% do consumo de CH₄. Kirschke, *et al.* (2013) mostra que, ao longo das últimas três décadas, as variações nas emissões de áreas alagadas têm dominado a variabilidade de ano para ano em emissões de superfície. Os vários cenários de emissões testados, concebidos para explicar as alterações temporais nos níveis atmosféricos de CH₄ observados sugerem que a estabilização do CH₄ atmosférico no início dos anos 2000 provavelmente deve-se a uma redução ou a estabilização das emissões de combustíveis fósseis, combinada com uma estabilização ou aumento das emissões microbianas. Depois de 2006, o novo aumento global no CH₄ atmosférico é consistente com o aumento das emissões de áreas alagadas e da queima de combustíveis fósseis, mas as contribuições relativas permanecem incertas (KIRSCHKE, *et al.*, 2013).

A Tabela 1 apresenta as estimativas globais e as variações das emissões e sumidouros por fontes naturais de CH₄ para a atmosfera segundo a EPA - *Environmental Protection Agency* (2010). A maior emissão proveniente das fontes naturais são as áreas alagadas, que contribuem com 170 Tg CH₄ ano⁻¹, assim como observado por Kirschke, *et al.* (2013), porém com uma contribuição de 217 Tg CH₄ ano⁻¹. As emissões provenientes das latitudes tropicais representam a maior contribuição aos fluxos globais entre 61% e 75% do total das emissões de CH₄ provenientes de áreas alagadas do mundo. Os lagos emitem cerca de 30 Tg CH₄ ano⁻¹ para a atmosfera (estes dados não incluem represamentos e reservatórios, por serem considerados fontes antrópicas) (EPA,

2010). Enquanto Kirschke, *et al.* (2013) estimaram uma emissão de 40 Tg CH₄ ano⁻¹ dos rios e lagos.

Tabela 1. Estimativas globais das emissões e sumidouros de CH₄ (Tg CH₄ ano⁻¹)
(Adaptada de EPA, 2010)

Fontes	Metano (Tg CH ₄ ano ⁻¹)	
	Emissões estimadas ^(a)	Faixa de variabilidade ^(b)
Áreas alagadas	170,3	
- Norte	42,7	24 – 72
- Tropical	127,6	81 – 206
Solos terra firme e zonas ribeirinhas	-30	-
Oceanos, estuários e rios	9,1	2,3 – 15,6
<i>Permafrost</i>	0,5	0 – 1
Lagos	30	10 – 50
Hidratos		2 – 9 ^(c)
Fontes geológicas terrestres e marinhas		42 – 64
Incêndios florestais		2 – 5
Vegetação		0 ou 20 – 60
Artrópodes terrestres ^(d)	20	2 – 22
Animais selvagens	8	2 – 15
Total (fontes naturais)	208	Ver nota ^(e)
Total (fontes naturais e antropogênicas)	566	503 – 610
Fontes naturais como porcentagem do total	37%	Ver nota ^(e)

^(a) Em alguns casos, uma estimativa pontual não pode ser previsto, devido à grande incerteza.

^(b) Os intervalos apresentados podem refletir uma compilação de várias estimativas diferentes. As estimativas publicadas variam em parte devido à incerteza na estimativa do número global de fontes pontuais e difusas e as médias anuais de emissões de cada fonte individual ou fonte por área.

^(c) As estimativas de emissão de hidratos correspondem ao fluxo de CH₄ para o oceano, pois a maior parte é susceptível de ser oxidado na coluna d'água do oceano.

^(d) As estimativas para os artrópodes terrestres incluem cupins. Estima-se que outros artrópodes, podem contribuir com até 100 Tg CH₄ ano⁻¹.

^(e) Como a contribuição relativa das emissões de cada fonte para a concentração total não são independentes uns dos outros (isto é, se uma fonte está no extremo inferior do seu intervalo estimado, outra pode estar na maior), os intervalos não podem ser somados.

A produção de CH₄ depende da temperatura, da disponibilidade de matéria orgânica e da falta de oxigênio, estes fatores são influenciados pelo clima, tamanho e profundidade do lago, e pela produtividade das plantas e animais. A expansão em terras alagadas que ocorre por inundação para produzir mais

energia hidrelétrica soma-se a esse total. O volume de CH_4 produzido após inundações depende significativamente da profundidade e da área dos reservatórios (BAIRD, 2002).

As represas hidrelétricas em áreas tropicais, como a Amazônia Brasileira, emitem CH_4 por decomposição de plantas e outros organismos biológicos sob condições anaeróbicas no fundo do reservatório. O CH_4 é liberado através de vários caminhos, inclusive por bolhas e difusão pela superfície, e liberação no transcurso da água pelas turbinas e vertedouros. A vegetação herbácea, de fácil decomposição, cresce rapidamente na área do fundo do reservatório que fica exposta quando o nível da água é periodicamente rebaixado. Quando o nível d'água sobe, a biomassa se decompõe no fundo do reservatório, produzindo CH_4 (FEARNSIDE, 2008).

Recentemente as plantas foram consideradas uma possível fonte de emissão de CH_4 . Em 2006, Keppler *et al.* observaram a produção efetiva de CH_4 em laboratório sob condições aeróbicas a partir de folhas vivas e mortas, estimando uma emissão global entre 62 e 236 $\text{Tg CH}_4 \text{ ano}^{-1}$ a partir de plantas vivas e 0,5 a 6,6 $\text{Tg CH}_4 \text{ ano}^{-1}$ a partir de plantas mortas. Estes resultados geraram muitos questionamentos da comunidade científica e diversos estudos têm sido realizados para verificar a emissão direta de CH_4 em plantas vivas em condições aeróbicas. Alguns estudos obtiveram resultados que comprovam estas emissões das plantas enquanto outros não encontram nenhuma evidência.

Segundo a EPA (2010), Tabela 1, devido ao número limitado de estudos que tentaram medir as emissões de CH_4 provenientes de plantas em condições aeróbicas, os resultados conflitantes dos estudos e o fato de que o mecanismo de produção de CH_4 pelas plantas ainda não foi identificado, deve-se incluir a possibilidade de que as plantas não são de fato uma fonte direta de CH_4 nas estimativas de emissões globais. Baseando-se nas informações atualmente disponíveis, estima-se que as plantas não emitem CH_4 ou se for confirmado que as plantas emitem CH_4 , estima-se uma emissão entre 20 e 60 $\text{Tg CH}_4 \text{ ano}^{-1}$.

Segundo Vigano (2010), o CH_4 é produzido a partir de matéria orgânica fresca e seca, bem como vários componentes estruturais de plantas, e os principais parâmetros que controlam a formação de CH_4 são a radiação UV e a temperatura. Seus estudos sugerem que a produção de CH_4 mediada por UV é um processo que ocorre prontamente na presença de oxigênio e que não é

mediado por bactérias. Ainda foi demonstrado que a radiação UVB é mais eficaz em induzir a emissão de CH_4 . Outro ponto importante é que, sem a presença da luz a produção de CH_4 começa quando a temperatura ultrapassa os 70 °C, provando que uma certa barreira de energia precisa ser ultrapassada. E, sob luz UV, a emissão de CH_4 parece começar a cerca de 0 °C. Todos os seus estudos apresentam clara evidência para a existência de produção aeróbica de CH_4 .

A queima de biomassa, tais como florestas e pastagens em áreas tropicais e semitropicais, libera CH_4 em quantidades de cerca de 1% do carbono consumido, junto com grandes quantidades de CO , ambos os compostos são produtos da combustão incompleta (BAIRD, 2002). De acordo com a EPA (2010) as emissões de CH_4 global por incêndios florestais são estimadas entre 2 e 5 Tg ano^{-1} , porém somente são considerados os incêndios causados por relâmpagos ou iniciados acidentalmente por humanos não sendo considerados os incêndios antrópicos, por exemplo, a queima de biomassa. Contudo é extremamente difícil distinguir entre as áreas de queimadas por incêndios florestais naturais e pelos incêndios antropogênicos, o que dificulta quantificar as emissões de CH_4 provenientes de incêndios naturais em relação ao total de todas as queimadas. Estimativas das emissões de CH_4 por incêndio natural estão baseadas na suposição de que cerca de 10% da queima de biomassa global é natural, embora esta proporção possa variar de ano para ano. Kirschke, *et al.* (2013) estimaram uma emissão da queima de biomassa de 38 $\text{Tg CH}_4 \text{ ano}^{-1}$ para a década de 2000 a 2009.

Animais ruminantes, como o gado bovino, búfalos, ovelhas e certos animais selvagens, produzem grandes quantidades de CH_4 como subproduto em seus estômagos quando digerem a celulose da qual se alimentam. A intensidade de emissão depende do tipo de animal, do tipo e da quantidade de alimento, do seu grau de digestibilidade e da intensidade da atividade física do animal, em função das diversas práticas de criação (MCT, 2010). Quando o material orgânico dos dejetos animais é decomposto, sob condições anaeróbicas, bactérias metanogênicas podem produzir quantidades consideráveis de CH_4 . Essas condições são favorecidas quando os dejetos são estocados na forma líquida (em lagoas, charcos e tanques) (EMBRAPA, 2006).

Globalmente, os ruminantes são responsáveis por aproximadamente 85 Tg CH_4 das 550 Tg CH_4 emitidos anualmente. Há, no entanto, uma

considerável incerteza associada com as estimativas de CH₄ provenientes de animais devido a pouca disponibilidade de dados para documentar a variabilidade que existe na criação (MCGINN *et al.*, 2006).

Cupins e outros artrópodes terrestres também produzem CH₄ como resultado da degradação bacteriana de matéria orgânica ingerida, sendo um contribuinte pequeno, mas não insignificante para as emissões de CH₄ mundial, estima-se que estes emitem entre 2 e 22 Tg CH₄ ano⁻¹. Animais ruminantes selvagens (como bisões, veados, alces, cabras e ovelhas, e algumas espécies de pequenos roedores) emitem um fluxo estimado entre 2 e 15 Tg CH₄ ano⁻¹ (EPA, 2010). Kirschke, *et al.* (2013) estimaram uma emissão de animais selvagens de 15 Tg CH₄ ano⁻¹, para a década de 2000 a 2009.

O tratamento de resíduos é outra fonte de CH₄, a matéria orgânica contida nos resíduos dos aterros de lixo e no tratamento anaeróbio de esgoto e águas residuais é decomposta pela ação de bactérias metanogênicas produzindo o CH₄. O crescimento demográfico, combinado com mudanças de hábitos, melhoria da qualidade de vida e desenvolvimento industrial, causa um aumento na quantidade gerada de resíduos e em suas características. A geração de CH₄ varia de local para local, em função de fatores como quantidade de resíduos, idade do depósito, presença de ambiente anaeróbio, materiais tóxicos, acidez e condições construtivas e de manejo (CETESB, 2006).

3.4 Emissões de CH₄ no Brasil

Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) na Segunda Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (2010), no ano de 2005 as emissões de CH₄ foram estimadas em 18,1 Tg, e para o ano de 2010 de 16,8 Tg (MCTI, 2013), Tabela 2. Este inventário inclui apenas as emissões antrópicas por fontes e sumidouros de GEE não controlados pelo Protocolo de Montreal (MCT, 2010).

No Brasil, o setor de Agropecuária é o maior responsável pelas emissões de CH₄ (71%), sendo a principal emissão, 90% do total, decorrente da fermentação entérica do rebanho de ruminantes (11,5 Tg), quase toda referente ao gado bovino, o segundo maior rebanho do mundo. O manejo de dejetos de animais, a cultura do arroz irrigado e a queima de resíduos agrícolas corresponderam às emissões restantes. Em 2010, a contribuição deste setor se

elevou para 78% (MCTI, 2013). No setor de Mudança do Uso da Terra e Florestas as emissões de CH₄ ocorrem pela queima da biomassa nas áreas de desflorestamento. Essas emissões representaram 17% (3,0 Tg) do total de emissões de CH₄ em 2005 e em 2010 este setor sofreu uma diminuição de 10%, sendo isso relacionado à redução do desmatamento (MCTI, 2013). São consideradas neste setor as emissões associadas à conversão da floresta para agricultura ou pecuária, a substituição de uma lavoura por reflorestamento e também a queima de biomassa.

Tabela 2. Sumário das emissões antrópicas de CH₄ no Brasil *(Adaptada de MCT, 2010 e MCTI, 2013)*

Setor	1990	1994	2000	2005	2010
	(Gg)				
1. Energia	427	382	388	541	577
1.1 Queima de Combustíveis:	336	296	267	344	412
1.1.1 Subsetor energético	169	148	125	165	198
1.1.2 Subsetor industrial	58	55	54	72	87
1.1.3 Subsetor transporte	11	12	11	10	12
1.1.4 Subsetor residencial	76	64	62	77	93
1.1.5 Outros Setores	22	17	15	19	23
1.2 Emissões Fugitivas	91	87	122	197	164
1.2.1 Mineração de Carvão	50	42	43	49	48
1.2.2 Extração e transporte de petróleo e gás natural	42	44	78	148	116
2. Processos industriais (indústria química)	5	7	9	9	12
3. Agropecuária	9.539	10.237	10.772	12.768	13.133
3.1 Fermentação Entérica	8.419	8.995	9.599	11.487	11.741
3.1.1 Gado bovino	8.004	8.579	9.256	11.129	11.382
3.1.1.1 Gado de leite	1.198	1.263	1.178	1.371	1.553
3.1.1.2 Gado de corte	6.807	7.316	8.078	9.757	9.828
3.1.2 Outros animais	415	416	344	358	359
3.2 Manejo de dejetos de animais	635	675	678	723	794
3.2.1 Gado bovino	191	205	216	254	259
3.2.1.1 Gado de leite	36	38	34	40	44
3.2.1.2 Gado de corte	155	167	182	214	215
3.2.2 Suínos	373	387	365	358	401
3.2.3 Aves	48	61	78	92	115
3.2.4 Outros animais	22	23	19	20	19
3.3 Cultura de arroz	363	436	393	426	418
3.4 Queima de resíduos agrícolas	121	131	101	133	179
4. Mudança do uso da terra e florestas	1.996	2.238	3.026	3.045	977
5. Tratamento de resíduos	1.227	1.369	1.658	1.743	2096
5.1 Lixo	792	897	1.060	1.104	1390
5.2 Esgoto	436	472	598	639	705
5.2.1 Industrial	95	103	190	206	275
5.2.2 Doméstico	341	369	408	433	430
Total	13.195	14.223	15.852	18.107	16.795

Segundo a Base de dados EDGAR versão 4.0 (*Emissions Database for Global Atmospheric Research*) as emissões de CH₄ no Brasil no ano de 2008 foram de 20,1 Tg, que representa 5% da emissão total global de CH₄. As emissões provenientes da queima de biomassa das florestas correspondem a 6% (1,3 Tg) das emissões totais brasileiras e as emissões provenientes da fermentação entérica foram de 13,9 Tg.

Na Amazônia e em áreas tropicais foram realizados alguns estudos para estimar a emissão de CH₄ (Tabela 3), pode-se observar uma grande variação nestas estimativas, portanto o papel da Amazônia na emissão de CH₄ ainda não está bem definido.

Tabela 3. Estimativa das emissões de CH₄ para a Amazônia e áreas tropicais

Emissões de CH ₄ (Tg CH ₄ ano ⁻¹)		Descrição da área de estudo
Matthews and Fung, 1987	32	Estimativa para áreas alagadas na região tropical (20°N-30°S)
Melack <i>et al.</i> , 2004	29	Estimativa para áreas alagadas na Amazônia (5 milhões de km ²)
Carmo <i>et al.</i> , 2006	4 - 38	Estimativa para áreas de terra firme na Amazônia (5 milhões de km ²)
Miller <i>et al.</i> , 2007	49	Extrapolando o fluxo médio de 27mg CH ₄ m ⁻² dia ⁻¹ para 5 milhões de km ²
Frankenberg <i>et al.</i> , 2008	79	Estimativa para área tropical da América do Sul (entre 15°S–15°N e 180° O–30° O)
Bergamaschi <i>et al.</i> , 2009	44,2	Estimativa para a área da Bacia Amazônica (8 milhões de km ²)
Bloom <i>et al.</i> , 2012	26,6	Estimativa para áreas alagadas na Amazônia
Kirschke <i>et al.</i> , 2013	28	Estimativa para região tropical sul-americana (2000-2009), com estimativas top-down
Kirschke <i>et al.</i> , 2013	58	Estimativa para região tropical sul-americana (2000-2009), com estimativas bottom-up

4 METODOLOGIA

4.1 Locais de estudo

Sendo o objetivo deste trabalho, determinar o balanço de CH_4 da Bacia Amazônica, foram escolhidos 4 locais na Bacia para os estudos de perfis verticais, utilizando avião de pequeno porte, de maneira a representar toda a Bacia Amazônica. As concentrações encontradas nos perfis verticais refletem o caminho que a massa de ar fez desde que cruzou a costa brasileira até o local de coleta, representando assim a resultante de todos os processos que ocorrem por todo este caminho, portanto, o percurso da massa de ar é que define a área representativa de cada local estudado, para cada perfil. Os quatro locais onde foram realizados os perfis verticais na Floresta Amazônica foram (Figura 12): Santarém (SAN), sobre a Floresta Nacional do Tapajós, em Tabatinga (TAB), em Rio Branco (RBA), e em Alta Floresta (ALF), com medidas de CH_4 entre as altitudes de 300 m a 4420 m.

Figura 12. Imagem do Brasil destacando os quatro locais de estudo na Bacia Amazônica.

(Fonte: imagem de satélite Google Earth).

4.2 Amostragem

Para a coleta foram utilizadas aeronaves de pequeno porte de empresas de táxi aéreo presentes nas localidades estudadas, contratadas para a realização dos voos. Nestas aeronaves foram instalados um tubo coletor de aço inoxidável, denominado “*inlet*” pelo qual o ar atmosférico externo ao avião é coletado. Também foram instalados um sensor de temperatura, umidade relativa (T,H), pressão e GPS (*Global Positioning System*) para registrar o posicionamento e as condições atmosféricas de cada coleta. O “*inlet*” e o sensor de T e H foram instalados na janela da cabine do piloto (Figura 13 e Figura 14) ou na asa (Figura 15), dependendo do modelo do avião.

As amostragens são realizadas entre 12:00 e 13:00 horas, horário local, período de estabilidade maior dentro da troposfera, e portanto com maior repetibilidade de condição atmosférica, onde a altura da camada limite está próxima de sua altura máxima.

Figura 13. Avião, modelo Sertanejo, utilizado para a realização das amostragens em SAN e, em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, o tubo coletor e a acomodação do sistema de coleta.

Figura 14. Avião utilizado para a amostragem em RBA e TAB, modelo Seneca II, e em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, o tubo coletor e a acomodação do sistema de coleta.

Figura 15. Avião Cessna 210, utilizado na amostragem em ALF, e, em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, a localização do tubo coletor e a acomodação do sistema de amostragem.

As amostras de perfis verticais de avião foram coletadas utilizando um sistema semiautomático de coleta, que consiste em duas unidades desenvolvidas pelo *Earth System Research Laboratory/National Oceanic and Atmospheric Administration* (ESRL/NOAA) para as coletas realizadas em SAN e um sistema semelhante, baseado neste, produzido pela empresa HPD – *High Precision Device*®, para as coletas realizadas nos demais locais. A primeira unidade, denominada Unidade Portátil Compressora (*Portable Compressor Package – PCP*), contém dois compressores e baterias recarregáveis e permanece no local amostrado. A segunda unidade foi denominada Unidade Portátil dos Frascos (*Portable Flask Package – PFP*), a versão utilizada em SAN contém 17 frascos de vidro (Figura 16) e a utilizada nas demais localidades possuem 12 frascos (Figura 17). Ambas versões possuem um funcionamento durante a amostragem semelhante e possuem válvulas para abertura e fechamento dos frascos e um microprocessador que controla a amostragem e armazena informações sobre a mesma.

Figura 16. Sistema de amostragem de ar versão II utilizado em SAN onde: 1) PFP com 17 frascos de vidro; 2) PCP; 3) Painel do piloto; 4) Minicomputador para registro de dados no local; 5) GPS.

Figura 17. Sistema de amostragem de ar versão III, utilizado em RBA, TAB e ALF, onde: 6) PFP com 12 frascos de vidro; 7) PCP; 8) Painel do piloto; 9) Minicomputador para registro de dados no local; 10) GPS (2 modelos utilizados).

Anteriormente ao processo de coleta, ocorre a limpeza e secagem dos frascos de vidro com ar comprimido com umidade relativa inferior a 2%, por no mínimo 30 minutos. Há também a programação do sistema de amostragem, onde são informadas as altitudes de coleta, de acordo com cada local de estudo, e os frascos são preenchidos e pressurizados com 20 psi (138 KPa) pelo gás de preparação com CO₂ 350 ppm em balanço de nitrogênio.

Durante a amostragem o tubo coletor é conectado na unidade compressora que transfere o ar para a mala contendo os frascos, e nesta é conectado um dispositivo, denominado *display* do piloto, que indica a altitude previamente programada em que o piloto deve fazer a amostragem do primeiro até o último frasco. Ao iniciar o processo de amostragem de cada frasco, o ar é sugado da atmosfera exterior ao avião, através do *inlet*, e pressurizado a 40 psi (276 KPa) nos frascos de vidro da PFP. Durante a coleta de cada frasco, são passados inicialmente 5 litros de ar pelo tubo de entrada e pela ligação entre os frascos de amostragem (*manifold*) para a limpeza e o condicionamento destes tubos com as condições de umidade e concentração dos gases. Na etapa seguinte as duas válvulas presentes no frasco são abertas e passam 10 litros de ar para a limpeza e o condicionamento do vidro dos frascos. Então a válvula de saída do frasco é fechada e quando o sensor de pressão da PFP identifica 40 psi no sistema, a válvula da frente também é fechada, armazenando assim de 1,4 a 1,7 litros de amostra por frasco em cada altitude determinada.

A trajetória do avião (Figura 18) é realizada em formato helicoidal descendente com diâmetro em torno de 5 km, em uma localidade (latitude e longitude, Tabela 4) definida para cada local. Para não haver influência do gás emitido pelo motor do avião na coleta, a coleta é realizada com a aeronave voando contra o vento e iniciando em 4420 m e finalizando em 427 m em ALF, 308 m em RBA, SAN e TAB. O processo de amostragem semiautomático é previamente programado, conforme mostra a Tabela 5, onde encontram-se os planos de voo para RBA, TAB, ALF e SAN.

Figura 18. Esquema da trajetória em formato helicoidal descendente realizada pelo avião de pequeno porte durante a amostragem de ar.

Tabela 4. Coordenadas dos locais de estudo e das estações globais da NOAA

Coordenadas e Locais			
Locais	Siglas	Decimal	
		Latitude	Longitude
Alta Floresta	ALF	-8,80	-56,75
Rio Branco	RBA	-9,38	-67,62
Santarém	SAN	-2,86	-54,95
Tabatinga	TAB	-5,96	-70,06
Ascension	ASC	-8,62	-14,67
Barbados	RPB	13,28	-59,72

Tabela 5. Plano de voo utilizado em SAN, ALF, RBA e TAB

Plano de voo (metros)				
Frasco	SAN	ALF	RBA	TAB
1	4420	4420	4420	4420
2	4115	3962	3658	3658
3	3810	3505	3200	3200
4	3505	3048	2743	2743
5	3200	2591	2438	2438
6	2896	2134	2134	2134
7	2591	1829	1829	1829
8	2286	1524	1524	1524
9	1981	1219	1219	1219
10	1676	914	914	914
11	1372	610	610	610
12	1067	457	305	305
13	914	-	-	-
14	762	-	-	-
15	610	-	-	-
16	457	-	-	-
17	305	-	-	-

4.3 Quantificação dos GEE

As análises foram realizadas no LQA/CQMA/IPEN, onde foram quantificados todos os gases de interesse, CH₄, SF₆ e o CO. O laboratório possui um sistema de análise em sequência, LAGEE (Laboratório de Análise de Gases de Efeito Estufa), e foi construído na NOAA por Andrew Crotwell e Dra. Luciana Vanni Gatti e instalado no LQA/CQMA/IPEN, iniciando suas operações em maio de 2004, sendo este uma réplica exata do Laboratório de GEE da NOAA/CMDL/GMD/ESRL (*Climate Monitoring & Diagnostics Laboratory / Global Monitoring Division / Earth System Research Laboratory*), em Boulder, Colorado – Estados Unidos da América, como apresentado na Figura 19.

Figura 19. LAGEE: (1) monitor CO₂; (2) cromatógrafo CO; (3) cromatógrafo N₂O/SF₆/CH₄; (4) controlador de fluxo; (5) válvula de seleção; (6) amostra/CO referência; (7) medidor de vácuo e receptor de amostras; (8) interface do cromatógrafo; (9) banho resfriador; (10) microcomputador; (11) painel de gases; (12) interface monitor CO₂; (13) interfaces das válvulas e cromatógrafo CO.

4.4 Sistema analítico

O LAGEE é um sistema totalmente automatizado e a representação analítica deste sistema é apresentada na Figura 20, para facilitar o entendimento do método de análise. 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, sendo permitida a passagem de apenas um gás por vez, assim é possível fazer a seleção dos gases. A *válvula 1* denominada “*Seleção de Amostra e Gases Referência*”, seleciona entre a entrada de amostra ou dos gases referência dos vários gases a serem analisados ou os padrões da curva de calibração do CO₂. A *válvula 2* denominada “*Seleção de Padrões*” possui várias entradas e apenas uma saída, selecionando os gases padrão das curvas de calibração do CO e N₂O. Já a *válvula 3* chamada de “*Seleção dos Equipamentos*” possui apenas uma entrada e várias saídas que permitem o direcionamento de cada gás ou amostra para os equipamentos analíticos de cada gás.

O gás a ser analisado (amostra ou referência) é selecionado pela *válvula 1* a qual direciona o mesmo para um controlador de fluxo, sendo para os gases CH₄, SF₆ e CO, um fluxo de 150 mL min⁻¹. A amostra ou referência passa

por um *loop* resfriado por um banho contendo álcool a uma temperatura de aproximadamente $-60,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, para a remoção de possível água existente na amostra e posteriormente é transferido para a *válvula 3* que direciona o gás para os instrumentos analíticos dos gases a serem determinados (BORGES, 2013).

Figura 20. Esquema de funcionamento do Sistema LAGEE-Brasil.

A quantificação do CH_4 foi realizada utilizando-se um cromatógrafo gasoso, da marca HP (Hewlett Packard), modelo HP 6890 series Plus com detector de ionização de chama (DIC), com pré-coluna de 198 cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo (coluna 1), empacotada com Sílica Gel 80/100 mesh e uma coluna de 106 cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo e empacotada com Peneira Molecular 5A 80/100 mesh (coluna 2). 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. O uso das *colunas 1* e *2* tem como função a separação de compostos indesejados na análise.

Figura 21. Esquema de funcionamento do cromatógrafo na análise do CH₄ (a) posição de espera e (b) posição de injeção da amostra no equipamento.

Na Figura 21, é apresentado um esquema de funcionamento do cromatógrafo. No esquema (a), quando a válvula de 10 vias está na posição “load” a amostra passa pelo “loop” por 30 segundos, a um fluxo de 150 mL min⁻¹, para a descontaminação da amostra anterior. Neste momento, apenas o gás carreador Nitrogênio 6.0 (gás de arraste) está passando pela coluna 1 e coluna 2, a uma temperatura de 70 °C e com um fluxo de 87 mL min⁻¹. No esquema (b), quando a válvula muda para posição “inject” a amostra contida no “loop” é transferida para a coluna 1 com o auxílio do gás de arraste. No momento em que o gás CH₄ atinge a coluna 2, a válvula de 10 vias volta para a posição “load”, e as demais espécies gasosas contidas na amostra que ainda se encontravam na coluna 1, são removidas desta pela inversão do fluxo do gás carreador, que as direciona para fora por uma saída aberta. A chama do detector DIC é feita com o comburente H₂ com fluxo de 45 mL min⁻¹ e pelo oxidante de composição especial (60% N₂ e 40% O₂) com fluxo de 250 mL min⁻¹.

Quando a amostra passa pela chama o CH₄ é oxidado a CO₂, em estado excitado e é atraído pelo cátodo gerando uma corrente elétrica proporcional a quantidade de CH₄ na amostra (Figura 22).

Figura 22. Esquema do detector DIC.

A quantificação de SF_6 é realizada por um cromatógrafo gasoso (HP - Hewlett Packard modelo HP 6890 series Plus) com detector de captura eletrônica (DCE), como esquematizado na Figura 23. Este cromatógrafo possui uma pré-coluna de 183 cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo (*Coluna 1*) empacotada com Haysep Q 100/120 mesh, e uma coluna com essas mesmas especificações (*Coluna 2*), além de um *loop* de 15 mL. Este sistema também possui uma válvula de 10 vias com duas posições (*inject* e *load*) e o mecanismo de funcionamento deste cromatógrafo é o mesmo anteriormente descrito na Figura 21 para o CH_4 . Porém neste caso, o gás de arraste é uma mistura de argônio com 5% de CH_4 (74 mL min^{-1}). O DCE utiliza uma fonte de ^{63}Ni aquecida a 350°C a qual ioniza as moléculas e são formados elétrons de baixa energia que migram para o ânodo (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.

Figura 23. Esquema de funcionamento do detector DCE.

A quantificação de CO foi realizada por meio de um cromatógrafo da *Peak Laboratories*, que consiste em uma pré-coluna de 30 ¼" x 1/8" empacotada com pérolas esféricas de sílica porosa 1S 60/80 (*coluna 1*) e uma coluna de 51" x 1/8" empacotada com Peneira Molecular 13x 60/80 (*coluna 2*) em um forno com temperatura constante a 100 °C. O gás carreador utilizado é o Ar Sintético a 20 mL min⁻¹. A amostra passa por um *loop* de 20 mL e é inserida nas *colunas 1* e 2. O esquema deste cromatógrafo é apresentado na Figura 24. Para remover contaminação de CO no gás carreador utilizou-se um catalizador, desenvolvido pela NOAA, que oxida o CO a CO₂. O Detector consiste em um leito de óxido de mercúrio (HgO) aquecido a 265 °C, e o CO contido na amostra reage com o HgO indo ao estado metálico, e quantificado pela absorção de luz ultravioleta (254 nm), conforme a Figura 25 (BORGES, 2013).

Figura 24. Esquema de funcionamento do cromatógrafo de CO.

Figura 25. Esquema do detector do cromatógrafo de CO.

4.5 Precisão e Acurácia dos resultados

A precisão dos resultados é alcançada intercalando a detecção de padrões referência com as amostras. Este procedimento garante que, com as variações de temperatura e pressão do ambiente, que alteram a resposta do detector, seja normalizada, pois o gás referência também vai sofrer a mesma alteração com as variações, garantindo assim a precisão da análise, uma vez que sua quantificação sempre é o produto da relação entre a amostra e o gás referência, que tem sua concentração conhecida, podendo a sequência ser representada da seguinte maneira:

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

Para o cálculo da concentração, é feita a média das referências anterior e posterior à amostra, e o valor utilizado para a quantificação é a razão da amostra pela média das referências, como mostra a Figura 26. Normalizando assim, alterações que a variação de temperatura e pressão acarretaria na resposta do detector.

Figura 26. Calibração do gás CH₄ de cilindro de intercomparação da WMO (azul) com 30 análises ($1820,59 \pm 2,15$ ppb) e o gás referência (vermelho).

Podemos observar pela calibração do cilindro, onde foram realizadas 30 medidas sequentes para testar a variabilidade com as mudanças de temperatura e pressão, que a resposta do instrumento varia ao longo do dia. No entanto, como o padrão referência varia junto com a amostra, estas variações são minimizadas utilizando a razão entre a resposta da amostra pela média do padrão referência anterior e posterior a esta.

Outro importante procedimento relativo a acurácia dos resultados é obtido pelos seguintes procedimentos: A) a utilização dos padrões primários, de trabalho e de referência calibrados pela GMD/ESRL/NOAA, que é o laboratório Referência da rede mundial da WMO. B) o controle da acurácia pela realização da calibração por 20 vezes do “*Target tank*” e o acompanhamento deste resultado ao longo do tempo. C) participação nas intercomparações da rede mundial, denominado *WMO-20XX World Round Robin Comparison Experiment*, que acontece a cada 3-4 anos. D) intercomparação semanal entre o LQA e a NOAA através das amostragens em Natal (NAT). A intercomparação entre o LQA com outros laboratórios filiados a NOAA é apresentada na Figura 27. Podemos observar que a diferença apresentada entre as concentrações do LQA em relação a NOAA, são próximas de zero, garantindo assim a acurácia de nossos resultados.

Figura 27. Intercomparação entre o LQA (BRA-IPEN) com outros laboratórios filiados a NOAA.

4.5.1 Curva de calibração

Os gases CH₄ 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.

O gás CO não possui relação linear da concentração com a área, motivo pelo qual, as curvas de calibração são construídas com 7 padrões. Estudos do laboratório da CCG/CMDL/NOAA (*Carbon Cycle Gases*) recomendam a cada 15 dias a calibração para o CO. Os padrões utilizados na construção destas curvas foram calibrados neste laboratório de calibração. As concentrações dos padrões utilizados na calibração desse gás estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Concentrações dos padrões das curvas de calibração de CO

CO		
Referência	Padrão	Concentração (ppb)
CA05938	1	0,00
CA03823	2	53,0
CA03885	3	71,8
CA03801	4	76,0
CA06539	5	122,1
CA03900	6	199,2
CA03803	7	295,5

4.5.2 Estabilidade do sistema analítico

A garantia da estabilidade do sistema analítico é verificada por meio da realização da calibração de dois cilindros constituídos de ar natural, previamente calibrado no laboratório da NOAA, denominados “*Target tank*”. Estes cilindros são analisados um desde 2004 (CA05558) e o outro desde 2007 (CA04533). São realizadas 20 medidas de cada cilindro a cada 60 e 15 dias, respectivamente. Na Figura 28 são apresentadas, como exemplo, as concentrações da calibração do cilindro CA04533 para o CH₄.

A precisão das calibrações é verificada pela variabilidade das 20 medidas. Na Tabela 7, são mostrados os valores das calibrações dos laboratórios LQA e GMD/NOAA, onde podemos observar que estamos com a precisão dentro da recomendada pela WMO.

Figura 28. Tanque de calibração do cilindro CA04533, para CH₄.

Tabela 7. Precisão dos gases analisados no laboratório de GEE da GMD/ESRL/NOAA e no LAGEE/LQA

Precisão nas análises			
Espécie Química	CH₄ (ppb)	CO (ppb)	SF₆ (ppt)
Precisão da NOAA/ESRL/GMD/	< 1	0,5	0,02
Precisão do LQA/CQMA/IPEN	1,5	1,1	0,02
Precisão requerida pela WMO	2	2	0,02

4.6 Cálculo do Fluxo de CH₄ por meio do Método de Integração de Coluna

Descrito primeiramente por Chou *et al.* (2002), o Método de Integração de Coluna utilizado para o cálculo de fluxo, foi aprimorado por Miller *et al.* (2007). Neste método, subtraem-se as concentrações obtidas em cada altura coletada no perfil, pela concentração que a massa de ar tinha ao cruzar a costa brasileira (concentração BKG, do termo em inglês *background*), para determinar a real contribuição no fluxo de CH₄ pela Floresta Amazônica. Esta técnica também foi utilizada em D'Amélio *et al.* (2009), Gatti *et al.* (2010) e Gatti *et al.* (2014). Neste método é realizada a integração do perfil, após a subtração da concentração do ar de entrada no continente, considerando o tempo desta trajetória até o local do perfil (MILLER *et al.*, 2007).

Para o cálculo da concentração BKG, foi utilizado o gás SF₆, como traçador de massas de ar. Em função de não haver fonte de emissão ou sumidouro deste gás na Bacia Amazônica (OLIVIER *et al.*, 1999) (Figura 29),

considera-se que a concentração encontrada no perfil é a mesma que cruzou a costa brasileira. Estas concentrações são relacionadas com as duas Estações de Monitoramento Global localizadas no Oceano Atlântico Sul (Ilha de Ascension - ASC) e Norte (Ilha de Barbados - RPB) e assim, determina-se uma fração que correlaciona a contribuição de ASC e RPB. Sendo assim, a fração de composição do ar de entrada no continente é uma fração relativa às estações de ASC e RPB, sendo calculada segundo a EQ. 4.1 e, a concentração BKG (X_{bkg}) é calculada segundo a EQ. 4.2.

Figura 29. Simulação da emissão de SF_6 no planeta. A marcação em vermelho destaca a área de estudo, a qual não possui emissão deste gás (Adaptado de OLIVIER, et al., 1999).

$$ASC_{local} = 1 - RPB_{local} = \frac{SF_{6_{local}} - SF_{6_{RPB}}}{SF_{6_{ASC}} - SF_{6_{RPB}}} \quad (4.1)$$

$$X_{bkg} = ASC_{local} X_{ASC} + RPB_{local} X_{RPB} \quad (4.2)$$

Onde ASC_{local} e RPB_{local} são as frações correspondentes de cada estação de ASC e RPB, respectivamente. $SF_{6_{local}}$, $SF_{6_{RPB}}$ e $SF_{6_{ASC}}$ são as concentrações de SF_6 nos locais estudados e, em RPB e ASC, respectivamente. X_{bkg} é a concentração BKG de cada gás, e X_{ASC} e X_{RPB} , as concentrações do gás de interesse, neste caso o CH_4 , em ASC e RPB, respectivamente.

Nas estações globais da rede da NOAA de ASC e RPB, as coletas de CH_4 , SF_6 e CO são realizadas semanalmente, sendo em ASC duas vezes por semana, e em RPB apenas uma vez por semana. A partir dos dados dessas concentrações a NOAA produz uma curva ajustada, denominada “smooth curve”

(Figura 30). Esses dados calculados pela NOAA foram disponibilizados no sistema de análise do LQA.

Figura 30. Concentrações medidas para os GEE em ASC e RPB e as curvas ajustadas dessas concentrações realizadas pela NOAA.

O fluxo de CH_4 foi calculado baseado na integração da diferença das concentrações (da costa ao local amostrado) da superfície ao topo do perfil dividido pelo tempo gasto entre a costa e o local de estudo, para cada altura com coleta de frasco, de acordo com a EQ. 4.3 (MILLER *et al.*, 2007; D'AMELIO *et al.*, 2009; GATTI *et al.*, 2010; GATTI *et al.*, 2014). Este cálculo foi realizado para cada perfil. Portanto, este fluxo corresponde à contribuição da emissão de CH_4 referente ao caminho percorrido pela massa de ar entre a costa e cada local amostrado.

$$F_{\text{CH}_4} = \frac{\int_{z_i}^{z_f} [(X_{\text{CH}_4})_{\text{LOCAL}} - (X_{\text{CH}_4})_{\text{bkg}}] dz}{t} \quad (4.3)$$

Onde X_{CH_4} é a concentração de CH_4 na unidade mol m^{-3} , a qual foi determinada pela concentração nos perfis verticais observados, pela temperatura

e pressão de acordo com as altitudes de amostragem. z_i e z_f são as altitudes mínima e máxima da integração vertical que é definida pelas altitudes do menor e maior nível dos perfis, sendo a integração realizada a cada dois pontos subsequentes. Para minimizar o erro se considera a concentração do primeiro frasco como sendo a mesma da superfície, e é realizada a integração entre a superfície (152 m: SAN; 175 m: RBA; 188 m: TAB e 250 m: ALF) e o primeiro ponto de coleta. t é o tempo gasto pela massa de ar, em dias, entre a costa e o local amostrado.

A Figura 31 apresenta o modelo de caixa simplificado do cálculo de fluxo pelo Método de Integração de Coluna, onde o topo da caixa é a altura máxima do perfil vertical e a base é representada pela área onde a massa de ar se desloca entre a costa e o local de estudo, que neste caso é SAN.

Neste método, foram calculadas as trajetórias das massas de ar a cada 500m no perfil vertical, entre as altitudes de 500 m a 4500 m, para todos os voos realizados, pelo modelo simulador de massas de ar HYSPLIT - *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (DRAXLER & ROLPH, 2013), e as altitudes dos voos foram relacionadas à altitude mais próxima simulada. Assim foi calculado o tempo, que cada parcela de massa de ar no perfil, levou da costa até o local estudado, sendo possível observar que a origem das massas de ar varia com a altitude.

Figura 31. Representação do modelo de caixa simplificado utilizado para o cálculo de fluxo pelo Método de Integração de Coluna.

4.7 Simulação das trajetórias das massas de ar

Para se obter o tempo que a massa de ar gastou para percorrer o trajeto da costa brasileira até cada local de estudo, e conhecer este trajeto, utilizou-se três métodos de cálculo: o modelo HYSPLIT, o BRAMS e o FLEXPART.

O modelo HYSPLIT - *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (DRAXLER & ROLPH, 2013, disponível em: <<http://ready.arl.noaa.gov/hysplit-bin/trajtype.pl?runtype=archive>>), de domínio público, permitiu o cálculo das trajetórias retrocedentes a cada 500 m de altitude, entre 500 e 4500 m, para todos os voos realizados sobre ALF, RBA, SAN e TAB, no ano de 2010, 2011, 2012 e 2013. As trajetórias foram calculadas utilizando a base de dados meteorológicos GDAS (*Global Data Assimilation System*). As trajetórias retrocedentes foram iniciadas a partir do dia, hora e altitude da coleta, e foram calculadas até 13 dias anteriores à amostragem, tempo máximo do modelo.

O modelo BRAMS - *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System* é baseado no modelo RAMS - *Regional Atmospheric Modeling System* (WALKO *et al.*, 2000) versão 6, com várias novas funcionalidades e parametrizações especializadas para os trópicos e sub-trópicos. Para este trabalho, as trajetórias foram calculadas por meio da parceria com o Dr. Saulo Freitas e seu grupo de trabalho do CPTEC/INPE. Estas trajetórias foram simuladas para cada uma das altitudes dos perfis realizados, em cada uma das quatro localidades de estudo, e para cada dia de voo, para o ano de 2010.

Para o cálculo das trajetórias também foi utilizado o modelo de inversão lagrangiano FLEXPART. Este modelo computa trajetórias de um grande número de partículas imaginárias, para descrever o transporte e a difusão de traçadores na atmosfera. Para este trabalho, as trajetórias foram calculadas pelo parceiro Dr. John B. Miller, membro da coordenação do projeto maior de Estudos de Fluxo de Emissão de GEE na Amazônia. Os dados de vento utilizados foram do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) global com resolução de 0,5° (~ 55 Km). Estas trajetórias foram simuladas para cada uma das altitudes dos perfis realizados, em cada uma das quatro localidades de estudo, e para cada dia de voo, para o ano de 2010.

4.8 Estimativa da Emissão de CH₄ por meio da Queima de Biomassa

A observação da emissão natural de CH₄ para a atmosfera é uma informação muito relevante, assim como a diferença entre a emissão durante a estação chuvosa e a seca. Na primeira, têm-se fontes de emissão oriunda de processos anaeróbicos, enquanto que, na segunda, tem-se o acréscimo da emissão pela queima de biomassa. Para separar as emissões biogênicas da emissão pela queima da biomassa utilizou-se o CO como traçador de queimada, pois o CO pode apresentar de 2 a 6 vezes de aumento. Por esta razão é um excelente traçador de queimadas.

Para estimar esta razão foi utilizado o CO e o CH₄ observados nos perfis, com pluma de queimada, subtraídos da concentração BKG. Para o cálculo da razão CO/CH₄ foram utilizados os resultados relativos às alturas onde foram detectadas a pluma, acrescentando ainda a porção anterior ao seu início, isto é, a altura com ausência de pluma. A razão foi dada pelo coeficiente angular da equação de reta dada por estes pontos.

Para o cálculo da quantidade de CH₄ emitida por queima de biomassa, foi então relacionado à emissão de CO, descontada de sua emissão natural (estação chuvosa e de transição), denominada emissão basal, e utilizada à relação CO/CH₄ determinada neste estudo.

Estas emissões basais foram adotadas como naturais, embora seja provável que na estação seca as emissões biogênicas de CO sejam maiores do que na estação chuvosa, devido às emissões de isopreno e do aumento do OH (SPIVAKOVSKY *et al.*, 2000). No entanto, estas foram consideradas desprezíveis neste estudo, e assim, assumiu-se que o período estável de emissões de CO biogênico persiste ao longo do ano, e este foi subtraído das emissões na estação seca, o que permite calcular o fluxo de emissão de queimada. Após o cálculo do fluxo de emissão oriunda da queima de biomassa, foi possível calcular a emissão biogênica subtraindo do fluxo total de CH₄, como:

$$F_{CH_4}^{Bio} = F_{CH_4}^T - r_{CO:CH_4} (F_{CO}^T - F_{CO}^{nat}) \quad (4.4)$$

Onde, $F_{CH_4}^{Bio}$ é o fluxo biogênico de CH₄; $F_{CH_4}^T$ o fluxo total; $r_{CO:CH_4}$ é a razão CO/CH₄; F_{CO}^T é o fluxo total de CO e F_{CO}^{nat} é o fluxo natural (basal) de CO antes do início das queimadas.

4.9 Estimativa da Emissão de CH₄ pela fermentação entérica de ruminantes, pelo manejo dos dejetos de animais e pelo cultivo de arroz

Para estimar as emissões oriundas da fermentação entérica de ruminantes e do manejo de dejetos de animais, foram consideradas as estimativas das emissões para todas as criações de animais consideradas pela metodologia do IPCC (2006): animais ruminantes (gado, búfalos, ovelhas e cabras); animais pseudo-ruminantes (cavalos, mulas e asnos); animais monogástricos (suínos) e as aves (estas incluídas apenas pelo manejo de dejetos) para cada uma das regiões de representatividade de cada local de estudo.

Foram utilizados os fatores de emissão para cada categoria animal (Tabela 8) das Diretrizes do IPCC em “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories” (IPCC, 2006), foi adotada a metodologia *Tier 1*, onde são necessários apenas o número de cabeças de cada classe animal e o fator de emissão para o cálculo da estimativa. Esta metodologia foi adotada devido à falta de maior detalhamento a respeito das características dos animais e das criações no país.

Tabela 8. Fatores de emissão de CH₄ para cada categoria animal utilizados na estimativa (Fonte: IPCC, 2006)

Espécies	Fatores (kg CH ₄ cabeça ⁻¹ ano ⁻¹)		
	Fermentação entérica	Manejo de dejetos animais	
		Clima quente	Clima temperado
Búfalos	55	2	1
Gado leiteiro	72	2	1
Gado em geral	56	1	1
Asininos e Muares	10	1,20	0,9
Ovelhas	5	0,20	0,15
Suínos	1	2	1
Cabras	5	0,22	0,17
Aves	-	0,02	0,02

As estimativas da emissão de CH₄ proveniente da fermentação entérica de ruminantes e do manejo de dejetos animais foram calculadas de acordo com as EQ. (4.5) e EQ (4.6), respectivamente.

$$Emiss\tilde{a}o = F \cdot \left(\frac{n}{10^6} \right) \quad \text{EQ. (4.5)}$$

$$Emiss\tilde{a}o = \sum \frac{(F \times n)}{10^6} \quad \text{EQ. (4.6)}$$

Onde F é o fator de emissão de cada espécie em kg CH₄ cabeça⁻¹ ano⁻¹ e n é o número de cabeças de cada espécie animal.

Para esta estimativa utilizaram-se os dados censitários oficiais de números de cabeças de cada classe animal, da Produção da Pecuária Municipal (PPM) do IBGE (dados disponíveis em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/ppm/default.asp>>), nos anos de 2010, 2011 e 2012, em nível municipal.

Para estimar as emissões oriundas do cultivo de arroz, foi utilizado o fator de emissão de 1,3 kg CH₄ ha⁻¹ dia⁻¹, de acordo com a metodologia do IPCC (2006). As estimativas da emissão de CH₄ do cultivo de arroz foram calculadas de acordo com a EQ. (4.7).

$$Emiss\tilde{a}o\ anual = \sum F \times T \times A \times 10^6 \quad \text{EQ.(4.7)}$$

Onde F é o fator de emissão em kg CH₄ ha⁻¹ dia⁻¹, T é o tempo do cultivo em dias (neste estudo utilizado a média de 120 dias) e A é a área colhida de arroz.

Para esta estimativa utilizaram-se os dados censitários oficiais de área colhida de arroz, da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE (dados disponíveis em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=p&o=18>>), nos anos de 2010, 2011 e 2012, em nível municipal. Devido a ausência de maiores informações sobre o tipo de cultivo, considerou-se como todas as áreas apresentando as mesmas características.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estudo das trajetórias das massas de ar utilizando os modelos HYSPLIT, RAMS e FLEXPART

Primeiramente as trajetórias retrocedentes foram calculadas utilizando o modelo HYSPLIT, para calcular o tempo que a massa de ar levou da costa até o local de amostragem para o cálculo do fluxo, conforme descrito no item 4.7. As trajetórias foram iniciadas a partir do dia e hora da coleta para cada perfil vertical realizado, em cada um dos quatro locais de estudo, e foram calculadas por até 13 dias (tempo máximo do modelo) anteriores à amostragem e a cada 500 metros de altura, desde 500 até 4500 m.

Após estudos científicos realizados pelo grupo de pesquisa do projeto AMAZONICA, em seu primeiro WORKSHOP, optou-se por utilizar o modelo RAMS para simular estas trajetórias, pois este modelo apresentava uma melhor resolução para a região tropical, incluindo o Brasil, em comparação com o modelo HYSPLIT. Em função das trajetórias calculadas pelo modelo RAMS apresentarem muitos dias com trajetórias que encostavam na superfície, devido à falta de parâmetros que considerassem processos de difusão ou turbulência, quando comparadas às calculadas pelo HYSPLIT, um novo estudo de trajetórias foi realizado com o modelo FLEXPART. A Tabela 9 apresenta a comparação dos tempos médios das trajetórias para cada voo realizado no ano de 2010, simuladas com os três modelos citados anteriormente. Decidiu-se pela utilização das trajetórias pelo modelo HYSPLIT em função de sua praticidade e fácil acesso, uma vez que não foram encontradas diferenças substanciais entre as 3 modalidades.

A região de RBA apresentou a maior média de tempo das trajetórias entre 2010 e 2013, para todas as altitudes do perfil, simuladas pelo modelo HYSPLIT, com um valor de 8 dias, em TAB obteve-se uma média de tempo igual a 7 dias. ALF com 6 dias em média e, em SAN, cujo tempo de trajetória foi o menor estimado, obteve-se uma média de 3 dias.

Tabela 9. Tempo médio das trajetórias para cada local de estudo, simuladas pelos modelos HYSPLIT, BRAMS e FLEXPART

Local	Data do voo	Tempo médio (em dias)			Local	Data do voo	Tempo médio (em dias)		
		HYSPLIT	BRAMS	FLEXPART			HYSPLIT	BRAMS	FLEXPART
ALF	27/01/2010	4,4	4,6	5,3	SAN	07/01/2010	2,3	1,4	2,2
	17/02/2010	5,2	3,7	3,7		14/01/2010	1,6	2,2	1,8
	01/03/2010	3,7	4,3	3,5		23/01/2010	1,1	0,9	1,4
	14/03/2010	5,3	4,5	4,5		04/02/2010	1,7	1,3	1,9
	15/04/2010	4,1	4,7	4,0		19/02/2010	1,9	1,4	2,5
	28/04/2010	4,5	6,9	4,9		08/03/2010	1,7	1,1	2,0
	13/05/2010	6,1	7,9	5,8		26/03/2010	3,4	3,3	2,7
	30/05/2010	6,4	5,7	6,6		09/04/2010	2,2	2,1	2,1
	18/06/2010	3,5	3,3	3,5		26/04/2010	1,6	2,4	1,7
	09/07/2010	5,4	5,7	4,2		14/05/2010	3,0	4,5	2,5
	30/07/2010	4,7	5,2	3,9		01/06/2010	5,2	5,4	4,1
	13/08/2010	3,9	3,8	3,7		17/06/2010	2,8	3,0	2,2
	30/08/2010	5,9	4,7	5,8		05/07/2010	2,8	2,6	2,9
	14/09/2010	6,1	4,6	4,5		21/07/2010	3,4	3,3	3,3
	28/09/2010	4,8	4,7	5,2		22/09/2010	2,7	3,7	2,4
	13/10/2010	4,5	5,1	4,7		22/10/2010	3,9	6,2	2,2
	28/10/2010	5,0	7,3	4,7		05/11/2010	3,8	2,9	3,3
	14/11/2010	5,8	5,9	6,7		06/12/2010	1,9	2,2	1,7
	30/11/2010	6,3	4,8	4,8		22/12/2010	1,5	1,6	1,4
	30/12/2010	4,9	4,8	5,2		média	2,6	2,7	2,3
RBA	08/01/2010	5,1	6,1	4,7	TAB	09/01/2010	3,8	3,6	3,6
	16/02/2010	5,3	4,8	4,3		17/02/2010	4,6	5,6	4,5
	13/03/2010	8,3	5,6	6,3		17/03/2010	5,9	4,5	5,8
	30/03/2010	9,6	8,6	10,0		27/03/2010	8,4	6,1	6,9
	24/04/2010	7,1	5,5	6,6		19/04/2010	7,6	5,4	7,6
	13/05/2010	8,9	7,7	9,3		27/04/2010	7,3	5,2	6,0
	30/05/2010	10,7	8,2	9,8		18/05/2010	8,3	8,2	6,5
	19/06/2010	7,8	6,6	6,8		20/06/2010	6,9	6,7	6,2
	27/06/2010	6,3	5,5	5,6		22/06/2010	5,9	5,5	5,5
	15/07/2010	9,1	7,9	8,7		17/07/2010	6,3	6,6	5,8
	29/07/2010	6,2	5,6	5,7		27/07/2010	5,5	7,3	5,7
	10/08/2010	6,5	6,7	7,4		18/08/2010	7,0	7,0	7,3
	28/08/2010	7,1	8,8	9,4		29/08/2010	7,1	6,6	5,0
	10/09/2010	9,0	6,8	8,2		18/09/2010	8,3	8,0	8,6
	24/09/2010	8,0	6,5	7,2		26/09/2010	9,5	7,1	7,3
	16/10/2010	8,0	7,1	6,6		23/10/2010	7,2	6,7	7,1
	27/10/2010	11,2	7,2	13,4		30/10/2010	9,0	5,2	9,5
	21/11/2010	8,5	6,3	8,4		23/11/2010	8,8	6,4	7,8
	06/12/2010	6,3	4,5	4,9		18/12/2010	4,3	5,8	4,0
	26/12/2010	6,2	6,0	5,1		29/12/2010	4,2	5,5	3,6
	média	7,7	6,6	7,4		média	6,8	6,1	6,2

Apesar do tempo máximo do modelo HYSPLIT ser 13 dias, não houve prejuízo para a estimativa do tempo para o cálculo dos fluxos, pois apenas uma pequena parcela das trajetórias de cada local não cruzam a costa brasileira mesmo com o tempo máximo. RBA foi o local que apresentou o maior número de trajetórias que não cruzaram a costa, 12% do total, mesmo utilizando o tempo máximo, seguido por TAB com 9%, ALF com 4% e SAN com apenas 1%. Isto

deve-se ao fato de RBA ser o local mais distante da costa e com o maior tempo médio de trajetória (8 dias).

Foi realizado um estudo para verificar a sazonalidade das massas de ar que chegam aos locais de estudo, ao longo do ano e nas diferentes altitudes. A Figura 32 apresenta as trajetórias para a região de SAN separadas por mês a 500 m, a Figura 33 a 2000 m e a Figura 34 a 4000 m. Observa-se nas trajetórias do nível mais baixo (500 m) uma variação na origem destas massas de ar entre os meses de janeiro a abril e em dezembro em comparação com os demais meses, indicando uma maior influência do HN. Já para as trajetórias a 2000 m esta variação só é observada nos meses de janeiro e fevereiro, porém com menos intensidade que em 500 m. Em 4000 m não foi observada esta variação.

A Figura 35 apresenta as trajetórias para a região de ALF a 500 m de altitude, a Figura 36 a 2000 m e a Figura 37 a 4000 m. Observa-se nas trajetórias do nível mais baixo (500 m) uma variação na origem destas massas de ar entre os meses de janeiro a abril, variando ao longo dos anos, em comparação com os demais meses, indicando uma maior influência do HN. A partir de agosto a dezembro novamente elas tem uma variação na origem, menos acentuada em comparação ao início do ano. Já para as trajetórias a 2000 m esta variação só é observada entre os meses de janeiro a março e entre outubro e dezembro, porém com menos intensidade que em 500 m. Em 4000 m as trajetórias não apresentam maiores variações em suas origens.

A Figura 38 apresenta as trajetórias para a região de RBA a 500 m, a Figura 39 a 2000 m e a Figura 40 a 4000 m. A variação na origem das massas de ar indicando uma maior influência do HN observada em SAN e ALF, também foi observada em RBA, nas trajetórias a 500 m e 2000 m entre os meses de janeiro a março e em dezembro, variando com os anos. Enquanto as trajetórias a 4000 m apresentaram variações nestes meses porém menos acentuada. A Figura 41 apresenta as trajetórias para a região de TAB a 500 m, onde também foi observada variação na origem das massas de ar, entre janeiro a março, e a partir de outubro a dezembro novamente, variando com os anos. Assim como observado nas trajetórias a 2000 m (Figura 42), e a 4000 m (Figura 43) apenas janeiro e fevereiro.

Figura 32. Trajetórias calculadas para a região de SAN a 500 m com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Figura 33. Trajetórias calculadas para a região de SAN a 2000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Figura 35. Trajetórias calculadas para a região de ALF a 500 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Figura 36. Trajetórias calculadas para a região de ALF a 2000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Figura 37. Trajetórias calculadas para a região de ALF a 4000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Figura 38. Trajetórias calculadas para a região de RBA a 500 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Figura 39. Trajetórias calculadas para a região de RBA a 2000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Figura 40. Trajetórias calculadas para a região de RBA a 4000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Figura 41. Trajetórias calculadas para a região de TAB a 500 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Figura 42. Trajetórias calculadas para a região de TAB a 2000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Figura 43. Trajetórias calculadas para a região de TAB a 4000 m, com o modelo HYSPLIT para cada perfil realizado.

Em um estudo sobre a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (CAVALCANTI, FERREIRA, SILVA, & DIAS, 2009), observa-se que a posição média da ZCIT entre os meses de janeiro a abril fica abaixo da linha do equador e, portanto as massas de ar que estariam chegando aos locais de estudo teriam como origem o Oceano Atlântico Norte. Já a partir de maio a ZCIT fica acima desta posição e, portanto as massas de ar teriam origem no Oceano Atlântico Sul, como pode ser observado na Figura 44. A ZCIT esta localizada mais ao norte de julho a outubro, e entre março a abril sua posição fica mais ao sul, como mostra a Figura 45. A região nordeste do Brasil, propensa a secas, fica particularmente deficiente de umidade durante períodos em que a ZCIT permanece em uma posição setentrional (BARRY & CHORLEY, 2013).

Figura 44. Variabilidade sazonal da posição da ZCIT observada e simulada para a região do Atlântico Tropical, próximo à costa sul-americana.

(Fonte: CAVALCANTI *et al.*, 2009).

Figura 45. Posições sazonais da Zona de Convergência Intertropical costeira.

(Fonte: BARRY & CHORLEY, 2013)

5.1 Área de representatividade de cada local de estudo

As medidas realizadas neste estudo até 4,4 km de altitude demonstram o fluxo de uma grande área, pois representam todos os processos que ocorrem

em toda a área por onde a massa de ar translada entre a costa brasileira e o local de amostragem.

A partir do estudo das trajetórias foi possível determinar a área de representatividade de cada um dos locais de estudo, Figura 46, que corresponde ao caminho realizado pelas massas de ar desde a costa até cada um dos locais estudados, utilizando-se o modelo FLEXPART pelo Dr. John B. Miller (GATTI *et al.*, 2014). Neste estudo, verifica-se que as regiões de maior representação para cada local de estudo, são as regiões mais próximas do local da coleta, pois apresentam maior densidade de trajetórias. O local que melhor representa toda a Bacia Amazônica é RBA, pois as massas de ar que chegam a este local abrangem a maior parte da área da Bacia Amazônica.

Figura 46. Mapa do Brasil mostrando a região de representatividade de cada local de estudo, (a) TAB; (b) SAN; (c) RBA; (d) ALF, calculadas pelo FLEXPART.

(Adaptado de GATTI, *et al.*, 2014)

Analisando as áreas de influência dos locais de estudo e o mapa de cobertura florestal (Figura 47) observa-se que as áreas de representatividade dos locais de estudo não são compostas apenas por áreas de Floresta Amazônica. Estas regiões representam também, Cerrado ao sul da região da floresta tropical

e Caatinga ao longo da costa nordeste do Brasil, que são classificados como Savana e pastagens, em menor área. Há ainda duas grandes cidades, Belém e Manaus (GATTI *et al.*, 2014).

Figura 47. Mapa da região Amazônica, em verde área florestal intacta, em vermelho a área desmatada 2000-2010, em cinza escuro a área desmatada antes de 2000, e nas áreas não-florestadas cinza claro. Detalhe: mapa da América do Sul destacando o bioma Amazônico, dentro dos limites da Amazônia Legal brasileira. As linhas pretas indicam os limites políticos de estados amazônicos.

(Fonte: Aragão *et al.*, 2014).

Considerando apenas as áreas cobertas pela floresta (Figura 48) obtemos que TAB apresenta a maior área coberta por floresta, 86% da área de influência, seguida por RBA com 77%, ALF com 59% e SAN com a menor área coberta por floresta, 46% de sua área de influência. Comparando a área de influência de cada local de estudo com a área da Amazônia Sulamericana (6,82 milhões de km²) a região de RBA é a que melhor representa a Amazônia Sulamericana (54%), seguida por TAB (37%), ALF (19%) e SAN (9%). E comparando com a área da Amazônia Brasileira (4,2 milhões de km²) a região de RBA é a que melhor representa a Amazônia (87%), seguida por TAB (60%), ALF (31%) e SAN (14%).

Com base nas áreas de influência de cada local de estudo, e o fato destas áreas não representarem apenas áreas de floresta tropical, analisou-se a presença de indicadores de atividades antrópicas que podem contribuir para a

emissão de CH₄ observada neste estudo. Foram analisados o número total de habitantes em cada uma destas áreas, o tamanho dos rebanhos de animais com fermentação entérica (bovinos, bubalinos, asininos, muares, suínos, caprinos e ovinos) e as áreas com cultivo de arroz (Tabela 10), pois de acordo com o MCTI (2013), o setor da agropecuária é a principal fonte antrópica de CH₄ brasileira. Para estes cálculos, dividiu-se a área de influência de cada local de estudo em quadrantes, que estão representados na Figura 49. E com base nestes quadrantes, foram coletados os dados do censo 2010 e estimativas da população nos anos de 2011, 2012 e 2013, realizados pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e os dados de produção agrícola e pecuária municipal, para os anos de 2010, 2011 e 2012.

Figura 48. Mapa do Brasil mostrando a região de influência de cada região de estudo, TAB, SAN, RBA e ALF, calculadas pelo FLEXPART considerando apenas as áreas com cobertura florestal.

(Adaptado de GATTI, et al., 2014)

Figura 49. Representação dos quadrantes utilizados para o cálculo da precipitação, temperatura e dos focos de queimada para cada local de estudo.

Com base nos dados da Tabela 10 observa-se que proporcionalmente ao tamanho de sua área de influência, a região de SAN é a mais populosa em comparação com as demais regiões, com o maior número de animais com fermentação entérica e a maior proporção de área com cultivo de arroz, demonstrando que esta é a região com mais atividades antrópicas dentre os quatro locais de estudo.

Tabela 10. Dados de população, rebanho de animais e área de cultivo de arroz para cada área de influência

Número de habitantes				
Anos	ALF	RBA	SAN	TAB*
2010	41.929.566	48.237.938	45.179.010	50.495.940
2011	42.320.446	48.726.701	45.614.858	51.012.713
2012	42.732.191	49.233.744	46.003.459	51.541.635
2013	43.946.663	50.890.211	47.192.582	53.030.963
Número de cabeças de animais com fermentação entérica				
Anos	ALF	RBA	SAN	TAB*
2010	175.408.648	200.286.611	161.256.902	188.218.458
2011	176.084.591	201.104.390	161.840.660	190.567.620
2012	170.761.295	196.785.366	159.091.051	187.862.762
2013	-	-	-	-
Área com plantação de arroz (km ²)				
Anos	ALF	RBA	SAN	TAB*
2010	9.254	10.064	7.501	8.585
2011	8.959	10.529	7.288	8.213
2012	7.931	8.389	6.522	7.296
2013	-	-	-	-
Área total de cada local de estudo (km ²)				
	ALF	RBA	SAN	TAB*
	2.652.842	5.059.823	1.713.564	3.049.295
Densidade Demográfica (média de todos os anos)				
	ALF	RBA	SAN	TAB*
Habitantes/km ²	16,6	10,1	27,4	17,4
Animais/km ²	64,4	38,9	92,8	61,6

* consideradas as informações apenas referentes ao Brasil

5.2 Estudo da precipitação, temperatura e focos de queimada nos anos de 2010, 2011, 2012 e 2013

Realizou-se um estudo das condições climatológicas na Amazônia Brasileira nos anos de 2010, 2011, 2012 e 2013, com o objetivo de melhorar o entendimento dos resultados de fluxo observados neste projeto.

Para a realização deste estudo utilizou-se dados do satélite TRMM - *Tropical Rainfall Measuring Mission*, com a base de dados GPCP (*Global Precipitation Climatology Project - Monthly Global Precipitation*; http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=GPCP_Monthly), os focos de queimada (a partir do banco de dados do CPTEC/INPE; <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueima> de biomassa/) e da temperatura média da superfície por satélite (utilizando dados do *Global Land Data Assimilation System* – GLDAS; http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=GLDAS025_M) para os anos de 2010, 2011, 2012 e 2013.

A Figura 50 apresenta a precipitação acumulada para o Brasil, onde observa-se que os anos de 2010 e 2012 foram anos secos na região Amazônica, comparados com 2011 e 2013. O ano de 2010 sofreu uma seca ainda mais severa na região Amazônica do que o ano de 2012, em que a seca foi mais intensa na região nordeste brasileira. Os anos de 2011 e 2013 foram mais chuvosos na região Amazônica, porém 2013 apresentou uma região seca mais extensa que 2011 na região nordeste brasileira.

Analisando os mapas de precipitação mensal acumulada dos anos em estudo (Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54) observa-se que em 2010 a seca na região Amazônica foi mais intensa nos meses entre janeiro e março, diferente do observado nos outros anos (Figura 55), e em 2012, um ano seco, nestes meses o total pluviométrico foi inferior a 2011 e 2013, porém maior que 2010. Conforme dito anteriormente, no ano de 2012 a seca foi mais intensa na região nordeste brasileira e leste da Amazônia.

Figura 50. Mapas de precipitação acumulada no Brasil (dados do satélite TRMM).

Figura 51. Mapas de precipitação mensal acumulada no Brasil no ano de 2010 (dados do satélite TRMM).

Figura 52. Mapas de precipitação mensal acumulada no Brasil no ano de 2011 (dados do satélite TRMM).

Figura 53. Mapas de precipitação mensal acumulada no Brasil no ano de 2012 (dados do satélite TRMM).

Figura 54. Mapas de precipitação mensal acumulada no Brasil no ano de 2013 (dados do satélite TRMM).

Figura 55. Precipitação mensal acumulada na Bacia Amazônica (dados do satélite TRMM).

Observa-se na Figura 56 que os anos de 2010, 2012 e 2013 foram anos mais quentes que 2011. Não é possível observar variações significativas entre os anos de 2010, 2012 e 2013 na região Amazônica, mas quando analisamos as temperaturas médias da superfície destes anos para a região nordeste brasileira observamos que 2012 e 2013 foram ainda mais quentes nesta região em comparação a 2010.

Figura 56. Mapas de temperatura média da superfície no Brasil (dados GLDAS).

Também foram analisados os focos de queimada no Brasil para estes mesmo anos (Figura 57). Como eram esperados os anos de 2010 e 2012 tiveram maiores números de focos comparados aos anos de 2011 e 2013, corroborando com a precipitação. Porém em 2010 foi observada uma maior ocorrência de queimadas do que 2012.

Figura 57. Mapas de focos de queimada na América do Sul (dados CPTEC/INPE).

5.3 Estudo das concentrações de SF₆

Conforme descrito no item 4.6, no método utilizado para o cálculo do fluxo neste estudo é estimada uma concentração de entrada no continente (*background*), a qual é calculada utilizando o SF₆ como um traçador de massas de ar. Portanto neste estudo também foi realizado um estudo das concentrações de SF₆ obtidas nos perfis verticais realizados.

A Figura 58 mostra os resultados obtidos ao longo de 2010 até 2013 nos quatro locais de amostragem, e as concentrações de ASC e RPB, representando o Hemisfério Sul e Norte, respectivamente, para este período. Observou-se durante os 4 anos de estudo, que as concentrações em todas as estações são geralmente semelhantes a ASC, com exceção de janeiro a início de maio para SAN, RBA, ALF e TAB, quando as concentrações são mais elevadas do que os outros meses, e mais semelhante a média do HN. Estudo das trajetórias retrocedentes das massas de ar, usando o modelo HYSPLIT, para este período confirmaram que algumas massas de ar que chegam aos locais de estudo são oriundas do HN.

Figura 58. Séries temporais de SF₆ para SAN, RBA, ALF e TAB, para RPB representando o Hemisfério Norte, e ASC representando o Hemisfério Sul, entre 2010 e 2013.

Na metodologia de cálculo de fluxo utilizada neste método, considera-se que as concentrações de SF_6 na costa brasileira seriam iguais as concentrações de SF_6 obtidas nos locais de estudo na Bacia Amazônica, por não haver fonte de emissão deste gás entre a costa e os locais de estudo. Borges (2013) realizou uma comparação com as concentrações de SF_6 obtidas na Bacia Amazônica, com concentrações de SF_6 obtidas na costa brasileira com coletas semanais na superfície em dois locais de amostragem em Salinópolis (SAL: 0,6°S, 47,4°O) e em Natal (NAT: 5,5°S, 35,3°O) e observou que não existem diferenças entre os locais de estudo da Bacia Amazônica e de SAL (costa brasileira), confirmando a ausência de fontes de SF_6 nas áreas de estudo.

5.4 Concentrações de entrada no continente

Conforme descrito no item 4.6, para calcular o fluxo utilizando o Método de Integração de Coluna é necessário estimar a concentração de entrada no continente (concentração BKG, do termo em inglês *background*), utilizando o SF_6 como um traçador das massas de ar.

Portanto, foram calculadas as concentrações BKG para cada um dos quatro locais de estudo, para todos os perfis realizados entre os anos de 2010 e 2013, estas concentrações BKG de CH_4 estão apresentadas na Figura 59, juntamente com as concentrações das duas estações de Monitoramento Global, ASC e RPB, que são utilizadas no cálculo da fração para determinar a concentração BKG. Observa-se na Figura 59 que as concentrações BKG calculadas para ALF, RBA, SAN e TAB, em sua maioria, estão compreendidas entre as duas estações de monitoramento global, ASC e RPB. É possível observar também, um aumento destas concentrações entre os meses de dezembro a março, assim como foi observado nas concentrações de SF_6 , Figura 58, e com as trajetórias das massas de ar, indicando que o ar que entra no continente e chega aos locais de estudo recebe contribuição tanto do ar que vem do HS quanto do HN. Considerando todos os locais de estudo, durante os quatro anos, as concentrações BKG variaram de 1750 ppb a 1833 ppb.

Figura 59. Série temporal das concentrações BKG de CH_4 calculadas para cada perfil realizado, em ALF, RBA, SAN e TAB, e as concentrações nas estações de ASC e RPB.

5.5 Concentrações de CH_4 na Bacia Amazônica

Entre janeiro de 2010 e dezembro de 2013 foram realizados 293 perfis verticais de avião nos quatro locais de estudo. A Tabela 11 apresenta a distribuição destes perfis ao longo dos anos para cada local de estudo. Observa-se que foram realizados em torno de 20 perfis por ano em cada um dos locais de estudo, porém em TAB devido a ocorrência de problemas logísticos não foi possível manter a frequência quinzenal dos voos, e a partir de 2013 não foi possível mais a realização dos perfis nesta região, devido a problemas com a aeronave.

Tabela 11. Número de perfis realizados anualmente em cada um dos locais de estudo

Ano	ALF	RBA	SAN	TAB
2010	20	20	19	20
2011	19	18	23	14
2012	24	22	24	9
2013	21	17	23	-
Total	84	77	89	43

A análise da concentração dos perfis verticais nos permite avaliar se na região de estudo há uma indicação de fonte ou de absorção de CH_4 . A concentração observada nos perfis corresponde à resultante da concentração de entrada no continente acrescida da contribuição da Bacia Amazônica. Sendo que, de maneira geral, observa-se que o topo do perfil representa a concentração de entrada no continente e o aumento observado próximo da superfície a emissão oriunda da Bacia Amazônica. A Figura 60 apresenta todos os perfis realizados em cada local, durante a estação chuvosa, meses com precipitação superior a 100 mm (em azul) e durante a estação seca, meses com precipitação inferior a 100 mm (em vermelho). Observa-se que para os quatro locais de estudo as concentrações obtidas nas altitudes mais próximas à superfície são maiores quando comparadas as concentrações das altitudes mais altas, que apresentaram um padrão mais homogêneo, indicando que os quatro locais de estudo atuaram como fonte de CH_4 durante todo o período estudado. Pode-se ainda observar uma variação nas emissões em cada local e também que há uma variação na emissão a cada ano, indicando uma variabilidade anual nas emissões nestas regiões.

A Figura 61 apresenta a série temporal das concentrações médias mensais acima de 3,8 km e abaixo de 1,5 km, dos perfis verticais realizados e as concentrações de ASC e RPB, ao longo dos anos. As barras em cinza representam o período de estação chuvosa para a região da Amazônia, considerou-se estação chuvosa os meses com precipitação acima de 100 mm (SALESKA, *et al.*, 2003; ARAGÃO, *et al.*, 2008). Observa-se neste período concentrações médias, abaixo de 1,5 km, mais elevadas, indicando uma maior emissão da Amazônia, porém em alguns anos também foram observadas concentrações elevadas na estação seca, indicando altas emissões, principalmente na região de SAN, estes resultados indicam uma contribuição nas emissões provenientes das queimadas ocorrentes nesta região durante a estação seca. Observa-se ainda, uma variação na diferença entre estas concentrações ao longo dos meses e ao longo dos anos, onde também é possível observar uma variabilidade na emissão de CH_4 , sendo que a região de SAN apresentou a maior diferença entre estas concentrações (Tabela 12), seguido de RBA e TAB, enquanto que, ALF mostrou a menor diferença entre estas concentrações e a menor variação ano a ano.

Figura 60. Concentração de CH₄ (em ppb) nos perfis verticais para cada local de estudo, em azul os perfis realizados na estação chuvosa (meses com precipitação acima de 100 mm) e em vermelho os perfis realizados na estação seca (meses com precipitação abaixo de 100 mm).

Figura 61. Concentrações médias mensais dos perfis verticais abaixo de 1,5 km e acima de 3,8 km, entre 2010 e 2013 para cada região de estudo, e as concentrações de ASC e RPB. As barras em cinza representam a estação chuvosa na Amazônia (meses com precipitação acima de 100 mm).

Tabela 12. Diferença média, para cada ano, entre as concentrações médias acima de 3,8 km e abaixo de 1,5 km, para cada um dos locais de estudo

Locais	Abaixo de 1,5 km – acima de 3,8 km (ppb)			
	2010	2011	2012	2013
ALF	12,3	16,3	11,3	7,2
TAB	28,0	18,3	27,2	-
RBA	38,8	28,5	23,5	35,2
SAN	44,8	52,3	47,8	60,3

Estes resultados indicam que a região de SAN possui fontes de CH_4 diferentes ou com maior magnitude que as demais regiões, pois as concentrações acima de 3,8 km para esta região são similares as dos demais locais, e apenas as concentrações mais próximas a superfície dos perfis verticais (abaixo de 1,5 km, Figura 61) são em alguns períodos do ano, superiores aos demais locais, principalmente durante a estação seca, onde foram observadas altas concentrações nas baixas altitudes dos perfis. Este resultado é semelhante ao comportamento dos perfis verticais realizados conforme observado na Figura 60, demonstrando que a Bacia Amazônica apresenta diferenças na emissão de CH_4 para diferentes regiões, confirmando o observado com os resultados do ano de 2010, conforme publicado em Basso (2011).

5.6 Fluxo de CH₄ nos locais de estudo

O fluxo de CH₄ na Bacia Amazônica para os quatro anos de estudo foi calculado após remover a concentração BKG para cada local amostrado, a diferença obtida entre a concentração medida no perfil vertical e a concentração BKG, representa a resultante de todos os processos que ocorrem entre a costa e cada local de estudo.

A Figura 62 apresenta os fluxos obtidos para os locais estudados durante os anos de 2010 a 2013. Observa-se que os quatro locais de estudo atuaram como fonte de CH₄, durante todo o período estudado, porém há uma variação nas emissões em cada local, sendo em SAN a maior emissão observada. Outra característica dos fluxos observados é a presença de uma sazonalidade ao longo do ano, com maiores emissões no início do ano (janeiro a abril), uma diminuição entre maio e junho e um novo aumento das emissões entre agosto e dezembro. A região de SAN apresentou esta sazonalidade de forma mais evidente, porém ela também foi observada nos demais locais de estudo, mas com uma variação menor. As emissões de CH₄ observadas nos demais locais representaram em torno de 20% à 33% (dependendo do ano), do que foi observado em SAN.

Os resultados obtidos para o ano de 2010 (BASSO, 2011) já indicavam uma variação regional nas emissões de CH₄ na Amazônia e uma sazonalidade ao longo do ano, mas apenas com uma série temporal longa foi possível observar que, além de uma variação regional, a emissão de CH₄ na Amazônia apresenta também variabilidade interanual, a qual pode estar correlacionada a variações nas condições climáticas desta região ano a ano. Esta possível correlação será abordada neste estudo mais adiante.

O aumento nos fluxos dos quatro locais de estudo, durante a estação seca, sugere uma possível contribuição da emissão oriunda da queima de biomassa no fluxo de CH₄ na Amazônia, então para verificar esta possível influência e estimar o total desta contribuição, foram estimadas as emissões de CH₄ provenientes da queima de biomassa. Para tal, foi utilizado o CO, por este ser um excelente traçador de queimadas.

Figura 62. Fluxos médios mensais de CH_4 ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para os quatro locais de estudo, de 2010 a 2013, a linha preta representa a média dos quatro anos e os desvios padrões (linhas tracejadas).

5.7 Concentrações e fluxo de CO na Bacia Amazônica

Conforme descrito no item 4.8, a observação da emissão natural de CH_4 para a atmosfera é uma informação muito relevante, assim como a diferença entre a emissão durante a estação chuvosa e a seca. Para separar as emissões biogênicas da emissão pela queima da biomassa, utilizou-se o monóxido de carbono (CO) como traçador de queimada. Portanto, determinar as concentrações de CO foi importante para elucidar a real contribuição e o fluxo de CH_4 oriundo da queima de biomassa no fluxo total observado.

5.7.1 Concentrações de entrada no continente de CO

Foram calculadas as concentrações BKG para o CO, para cada um dos quatro locais de estudo, para todos os perfis realizados entre os anos de 2010 e 2013, assim como para CH_4 , estas concentrações BKG estão apresentadas na Figura 63, juntamente com as concentrações das duas estações de Monitoramento Global, ASC e RPB, que são utilizadas no cálculo da fração para determinar a concentração BKG. Observa-se que as concentrações BKG calculadas para ALF, RBA, SAN e TAB, em sua maioria, estão compreendidas

entre as duas estações de monitoramento global, ASC e RPB, assim como foi observado nas concentrações BKG calculadas para CH₄.

Figura 63. Série temporal das concentrações BKG de CO calculadas para cada perfil realizado e as concentrações nas estações de ASC e RPB.

5.7.2 Concentrações de CO nos perfis verticais

Foram analisadas as concentrações de CO para todos os perfis verticais realizados neste estudo (Figura 64), durante a estação chuvosa, meses com precipitação superior a 100 mm (em azul) e durante a estação seca, meses com precipitação inferior a 100 mm (em vermelho). Pode-se observar que há um aumento significativo das concentrações nos perfis durante a estação seca (em vermelho), indicando a presença de plumas de queima de biomassa nestes perfis. Porém observa-se ainda alguns perfis com altas concentrações de CO durante a estação chuvosa, devido as áreas de influência dos locais de amostragem representarem regiões muito extensas, as vezes englobando áreas no HN, onde a sazonalidade é o oposto abaixo do equador. Ainda devido as áreas de influência serem extensas, ocorrem variações na precipitação e na queima de biomassa dentro destas regiões, ou seja, apesar do mês ser considerado chuvoso, podem existir áreas onde já está na estação seca, podendo inclusive já apresentar queimadas.

Figura 64. Concentração de CO (em ppb) nos perfis verticais para cada local de estudo, em azul os perfis realizados na estação chuvosa (meses com precipitação acima de 100 mm) e em vermelho os perfis realizados na estação seca (meses com precipitação abaixo de 100 mm).

A Figura 65 apresenta a série temporal das concentrações médias mensais de CO acima de 3,8 km e abaixo de 1,5 km, para os quatro locais de

estudo na Bacia Amazônica, juntamente com as concentrações de ASC e RPB. As barras em cinza representam o período de estação chuvosa na Amazônia (precipitação acima de 100 mm). Observa-se um aumento significativo das concentrações no período da estação seca, para os quatro locais, representado as emissões geradas nos processos de queima. Observa-se ainda, altas concentrações abaixo de 1,5 km no início da estação chuvosa ainda como resultado de processos de queima, devido ao fato das áreas de influência de cada local estudado serem muito abrangentes, mesmo no total pluviométrico da área da Amazônia ser considerado estação chuvosa, ainda há locais, em geral na região leste da Amazônia e no nordeste brasileiro, em que é estação seca e ocorrem queimadas. Pode-se observar também, maiores concentrações na estação seca do ano de 2010 em comparação com os demais anos, resultado em concordância com o fato do ano de 2010 ter sido o ano com maior número de queimadas em comparação com os demais. As regiões de ALF e RBA apresentaram as maiores concentrações de CO no período da estação seca, ALF por estar localizada na região conhecida como Arco do Desflorestamento ou Arco do Fogo (Figura 66), e RBA também localizada mais ao Sul da Bacia Amazônica recebendo grande influência das queimadas desta região neste período.

Figura 65. Concentrações médias mensais dos perfis verticais de CO abaixo de 1,5 km e acima de 3,8 km, entre 2010 e 2013 para cada região de estudo, e as concentrações de ASC e RPB. As barras em cinza representam a estação chuvosa na Amazônia (meses com precipitação acima de 100 mm).

Figura 66. Mapa da Amazônia Legal com destaque para a região do Arco do Desflorestamento, ou também conhecida como Arco do Fogo.

(Fonte: IBAMA, 2007)

5.7.3 Fluxo de CO na Bacia Amazônica

Após remover a concentração BKG, para cada local amostrado, a diferença obtida entre a concentração medida no perfil vertical e a concentração BKG, foram calculados os fluxos de CO para cada um dos perfis verticais realizados e posteriormente as médias mensais para os anos de 2010 a 2013. A Figura 67 apresenta os fluxos de CO para os quatro locais de estudo. Observa-se um aumento na emissão de CO no segundo semestre do ano, período de estação seca, em todos os locais, resultado das emissões oriundas da queima de biomassa.

A Tabela 13 apresenta as médias anuais dos fluxos de CO de 2010 a 2013. As regiões de ALF e SAN apresentaram as maiores emissões de CO, por serem regiões com maiores influências de atividades humanas. Observam-se ainda, fluxos maiores nos anos de 2010 e 2012, anos mais secos e com maiores ocorrências de queima de biomassa, com exceção de TAB, local que apresentou a menor influência da queima de biomassa, devido a esta região ser a que possui a maior área de floresta dentro de sua área de representatividade, em comparação com os demais locais.

Analisando a série temporal dos fluxos de CO ao longo do ano, notou-se um período onde a emissão chega a um valor mínimo estável, no primeiro

semestre do ano, durante a estação chuvosa (Figura 67), entre os meses de março a junho, para os quatro locais de estudo. Portanto, adotou-se a média desta emissão como sendo uma emissão natural de CO que será descontada no cálculo para uma posterior estimativa da emissão e contribuição da queima de biomassa no fluxo de CH₄ nestas regiões (Tabela 14).

Figura 67. Fluxos médios mensais de CO ($\text{mg CO m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) para os quatro locais de estudo, de 2010 a 2013.

Tabela 13. Fluxos médios anuais de CO ($\text{mg CO m}^{-2} \text{dia}^{-2}$) para cada um dos locais de estudo

Fluxo de CO ($\text{mg CO m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)	ALF	RBA	SAN	TAB
2010	57,2	40,9	87,0	17,9
2011	31,4	20,1	64,7	10,5
2012	40,3	27,6	80,7	9,6
2013	25,2	22,3	69,1	-

Tabela 14. Fluxo natural de CO ($\text{mg CO m}^{-2} \text{dia}^{-2}$) calculado para cada um dos locais de estudo

Fluxo Natural de CO ($\text{mg CO m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)	ALF	RBA	SAN	TAB
2010	10,3	11,2	12,5	4,8
2011	3,0	2,7	8,5	5,2
2012	9,9	8,2	15,1	5,4
2013	2,3	6,5	4,9	-

5.8 Razão CO/CH₄ utilizada para estimar o fluxo de CH₄ das queimadas

Conforme descrito no item 4.8, utilizou-se o monóxido de carbono (CO) como traçador de queimada. Neste estudo, para estimar esta razão, foram utilizadas as concentrações de CO e de CH₄ observadas nos perfis, subtraídas das concentrações BKG. Foram selecionados apenas os perfis realizados na estação seca, os quais apresentaram pluma de queimada claramente identificável no perfil. Para o cálculo da razão CO/CH₄ foram utilizados os resultados relativos às alturas onde foram detectadas as plumas, acrescentando ainda a porção anterior ao seu início, isto é, a altura anterior à pluma (Figura 68). A razão foi dada pelo coeficiente angular da equação de reta dada por estes pontos (Tabela 15). Para evitar contabilizar contaminação por emissões de outros processos na razão estimada, não foram considerados nenhum ponto abaixo de 1,5 km (abaixo da camada limite).

Figura 68. Perfis onde foram observadas plumas de queima de biomassa que foram utilizados para o cálculo da razão, onde em destaque estão as altitudes que foram consideradas.

Tabela 15. Razões CO/CH₄ encontradas nos perfis selecionados na estação seca.

Local	Data	CO/CH ₄	r ²	Média	Desvio padrão
ALF	13/08/2010	12,7	0,97	9,6	3,3
	30/08/2010	8,3	0,90		
	14/09/2010	6,6	0,93		
	28/09/2010	9,2	0,98		
	17/09/2011	11,8	0,94		
	13/08/2012	15,2	0,94		
	28/09/2012	7,0	0,84		
	31/08/2013	6,2	0,98		
RBA	10/08/2010	3,6	0,93	5,1	1,5
	28/08/2010	5,7	0,90		
	10/09/2010	3,4	0,76		
	24/09/2010	5,2	0,97		
	24/08/2011	5,5	0,81		
	31/08/2011	4,9	0,92		
	25/09/2011	3,8	0,90		
	31/08/2012	6,2	0,91		
	12/09/2012	8,1	0,70		
SAN	13/10/2004	4,2	0,99	6,7	1,9
	29/10/2004	8,8	0,94		
	21/08/2006	6,2	0,95		
	16/09/2006	5,6	0,91		
	16/12/2006	8,6	0,91		
	13/09/2007	6,1	0,94		
	16/11/2007	4,2	0,78		
	01/11/2008	5,0	0,90		
	15/11/2008	6,5	0,98		
	21/11/2009	8,2	0,98		
	18/08/2012	10,3	0,96		
	29/11/2012	6,6	0,81		
TAB	27/07/2010	6,1	0,55	7,5	2,2
	18/08/2010	5,6	0,89		
	29/08/2010	6,4	0,91		
	18/09/2010	8,8	0,93		
	26/09/2010	6,6	0,94		
	27/09/2011	11,4	0,73		

Analisando as plumas encontradas nos perfis de SAN, RBA e TAB, observou-se que estas não representam apenas as emissões da queima de biomassa, mas também a influência de outras fontes interferindo nas razões. Além deste aspecto, nota-se que as razões encontradas nestes locais são muito inferiores as de ALF. Considerando-se ainda que ALF localiza-se na região do “Arco do Fogo”, concluímos que as razões encontradas neste local são mais representativas da queima de biomassa que nos demais locais. Por estas razões,

utilizou-se apenas a razão média CO/CH₄ encontrada em ALF no cálculo do fluxo de emissão proveniente da queima de biomassa. A razão média determinada em ALF foi de $9,6 \pm 3,3$ ppbCO/ppbCH₄.

Para efeito de comparação Yokelson *et al.* (2007), por meio de medidas com avião na estação seca de 2004 na Amazônia, estimaram uma razão de 10,3 ppbCO/ppbCH₄, Yokelson *et al.* (2008) estimaram uma razão para queima de biomassa na Amazônia de 9,9ppbCO/ppbCH₄ (este estudo inclui medidas realizadas com aviões, medidas de superfície e em laboratório) e Andreae e Merlet (2001) publicaram uma taxa de emissão para as florestas tropicais de 8,7 ppbCO/ppbCH₄. Neste estudo, a razão CO/CH₄ calculada foi próxima aos valores encontrados na literatura para floresta tropical.

5.9 Fluxo de CH₄ biogênico e de queima de biomassa

Com base nas razões CO/CH₄ encontradas neste estudo (item 5.8) foi possível determinar o fluxo de CH₄ proveniente da queima de biomassa, e a resultante da subtração deste fluxo com o fluxo total de CH₄, foi denominado de fluxo biogênico. Para a compreensão da variabilidade regional e interanual encontradas nos fluxos observados nos locais de estudo, também foram calculadas a precipitação por satélite, os focos de queimada, e a temperatura média da superfície por satélite (utilizando dados do *Global Land Data Assimilation System* – GLDAS; http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=GLDAS025_M) para a área de influência de cada local de estudo e comparados com os fluxos observados.

A Figura 69 apresenta as médias mensais calculadas para os fluxos total, biogênico e de queima de biomassa para a região de RBA. Observa-se também as médias mensais, da precipitação, dos focos de queimada e da temperatura para esta região. Como as áreas de influência de cada local de estudo são muito extensas, a definição de estação seca para os meses que apresentaram precipitação menor que 100mm (SALESKA, *et al.*, 2003; ARAGÃO, *et al.*, 2008), pode não retratar a realidade sazonal, uma vez que, dentro da área de influência, tem-se uma região na estação chuvosa e outra na estação seca. Portanto para caracterizar a estação seca destas regiões além dos dados de precipitação, também foram considerados os focos de queimada para cada área.

Analisando os dados de precipitação para esta região, Tabela 16, pode-se observar que durante os quatro anos de estudo, ocorreram dois anos de seca, 2010 e 2012, com precipitação abaixo da média de 10 anos (1999-2009) observada para esta região. A principal diferença observada nos anos de seca em RBA foi no período em que a seca ocorreu, em 2010 os índices de precipitação abaixo da média foram observados principalmente nos meses de maior intensidade das chuvas, fevereiro e março, enquanto em 2012 ocorreu principalmente entre os meses de março a junho. Já os anos de 2011 e 2013 tiveram precipitação acima da média observada, sendo que em 2011 este total foi ainda maior que 2013. O ano de 2011 além de ser um ano extremamente chuvoso para esta região, também foi o ano com a menor temperatura média observada, sendo esta abaixo da temperatura média dos 10 anos. Enquanto que os anos de 2010, 2012 e 2013 apresentaram temperatura média acima da média observada para a região de RBA, sendo 2013 o ano mais quente comparado a 2010 e 2012, apesar destes dois anos serem de seca. A análise do número total de focos de queimada nesta região esta de acordo com o observado na precipitação. Os anos de 2010 e 2012, por serem anos de seca, apresentaram um número total de focos de queimada acima da média, enquanto os anos de 2011 e 2013, anos chuvosos, apresentaram um número total de focos de queimada inferior a média.

Com relação aos fluxos observados, o fluxo biogênico foi maior nos meses de maior intensidade das chuvas, bem como um aumento do fluxo da queima de biomassa no período de maior ocorrência dos focos de queimada, e uma diminuição do fluxo biogênico neste mesmo período. Estes resultados indicam uma contribuição da queima de biomassa em relação ao fluxo total anual de CH_4 , entre 9% a 12%.

Figura 69. Médias mensais dos fluxos, da precipitação, temperatura e dos focos de queimada, para a região de RBA, para o anos de 2010, 2011, 2012 e 2013.

Tabela 16. Fluxos médios anuais, precipitação, temperatura e número de focos de queimada para a área de influência de RBA

Fluxos ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	2010	2011	2012	2013	Média (99-09)
Fluxo total	14,9	10,5	14,0	11,3	-
Fluxo biogênico	13,2	9,5	12,8	10,3	-
Fluxo queimada	1,8	1,0	1,2	1,1	-
Precipitação (mm)	1726	1978	1710	1904	1859
Focos de queimada	149.073	73.010	113.904	65.032	103.153
Temperatura (°C)	26,5	26,2	26,5	26,7	26,3

Nesta região, além da sazonalidade ao longo do ano, também foi observada uma variabilidade interanual, onde foi observado maiores emissões nos anos de seca, 2010 e 2012. Estas maiores emissões foram observadas nos fluxos de queimada, pois durante estes anos ocorreram um número maior de queimadas nesta região, mas também foram observados fluxos biogênicos maiores nestes anos, em comparação com os anos de 2011 e 2013, que foram anos com precipitação acima da média. O ano de 2011 apresentou fluxo biogênico ainda menor que o observado em 2013. Ambos os anos com precipitação acima da média, porém em 2011 este aumento na precipitação ocorreu principalmente entre os meses de janeiro a abril, enquanto em 2013 foi observada uma precipitação maior principalmente na estação seca. Cabe ressaltar que o ano de 2011 foi um ano com menor temperatura média, enquanto que 2013 foi o ano mais quente dentre os 4 anos de estudo. Estas variações podem estar relacionadas à variação observada nos fluxos destes dois anos.

Assim como em RBA, no fluxo calculado para a região de ALF (Figura 70), o ano de 2010 também apresentou precipitação abaixo da média nesta região, onde a precipitação foi menor nos meses de fevereiro e março. O ano de 2012 também foi um ano de seca, com uma intensidade maior entre os meses de março a junho, e diferente do observado em RBA, em ALF o ano de 2013 também apresentou precipitação abaixo da média, principalmente nos meses de fevereiro a abril. E assim como em RBA, o ano de 2011 para a região de ALF também apresentou precipitação acima da média, principalmente entre janeiro a maio.

Com relação a temperatura os anos de 2010 e 2012, tiveram temperatura média anual igual a média observada em 10 anos, enquanto o ano de 2011 apresentou temperatura inferior a média, e 2013 apresentou a maior temperatura dentre os quatro anos de estudo e acima da média, conforme observado em RBA.

Os resultados do número total de focos de queimada para esta região corroboram com a precipitação observada, os anos de 2010 e 2012 que apresentaram precipitação abaixo da média, foram os anos com maior número de focos de queimada, sendo que o ano de 2010 apresentou o maior número em relação à 2012. O ano de 2013 apesar de ter apresentado precipitação abaixo da média, teve um número total de focos de queimada abaixo da média, observando

a variação da precipitação e das queimadas ao longo dos meses, observa-se que os meses em que a seca foi mais intensa (fevereiro a maio) são meses em que não há um grande número de focos de queimada, e durante a estação seca a precipitação foi próxima a média e o número total de focos foi abaixo da média neste período. E para o ano de 2011 também foi observado um menor número de focos de queimada, sendo que este ano apresentou a maior precipitação dentre os quatro anos de estudo.

Assim como o observado na região de RBA, em ALF também é possível observar um aumento da emissão biogênica de CH_4 durante o período de maior intensidade das chuvas, e posteriormente uma emissão proveniente da queima de biomassa no período de maior ocorrência dos focos de queimada (Figura 70). Observa-se também, que no período de aumento da emissão da queima de biomassa, há uma redução na emissão biogênica nesta região.

Nesta região os anos de seca mais intensa (2010 e 2012) também apresentaram fluxos de queima de biomassa superiores aos demais anos, e também uma maior emissão biogênica (Tabela 17). O ano de 2011 apresentou um fluxo de queima de biomassa similar ao ano de 2012, que foi um ano seco, mas analisando a emissão mensal, observa-se uma alta emissão no mês de setembro, mês em que o número de queimadas foi acima da média e que a precipitação foi inferior a média, portanto corroborando com o resultado obtido. O ano de 2013 apresentou o menor fluxo de queima de biomassa, apesar de ter sido um ano com precipitação abaixo da média, observa-se que o número de focos de queimada esteve abaixo da média, e ao analisarmos a precipitação mensal durante a estação seca, esta esteve acima da média durante todos os meses, concordando com os resultados obtidos. A contribuição da queima de biomassa no fluxo médio anual em ALF, variou de 12% a 18%, durante os quatro anos de estudo.

Os anos de 2011 e 2013 apresentaram emissões biogênicas inferiores aos anos de 2010 e 2012. A menor emissão foi observada no ano de 2013, que diferentemente do observado nos demais anos, teve uma redução nas emissões na estação seca, a partir de setembro.

A diferença nas emissões observada entre 2010 e 2012, assim como para RBA, também está relacionada a uma maior emissão oriunda da queima de biomassa em 2010.

Figura 70. Médias mensais dos fluxos, da precipitação, temperatura e dos focos de queimada, para a região de ALF, para o anos de 2010, 2011, 2012 e 2013.

Tabela 17. Fluxos médios anuais, precipitação, temperatura e número de focos de queimada para a área de influência de ALF

Fluxos ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	2010	2011	2012	2013	Média (99-09)
Fluxo total	15,8	12,8	14,6	10,4	-
Fluxo biogênico	13,0	11,1	12,8	9,1	-
Fluxo queimada	2,8	1,7	1,8	1,4	-
Precipitação (mm)	1358	1745	1246	1518	1563
Focos de queimada	109.770	59.565	93.843	67.270	74.699
Temperatura (°C)	26,4	26,1	26,4	26,9	26,4

A Figura 71 apresenta os resultados obtidos para a região de TAB. Cabe ressaltar que nesta região, devido a problemas logísticos as amostragens foram encerradas no ano de 2012. Houve um acidente com o avião que realizava as coletas em agosto de 2012. Até dezembro foram realizados voos a partir de Rio Branco, o que encareceu bastante o custo das coletas, sendo feito então um por mês. Por esta razão foram realizados apenas 3 anos de estudos nesta região.

Os resultados obtidos para a região de TAB são semelhantes ao observado em RBA. Nesta região, os anos de 2010 e 2012 foram anos de seca, com temperatura acima da média, bem como com um maior número de focos de queimada, quando comparados ao ano de 2011 (Tabela 18), que foi um ano com precipitação acima da média, principalmente entre os meses de janeiro a maio, e com temperatura abaixo da média de 10 anos. O número de focos de queimada em 2011 esteve abaixo da média, concordando com a maior precipitação obtida neste ano. Assim como para RBA, em 2010 a seca foi mais intensa nos meses de fevereiro e março, enquanto que em 2012 foi entre abril e junho.

Em TAB também foi observado, como em RBA e ALF, um aumento do fluxo biogênico nos meses de maior intensidade das chuvas e na estação seca um aumento no fluxo proveniente da queima de biomassa, e uma pequena redução do fluxo biogênico neste período do ano.

Assim como em RBA e ALF, os anos de 2010 e 2012 (anos de seca) apresentaram as maiores emissões biogênicas, comparados ao ano de 2011. O ano de 2010, que foi o ano mais seco e com maior número de queimadas dentre os 3 anos de estudo, apresentou o maior fluxo oriundo da queima de biomassa, enquanto 2011 e 2012 apresentaram fluxos de queima de biomassa semelhantes, apesar de em 2012 o número de focos de queimada serem superiores a média. Deve-se ressaltar que devido a problemas logísticos no ano de 2012 foram realizados 9 perfis durante o ano, portanto, este fluxo pode não representar corretamente o ano todo, sendo 5 perfis durante a estação chuvosa e 4 perfis durante a estação seca.

A região de TAB é dentre os quatro locais de estudo, a área mais preservada, com maior área de floresta dentro de sua área de representatividade, comparada aos demais locais. Nesta região foi observada uma influência da queima de biomassa no fluxo médio total anual de CH₄ entre 1% e 5%.

Figura 71. Médias mensais dos fluxos, da precipitação, temperatura e dos focos de queimada, para a região de TAB, para o anos de 2010, 2011 e 2012.

Tabela 18. Fluxos médios anuais, precipitação, temperatura e número de focos de queimada para a área de influência de TAB

Fluxos ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	2010	2011	2012*	Média (99-09)
Fluxo total	16,2	11,2	17,6*	-
Fluxo biogênico	15,4	10,8	17,3*	-
Fluxo queima de biomassa	0,8	0,4	0,3*	-
Precipitação (mm)	1813	2197	1817	2093
Focos de queimada	118.751	61.050	98.519	83.304
Temperatura (°C)	26,8	26,5	26,7	26,6

*Devido ao baixo número de perfis realizados este fluxo pode não representar corretamente o ano todo.

A Figura 72, apresenta os resultados obtidos para a região de SAN para os 4 anos de estudo. Observa-se uma emissão de CH₄ muito superior aos demais locais estudados para todos os anos. Durante a estação chuvosa, observou-se os maiores fluxos de emissão biogênicos, que são reduzidos durante a estação seca. No entanto, em SAN, durante a estação seca, também foi observado uma grande emissão biogênica. Estes resultados indicam a presença ou magnitude diferentes de fontes de CH₄ entre as regiões estudadas.

Analisando a precipitação, observa-se que os anos de 2010, 2012 e 2013 foram anos de baixo índice de precipitação na região de SAN, sendo o ano de 2012 ainda mais seco que os demais, Tabela 19. E em 2011 a precipitação foi acima da média e foi o ano que apresentou temperatura abaixo da média, enquanto que os anos de 2010, 2012 e 2013 foram anos com temperatura acima da média. Os anos de 2010 e 2012, apresentaram os maiores números de focos de queimada. Já o ano de 2013, apesar de ter sido um ano de seca, considerando o total anual da precipitação, apresentou número de focos de queimada abaixo da média, pois justamente nos meses de pico das queimadas, a precipitação foi superior a média, inibindo as queimadas na região.

Em SAN a influência da queima de biomassa nos fluxos médios totais anuais foi de 7%, indicando que a alta emissão nesta região está associada a outras fontes.

A Tabela 20 apresenta resumidamente um comparativo das médias anuais dos fluxos de CH₄ totais, biogênicos e provenientes da queima de biomassa para os locais de estudo, e a porcentagem da emissão de queimada em relação ao fluxo total anual. Observa-se que a região de ALF apresenta a maior influência da emissão de queimada no fluxo, devido a sua localização na região do “Arco do Fogo”. Analisando as trajetórias para esta região, observa-se que a maior parte das massas de ar que chegam a este local recebe uma grande contribuição das queimadas. O fluxo proveniente da queima de biomassa para o ano de 2010 foi o maior observado em todos os locais de estudo, este resultado esta em acordo com a baixa precipitação e o alto número de queimadas ocorridas neste ano.

Figura 72. Médias mensais dos fluxos, da precipitação, temperatura e dos focos de queimada, para a região de SAN, para o anos de 2010, 2011, 2012 e 2013.

Tabela 19. Fluxos médios anuais, precipitação, temperatura e número de focos de queimada para a área de influência de SAN

Fluxos ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	2010	2011	2012	2013	Média (99-09)
Fluxo total	59,5	46,8	52,6	56,5	-
Fluxo biogênico	55,4	43,6	48,9	52,8	-
Fluxo queimada	4,2	3,1	3,7	3,8	-
Precipitação (mm)	1441	1832	1239	1512	1662
Focos de queimada	50.541	34.183	53.958	35.199	46.429
Temperatura (°C)	26,8	26,5	27,0	27,3	26,6

Tabela 20. Médias anuais dos fluxos de CH₄ de 2010, 2011, 2012 e 2013

Fluxo Total (mg CH₄ m⁻² dia⁻¹)	2010	2011	2012	2013
ALF	15,8	12,8	14,6	10,4
RBA	14,9	10,5	14,0	11,3
TAB	16,2	11,1	17,6	-
SAN	59,5	46,8	52,6	56,5
Fluxo Biogênico (mg CH₄ m⁻² dia⁻¹)	2010	2011	2012	2013
ALF	13,0	11,1	12,8	9,1
RBA	13,2	9,5	12,8	10,3
TAB	15,4	10,8	17,3	-
SAN	55,4	43,6	48,9	52,8
Fluxo Queima Biomassa (mg CH₄ m⁻² dia⁻¹)	2010	2011	2012	2013
ALF	2,8	1,7	1,8	1,4
RBA	1,8	1,0	1,1	1,0
TAB	0,8	0,4	0,3	-
SAN	4,2	3,1	3,7	3,8
Porcentagem da Emissão de Queimada no Fluxo Anual	2010	2011	2012	2013
ALF	18%	13%	12%	13%
RBA	12%	10%	8%	9%
TAB	5%	3%	1%	-
SAN	7%	7%	7%	7%

A maior participação da queima de biomassa ocorreu em ALF, no ano de 2010, representando até 18% da emissão total. Nesta região, a participação da queima de biomassa nas emissões variam de 12 a 18% e a região com a menor emissão de queima de biomassa foi TAB. Em termos absolutos a maior emissão ocorreu em SAN, onde a emissão biogênica é de 3 a 4 vezes maior do que nos demais locais.

Sawakuchi *et al.* (2014) estudaram os fluxos de CH₄ dos grandes rios da Amazônia, sendo que as maiores emissões foram encontradas nos rios Xingú, com um fluxo de $95,36 \pm 146,40$ mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ ($5,96 \pm 9,15$ mmol CH₄ m⁻² dia⁻¹) e no Tapajós de $38,56 \pm 65,60$ mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ ($2,41 \pm 4,10$ mmol CH₄ m⁻² dia⁻¹). Estes fluxos médios consideram tanto emissões difusivas como ebulitivas. O Rio Xingú apresenta uma emissão média difusiva, de $47,20 \pm 61,92$ mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ ($2,95 \pm 3,87$ mmol CH₄ m⁻² dia⁻¹), semelhante ao observado no Rio Tapajós de $36,32 \pm 59,84$ mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ ($2,27 \pm 3,74$ mmol CH₄ m⁻² dia⁻¹). A grande diferença observada nas emissões destes dois rios, refere-se as emissões

ebulitivas, que no Rio Xingú foi de $48,16 \pm 114,24 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($3,01 \pm 7,14 \text{ mmol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), enquanto que no Rio Tapajós foi de $2,24 \pm 14,08 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($0,14 \pm 0,88 \text{ mmol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), ou seja, uma emissão 22 vezes maior no Rio Xingú. Na Figura 73, pode-se observar onde estes rios estão localizados e verifica-se que esta região é justamente a região de maior influência sobre o fluxo de SAN, conforme pode-se observar na Figura 46. As emissões ebulitivas encontradas nestes rios seriam a razão da emissão de SAN ser tão superior a dos demais locais. Além destas emissões, ainda existem na Amazônia bolsões de CH_4 abaixo de rochas mais antigas, localizadas entre 1 km e 3 km abaixo da superfície, que seriam lentamente liberadas para a atmosfera (comunicação pessoal, Andre Sawakuchi, 2014). Estas altas emissões do Rio Xingú e região contribuem com o alto fluxo observado em SAN, neste estudo, comparado com as demais localidades.

Figura 73. Locais com medidas de fluxo realizadas em diferentes épocas do ano e os afluentes do Rio Amazonas. Os números entre parênteses na legenda indicam quantos locais foram medidos em cada época. Em destaque os locais de coleta no Rio Xingú e no Rio Tapajós, que influenciam a região de SAN.

(Adaptado de SAWAKUCHI, et al., 2014)

A Tabela 21 apresenta as médias de emissões de CH_4 separadamente para a estação chuvosa e seca, nos quatro anos, para as quatro regiões estudadas. Observa-se que a emissão biogênica, representa a maior fonte em todo o ano, inclusive durante o período com emissões de queima de biomassa.

Estes resultados estão de acordo com o encontrado por Sawakuchi et al. (2014), pois os rios também apresentaram diferenças significativas nas emissões das diferentes estações. Uma análise comparando todas as medições feitas durante os níveis altos e baixos dos rios, mostrou emissões

significativamente mais elevadas, aproximadamente 4 vezes maior, durante o período em que os níveis de água dos rios estavam baixos. O fluxo médio para todos os locais de estudo durante este período foi de $65,6 \pm 120,5 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($4,1 \pm 7,53 \text{ mmol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), enquanto que no período de cheia dos rios foi de $14,4 \pm 20,8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($0,9 \pm 1,3 \text{ mmol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), mostrando uma concordância com o resultado encontrado neste estudo para SAN, onde as emissões durante a estação seca são superiores as da estação chuvosa, exceto no ano de 2010, onde elas foram muito próximas.

Tabela 21. Médias dos fluxos de CH_4 para a estação chuvosa e seca

Fluxo ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)		Ano 2010		Ano 2011		Ano 2012		Ano 2013	
		Biogênico	Queima biomassa	Biogênico	Queima biomassa	Biogênico	Queima biomassa	Biogênico	Queima biomassa
ALF	Chuvosa	18,5	0,4	16,2	0,0	16,6	0,3	14,3	0,6
	Seca	7,5	5,2	6,8	3,1	9,0	3,3	2,8	2,3
RBA	Chuvosa	15,8	0,7	11,3	0,1	15,9	0,3	12,6	0,3
	Seca	9,6	1,8	5,1	2,2	8,6	2,3	5,9	2,3
TAB	Chuvosa	18,7	0,5	12,3	0,0	21,4	0,1	-	-
	Seca	9,8	1,2	8,1	1,0	6,8	0,4	-	-
SAN	Chuvosa	56,1	2,1	43,3	0,8	46,4	1,8	48,8	2,0
	Seca	54,1	7,8	44,1	6,4	52,3	6,3	56,9	6,4

Nas emissões difusivas o CH_4 passa pela coluna da água e se difunde gradativamente pela superfície da água para a atmosfera, quando há diferença de concentração entre estes dois meios, podendo ser oxidado dentro da coluna d'água. Por ser pouco solúvel na água, o principal processo de emissão de CH_4 é ebulitivo (DEVOL *et al.*, 1990), pois as bolhas, que contém principalmente CH_4 , passam pela coluna d'água, impedindo a oxidação deste gás. A produção e o acúmulo de CH_4 é maior quando há estratificação da coluna da água com formação de um hipolímnio (camada inferior que fica junto ao fundo do rio) anóxico (BALLESTER e SANTOS, 2001). Além disso, o aumento da profundidade gera um aumento da pressão hidrostática, que faz com que os gases fiquem estocados sob a coluna da água. Quando o nível da água diminui, a emissão de CH_4 se torna maior, pois o CH_4 estocado no hipolímnio, com a diminuição da pressão hidrostática, formam bolhas que serão liberadas para a coluna d'água e posteriormente para a superfície (ROSENQVIST *et al.*, 2002).

Estudos mostraram, que em regiões tropicais, o principal mecanismo de emissão de CH_4 é a ebulição, responsável por 85% da emissão de CH_4 ao longo do Rio Amazonas (DEVOL *et al.*, 1988), por 69% da emissão do lago Calado na Amazônia (ENGLE e MELACK, 2000) e por 65% da emissão da planície do rio Orinoco (SMITH *et al.*, 2000). A decomposição da matéria orgânica dos solos e sedimentos em áreas alagáveis é uma das maiores fontes de CH_4 , sendo o sedimento o principal sítio de formação do CH_4 , responsável por 80% do total emitido de áreas alagáveis da Amazônia (DEVOL *et al.*, 1994).

Neste presente estudo, outro aspecto importante, que foi observado com os resultados, foi a ocorrência de uma variabilidade interanual, pois foram observadas maiores emissões de CH_4 durante os anos com menor precipitação (anos de seca). Com o objetivo de tentar compreender quais fatores poderiam estar relacionados com esta variabilidade, realizou-se uma análise da correlação entre os fluxos biogênicos calculados neste estudo, com os dados de precipitação e temperatura (Tabela 22).

Tabela 22. Correlação entre os fluxos de CH_4 (para o ano todo) com a precipitação e temperatura

ALF	Fluxo Biogênico	
	R	p
Precipitação	0,65	< 0,0001
Temperatura	-0,33	0,0224
RBA	Fluxo Biogênico	
	R	p
Precipitação	0,52	0,0002
Temperatura	-0,43	0,0028
TAB	Fluxo Biogênico	
	R	p
Precipitação	0,38	0,0318
Temperatura	-0,49	0,0049
SAN	Fluxo Biogênico	
	R	p
Precipitação	0,09	0,5339
Temperatura	0,22	0,1358

Observa-se que RBA, TAB e ALF apresentaram correlações significantes entre o fluxo biogênico e a precipitação, e correlações negativas, também significantes com a temperatura. Esta correlação inversa com a

temperatura esta relacionada ao período da estação seca, pois neste período as temperaturas estão maiores, mas o fluxo biogênico diminui. Apenas a região de SAN apresentou um comportamento diferente, pois não apresentou correlações significantes entre o fluxo biogênico e estes dois fatores.

Como foram observadas variações maiores nos fluxos anuais nas emissões do início do ano, decidiu-se por correlacionar estes fatores para o período entre janeiro à julho, a fim de desconsiderar também, outras possíveis influências durante a estação seca (Tabela 23).

Em ALF e RBA, o fluxo biogênico apresentou uma maior correlação com a precipitação, com valores de p inferior a 0,05, indicando que esta correlação possui significância. Em relação a temperatura, ALF apresentou uma correlação entre o fluxo biogênico e a temperatura de 0,39 com um valor de p inferior a 0,05, indicando que esta correlação é significativa. A região de RBA também apresentou correlação do fluxo biogênico com a temperatura, de 0,35 porém seu valor de p foi superior a 0,05.

Para a região de SAN o fluxo biogênico apresentou correlações com a precipitação e a temperatura, sendo que a temperatura apresentou uma correlação maior e mais significativa com o fluxo, do que a precipitação. Conforme observado na Tabela 10, esta região é a que apresenta o maior número de habitantes por área, bem como de animais. De acordo com o estudo realizado por Chimeli *et al.* (2011), esta região apresentou uma maior correlação com o setor de serviços. Neste caso, serviços indicam atividades urbanas, e quanto maior a densidade demográfica, maiores são as emissões humanas, como rejeitos (esgoto, lixo, etc), queima de combustíveis fósseis e biomassa, etc.

A região de TAB, diferentemente das demais áreas, não apresentou correlação entre o fluxo biogênico com a precipitação e a temperatura. A área de TAB representa regiões não só abaixo do equador, mas também acima deste. Sendo assim, no período considerado estação chuvosa abaixo do equador, será estação seca nas regiões acima deste (Figura 46). Por esta razão, não observamos correlação entre os resultados obtidos e a precipitação e temperatura, uma vez que, uma parcela da área de influência estaria na estação seca, enquanto a outra estaria na estação chuvosa.

Tabela 23. Correlação entre os fluxos de CH₄ (de janeiro a julho) com a precipitação e temperatura

ALF	Fluxo Biogênico	
	R	p
Precipitação	0,65	0,0002
Temperatura	0,39	0,0419
RBA	R	
	p	
Precipitação	0,65	0,0002
Temperatura	0,35	0,0704
TAB	R	
	p	
Precipitação	0,05	0,8419
Temperatura	0,05	0,8353
SAN	R	
	p	
Precipitação	0,37	0,0513
Temperatura	0,52	0,0046

Com base nestes resultados, para estimar uma correlação das emissões de CH₄ durante a estação chuvosa e o período de transição para a estação seca, para a área da Bacia Amazônica, utilizou-se os valores de fluxo, precipitação e temperatura das 3 regiões juntas de ALF, RBA e SAN. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 24, onde observa-se que o fluxo biogênico apresentou maior correlação com a temperatura, em comparação com a precipitação (para o período entre janeiro e julho), e ambas as correlações são significantes. Considerando que a maior emissão é a ebullitiva, e que quanto maior a temperatura, maior será o escape das bolhas pelos sedimentos e coluna d'água.

Tabela 24. Correlação entre os fluxos biogênicos de CH₄ com a precipitação e temperatura para a Amazônia

Correlação	R	p
Fluxo Bio x Precipitação	0,33	0,0021
Fluxo Bio x Temperatura	0,48	<0,0001

5.10 Perfis verticais com medidas até aproximadamente 7,5 km de altura

Os perfis verticais de avião entre 2010 e 2013 foram realizados até 4,4 km de altura, por ser a altura máxima que os aviões utilizados na amostragem

alcançam, sem o uso de oxigênio para os pilotos. Considera-se neste estudo, que devido as medidas ocorrerem apenas até esta altura, poderia existir uma perda no fluxo que não estaria sendo computada em nossos cálculos.

Como teste desta possível fonte de erro, utilizou-se medidas iniciadas no ano de 2013, com avião pressurizado que realizou coletas até aproximadamente 7,5 km de altura na região de RBA. Esta região foi escolhida por ser a que melhor representa a Amazônia, dentre os quatro locais de estudo, e também por ter potencialmente a maior possibilidade de erro por perda de informação acima da altura de 4,4 km de coleta, uma vez que as massas de ar viajam em média 7 dias. Dentro deste longo período as massas de ar poderiam ter encontrado nuvens que promoveriam a convecção. Promovendo assim trocas de massas de ar acima e abaixo das nuvens.

A Figura 74 apresenta uma comparação dos perfis verticais, realizados no ano de 2013, até 4,4 km de altura com os perfis realizados até aproximadamente 7,5 km de altura. Estes resultados preliminares do ano de 2013 indicam que não há grandes variações nas concentrações de CH_4 nas altitudes acima de 4,4 km, sugerindo assim que a metodologia adotada neste estudo não gera perdas significantes nos fluxos calculados na região da Amazônia.

Figura 74. Comparação dos perfis verticais até 4,4 km e até 7,5 km realizados em RBA.

5.11 Estimativa do fluxo de CH₄ para a área da Bacia Amazônica

Com o objetivo de estimar o fluxo para a área total da Bacia Amazônica, calculou-se a média dos fluxos de CH₄, para cada perfil realizado, em cada local de estudo de 2010-2013 (Figura 75). Foi calculada uma média ponderada, onde cada local estudado teve sua respectiva área de influência considerada no cálculo. Observa-se uma sazonalidade ao longo do ano, indicando uma maior emissão pela Amazônia entre janeiro a março, e posteriormente um novo aumento entre os meses de agosto a dezembro, período de ocorrência da queima de biomassa e grande emissão biogênica na região de SAN.

Observando a variabilidade dos resultados encontrados para cada um dos quatro locais de estudo, e a variabilidade anual já demonstrada neste estudo, os resultados indicam a necessidade de um estudo com uma série temporal mais longa, para que a média represente as variações nas emissões de região para região e, também a variabilidade interanual. Estes quatro anos de estudo já indicam a Amazônia como uma fonte de CH₄ o ano todo, e a necessidade de estudos complementares para compreender os fatores que influenciam na variabilidade interanual e regional observada.

Figura 75. Fluxos de CH₄ calculados para cada perfil realizado nos quatro locais de estudo e a média ponderada destes fluxos onde as barras representam o desvio padrão.

A Tabela 25 apresenta uma estimativa da emissão para a totalidade da Bacia Amazônica Sulamericana (6,82 milhões de km²) e para a Bacia Amazônica Brasileira (4,20 milhões de km²), onde se calculou a média ponderada dos fluxos totais, obtidos nos quatro locais de estudo.

Observa-se que surpreendentemente, foi encontrada uma variabilidade anual nos balanços de emissão muito acentuada. 2010 apresentou uma emissão 35% maior que 2011. Pelo fato de 2011 ter sido um ano de precipitação elevada, seria esperado que este ano apresenta-se maior emissão que 2010, que foi um ano seco. As razões desta maior emissão foram discutidas nas páginas 101 e 102, onde foi apontado que quando o nível da água diminui, a emissão de CH₄ se torna maior, pois o CH₄ estocado no fundo do corpo d'água torna-se menos solúvel com a diminuição da pressão hidrostática, formando assim bolhas que são liberadas para a coluna d'água e posteriormente para a superfície (ROSENQVIST *et al.*, 2002). Este processo, aliado ao aumento da temperatura, explicaria a maior emissão encontrada nos anos mais secos. Este fenômeno se repetiu entre os anos de 2012 (seco) e 2013 (chuvoso), confirmando a hipótese levantada.

Comparando o resultado para a Bacia Amazônica Brasileira, encontrado neste estudo, com os dados de emissão brasileira de CH₄ do relatório do MCTI (2013) para o ano de 2010, para todo o território nacional, de 16,8 Tg CH₄, e com a base de dados EDGAR para o ano de 2008, de 20,1 Tg CH₄. Observa-se que a taxa de emissão obtida para a região da Bacia é maior do que o estimado, para todo o território nacional, por estas duas fontes. Cabe ressaltar que ambas as estimativas, do MCTI e da base de dados do EDGAR, consideram apenas as emissões provenientes de fontes antropogênicas, não considerando, portanto as emissões naturais. Comparando os resultados deste estudo com ambos relatórios, obteve-se um resultado de emissão em torno de 50% superior as emissões antropogênicas brasileiras, segundo relatório do MCTI e 25% segundo a base de dados EDGAR.

Existem poucos estudos anteriores que forneçam explicitamente à estimativa das emissões de CH₄ para a escala da Bacia Amazônica, com os quais possam ser comparados os resultados obtidos neste estudo, na maioria dos casos são utilizadas diferentes áreas nas estimativas para a área da Bacia Amazônica. Para efeito de comparação com os resultados obtidos neste estudo,

os valores encontrados na literatura foram convertidos para a área da Amazônia Brasileira, utilizada neste estudo, de 4,2 milhões de km² (Tabela 26).

Tabela 25. Estimativa da emissão de CH₄ para a área da Amazônia Sulamericana (6,82 milhões de km²) e Brasileira (4,20 milhões de km²)

Ano	Amazônia Sulamericana (Tg CH ₄ ano ⁻¹)	Amazônia Brasileira (Tg CH ₄ ano ⁻¹)
2010	46,6	28,7
2011	34,5	21,2
2012	44,8	27,6
2013	39,5	24,3
Média	41,3	25,4

No estudo de Bergamaschi *et al.* (2009), que fez uma estimativa para toda a Bacia Amazônica, utilizando dados de satélite e modelamento, observa-se um resultado muito próximo ao encontrado neste estudo utilizando uma técnica de medida em escala regional, com perfis verticais. Cabe ressaltar que Melack *et al.* (2004) que utilizou um método completamente diferente de cálculo (*bottom-up*) encontrou um resultado muito parecido com o neste estudo (*top-down*).

As estimativas encontradas neste estudo estão dentro da variabilidade encontrada na literatura, e as variações nestes resultados devem considerar a realização de medidas em diferentes regiões, que podem não representar a área total da Bacia, pois como visto neste estudo há uma variação regional nas emissões na Amazônia.

Tabela 26. Estimativas das emissões de CH₄ encontradas na literatura para a área da Amazônia Brasileira, recalculando para a área de 4,20 milhões de km²

Estimativa para a área da Amazônia Brasileira de 4,2 milhões de km ² (Tg CH ₄ ano ⁻¹)	
Melack <i>et al.</i> , 2004	24,4
Carmo <i>et al.</i> , 2006	3,4 – 31,9
Miller <i>et al.</i> , 2007	41,2
Frankenberg <i>et al.</i> , 2008	9,6
Bergamaschi <i>et al.</i> , 2009	23,0
Média neste estudo	25,4

Segundo o IPCC (2013) a emissão total global *top-down* de CH₄ para a atmosfera foi de $556 \pm 56 \text{ Tg ano}^{-1}$, considerando as fontes naturais ($202 \pm 35 \text{ Tg ano}^{-1}$) e antropogênicas ($354 \pm 45 \text{ Tg ano}^{-1}$). As estimativas da emissão de CH₄ para a área da Amazônia Brasileira deste estudo representam de 4% desta emissão total global e ao considerarmos a Amazônia Sulamericana sua representação é de 7%. Segundo Kirschke *et al.* (2013) a emissão total global *top-down* de CH₄ para a atmosfera foi de 548 (526 - 569) Tg ano⁻¹, as estimativas para a área da Amazônia Brasileira deste estudo representam de 4% desta emissão total global e ao considerarmos a Amazônia Sulamericana sua representação é de 8%. E considerando as emissão total global *bottom-up*, de 678 (542-852) Tg ano⁻¹, as estimativas para a área da Amazônia Brasileira deste estudo representam de 5% desta emissão total global e ao considerarmos a Amazônia Sulamericana sua representação é de 6%.

As emissões provenientes da queima de biomassa para a área da Amazônia Brasileira variaram entre 1,7 e 2,8 Tg CH₄ ano⁻¹, representando entre 8 e 10% da emissão total desta região. As emissões consideradas neste estudo como biogênicas para a Amazônia Brasileira variaram entre 19,6 e 25,9 Tg CH₄ ano⁻¹, representando entre 90 e 92% da emissão total desta região, onde são considerados os processos como emissões de corpos d'água (áreas alagadas, lagos, rios, lagoas, igarapés, etc), decomposição de matéria orgânica em geral, fermentação entérica, decomposição de rejeitos agropecuários, cultivo de arroz, etc.

Foi realizado um levantamento com os dados encontrados no Censo Brasileiro do IBGE para estimar a grandeza das várias fontes de emissão de CH₄, inclusive separando deste total, quanto seria antropogênico. Observa-se na Tabela 27 a emissão estimada, para cada área de estudo, proveniente dos rebanhos animais, considerando as emissões por fermentação entérica e pelo manejo dos dejetos, e as emissões do cultivo de arroz.

As emissões por fermentação entérica e do manejo dos dejetos animais, representam em média 19% da emissão biogênica de CH₄ estimada neste estudo para cada local. Observa-se que a região de ALF apresenta a maior influência (28% na média) das emissões geradas pelos rebanhos de animais. Esta região também apresentou a maior influência em relação as emissões geradas pelo cultivo de arroz, 1,2 a 1,5% do total estimado de emissão biogênica,

enquanto que para os demais locais de estudo esta influência é desprezível. A região de SAN foi o local que apresentou a menor influência nas emissões de CH₄ oriundas dos rebanhos animais dentre todos os locais de estudo, indicando que estas fontes não são responsáveis pela alta emissão de CH₄ observada nesta região.

De acordo com o MCTI (2013) as emissões por mudança no uso da terra e florestas, para a Amazônia, no ano de 2010 emitiu 0,671 Tg CH₄ ano⁻¹.

Tabela 27. Estimativa das emissões de CH₄ provenientes dos rebanhos animais, considerando emissões por fermentação entérica e manejo de dejetos, e proveniente do cultivo de arroz (entre parênteses quanto representa do fluxo Biogênico de cada região em %)

Emissão dos rebanhos animais por fermentação entérica e manejo de dejetos (Tg CH₄ ano⁻¹)				
Anos	ALF	RBA	SAN	TAB
2010	2,741 (26%)	4,187 (18%)	1,847 (7%)	2,889 (17%)
2011	2,818 (31%)	4,299 (26%)	1,873 (9%)	2,976 (26%)
2012	2,764 (28%)	4,254 (19%)	1,817 (8%)	2,935 (15%)
Média	2,774 (28%)	4,246 (21%)	1,845 (8%)	2,933 (19%)

Emissão das plantações de arroz (Tg CH₄ ano⁻¹)				
Anos	ALF	RBA	SAN	TAB
2010	0,144 (1,4%)	0,002 (0,0%)	0,001 (0,0%)	0,001 (0,0%)
2011	0,140 (1,5%)	0,002 (0,0%)	0,001 (0,0%)	0,001 (0,0%)
2012	0,124 (1,2%)	0,001 (0,0%)	0,001 (0,0%)	0,001 (0,0%)
Média	0,136 (1,4%)	0,002 (0,0%)	0,001 (0,0%)	0,001 (0,0%)

5.12 Contribuição da Bacia Amazônica no aumento da concentração global

Estudos recentes apontam que o aumento de emissões tropicais de CH₄, deve-se a um aumento da precipitação em áreas alagadas. Durante 2007 e 2008 observou-se aumento da concentração global de CH₄ após uma década de concentração estável sem registro de crescimento. Uma explicação provável para este aumento foi um episódio extremo de La Niña nestes 2 anos. Porém, as razões para este incremento ainda não são completamente compreendidas e há uma incerteza com relação à continuidade deste aumento neste ritmo (DLUGOKENCKY *et al.*, 2009; WMO, 2014; NISBET *et al.*, 2014). Este

crescimento continuou nos anos seguintes, como pode ser observado na Figura 9. Outros fatores também influenciam este aumento como o derretimento de geleiras, que expõe um solo de conteúdo com muita matéria orgânica e assim tem-se um acréscimo nas fontes de emissão, como mostra a Figura 7 que aponta uma maior concentração em áreas do extremo norte. Além disto, o aumento de temperatura também favorece as emissões de CH_4 . Este mesmo aumento de temperatura eleva a precipitação em regiões de monção, e assim aumenta-se as áreas alagadas (KITOH *et al.*, 2013).

O LQA vem realizando medidas de CH_4 na região de SAN desde o ano 2000, totalizando 13 anos de medidas. Entre dezembro de 2000 e dezembro de 2013 foram realizados 194 perfis verticais nesta região. A Figura 76a apresenta uma série temporal de todos os perfis realizados em SAN, com a concentração média acima de 3,8 km (representando o topo do perfil) e a concentração média inferior a 1,5 km, que representam a parte abaixo da camada limite planetária, que representa as emissões da superfície. Observa-se um aumento das concentrações em SAN, em 2007, tanto nas concentrações médias acima de 3,8 km e abaixo de 1,5 km. Comparando os resultados acima de 3,8 km com as séries temporais de ASC e RPB, aqui representando as concentrações no HS e no HN, respectivamente, as concentrações do topo do perfil em SAN seguem o aumento das concentrações globais, desde 2007.

Comparando-se a média das concentrações de SAN abaixo de 1,5 km, entre 2000 e 2006, com a média das concentrações a partir de 2007, observa-se que nesta região (que representa o leste da Amazônia) houve um aumento das concentrações desde 2007, apresentando maior variabilidade que entre os anos de 2000-2006, quando as concentrações estavam estáveis, como as concentrações globais.

Para confirmar se a hipótese de que este novo aumento das concentrações globais de CH_4 a partir de 2007, deve-se ao aumento das emissões de áreas alagadas durante o período de La Niña em áreas tropicais, produziu-se a Figura 76b. Foram analisados os fluxos de CH_4 , calculados a partir dos perfis de avião nesta localidade, e calculadas as médias anuais. Estes resultados mostraram que, desde meados de 2007, as emissões aumentaram na Amazônia, mostrando um máximo em 2008, e nos anos de 2009 e 2010 ainda apresentaram emissões superiores, porém gradativamente menores. A partir de

2011 o aumento apresentado é de menor magnitude que na fase anterior (2007-2010), mostrando um aumento discreto, em torno de 1,7 Tg CH_4 por ano, nestes 3 últimos anos.

Figura 76. a) Séries temporais de CH_4 de ASC (linha preta), RPB (linha cinza) e a concentração média acima de 3,8 km (círculos vermelhos) e abaixo de 1,5 km (losangos verdes) em SAN. b) Série temporal do fluxo de CH_4 , entre 2000 e 2013 (triângulos pretos), e os círculos verdes representam a média anual. As barras vermelhas representam os períodos de El Niño e as barras azuis representam os períodos de La Niña.

Analisando a série temporal da média do perfil vertical subtraída do BKG, Figura 77, pode ser observado o aumento das concentrações em SAN desde 2007, passando por um máximo em 2008 e diminuindo até 2010. Este comportamento está em concordância com os fluxos médios anuais calculados

para o período estudado, mostrando que o processo que influenciou o aumento de emissão na Amazônia entre 2007 e 2010, já não apresenta o mesmo efeito após este período. Na Figura 76b, observa-se que no período de 2007 a 2009 ocorreram dois períodos consecutivos de La Niña, que poderiam justificar o aumento de emissão, no entanto, no período de 2010 a 2012 também observamos dois eventos de La Niña consecutivos mas sem o aumento de emissão na mesma magnitude do período anterior. Isto mostra que deve ter ocorrido um processo adicional no período anterior.

Observando-se a média global de CH_4 e as médias anuais dos perfis verticais subtraídos do BKG fica claro uma mudança de comportamento a partir de 2009. Enquanto as concentrações na Amazônia mostraram que voltaram no patamar anterior ao de 2007, a média global apresenta um aumento sistemático de 5 ppb ao ano. Isto mostra que a Amazônia pode ter contribuído com o aumento mundial em 2007/2008, porém a partir de 2009 já não se observa mais esta contribuição.

Figura 77. Série temporal das médias de cada perfil menos o BKG (círculo preto) e as médias anuais das concentrações menos o BKG (círculo azul). Média anual da concentração global (triângulos vermelhos), dados obtidos dos boletins anuais de GEE da GAW/WMO de 2004 a 2013.

6 CONCLUSÕES

Os quatro anos de estudo mostraram que a Amazônia atua como uma importante fonte de CH_4 , com uma emissão de $25,4 \text{ Tg ano}^{-1}$ (4% - 5% da emissão global) considerando a área da Amazônia Brasileira, e $41,3 \text{ Tg ano}^{-1}$ (6% - 8% da emissão global) considerando a área da Amazônia Sulamericana. As emissões na Bacia Amazônica apresentaram variações regionais e também anuais.

Os resultados mostraram que os anos com maiores emissões foram os anos de seca (2010 e 2012). A emissão pela queima de biomassa não foi significativa nas regiões de estudo, enquanto as emissões por fermentação entérica e manejo dos dejetos animais foram significativas na maioria das regiões de estudo, mostrando que os processos responsáveis por esta maior emissão em anos mais secos são biogênicos. Estes resultados sugerem que as estimativas das fontes CH_4 e os processos que influenciam estas emissões ainda não são bem compreendidos, evidenciando a necessidade de maiores estudos para elucidar os processos que influenciam as emissões de CH_4 .

Os resultados obtidos ressaltam ainda a importância da realização de estudos em escala regional para esclarecer o comportamento de toda a Bacia Amazônica. E a importância de estudos de longa duração, pois como pode ser observado, há uma variação significativa nas emissões a cada ano. Os estudos de longa duração tanto ajudarão no melhor entendimento a respeito das fontes de CH_4 e suas variabilidades, como também para que a média de uma longa série temporal possa representar o comportamento da Bacia com confiabilidade.

Os 13 anos de estudo realizados em SAN, evidenciam que a Amazônia contribuiu com o aumento da emissão global durante os anos de 2007 e 2008, porém a partir de 2009 as emissões voltaram a diminuir em relação ao aumento global. Estes resultados são uma evidência de que estudos de longo tempo elucidam importantes processos e permitem uma análise de maior compreensão sobre quais fatores podem influenciar a emissão de CH_4 nesta região.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir estão apresentadas algumas sugestões para continuidade do estudo de CH₄ na Amazônia.

- Estudar mais detalhadamente como os fatores climáticos, como a precipitação e a temperatura, podem contribuir para a sazonalidade observada nos fluxos de CH₄ encontrados nos quatro locais de estudo.
- Aumentar o número de anos de estudo nas regiões da Bacia Amazônica para ter uma melhor representatividade da variabilidade interanual da emissão de CH₄ na Amazônia.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, C.D. ***Essentials of Meteorology: An invitation to the Atmosphere***. 3.ed. Canadá: Brooks/Cole Thomson Learning, 2000.
- ANDREAE, M.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. ***Global Biogeochemical Cycles***, v. 0, n. 0, p. 1-12, **2001**.
- ARAGÃO, L.E.O.C.; YADVINDER, M.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. ***Philosophical transactions of the Royal Society B***, v. 363, p. 1779-1785, **2008**.
- ARAGÃO, L.E.O.C., POULTER, B., BARLOW, J.B., ANDERSON, L.O., MALHI, Y., SAATCHI, S., PHILLIPS, O.L., GLOOR, E.. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. ***Biological Reviews***, 2014.
- BAIRD, C. ***Química Ambiental***. 2.ed. São Paulo: Bookman, 2002.
- BALLESTER, M.V.R.; SANTOS, J.E. Biogenic Gases in Tropical Floodplain River. ***Brazilian Archives of Biology and Technology***, v. 44, n. 2, p. 141–147, **2001**.
- BARRY, R., & CHORLEY, R. ***Atmosfera, tempo e clima***. 9 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BASSO, L.S. ***Estudo da Emissão de Metano da Bacia Amazônica utilizando Perfis Verticais com Avião***. 2011. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- BEKKI, S.; LAW, K.; PYLE, J. Effects of ozone depletion on atmospheric CH₄ and CO concentrations. ***Nature***, v. 371, p. 595-597, **1994**.
- BERGAMASCHI, P.; FRANKENBERG, C.; MEIRINK, J.F.; KROL, M.; VILLANI, M.G.; HOUWELING, S.; DENTENER, F.; DLUGOKENCKY, E. J., MILLER, J.B.; GATTI, L.V.; ENGEL, A.; LEVIN, I. Inverse modeling of global and regional CH₄ emissions using SCIAMACHY satellite retrievals, ***Journal of Geophysical Research***, v. 114, (D22301), **2009**.
- BLOOM, A., PALMER, P., FRASER, A., & REAY, D. Seasonal variability of tropical wetland CH₄ emissions: the role of the methanogen-available carbon pool. ***Biogeosciences***, v. 9, p. 2821–2830, **2012**.
- BORGES, V.F. ***Determinação da Concentração de Entrada dos Gases de Efeito Estufa na Costa Norte/Nordeste Brasileira***. 2013. Dissertação

- (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2013.
- CARMO, J.; KELLER, M.; DIAS, J.; DE CAMARGO, P.; CRILL, P. A source of methane from upland forests in the Brazilian Amazon. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 4, 2006.
- CAVALCANTI, I., FERREIRA, N., SILVA, M., & DIAS, M. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência - Emissões de Metano no Tratamento e na Disposição de Resíduos**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006.
- CHIMELI, A.; GUILHOTO, J.; GATTI, L., Socio-Economic Drivers of Greenhouse Gas Emissions in the Brazilian Amazon: New Evidence from Santarem, Para. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=1876631> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1876631>, 2011.
- CHOU, W.; WOLFSY, S.; HARRISS, R.; LIN, J.; GERBIG, C.; SACHSE, G. Net fluxes of CO₂ in Amazonia Derived from Aircraft Observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 107 (D22), p. 4614, 2002.
- D'AMELIO, M.T.S.; GATTI, L.V.; MILLER, J.B.; TANS, P. Regional N₂O fluxes in Amazonia derived from aircraft vertical profiles. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, p. 8785-8797, 2009.
- DEVOL, A.H.; RICHEY, J.E.; CLARK, W.A.; KING, S.L.; MARTINELLI, L.A. Methane emissions to the troposphere from the Amazon floodplain. **Journal of Geophysical Research**, v.93, n.D2, p.1583-1592, 1988.
- DEVOL, A.H.; RICHEY, J.E.; FORSBERG, B.R.; MARTINELLI, L.A. Seasonal dynamics in methane emissions from the Amazon River floodplain to the troposphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 16417-16426, 1990.
- DEVOL, A.H.; RICHEY, J.E.; FORSBERG, B.R.; MARTINELLI, L.A. Environmental methane in the Amazon river floodplain. In: W.J. Mitsch (Ed.), Global Wetlands: Old World and New, **Elsevier Science**, p.151-165, 1994.
- DLUGOKENCKY, E.; BRUHWILER, L.; WHITE, J.; EMMONS, L.; NOVELLI, P.; MONTZKA, S.; MASARIE, K.A.; LANG, P.M.; CROTWELL, A.M.; MILLER, J.B.; GATTI, L.V. Observational constraints on recente increases in the atmospheric CH₄ burden. **Geophysical Research Letters**, v. 36, L18803, 2009.
- DLUGOKENCKY, E.; DUTTON, E.; NOVELLI, P.; TANS, P.; MASARIE, K.A.; LANTZ, K.O.; MARDRONICH, S. Changes in the CH₄ and CO growth rates after the eruption of Mt. Pinatubo and their link with changes in tropical

- tropospheric UV flux. **Geophysical Research Letter**, v. 23, p. 2761-2764, **1996**.
- DLUGOKENCKY, E.; WALTER, B.; MASARIE, K.; LANG, P.; KASISCHKE, E. Measurements of an anomalous global methane increase during 1998. **Geophysical Research Letters**, v. 28, p. 499-502, **2001**.
- DRAHLER, R.; ROLPH, G. **HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)**, 2013. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. Disponível em: <<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>>. Acesso em 20 fev. 2014.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência - Emissões de Metano da Pecuária**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006.
- ENGLE, D.; MELACK, J.M. Methane emissions from an Amazon floodplain lake: Enhanced release during episodic mixing and during falling water. **Biogeochemistry**, v. 51, p. 71-90, **2000**.
- EPA - Environmental Protection Agency. **Methane and Nitrous Oxide Emissions From Natural Sources**. Washington: EPA - Environmental Protection Agency, 2010.
- EDGAR - European Commission, Joint Research Centre (JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL). **Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR, release version 4.0)**. Disponível em: <<http://edgar.jrc.ec.europa.eu>>. Acesso em: 03 mai. 2013.
- FEARNSIDE, P. Hidrelétricas como "fábricas de Metano": o papel dos reservatórios em áreas de floresta tropical na emissão de Gases de Efeito Estufa. **Oecologia Brasilienses**, v. 12, p. 100-115, **2008**.
- FRANKENBERG, C.; BERGAMASCHI, P.; BUTZ, A.; HOUWELING, S.; MEIRINK, J.; NOTHOLT, J.; PETERSEN, A.K.; SCHRIJVER, H.; WARNEKE, T.; ABEN, I. Tropical methane emissions: A revised view from SCIAMACHY onboard ENVISAT. **Geophysical Research Letters**, v. 35, L15811, **2008**.
- GATTI, L.V.; GLOOR, M.; MILLER, J.B.; DOUGHTY, C.E.; MALHI, Y.; DOMINGUES, L.G.; BASSO, L.S.; MARTINEWSKI, A.; CORREIA, C.S.C.; BORGES, V.F.; FREITAS, S.; BRAZ, R.; ANDERSON, L.O.; ROCHA, H.; GRACE, J.; PHILLIPS, O.L.; LLOYD, J.. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. **Nature**, v. 506, p. 76-80, **2014**.
- GATTI, L.V.; MILLER, J.B.; D'AMELIO, M.T.S.; MARTINEWSKI, A.; BASSO, L.S.; GLOOR, M.; WOFSY, S.; TANS, P. Vertical profiles of CO₂ above eastern Amazonia suggest a net carbon flux to the atmosphere and balance biosphere between 2000 and 2009. **Tellus B Chemical and Physical Meteorology**, v. 62, **2010**.

- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Séries Estatísticas e Séries Históricas. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=PPM01&t=efetivo-dos-rebanhos-por-tipo-de-rebanho>>. Acesso em: 4 abr. 2014.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Séries Estatísticas e Séries Históricas. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=p&o=18>>. Acesso em: 4 abr. 2014.
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Banco de dados de queima de biomassa CPTEC/INPE (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueima de biomassa/](http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueima%20de%20biomassa/)>. Acesso em: 17 fev. 2014.
- IPCC *Intergovernmental Panel on Climate Change - **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p., 2013.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. ***Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change.*** eds. Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Marquis, M.; Averyt, K.; Tignor, M.M.B.; Miller Jr, H.L.; Chen, Z. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. ***2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*** Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K. (eds). IGES, Japan, 2006.
- KEPPLER, M.; HAMILTON, J.; BRASS, M.; RÖCKMANN, T. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. ***Nature***, v. 439, n. 7073, **2006**.
- KIRSCHKE, S.; BOUSQUET, P.; CIAIS, P.; SAUNOIS, M.; CANADELL, J.; DLUGOKENCKY, E.; BERGAMASCHI, P.; BERGMANN, D.; BLAKE, D.R.; BRUHWILER, L.; CAMERON-SMITH, P.; CASTALDI, S.; CHEVALLIER, F.; FENG, L.; FRASER, A.; FRASER, P.J.; HEIMANN, M.; HODSON, E.L.; HOUWELING, S.; JOSSE, B.; KRUMMEL, P.B.; LAMARQUE, J.F.; LANGENFELDS, R.L.; QUÉRÉ, C.L.; NAIK, V.; O'DOHERTY, S.; PALMER, P.I.; PISON, I.; PLUMMER, D.; POULTER, B.; PRINN, R.G.; RIGBY, M.; RINGEVAL, B.; SANTINI, M.; SCHMIDT, M.; SHINDELL, D.T.; SIMPSON, I.J.; SPAHNI, R.; STEELE, L.P.; STRODE, S.A.; SUDO, K.; SZOPA, S.; VAN DER WERF, G.R.; VOULGARAKIS, A.; WEELE, M.V.; WEISS, R.F.; WILLIAMS, J.E.; ZENG, G. Three decades of global methane sources and sinks. ***Nature Geoscience***, v. 6, p. 813-823, **2013**.

- KITOH, A.; ENDO, H.; KUMAR, K.K.; CAVALCANTI, I.F.A.; GOSWAMI, P.; ZHOU, T. Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context. ***Journal of Geophysical Research: Atmospheres***, v. 118, p.1–13, 2013.
- MALHI, Y.; MEIR, P.; BROWN, S. Forests, carbon and global climate. ***Philosophical Transactions Royal Society Lond. A***, v. 360, p. 1567-1591, 2002.
- MARENGO, J. ***Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI***. 2º ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2007.
- MATTHEWS, E.; FUNG, I. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. ***Global Biogeochemical Cycles***, p. 61-86, 1987.
- MCGINN, S.M.; FLESCHE, T.K.; HARPER, L.A.; BEAUCHEMIN, K.A. An approach for measuring methane emissions from whole farms. ***Journal of Environmental Quality***. v. 35, p. 14-20, 2006.
- MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. ***Segunda Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima***. Brasília, 2010.
- MCTI, M. ***Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil***. Brasília, 2013.
- MELACK, J.; HESS, L.; GASTIL, M.; FORSBERG, B.; HAMILTON, S.; LIMA, I.; NOVO, M.L.M.E. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. ***Global Change Biology***, v. 10, n. 5, 2004.
- MILLER, J.B.; GATTI, L.V.; D'AMELIO, M.T.S.C.; CROTWELL, A.; DLUGOCKENKY, E.; BAKWIN, P.; ARTAXO, P.; TANS, P. Airborne measurements indicate large methane emissions from the eastern Amazon Basin. ***Journal of Geophysical Research***, v. 34, L10809, 2007.
- NISBET, E.G.; DLUGOCKENCKY, E.J.; BOUSQUET, P. Methane on the Rise—Again. ***Science***, v. 343, 2014.
- OLIVIER, J.; BOUWMAN, A.; BERDOWSKI, J.; VELDT, C.; BLOOS, J.; VISSCHEDIJK, A.; VAN DE MAAS, C.W.M.; ZANDWELD, P.Y.J. Sectorial emission inventories of greenhouse gases for 1990 on per country basis as well as on 10 x 10. ***Environmental Science & Policy***, v. 2, p. 241-264, 1999.
- PAZINATO, J. ***Isolamento e identificação de microrganismos metanogênicos em solos de Terra Preta Antropogênia (TPA) e de Várzea (Gleissolos)***

- da Amazônia Oriental**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ROSENQVIST, A.; FORSBERG, B.R.; PIMENTEL, T.; RAUSTE, Y.A.; RICHEY, J.E. The use of spaceborne radar data to model inundation patterns and trace gas emissions in the central Amazon floodplain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 7, p.1303–1328, **2002**.
- SAWAKUCHI, H.O.; BASTVIKEN, D.; SAWAKUCHI, A.; KRUSCHE, A.V.; BALLESTER, M.V.R.; RICHEY, J.E. Methane emissions from Amazonian Rivers and their contribution to the global methane budget. **Global Change Biology**, doi: 10.1111/gcb.12646, **2014**.
- SALESKA, S.; MILLER, S.; MATROSS, D.; GOULDEN, M.; WOFSY, S.; da ROCHA, H.; CAMARGO, P.B.; CRILL, P.C.; DAUBEL, B.C.; FREITAS, H.C.; HUTYRA, L.; KELLER, M.; KIRCHHOFF, V.; MENTON, M.; MUNGER, J.W.; PYLE, E.H.; RICE, A.H.; SILVA, H. Carbon in Amazon Forests: Unexpected Seasonal Fluxes and Disturbance induced Losses. **Science**, v. 302, p. 1554-1557, **2003**.
- SCHIMIDT, G. **Methane: a scientific journey from obscurity to climate superstardom NAA GISS research features**, 2004. Disponível em: <http://www.giss.nasa.gov/research/features/200409_methane/>. Acesso em 26 mar. 2013.
- SMITH, L.K.; LEWIS, W.M.; CHANTON, J.P.; CRONIN, G.; HAMILTON, S.K. Methane emissions from the Orinoco River floodplain, Venezuela. **Biogeochemistry**, v.51, p.113-140, **2000**.
- SPIVAKOVSKY, C.M.; LOGAN, J.A.; JONES, D.B.A.; FUSCO, A.C.; MONTZKA, S.A.; BALKANSKI, Y.J.; FOREMAN-FOWLER, M.; HOROWITZ, L.W.; BRENNINKMEIJER, C.A.M.; PRATHER, M. J. Three-dimensional climatological distribution of tropospheric OH - Update and evaluation. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. D7, p. 8931-8980, **2000**.
- STEPHENS, G.; LI, J.; WILD, M.; CLAYSON, C.; LOEB, N.; KATO, S.; L'ECUYER, T.; STACKHOUSE JR, P.W.; LEB SOCK, M.; ANDREWS, T. An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. **Nature Geosciences**, v.5, p. 691-696, **2012**.
- SUGIMOTO, A.; WADA, E. Hydrogen isotopic composition of bacterial methane: CO₂/H₂ reduction and acetate fermentation. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. v. 59, n. 7, p. 1329-1337, **1995**.
- TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission. Disponível em <http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly>. Acesso em junho de 2011.
- VIGANO, I. **Aerobic Methane Production from organic matter**. Bergamo, Italia: Ipskamp Drukkers BV, Enschede, 2010.

- WALKO, R.; BAND, L.; BARON, J.; KITTEL, F.; LAMMERS, R.; LEE, T.; OJIMA, D.; PIELKE SR., R.A.; TAYLOR, C.; TAGUE, C.; TREMBACK, C.J.; LUIGIVIDALE, P.. Coupled Atmosphere-Biophysics-Hydrology Models for Environmental Modeling. ***Journal of Applied Meteorology***, v. 39 (6), p. 931-944, **2000**.
- WMO - World Meteorological Organization - Global Atmosphere Watch - World Data Centre for Greenhouse Gases. *WMO WDCGG Data Summary*, n. 38. Japan Meteorological Agency em cooperação com World Meteorological Organization, 2014.
- WMO - World Meteorological Organization - *Greenhouse Gas Bulletin - The state of Greenhouse gases in the atmosphere using global observation through 2012*. n. 9. Acesso em Março de 2014, disponível em <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG_Bulletin_No.8_en.pdf>, 2013.
- WUEBBLES, D.J.; HAYHOE, K. Atmospheric methane and global change. ***Earth Science Reviews***. v. 52, p. 177-210, **2002**.
- YOKELSON, R.; CHRISTIAN, T.; KARL, T.; GUENTHER, A. The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and synthesis of campaign data. ***Atmospheric Chemistry and Physics***, v. 8, p. 3509-3527, **2008**.
- YOKELSON, R.; KARL, T.; ARTAXO, P.; BLAKE, D.; CHRISTIAN, T.; GRIFFITH, D.; GUENTHER, A.; HAO, W.M. The tropical forest and fire emissions experiment: Overview and airborne fire emissions experiment: Overview and airborne fire emission factor measurements. ***Atmospheric Chemistry and Physics***, v. 7, p. 5175-5196, **2007**.