



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA**

**PRODUÇÃO E FLUXO DE METANO EM ÁREA DE FLORESTA  
DE TERRA-FIRME NA FLONA TAPAJÓS**

**ALÍRIO TENÓRIO FURTADO NETO**

**Santarém, Pará  
Setembro 2013**

**ALÍRIO TENÓRIO FURTADO NETO**

**PRODUÇÃO E FLUXO DE METANO EM ÁREA DE FLORESTA  
DE TERRA-FIRME NA FLONA TAPAJÓS**

**ORIENTADOR: DR. JOSÉ MAURO SOUSA DE MOURA  
CO-ORIENTADOR: DR. RODRIGO DA SILVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, junto ao Programa de Pós - Graduação *Stricto Sensu* em Recursos Naturais da Amazônia.

Área de concentração: Estudos e Manejos de Ecossistemas Amazônicos.

**Santarém, Pará  
Setembro, 2013**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema Integrado de Gestão da Informação – SIGI/UFOPA**

---

F992p Furtado Neto, Alírio Tenório  
Produção e fluxo de metano em área de floresta de terra-firma na Flona Tapajós / Alírio Tenório Furtado Neto. – Santarém, 2013.  
xii, 70 f.: il.  
Inclui bibliografias.

Orientador José Mauro Sousa de Moura, Co-orientador Rodrigo da Silva.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia. Santarém, 2013.

1. Ciclo biogeoquímico. 2. Ecossistemas. 3. Floresta Nacional do Tapajós.  
I. Moura, José Mauro Sousa de, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 577.14

---

Bibliotecário - Documentalista: Mayco Ferreira Chaves – CRB/2 1357

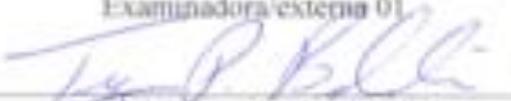
# PRODUÇÃO E FLUXO DE METANO EM ÁREA DE FLORESTA DE TERRA-FIRME NA FLONA TAPAJÓS

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais. Área de concentração: Estudos e Manejos de Ecossistemas Amazônicos. Aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Recursos Naturais da Amazônia, nível de mestrado, da Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, em 16 de setembro de 2013.

Prof. Dr. Luis Reginaldo Ribeiro Rodrigues  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA  
Coordenador (a) do PGRNA

Apresenta à Comissão Examinadora, integrada pelos Professores:

  
Prof. (a). Dr. (a) Luciana Vanni Gatti  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES-IPEN  
Examinadora/externa 01

  
Prof. Dr. Troy Patrick Beldini  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ-UFOPA  
Examinador 02

  
Prof. Dr. (a) Izaura Cristina Nunes Pereira  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ-UFOPA  
Examinadora 03

  
Prof. Dr. José Mauro Sousa de Moura  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ-UFOPA  
Orientador

  
Prof. Dr. Rodrigo da Silva  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ-UFOPA  
Co-orientador

# DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a meus amados pais, João e Maria Lucilene e aos meus queridos irmãos; Francisco, Helaine, Heloisa, Helen, Lilian e a minha querida e eterna namorada Sandriely*

## AGRADECIMENTOS

A meu Deus que é Pai, Filho e Espírito Santo por ser sempre fiel a mim, por ter me dado força nos momentos de dificuldades e sabedoria necessária para a realização deste trabalho. Agradeço a minha mãezinha do céu (N. Sra. Guadalupe e N. Sra. Desatadora dos nós) por sua constante intercessão.

À minha preciosa família em especial aos meus pais João Medeiros Furtado e M. Lucilene Moraes da Costa, por sempre me apoiar com muito carinho, amor e paciência.

À minha querida namorada, Sandriely Furtado, pelas orações dedicadas a mim, pelo carinho, amor, paciência e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Mauro de Sousa Moura, pela confiança depositada, pelas orientações e exigências para que eu correspondesse às atividades estabelecidas e por sua amizade.

Ao prof. Dr. Rodrigo da Silva pela orientação, amizade, descontração e por disponibilizar equipamentos do LaBIA/UFOPA/LBA para a realização de coleta de dados.

Ao Dr. Raimundo Cosme de Oliveira Junior, por suas colaborações e por conceder o Laboratório da EMBRAPA-Santarém para análises das amostras de solo. Agradeço também ao técnico responsável, Cleuton Pereira por me auxiliar nas análises.

Ao Dr. T. Röckmann por disponibilizar o equipamento para a realização das amostras de ar no perfil vertical da floresta.

À Dra. Luciana Vanni Gatti por colaborar nas análises dessas amostras de ar em seu laboratório de Química da Atmosfera do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN e aos técnicos responsáveis por essas análises Marcelo e Luana, meu muito obrigado.

Ao programa LBA/Santarém pelo apoio logístico e a seus funcionários Elisangela, Marduck, Gene, Edilson e Loro.

A CAPES pelo apoio financeiro através da concessão de uma bolsa de mestrado.

Ao programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia-PGRNA/UFOPA.

A todos os colegas do curso de mestrado, em especial a minha amiga Jéssica Ariana.

Aos colegas do T&E/LBA, e em especial aos que participaram durante as idas ao campo: Junior, Rardiles, Miércio, Kleber e Raphael.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

# EPÍGRAFE

*“Deus lhe quer vencedor, a vitória já está  
preparada feito presente que está  
embrulhado e que precisa ser aberto. Não  
perca tempo!”*

*Pe. Fábio de Melo  
Cantor, compositor e poeta.*

FURTADO NETO, Alírio Tenório. **Produção e fluxo de metano em área de floresta de terra-firme na Flona Tapajós**. 2013. 83p. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais. Área de concentração: Estudos e Manejos de Ecossistemas Amazônicos – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Santarém, 2013.

## RESUMO

O metano (CH<sub>4</sub>) é o segundo gás de efeito estufa e sua concentração na atmosfera aumentou 259% desde 1750. Na forma orgânica é o gás traço mais abundante na atmosfera (proporção de mistura ~ 1,8 ppm). Estudos para verificar o balanço regional de CH<sub>4</sub> são realizados com baixa intensidade na Amazônia. Deste modo, conhecer a produção e o fluxo desse gás para atmosfera na região é de grande importância na avaliação da dinâmica do carbono neste ecossistema e para melhor entendimento de seu ciclo biogeoquímico. Este trabalho tem como objetivo quantificar a concentração e fluxo de metano no perfil vertical da floresta, assim como, determinar a emissão de metano na interface solo-atmosfera na FLONA-Tapajós durante o período chuvoso e de estiagem para o ano de 2012. Amostras de ar foram coletadas *in situ* diretamente do solo através do uso de câmaras estáticas e no perfil vertical da floresta através da torre micrometeorológica em quatro alturas diferentes (2m, 16m, 36m e 63m). Posteriormente, as amostras de ar foram analisadas por cromatografia gasosa. A concentração de metano na estratificação vertical da vegetação foi de  $1,866 \pm 0,038$  ppm (média  $\pm$  desvio padrão), ou seja,  $1.866 \pm 38$  ppb e o fluxo foi  $\sim 15,50$  mg de CH<sub>4</sub>.m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e a emissão de metano no solo foi  $0,45 \pm 0,71$  mg de CH<sub>4</sub>.m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Portanto, no período de estudo o ecossistema florestal de terra-firme atuou como fonte de CH<sub>4</sub> para atmosfera.

Palavras-Chave: Ciclo biogeoquímico, Ecossistema florestal, Emissão de Metano.

FURTADO NETO, Alírio Tenório. **Produção e Fluxo de Metano em área de floresta de terra-firme na Flona Tapajós**. 2013. 83p. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais. Área de concentração: Estudos e Manejos de Ecossistemas Amazônicos – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Santarém, 2013.

## ABSTRACT

Methane (CH<sub>4</sub>) is the second greenhouse gas and its concentration in the atmosphere has increased 259% since 1750. In organic form is the most abundant trace gas in the atmosphere (mixing ratio ~ 1.8 ppm). Studies to verify the regional balance of CH<sub>4</sub> are performed with low intensity in the Amazon, so know the contribution of tropical rainforest in the production and flow of this gas to the atmosphere in the region is important to address carbon dynamics in this ecosystem to better conceptualization of balance its biogeochemical cycle. This study aims to quantify the concentration and flow of methane in the vertical profile of the forest, as well as determine the emission of methane in the atmosphere-soil interface FLONA-Tapajós during the rainy season and the dry season for the year 2012. Air samples were collected directly *in situ* soil through the use of static chambers and the vertical profile through forest micrometeorological tower at four different heights (2 m, 16 m, 36 m and 63 m). Subsequently, the air samples were analyzed by gas chromatography. The methane concentration in the vertical profile was  $1.866 \pm 0.038$  ppm (mean  $\pm$  standard deviation), that is  $1866 \pm 38$  ppb and the ecosystem flux was  $\sim 15.50$  mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> and methane soil emission was  $0.45 \pm 0.71$  mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Therefore, for the period of study, the ecosystem of upland forest acted as a source of CH<sub>4</sub> to the atmosphere.

Keywords: Biogeochemical cycle, Forest ecosystem, Methane emission

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>1-CAPÍTULO.....</b>	<b>4</b>
<b>1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
1.1. Efeito estufa e aquecimento global .....	4
1.2. Ciclo do Carbono no ecossistema terrestre .....	10
1.3. Florestas tropicais.....	12
1.4. Produção de metano (CH <sub>4</sub> ).....	13
1.5. Fluxo de CH <sub>4</sub> na interface solo-atmosfera .....	15
1.6. Fluxo de CH <sub>4</sub> no dossel da floresta .....	17
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>19</b>
2.1 Objetivo geral .....	19
2.2 Objetivos específicos .....	19
<b>3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>20</b>
<b>2-CAPÍTULO.....</b>	<b>28</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>30</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>31</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
2.1. Descrição da área de estudo .....	35
2. 2. Regime pluviométrico.....	39
2.3. Amostragem.....	40
2.3.1. Coleta das amostras de CH <sub>4</sub> emitido pelo solo .....	40
2.3.2. Coleta das amostras de CH <sub>4</sub> no perfil vertical da floresta.....	41
2.3.3. Temperatura e umidade do solo .....	44
2.4. Análise das amostras de CH <sub>4</sub> – Cromatografia gasosa .....	44

2.5. Método quantitativo para determinar o fluxo de CH <sub>4</sub> .....	46
2.5.1. Determinação do Fluxo de CH <sub>4</sub> do solo.....	46
2.5.2. Determinação do Fluxo de CH <sub>4</sub> no perfil vertical da floresta .....	48
2.6. Análise dos dados .....	49
2.7. Aspectos éticos e legais .....	49
<b>3. RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
3.1. Concentração e Fluxo de CH <sub>4</sub> do solo .....	50
3.2. Concentração e Fluxo de CH <sub>4</sub> no perfil vertical da floresta .....	56
<b>4. DISCUSSÃO .....</b>	<b>60</b>
4.1. Concentração e Fluxo de CH <sub>4</sub> do solo .....	60
4.2. Concentração e Fluxo de CH <sub>4</sub> no perfil vertical da floresta .....	62
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>6. AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>65</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA CITADA .....</b>	<b>65</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Área ocupada por alguns dos principais biomas terrestres e quantidade de carbono estocada no solo e na serapilheira desses biomas.....	12
Tabela 2 – Estimativa da troca líquida de CH <sub>4</sub> da Bacia Amazônica para a atmosfera. ....	16
Tabela 3– Período de coleta e número (n) de amostragem analisadas em cada estação do ano de 2012 quanto à concentração e fluxo de metano [CH <sub>4</sub> ], na Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T). ....	40
Tabela 4 – Média e os valores de <i>p</i> obtidos na análise de “Kruskal-Wallis” na comparação entre os valores das amostras de CH <sub>4</sub> coletadas ao longo do perfil vertical da floresta entre as estações chuvosa e seca. ....	57
Tabela 5 – A taxa de $d[CH_4] / d[CO_2]$ calculado para dois períodos de amostragem na Floresta Nacional do Tapajós (F. N. T) e o fluxo de CH <sub>4</sub> correspondente ao fluxo de CO <sub>2</sub> do solo. ....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A média global da fração molar de CO <sub>2</sub> (a) e sua taxa de crescimento (b) a partir de 1984-2011. Taxa de crescimento médio anualmente é mostrado por colunas em (b). Fonte: WMO, 2012.....	7
Figura 2 - A média global da fração molar de CH <sub>4</sub> (a) e sua taxa de crescimento (b) 1884-2011. Taxa de crescimento médio anualmente é mostrado por colunas em (b). Fonte: WMO, 2012.....	8
Figura 3 - A média global da fração molar de N <sub>2</sub> O (a) e sua taxa de crescimento (b) 1880-2011. Taxa de crescimento médio anualmente é mostrado por colunas em (b). Fonte: WMO, 2012.....	9
Figura 4 - Ciclo do Carbono. Adaptado de <a href="http://www.fiec.org.br/portaltv2/sites/revista/files/images/ciclo_carbono.jpg">http://www.fiec.org.br/portaltv2/sites/revista/files/images/ciclo_carbono.jpg</a> .....	10
Figura 5 - Localização da Floresta Nacional do Tapajós (PA) adaptada de Espírito Santo, 2003.....	36
Figura 6 - Localização da área de estudo Belterra – PA adaptada de Moura, 2010. Cobertura vegetal: Recorte dos mosaicos de imagens ETM+/Landsat sobreposto aos mapas de elevação do terreno (SRTM). Disponível em: <a href="http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/">http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/</a> .....	37
Figura 7 - Média mensal de precipitação no município de Belterra - PA. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <a href="http://www.inmet.gov.br/sim/sonobra/convenionais.php">www.inmet.gov.br/sim/sonobra/convenionais.php</a> .....	39
Figura 8 - Desenho experimental da distribuição das câmaras nos transectos.....	41
Figura 9 - Panorama esquemático para coleta de metano no perfil vertical da floresta. (a) torre (b) sistema de coleta de ar (c) medidor de umidade, régua (d) câmara de concentração estática e termômetro. ....	42
Figura 10 - Visão geral do sistema de coleta do ar na torre .....	43
Figura 11 - Componentes básicos de um cromatógrafo a gás. Adaptado de Ciola (1985) <i>apud</i> Marani (2007). ....	45
Figura 12 - Concentração (a) e fluxo (b) de CH <sub>4</sub> do solo para os meses de 2012.....	51
Figura 13 - Correlação e regressão da Concentração (a) e Fluxo de Metano (b) do solo com a temperatura do solo a 5 cm de profundidade. ....	52
Figura 14 - Correlação e regressão da Concentração (a) e Fluxo de Metano (b) do solo com a umidade do solo a 12 cm de profundidade.....	53
Figura 15 - Fluxo de Metano do solo com as variáveis ambientais temperatura do solo (a) e umidade do solo (b) para os meses de 2012.....	55
Figura 16 - Concentração de CH <sub>4</sub> no perfil vertical da floresta durante as estações chuvosa e seca. ....	56
Figura 17 - Medidas de CH <sub>4</sub> em diferentes alturas durante a estação chuvosa (a) e seca (b) .....	58
Figura 18 - Proporção de mistura de CH <sub>4</sub> em relação ao CO <sub>2</sub> para todos os perfis. ....	59

# 1. INTRODUÇÃO GERAL

A temperatura da superfície global<sup>1</sup> elevou-se em torno de 0,74 (0,56 a 0,92)°C no período de 1906 a 2005. A causa mais provável para esse aumento seria a crescente concentração de gases de efeito estufa como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso presente na atmosfera retendo mais radiação solar refletida pela Terra (IPCC, 2007).

A Organização Meteorológica Mundial (WMO) em 2012 lançou o boletim a respeito do comportamento dos principais gases de efeito estufa na atmosfera com base em observações globais até 2011. Dentre eles, o metano (CH<sub>4</sub>) é o segundo gás de efeito estufa mais importante no planeta e sua concentração aumentou 259% desde 1750 (~700 ppb). Em 2011, a média global da fração molar de CH<sub>4</sub> atingiu um novo recorde de 1813 ± 2 ppb um aumento de 5 ppb em relação ao ano de 2010 e nos últimos 10 anos obteve um acréscimo de 3,2 ppb.ano<sup>-1</sup>. No período de 1999 a 2006 o CH<sub>4</sub> permaneceu estável na atmosfera e a partir de 2007 voltou a crescer a uma taxa de 5 ppb/ano. Esse gás é um forte absorvedor de luz infravermelha na região espectral de 7,66 μm (Dickinson e Cicerone, 1986), por isso, o potencial de aquecimento do CH<sub>4</sub> na atmosfera é alto, sendo 21 vezes maior que o CO<sub>2</sub> para um cenário de 100 anos e sua forçante radiativa é de 48 Wm<sup>-2</sup> representa aproximadamente 18% <sup>[2]</sup> da média global dos gases de efeito estufa de vida longa. A durabilidade do CH<sub>4</sub> na atmosfera é estimado em 12 anos (IPCC, 2007).

Segundo Cerri *et al.*, 2007 o Brasil se classifica como um dos principais emissores de gases de efeito estufa devido às emissões relacionadas pela queima de biomassa decorrentes da conversão de suas florestas em pastagens ou áreas agrícolas. No entanto, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) em 2013 divulgaram as emissões antrópicas de três importantes gases de efeito estufa no Brasil (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O), sendo que no setor de Uso da Terra e Florestas estes gases apresentaram reduções em suas emissões de - 76,7%, - 65,2%, - 65,2%, respectivamente para um período de 2005 a 2010. Porém, outros setores como energia, processos industriais, agropecuária, e tratamentos de resíduos permanecem com saldo positivo (MCTI, 2013).

O país apresenta grande parte de seu território coberta por florestas tropicais, especialmente a região amazônica, alguns pesquisadores acreditam que essas áreas poderiam

---

<sup>[1]</sup> A média da temperatura do ar próximo à superfície sobre a terra e a temperatura da superfície do mar.

<sup>[2]</sup> Esta percentagem é calculada como a contribuição relativa do gás (es) mencionado para o aumento da radiação de escala global provocada por todos os gases de efeito estufa de vida longa desde 1750.

absorver o carbono da atmosfera e aloca-lo na forma de biomassa vegetal. As florestas da Amazônia estariam acumulando uma enorme quantidade de carbono, até 6 toneladas de carbono por hectare (Grace *et al.*, 1995; Malhi *et al.*, 1998; Araújo *et al.*, 2002; Carswell *et al.*, 2002).

Segundo Saleska *et al.*, (2003) existe uma falha na indicação do sequestro de carbono em florestas da Amazônia, mostrando balanços neutros ou até mesmo positivos, ou seja, as florestas poderiam também atuar como fontes de carbono para a atmosfera. Lehmann (2007) acredita que a forma de armazenamento de carbono no solo é melhor do que nas plantas e árvores, pois após o crescimento da biomassa, há também o aumento de matéria orgânica na superfície do solo. Esse material em estágio de decomposição na interface solo-atmosfera emite carbono para atmosfera.

Fatores como a localização das florestas estudadas, as metodologias empregadas e as diferentes condições ambientais como umidade e nutrientes do solo, precipitação, relevo e cobertura de nuvens são tidos como fatores inerentes ao ecossistema influenciando a ciclagem do carbono em florestas tropicais (Ometto, 2005).

Estudos para verificar o balanço regional de metano são realizados com baixa intensidade na Amazônia e com precisões duvidosas, uma vez que, um estudo divulgado em meio científico foi bastante contestado pela comunidade científica, segundo o qual a floresta amazônica responde por mais de 20% das emissões de CH<sub>4</sub> do mundo. Entretanto, essa estimativa de emissão do CH<sub>4</sub> pela floresta Amazônica pode ser bem menor, devido às limitações do experimento durante as observações de campo (Machado, 2011).

Por isso, faz-se necessário descobrir a origem desse metano, uma vez que, suas fontes podem ser desconhecidas ou que suas emissões são maiores do que se esperava (Juste, 2007).

Carmo *et al.*, (2006) usando um modelo que combina medidas diretas da concentração de metano em perfis verticais de florestas de terra-firme da Amazônia e medidas de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, estimaram que a emissão líquida de CH<sub>4</sub> varia entre 2 a 21 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, ou seja, a estimativa superior é uma ordem de grandeza maior que a estimativa inferior, o que mostra que as incertezas sobre os balanços de CH<sub>4</sub> são muito altas e que precisam ser minimizadas.

Deste modo, conhecer a contribuição das florestas tropicais na produção e fluxo de metano para atmosfera na região é de grande importância na avaliação da dinâmica do carbono no ecossistema amazônico para melhor entendimento do balanço de seu ciclo biogeoquímico. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo quantificar a concentração e

fluxo de metano no perfil vertical da floresta, assim como, determinar a emissão de metano na interface solo-atmosfera em uma área de floresta de terra-firme na FLONA Tapajós.

# 1-CAPÍTULO

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1. Efeito estufa e aquecimento global

O aquecimento da atmosfera se deve ao efeito estufa natural no qual mantém a temperatura média do planeta em torno de 15°C permitindo a existência de vida na Terra (ESCOBAR, 2008). A ação desse fenômeno é em função da radiação solar parcial refletida pela superfície terrestre na forma de radiação infravermelha a qual é absorvida por gases de efeito estufa como: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e vapor de água presentes na atmosfera. Esses gases têm a capacidade de reter calor em comprimento de onda longo na baixa atmosfera resultando no aquecimento do planeta.

O efeito estufa natural é representado por 80% de vapor de água em altas concentrações na atmosfera, os outros 20% são devido aos gases presentes na atmosfera (Escobar, 2008). As emissões naturais de CO<sub>2</sub> para atmosfera correspondem a 120 Pg de C ano<sup>-1</sup> da biosfera terrestre, 90 Pg de C ano<sup>-1</sup> dos oceanos e taxas de CO<sub>2</sub> emitidos por vulcanismos de 0,02 a 0,05 Pg de C ano<sup>-1</sup>, lembrando que, um peta grama Pg = 10<sup>15</sup> gramas ou 1 bilhão de tonelada (Juárez, 2004).

As fontes naturais de CH<sub>4</sub> correspondem a 30%: pantanal (100-200 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>, 1 Tg = 10<sup>12</sup>g), cupins (10-50 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>), oceano (5-20 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>), água doce (1-25 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>), e hidrato de CH<sub>4</sub> (0-5 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>) (Mosier *et al.*, 2004). A concentração de N<sub>2</sub>O na atmosfera resultante de atividades bióticas e antropogênicas é aproximadamente 4 Tg N<sub>2</sub>O – N ano<sup>-1</sup> (Mosier *et al.*, 2004). A agricultura é a principal fonte de N<sub>2</sub>O contribuindo com aproximadamente dois terços das emissões naturais (Bouwman *et al.*, 1993).

As mudanças no uso da terra e as atividades agrícolas são as principais causas da troca de Gases de Efeito Estufa (GEE) como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O os quais são gases que contribuem para o aquecimento do planeta (Smith *et al.*, 2003).

O N<sub>2</sub>O é um gás que contribui para o efeito estufa e participa diretamente da destruição da camada de ozônio na estratosfera. A atmosfera concentra aproximadamente 0,3

ppm<sup>312</sup> de N<sub>2</sub>O com aumento anual de 0,25%. Sua concentração atualmente é 13 vezes maior em relação ao período industrial e seu potencial de aquecimento é 298 vezes maior do que o CO<sub>2</sub> para um cenário de 100 anos (IPCC, 2007). As emissões de N<sub>2</sub>O a partir de solos ocorrem como consequência do processo microbiológico de desnitrificação a partir do nitrogênio mineral e também provém do uso de fertilizantes nitrogenados, da fixação biológica de nitrogênio, da mineralização da matéria orgânica adicionada, da adição ou depósito de dejetos de animais nos solos, da lixiviação de solos e da queima de resíduos agrícolas (Lima, 2002).

A concentração atmosférica global de CH<sub>4</sub> aumentou de um valor pré-industrial de cerca de 715 ppb para 1732 ppb no início da década de 90, sendo de 1774 ppb em 2005, um aumento de 42 ppb nas últimas duas décadas. A concentração atmosférica de metano em 2005 ultrapassa a faixa natural dos últimos 650.000 anos (320 a 790 ppb) (IPCC, 2007). Aproximadamente 70% da produção de CH<sub>4</sub> são de fontes antropogênicas como; carvão mineral, gás natural e indústria pet (70-120 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>), arroz com casca (20-150 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>), fermentação entérica (65-100 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>), resíduos de origem animal (10-30 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>), tratamento de esgoto doméstico (25 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>), grandes áreas de terra (20-70 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>) e queima de biomassa (20-80 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>). As emissões de CH<sub>4</sub> na agricultura tropical contribuem na emissão anual de metano global e as atividades que mais colaboram para o aumento de CH<sub>4</sub> na atmosfera são: arroz com casca, queima de biomassa e fermentação entérica (Mosier *et al.*, 2004).

Em 1800 a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera era de 280 ppm, mas após a Revolução Industrial essa concentração aumentou para 362 ppm. Em 2005 a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> (379 ppm) ultrapassou os valores naturais ao longo dos últimos 650.000 anos (Escobar, 2008). A média calculada para a concentração global de CO<sub>2</sub> atmosférico segundo Hansen (2009) é de 385 ppm. Isso se deve ao uso de combustíveis fósseis, mudanças no uso da terra e decomposição de resíduos (Fernandes, 2008). O IPCC 2007 registra um crescimento de 80% nos últimos 34 anos iniciando em 1970 e finalizando em 2004. Em 2100 o crescimento chegará a 700 ppm caso não haja uma mudança significativa no comportamento da sociedade.

O relatório publicado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2001) afirma que as atividades econômicas e industriais têm provocado alterações na biosfera,

---

<sup>3</sup> ppm (parte por milhão) ou ppb (partes por bilhão, 1 bilhão = 1.000 milhões) é a razão do número de moléculas de gases de efeito estufa em relação ao número total de moléculas de ar seco. Por exemplo, 300 ppm significam 300 moléculas de um gás de efeito estufa por milhão de moléculas de ar seco.

resultando no aumento da concentração desses gases de efeito estufa na atmosfera desde a revolução industrial. Ainda reafirma que as evidências das ações antropogênicas nos últimos 140 anos foram responsáveis pelo aumento da temperatura em 0,6°C. Pesquisas científicas fazem previsões para o aumento da temperatura média do planeta em torno de 2 a 6°C para os próximos cem anos se mantido o ritmo de crescimento das emissões desses gases de efeito estufa, pode gerar sérias consequências para a vida na terra (Cox *et al.*, 2000; IPCC, 2001; IPCC, 2007).

A Organização Meteorológica Mundial (WMO) em 2012 lançou o boletim a respeito do comportamento dos principais gases de efeito estufa na atmosfera com base em observações globais até 2011.

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é o mais importante gás de efeito estufa antropogênico na atmosfera, contribuindo com aproximadamente 64% <sup>[2]</sup> da forçante radioativa. É responsável por 85% do aumento radioativo na última década e 81% ao longo dos últimos cinco anos. O nível pré-industrial de ~280 ppm representou um saldo de fluxos entre a atmosfera, os oceanos e a biosfera. Em 2011 essa concentração chegou a 140% maior em relação ao nível pré-industrial, principalmente por causa das emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis (9,1 ± 0,5 PgC em 2010) e a mudança no uso da terra (0,9 ± 0,7 PgC em 2010, principalmente devido ao desmatamento tropical). O aumento médio do CO<sub>2</sub> na atmosfera referente ao período pré-industrial corresponde a ~55% do CO<sub>2</sub> emitido pela queima de combustíveis fósseis, com os restantes ~45% removido pelos oceanos e a biosfera terrestre. A parte do CO<sub>2</sub> emitido pela queima de combustível fóssil, que permanece na atmosfera varia Inter anualmente sem uma tendência mundial confirmada. A média global da fração molar de CO<sub>2</sub> em 2011 foi de 390,9 ± 0,1 ppm (Figura 1). O aumento anual de 2,0 ppm é mais elevada do que a taxa de crescimento médio durante os anos de 1990 (~1,5 ppm.ano<sup>-1</sup>) e é o mesmo que a taxa de crescimento médio durante a última década (~2,0 ppm.ano<sup>-1</sup>).

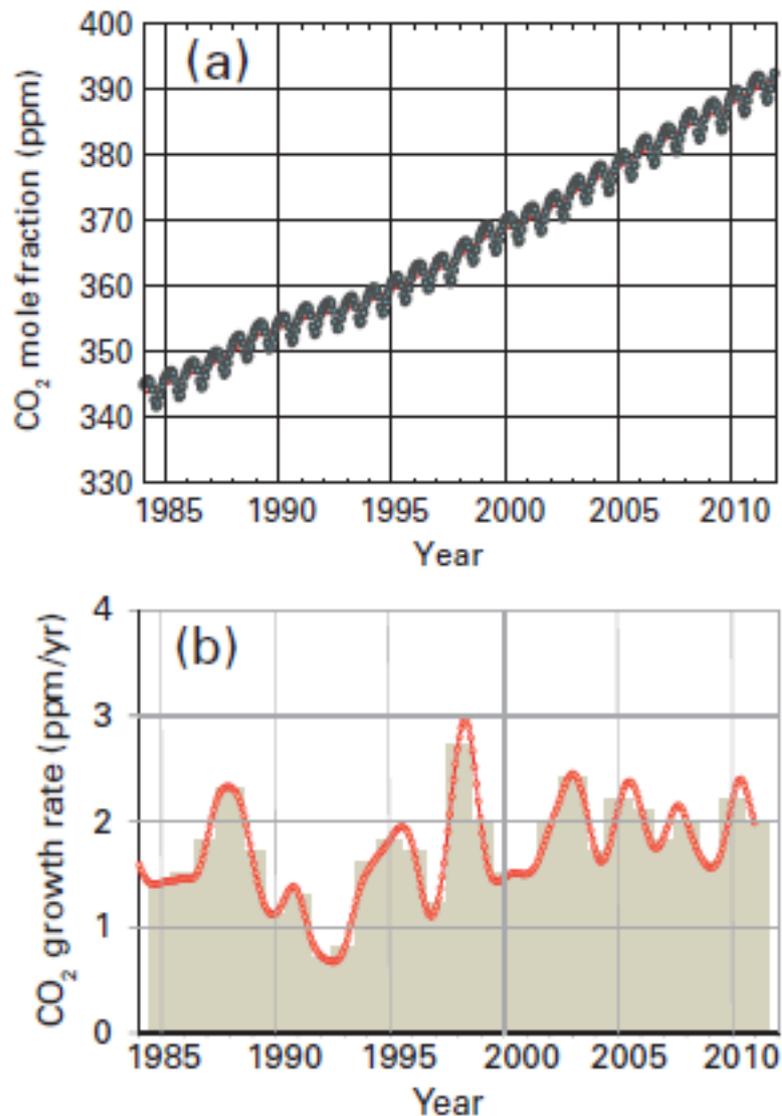


Figura 1 - A média global da fração molar de CO<sub>2</sub> (a) e sua taxa de crescimento (b) a partir de 1984-2011. Taxa de crescimento médio anualmente é mostrado por colunas em (b). Fonte: WMO, 2012.

O metano (CH<sub>4</sub>) é o segundo gás de efeito estufa mais importante e sua concentração aumentou 259% desde 1750 (~700 ppb). Em 2011, a média global da fração molar de CH<sub>4</sub> atingiu um novo recorde de  $1813 \pm 2$  ppb um aumento de 5 ppb em relação ao ano de 2010 e nos últimos 10 anos obteve um acréscimo de  $3,2 \text{ ppb}\cdot\text{ano}^{-1}$ . No período de 1999 a 2006 o CH<sub>4</sub> permaneceu estável na atmosfera e a partir de 2007 voltou a crescer a uma taxa de  $5 \text{ ppb}\cdot\text{ano}^{-1}$  (Figura 2) (WMO, 2012). Esse gás é um forte absorvedor de luz infravermelha na região espectral de  $7,66 \mu\text{m}$  (Dickinson e Cicerone, 1986), por isso, o potencial de aquecimento do CH<sub>4</sub> na atmosfera é alto, sendo 21 vezes maior que o CO<sub>2</sub> para um cenário de 100 anos e sua forçante radiativa de  $48 \text{ Wm}^{-2}$  representa aproximadamente 18% <sup>[2]</sup> da média total global dos

gases de efeito estufa de vida longa. A durabilidade do  $\text{CH}_4$  na atmosfera é estimado em 12 anos (IPCC, 2007).

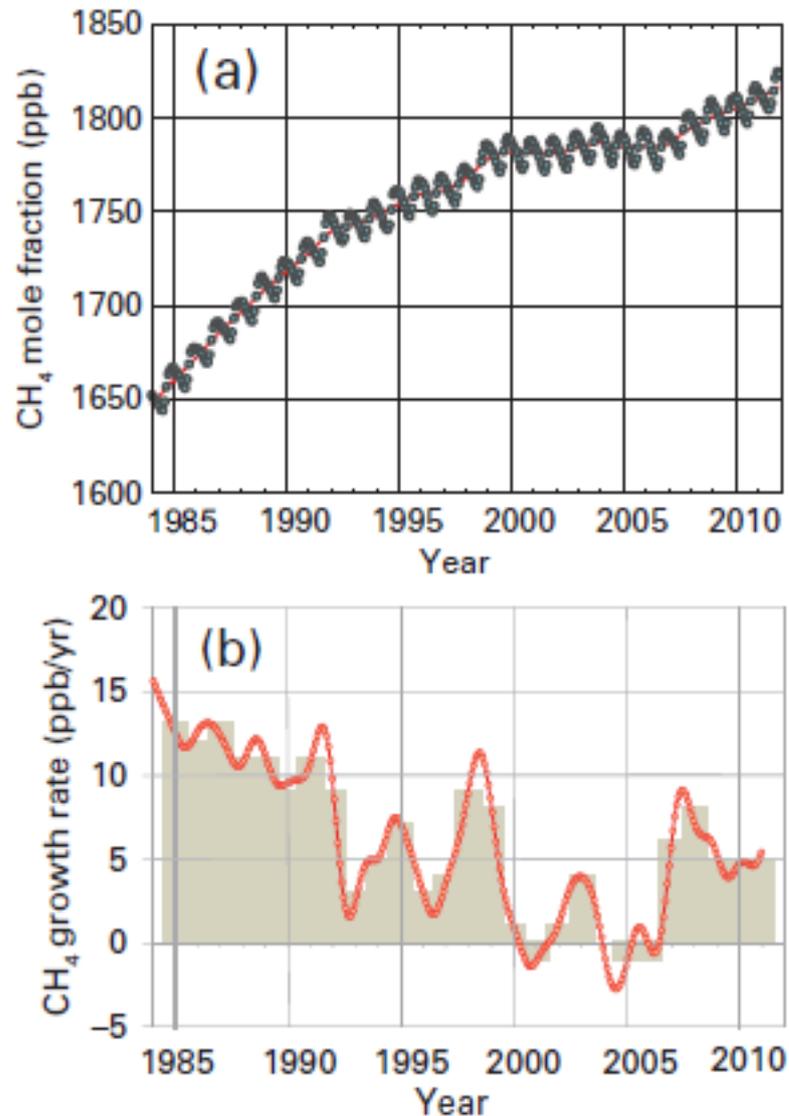


Figura 2 - A média global da fração molar de  $\text{CH}_4$  (a) e sua taxa de crescimento (b) 1884-2011. Taxa de crescimento médio anualmente é mostrado por colunas em (b). Fonte: WMO, 2012.

O Óxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) contribui com aproximadamente 6% <sup>[2]</sup> da forçante radioativa. É o terceiro gás de efeito estufa mais importante. O  $\text{N}_2\text{O}$  é emitido para a atmosfera por condições naturais (cerca de 60%) e por fontes antropogênicas (aproximadamente 40%), incluindo oceanos, solo, queima de biomassa, uso de fertilizantes e vários processos industriais. A média global da fração molar de  $\text{N}_2\text{O}$  em 2011 atingiu  $324,2 \pm 0,1$  ppb, que é 1,0 ppb acima do ano anterior (Figura 3) e 120% do nível pré-industrial (270ppb) é 310 vezes

mais aquecedor que o CO<sub>2</sub>. O aumento anual 2010 – 2011 é o maior do que a taxa de crescimento médio ao longo dos últimos 10 anos (0,78 ppb.ano<sup>-1</sup>) (WMO, 2012).

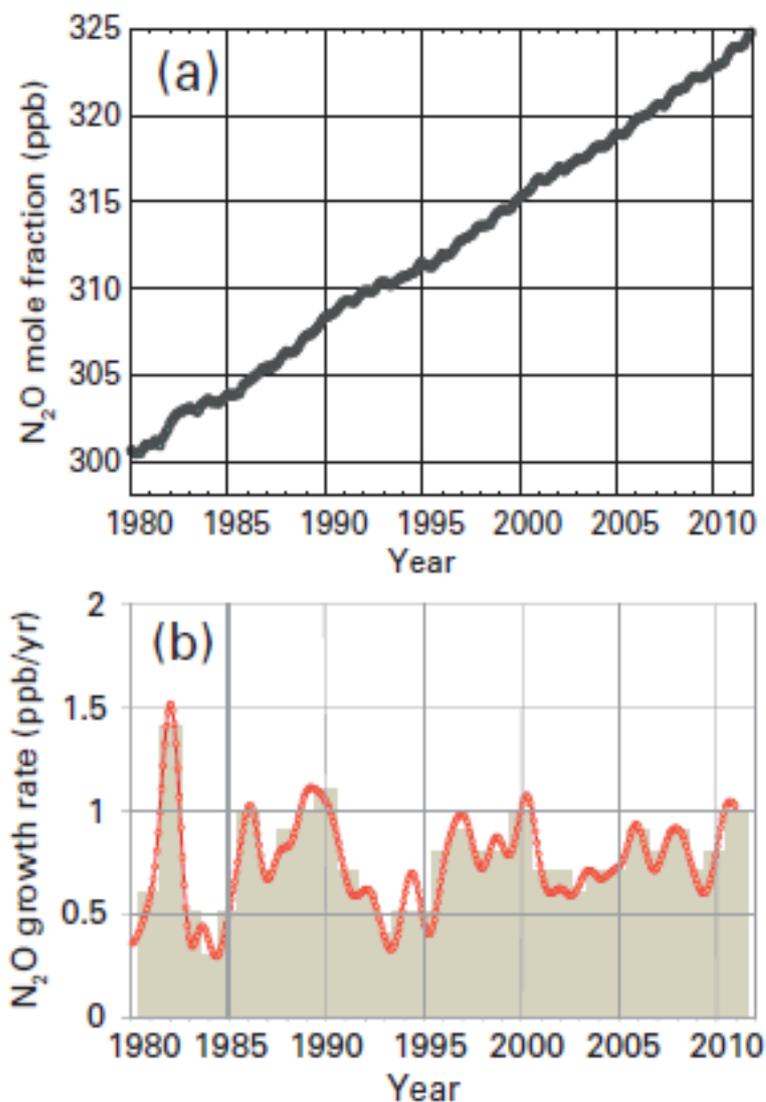


Figura 3 - A média global da fração molar de N<sub>2</sub>O (a) e sua taxa de crescimento (b) 1880-2011. Taxa de crescimento médio anualmente é mostrado por colunas em (b). Fonte: WMO, 2012.

O acréscimo de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O na atmosfera gera um desconforto térmico no planeta mudando o comportamento natural do efeito estufa e conseqüentemente gerando um aquecimento global da Terra.

<sup>[2]</sup> Esta percentagem é calculada como a contribuição relativa do gás (es) mencionado para o aumento da radiação de escala global provocada por todos os gases de efeito estufa de vida longa desde 1750.

## 1.2. Ciclo do Carbono no ecossistema terrestre

Na atmosfera e no continente, o carbono (C) na forma de CO<sub>2</sub> é movimentado por mecanismos naturais. A fotossíntese, a respiração e a dissolução do CO<sub>2</sub> são os processos naturais que tornam esta movimentação um processo cíclico (Figura 4) o qual é denominado como ciclo do C (Coelho, 2005).

Os ciclos biogeoquímicos representam o caminho pelo qual a matéria se movimenta no ambiente, e podem ser descritos em diferentes escalas de tempo e espaço (Fernandes, 2008). Dentre eles, o ciclo do C é decisivo para as interações entre os ciclos, devido, ser o agente principal na fotossíntese e na decomposição da matéria orgânica (Likens, 1981). Há uma preocupação com a ciclagem global de C e o manejo do fluxo entre a atmosfera, oceano e ecossistemas terrestres, por causa do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico (Grace, 2001).

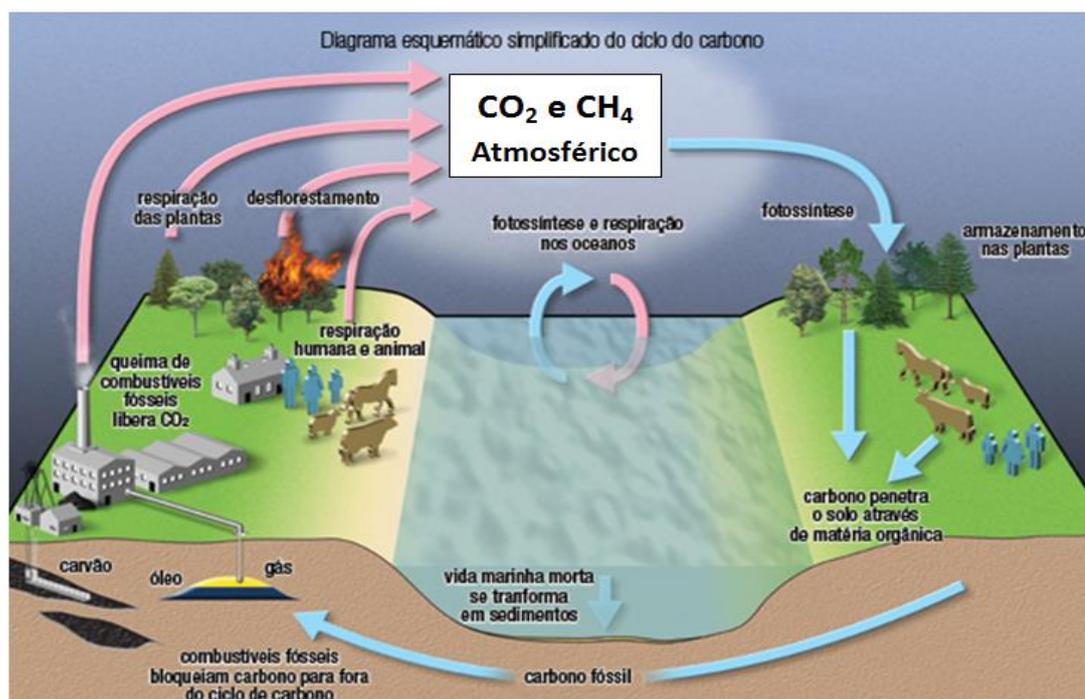


Figura 4 - Ciclo do carbono. Adaptado de

[http://www.fiec.org.br/porta/v2/sites/revista/files/images/ciclo\\_carbono.jpg](http://www.fiec.org.br/porta/v2/sites/revista/files/images/ciclo_carbono.jpg)

A superfície terrestre é um grande reservatório de C, onde a maior parte ( $8,06 \times 10^{22}$ g de C) é contida em rochas sedimentares na forma de carbono e compostos orgânicos. Entretanto, estes reservatórios são de ciclagem extremamente lenta e normalmente não são

levados em consideração no estudo do ciclo global do C, principalmente quando se está interessado nas mudanças climáticas globais de origem antrópica (Coelho, 2005).

Os solos estocam dois ou três vezes mais carbono do que existe na atmosfera (Davidson *et al.*, 2000) e a liberação de carbono dependerá da velocidade de decomposição da matéria orgânica, que é influenciada por características da vegetação e do clima, pelos gradientes de temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> na interface solo-atmosfera, pelas propriedades físicas do solo, e pelas flutuações de pressão do ambiente (Raich e Schlesinger, 1992; Meier *et al.*, 1996).

Nos continentes, são estimados 1.550 Pg de C para os solos de até 1m de profundidade, enquanto que na atmosfera tem-se aproximadamente 750 Pg de C, e para cobertura vegetal em torno de 610 Pg de C (Tonello, 2007). A respiração do solo libera para atmosfera, numa ordem global, 75 bilhões de toneladas de C, sendo a segunda maior fonte desse gás para a atmosfera, depois dos oceanos (IPCC, 2001).

A estocagem de C nos solos agrícolas é uma função do balanço de C, cujas entradas ocorrem na forma de resíduos vegetais ou fertilizantes orgânicos. Por outro lado, as liberações de C são decorrentes da mineralização de resíduos vegetais e da matéria orgânica no solo na forma de CO<sub>2</sub>. Em condições anaeróbicas de solo, essas liberações de C ocorrem na forma de CH<sub>4</sub>. Esta molécula por sinal é a forma mais reduzida do C em função da respiração anaeróbica, com estado de oxidação - 4. Portanto, o ciclo do C, entre os diferentes compartimentos da Terra, é uma sequência de reações de oxirredução (Martinelli *et al.*, 2009). Todas as opções de manejo que aumentam as entradas de matéria orgânica provêm o estoque de C nos solos (Sadowsky *et al.*, 1996).

Nos ecossistemas terrestres, o ciclo de C tem sido alterado pelas atividades humanas como: queima de combustíveis fósseis (gasolina, querosene, óleo diesel, xisto), mudança no uso da terra pelo corte da floresta e queima de biomassa. Essas atividades antrópicas incrementam cerca de 7 Pg de C anual na forma de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Desse total, 3,5 Pg de C ficam na atmosfera e conseqüentemente contribui para o aumento do efeito estufa. O restante é dissolvido no oceano, ou sequestrado pela atividade fotossintética, ficando retido como biomassa viva, ou matéria orgânica do solo (Schlesinger, 1997; Grace, 2001).

### 1.3. Florestas tropicais

As florestas contêm 90% de todo o C na matéria orgânica viva do sistema terrestre. Mais importante ainda é que a maior quantidade de C estocado em florestas encontra-se no Brasil (Martinelli *et al.*, 2009). As florestas tropicais são reconhecidamente os ecossistemas mais produtivos e de maior diversidade de nosso planeta. A Tabela 1 apresenta um panorama global referente à quantidade de carbono na serrapilheira e nos solos de alguns biomas terrestres. A maior fonte de carbono estocado está nos solos de florestas tropicais e a maior quantidade de carbono na serrapilheira está nas florestas boreais. Segundo Martinelli *et al.*, (2009) menores temperaturas levam a uma decomposição menos intensa, estocando mais carbono na serrapilheira.

A floresta amazônica abrange 60% da área de floresta tropical do mundo, é importantíssima para o equilíbrio do C global, armazena em sua biomassa e no solo mais C do que na atmosfera (Dixon *et al.*, 1994).

Tabela 1 - Área ocupada por alguns dos principais biomas terrestres e quantidade de carbono estocada no solo e na serrapilheira desses biomas.

<b>Ecosistema</b>	<b>Área (milhões de km<sup>2</sup>)</b>	<b>C – solo (10<sup>9</sup> t C)</b>	<b>C – serapilheira (10<sup>9</sup> t C)</b>
<b>Rocha gelo e areia</b>	24,0	3,0	0,02
<b>Desertos</b>	18,0	101,0	0,20
<b>Floresta tropical</b>	17,0	255,0	3,60
<b>Savana</b>	15,0	56,0	1,50
<b>Terras cultivadas</b>	14,0	178,0	0,70
<b>Florestas boreais</b>	12,0	179,0	24,0

Fonte: Martinelli *et al.*, 2009.

Os ecossistemas na Amazônia brasileira apresentam uma cobertura vegetal caracterizada por 48,8% de floresta densa e 27,1% de floresta aberta. As savanas amazônicas são em torno de 17,1%, têm-se também os campos naturais e inundados equivalendo a 7% da cobertura vegetal da Amazônia. Segundo Houghton *et al.*, (2000) uma floresta típica da região

Amazônica mantém em média contida na vegetação em torno de 360 toneladas de biomassa vegetal por hectare, o que representa a 170 toneladas por hectare de C.

Os troncos, galhos, raízes das árvores que perfazem os ricos e variados ecossistemas de florestas tropicais armazenam o equivalente a cinquenta anos de emissão de C (aproximadamente 430 bilhões de toneladas de C) e esse C está sendo adicionado na atmosfera por meio do desmatamento, uso inadequado do solo e degradação florestal a taxas variando entre 0,8 e 2,4 bilhões de toneladas por ano (Rayner *et al.*, 1999).

Estudos feitos por meio da técnica de covariância de vórtices turbulentos sugerem que as florestas tropicais da Amazônia formam um substancial sumidouro de C proveniente do CO<sub>2</sub> antropogênico (Grace *et al.*, 1995; Malhi *et al.*, 1998). Entretanto, Saleska *et al.*, (2003) tiveram o primeiro estudo de covariância de vórtices turbulentos em florestas tropicais da Amazônia de antigo crescimento em que falha na indicação do sequestro de C.

Os solos das florestas tropicais têm participação significativa na dinâmica dos processos físicos e químicos da atmosfera, uma vez que, atuam como fonte e sorvedouro de vários gases traços (Keller *et al.*, 1986; Goreau, *et al.*, 1987). Cerca de 2/3 de C que está sendo drenado pelas florestas tropicais pode ser acumulada na matéria orgânica humificada, porém Telles *et al.*, (2003) mostraram que o C nestes solos está praticamente em equilíbrio. Como o solo da Amazônia apresenta um mosaico de superfícies, os estoques de C são extremamente variáveis e pouco se sabe sobre sua dinâmica e tempo de residência em solos tropicais.

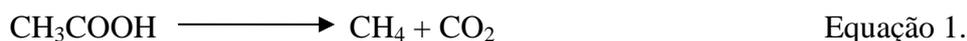
Portanto, o conhecimento do fluxo de gases traços (CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>) do solo e do ecossistema vegetal em áreas de florestas tropicais para a atmosfera é de grande importância na avaliação da dinâmica do C no ecossistema, para um melhor entendimento do balanço do ciclo biogeoquímico do C.

#### **1.4. Produção de metano (CH<sub>4</sub>)**

O metano é produzido em condições de anaerobiose através de bactérias metanogênicas encontradas em áreas alagadas, em ecossistemas sedimentares e no trato digestivo de cupins e de organismos ruminantes. A produção de CH<sub>4</sub> ocorre por meio de duas vias metanogênicas principais: a fermentação do acetato (CH<sub>3</sub>COOH) e a redução do dióxido

de carbono com o hidrogênio como fonte de elétron (CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>) (Martens *et al.*, 1986; Whiticar *et al.*, 1986; Sugimoto e Wada, 1995).

Na fermentação do acetato, a ausência de oxigênio promove a clivagem do ácido acético, em que o metil é reduzido a metano, e o grupo carboxílico é oxidado a gás carbônico (equação 1).



Com a disponibilidade de hidrogênio, as bactérias produzem metano por meio da redução do dióxido de carbono, onde este atua como aceptor do átomo de hidrogênio (equação 2).



Em áreas alagadas bactérias anaeróbicas convertem parcialmente a matéria orgânica em metano. Essa matéria orgânica é degradada por um conjunto de bactérias anaeróbicas que consomem enzimaticamente a celulose e outros compostos orgânicos mais complexos. Os compostos resultantes, como ácidos graxos, são por sua vez degradados por outras bactérias em acetato ou compostos contendo um átomo de carbono, por exemplo, CO<sub>2</sub> ou metanol (CH<sub>3</sub>OH). Ao final desse processo, esse conjunto de bactérias reduz estes compostos a metano. Muitas bactérias metanogênicas podem usar ambas as vias, acetato ou CO<sub>2</sub>, mudando de uma para outra dependendo da disponibilidade do substrato (Marik *et al.*, 2002).

As fontes de CH<sub>4</sub> da biosfera para a atmosfera foram sempre atribuídas aos processos microbianos anaeróbicos em solos úmidos, a cultivos de arroz, a intestinos de cupins e ruminantes, a desperdício humano e agrícola, a queima de biomassa, a mineração de combustível fóssil, e a fontes geológicas incluindo a erupção vulcânica.

Entretanto, o trabalho publicado por Keppler *et al.*, (2006)<sup>4</sup> <sup>3</sup> mostrou ser possível a produção efetiva de CH<sub>4</sub> em laboratório sob em condições aeróbicas a partir de folhas vivas e mortas. Embora, essa taxa de emissão seja pequena, os pesquisadores extrapolaram uma estimativa completa para a emissão anual total de metano global de fontes vivas da vegetação usando a biomassa das folhas para as taxas de emissões em grande escala em condições ensolaradas e noturnas, durante o crescimento da estação e da produtividade primária líquida

---

<sup>4</sup> Emissão de metano a partir de plantas terrestres sob condições aeróbicas.

total para cada bioma. Esta estimativa é de 62 – 236 Tg (1Tg = 10<sup>12</sup>g) de CH<sub>4</sub> por ano, com uma grande contribuição de 46 – 169 Tg CH<sub>4</sub> por ano das florestas tropicais e de pasto, observado algo em torno de 10 – 40 % do conhecimento da fonte de concentração anual de CH<sub>4</sub> (IPPC, 2007).

Além disso, pesquisas realizadas por Viganò *et al.*, (2008) mostraram o efeito da radiação UV e da temperatura elevada na emissão de CH<sub>4</sub> em folhas secas e frescas de mais de 20 espécies de plantas e de componentes estruturais incluindo a pectina, lignina e celulose. Eles demonstraram que a emissão de CH<sub>4</sub> foi linearmente relacionada à irradiância UV e foi quase instantaneamente depois da irradiação, indicando um processo fotoquímico direto. Outros pesquisadores como McLeod *et al.*, (2008) ; Bruhn *et al.*, (2009) também observaram que as emissões de CH<sub>4</sub> eram estimuladas pela radiação UV.

Qaderi e Reid (2009) relataram o efeito da temperatura, da radiação UV-B e do estresse hídrico na emissão de CH<sub>4</sub>. A diferença com relação aos estudos citados anteriormente foi que os raios UV influenciavam na emissão de CH<sub>4</sub> da planta após a interrupção do estresse hídrico. Portanto, observa-se que a irradiação UV, a temperatura elevada pode conduzir a formação de CH<sub>4</sub> na planta, na folhagem, e nos componentes estruturais das plantas.

### **1.5. Fluxo de CH<sub>4</sub> na interface solo-atmosfera**

A bacia amazônica, sozinha representa aproximadamente 4% da emissão anual de CH<sub>4</sub> a nível global originadas de fontes naturais e antropogênicas. Esse potencial de emissão de metano equivale aproximadamente 30 - 40% da estimativa de C acumulado anualmente na biomassa da floresta amazônica em seu estado de clímax (Davidson e Artaxo, 2004).

Davidson e Artaxo (2004) compilaram os resultados apresentados pelo LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera Atmosfera na Amazônia) e de outras estimativas apresentadas na literatura e compararam a importante relação na troca líquida entre a biosfera e a atmosfera de gases de efeito estufa, dentre eles, o CH<sub>4</sub> devido às mudanças na paisagem da floresta e de suas condições naturais (Tabela 2). A emissão de CH<sub>4</sub> é muito menor comparado ao fluxo líquido de CO<sub>2</sub>, mas é um potencial para o aquecimento global na atmosfera por apresentar aproximadamente 23 vezes maior capacidade de absorver e liberar calor do que o dióxido de carbono (Ramaswamy *et al.*, 2001).

Tabela 2 – Estimativa da troca líquida de CH<sub>4</sub> da Bacia Amazônica para a atmosfera.

Fonte/sumidouro	Fluxo anual da Bacia	Referência
<b>Emissão de CH<sub>4</sub> de solos inundados</b>	+ 25 Tg CH <sub>4</sub> - C	Melack <i>et al.</i> , (this issue)
<b>Absorção lenta de CH<sub>4</sub> pelo solo</b>	- 1 a - 3 Tg CH <sub>4</sub> - C	Stuedler <i>et al.</i> , (1996), Verchot <i>et al.</i> , (2000)
<b>Mudança devido à emissão de CH<sub>4</sub> do gado e queima de biomassa.</b>	+ 3 Tg CH <sub>4</sub> - C	Stuedler <i>et al.</i> , (1996)

Valores positivos indicam emissão da biosfera para a atmosfera, e valores negativos indicam absorção do gás atmosférico para a biosfera. **Fonte:** Tabela adapta de Davidson e Artaxo (2004).

Em estudos realizados na Flona Tapajós por Keller *et al.*, (2005) constataram o consumo de CH<sub>4</sub> atmosférico em solos florestais não perturbados pelo corte seletivo de madeira. A média dos fluxos foram em torno de  $-0,3 \pm 0,2$  e  $-0,1 \pm 0,9$  mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> em Latossolo Vermelho para os anos de 2000 e 2001, respectivamente. Já em ARGISSOLO as médias para o mesmo período foram iguais a  $-1,0 \pm 0,2$  e  $-0,9 \pm 0,3$  mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. No entanto, em áreas de forte compactação do solo, especificamente nas trilhas de arraste e no pátio de estocagem, a emissão de CH<sub>4</sub> cresceu significativamente chegando a uma taxa anual de  $531 \pm 419$  e  $98 \pm 41$  mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> para os sítios em Latossolo Vermelho e Argissolo, respectivamente.

Carmo *et al.*, (2007) mostraram que os fluxos de CH<sub>4</sub> foram negativos em todas as áreas amostradas entre os meses de agosto de 2006 a abril de 2007. Sendo que, nas parcelas de floresta submontana apresentaram o maior consumo  $-0,50$  mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e o menor na floresta montana com  $-0,24$  mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. A partir deste resultado concluíram a existência de absorção de metano e não a emissão desse gás para atmosfera em solos de Florestas do bioma Mata Atlântica.

Sousa Neto *et al.*, (2011) estudando a troca de metano em gradientes elevado na Mata Atlântica também constataram o consumo de CH<sub>4</sub> no solo em todas as altitudes com médias anuais de  $-1,0 (\pm 0,2)$ ,  $-1,8 (\pm 0,3)$ , e  $-1,6 (\pm 0,1)$  mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> em 100 m, 400 m, e 1000 m, respectivamente.

Moura (2010) verificando o fluxo de CH<sub>4</sub> do solo na Flona Tapajós observou que maior parte de suas medidas apresentaram fluxos negativos (durante os períodos secos) variando de - 4,69 a 4,00 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> sendo a média amostrada igual a - 1,17 ± 0,28 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, indicando um consumo de CH<sub>4</sub> pelo solo. Entretanto, valores de fluxos positivos foram observados no final da tarde (16hora-local) e na estação úmida. Keller *et al.*, (2005) também encontraram fluxos positivos de CH<sub>4</sub> durante a estação chuvosa.

A saturação do solo favorece o desenvolvimento de bactérias metanogênicas, que por sua vez produzem metano a partir da decomposição da matéria orgânica disponível no solo e na serrapilheira. Os balanços anuais de fluxo de CH<sub>4</sub> do solo na Amazônia apresentam valores negativos, especificamente durante os períodos mais seco. Todavia, os solos de florestas podem torna-se fontes desse gás durante e estação chuvosa, quando os níveis de umidade do solo atingem patamares que favoreçam o crescimento de bactérias anaeróbicas produzindo CH<sub>4</sub> como subproduto da respiração (Moura, 2010).

#### **1.6. Fluxo de CH<sub>4</sub> no dossel da floresta**

Frankenberg *et al.*, (2005) usando dados de satélite da Agência Espacial Europeia constataram que as concentrações de CH<sub>4</sub> para as florestas tropicais foram maiores do que o esperado, o mesmo atribuiu a fontes de zonas úmidas, queima de biomassa, cupins, gado e também incluiu uma fonte de CH<sub>4</sub> até então desconhecidas podendo estar diretamente relacionada as florestas tropicais. Posteriormente, Keppler *et al.*, (2006) sugeriram que suas observações experimentais da emissão de CH<sub>4</sub> pela vegetação em condições aeróbicas poderiam explicar a discrepância observada por Frankenberg *et al.*, (2005).

Bergamaschi *et al.*, (2007) e Schneising *et al.*, (2009) também detectaram uma emissão significativa em florestas tropicais a partir das observações por satélite. Frankenberg *et al.*, (2008) retrabalharam seus dados de CH<sub>4</sub> pois suas medidas para as florestas tropicais poderiam ser influenciadas pela interferência de espectroscopia do vapor d'água, mesmo assim ainda obteve uma emissão substancial de CH<sub>4</sub> das florestas tropicais.

Miller *et al.*, (2007) coletaram amostras de ar em frascos para análise da concentração de CH<sub>4</sub> em perfis verticais com avião a uma altitude de 300 a 4300 m acima do nível do mar em dois sítios localizados na Amazônia Oriental e Central. Os cálculos para emissão de CH<sub>4</sub> nestas florestas apresentaram média de 27 mg de CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, os pesquisadores tentaram interpretar os dados, entretanto, não conseguiram explicar suas fontes, pois poderia estar

relacionada a diversos fatores, dentre eles, a emissão de  $4 \text{ mg de CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  das plantas, segundo Keller *et al.*, (2006) e aproximadamente uma média de  $7 \text{ mg de CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  de emissão desconhecidas no período noturno (Carmo *et al.*, 2006).

Carmo *et al.*, (2006) usando medidas diretas da concentração de  $\text{CH}_4$  a nível local em perfis verticais de florestas de terra-firme da Amazônia e medidas de fluxo de  $\text{CO}_2$  do solo, estimaram que a emissão líquida de  $\text{CH}_4$  varia entre 2 e  $21 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , apresentando uma estimativa de emissão anual variando de 4 e  $38 \text{ Tg CH}_4 \text{ ano}^{-1}$ . Observe que a estimativa superior é uma ordem de grandeza maior que a inferior, mostrando que as incertezas sobre os balanços de  $\text{CH}_4$  são muito altas e que necessitam ser minimizadas. Apesar disso, se considerar somente o menor valor dessa estimativa, a contribuição da Amazônia equivale a aproximadamente 1% das emissões globais de  $\text{CH}_4$ .

Querino *et al.*, (2011) verificaram o fluxo turbulento e o gradiente vertical da razão de mistura do  $\text{CH}_4$  em florestas de terra firme localizada na Reserva Biológica de Cuieiras (aproximadamente 60 Km ao Norte de Manaus, Brasil). Eles observaram um gradiente contínuo de  $\text{CH}_4$  no interior da copa originado a partir do solo, entretanto, não ficou muito claro se há evidência da emissão de  $\text{CH}_4$  aeróbico. Durante o dia a razão de mistura do  $\text{CH}_4$  diminuíram cerca de 3,2 ppb entre os níveis de 2 a 6 m e 4,3 ppb entre 2 e 36 m no perfil vertical da floresta. Durante a noite, a diferença entre os dois primeiros níveis é aproximadamente 3,4 ppb e a diferença aumenta para 9 ppb entre o primeiro e terceiro nível. Os fluxos de  $\text{CH}_4$  são pequenos, mas é observada uma diferença entre os meses, sendo que em cada amanhecer é observado um pico no fluxo em cima do dossel. Durante a tarde e toda a noite o fluxo de  $\text{CH}_4$  foi baixo, mas em média positivos com valores entre  $0,5$  e  $1,6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . O tamanho do pico pela manhã aumentou durante a estação seca (novembro) com fluxo máximo de  $2 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para a estação chuvosa (janeiro, fevereiro e maio) o fluxo chegou a  $4\text{-}10 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

## **2. OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo geral**

Quantificar a concentração e fluxo de metano no perfil vertical da floresta, assim como, determinar a emissão de metano na interface solo-atmosfera em uma área de floresta de terra firme na FLONA Tapajós.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Determinar a variabilidade sazonal da concentração e do fluxo de metano no ecossistema florestal de terra firme.
- Verificar a influência de fatores ambientais (umidade e temperatura do solo) atuando diretamente no comportamento do metano.

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, AC.; NOBRE, A.D.; KRUIJT, B.; ELBERS, J.A.; DALLAROSA, R.; STEFANI, P.; VON RANDOW, C.; MANZI, A.O.; CULF, A.D.; GASH, J.H.C.; VALENTTINI, R.; KABAT, P. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**. Washington, v. 107, n. D20, Sep - Oct, 2002.

BERGAMASCHI, P., FRANKENBERG, C., MEIRINK, J. F., KROL, M., ENTENER, F., WAGNER, T., PLATT, U., KAPLAN, J. O., KORNER, S., HEIMANN, M., DLUGOKENCKY, E. J. AND GOEDE, A. Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: 2. Evaluation based on inverse model simulations, **Journal of Geophysical Research – Atmospheres**, v. 112, n D2, D02304.2007.

BOUWMAN, A. F.; FUNG, I.; MATTHEWS, E.; JOHN, J. Global analysis of the potential for N<sub>2</sub>O production in natural soils. **Global Biogeochemical Cycles**, v.7, n3, p.557-597. 1993.

BRUHN, D., MIKKELSEN, T. N., OBRO, J., WILLATS, W. G. T.; AMBUS, P. Effects of temperature, ultraviolet radiation and pectin methyl esterase on aerobic methane release from plant material, **Plant Biology**, v. 11, p. 43–48. 2009.

CARMO, J.B.; KELLER, M.; DIAS, J.B.; DE CAMARGO, PB.; CRILL, P. A. Source of methane from upland forests in the Brazilian Amazon. **Geophysical Research letters**, Washington. v.33, n.4, feb. 2006.

CARMO, J. B.; NETO SOUSA, E. R.; KELLER, M. M.; GRILO, S. C.; MARTINELLI, L. A. Fluxos de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em floresta tropical de mata atlântica do Estado de São Paulo. In: VII CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 2007. **Anais**, Caxambu: Sociedade de ecologia do Brasil,. p. 1-2. 2007.

CARSWELL, F.E.; COSTA, AL.; PALHETA, M.; MALHI, Y.; MEIR, P.; COSTA, J.D.R.; RUIVO, M.D.; LEAL, L.D.M.; COSTA, J.M.N.; CLEMENT, R.J.; GRACE, J. Seasonality in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O flux at na eastern Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v. 107, n.D20, Sep-Oct. 2002.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. **Agricultura e aquecimento global**. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, n.1, p. 40-44, jan./abr. 2007.

CHAMBERS, J. Q., E. S. TRIBUZI, L. C. TOLEDO, B. F. CRISPIM, N. HIGUCHI,

J. SANTOS, A. C. ARAUJO, B. KRUIJT, NOBRE, A. D. AND TRUMBORE, S. E. Respiration from a tropical forest ecosystem: Partitioning of sources and low carbon use efficiency, **Ecol. Appl.**, 14, suppl., S72–S88. 2004.

COELHO, M. M. Estudo da respiração do solo em florestas de transição no sudoeste da Amazônia. 2005. **Dissertação** (Mestrado em Física e Meio ambiente)-Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

COSTA, D. H. M.; SILVA, J.N.M.; CARVALHO, J.O.P. Crescimento de árvores em uma área de terra firme na floresta nacional do Tapajós após a colheita de madeira. **Revista de Ciência Agrária**, Belém, n. 50, p. 63-76, jul.- dez. 2008.

COX, P.M. ; BETTS, R. A.; JONES, C. D.; SPALL, S. A. ; OTTERDELL, I. J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climatic model. **Nature**, v.108, p.184-187. 2000.

DAVIDSON, E.A.; ARTAXO, P. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: results of the Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment. **Global Change Biologic**, Oxford. v. 10, n.5, p.519-529, may. 2004.

DAVIDSON, E. A.; TRUMBORE, S. E.; AMUNDSON, R. Biogeochemistry. Soil warming and organic carbon. **Nature**, London, v. 408, n. 6814, p. 789-790, dec. 2000.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, I. J. Carbon pools and flux of global Forest ecosystems, **Science**, New York, v. 263, p. 185-190. 1994.

ESCOBAR, L. F. Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo em solos do planalto médio do Rio Grande do Sul. 2008. **Dissertação** (Mestrado em Ciências do Rurais)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ESPÍRITO SANTO, F.D.B. Caracterização e mapeamento da vegetação da região da Floresta Nacional do Tapajós através de dados óticos, radar e inventários florestais. 2003. **Dissertação** (Mestrado em Sensoriamento Remoto)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

FERNANDES, E. B. Emissão de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, e N<sub>2</sub>O em solos sob diferentes Cultivos na Região do Cerrado. 2008. **Tese** (Doutorado em Ecologia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

FRANKENBERG, C., MEIRINK, J. F., VAN WEELE, M., PLATT, U.; AGNER, T. Assessing methane emissions from global space-borne observations. **Science**, v. 308, n. 5724, p.1010–1014. 2005.

FRANKENBERG, C., BERGAMASCHI, P., BUTZ, A., HOUWELING, S., MEIRINK, J. F., NOTHOLT, J., PETERSEN, A. K., SCHRIJVER, H., WARNEKE, T. AND ABEN, I. Tropical methane emissions: A revised view from SCIAMACHY onboard ENVISAT, **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 15, p.15811. 2008.

GOREAU, T. J.; DE MELLO, W.Z. Effect of deforestation on source and sinks of atmospheric carbon dioxide, nitrous oxidade and methane from some Amazonian biota and soil. In: **WORKSHOP ON BIOGEOCHEMISTRY OF TROPICAL RAIN FORESTS: PROBLEM FOR RESEARCH ESP AND WWF**, 1987, Piracicaba: FEALQ, p. 104-130. 1987.

GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.; NOBRE, C.; MONCIEF, J.; MASSHEDER, J.; MAHLI, Y.; WRIGHT, I.; GASH, J. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rainforest in south-west Amazonia. **Science**, v. 270, p. 778-780. 1995.

GRACE, J., MALHI, LLOYD, J., MCINTYRE, J. MIRANDA, A., MEIER, P. MIRANDA, H. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain Forest, **Global Change Biology**, v.2, p.209-217. 2001.

HANSEN, J.; SATO,; M.; KHARECHA, P.; BEERLING, D.; BERNER, R.; MASSON-DELMONTTE, V.; PAGANI, M.; RAYMO; ROYER, D.L.;ZACHOS, J. Target Atmospheric CO2: Where Should Humanity Aim? **The Open Atmospheric Science journal**, v. 2, issn: 1874-2823, p. 217-231, 2009.

HOUGHTON, R.; SKOLE, D.; NOBRE, C. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, London, v. 403, p. 301- 304. 2000.

**IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climatic Change: the scientific basis. HOUGHTON J. T.; DING, Y. ; GRIGGS, D. J. ; NOGUER, M.; VANDER LINDEN P. J. ; DAI, X. ; MASKELL, K. ; JOHNSON, C. A (Eds). Cambridge University press, Cambridge, p. 881. 2001.

**IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change). The physical Science basis: contribution on working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change. Paris, 2007.

JUÁREZ, R. I. N. Variabilidade climática regional e controle da vegetação no sudeste: um estudo de observações sobre cerrado e cana-de-açúcar e modelagem numérica da atmosfera. **Tese** (Doutorado em Ciências Atmosféricas)-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

KELLER, M., KAPLAN, W. A.; WOFYSY, S.C. Emissions of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from tropical forest soils. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington, v. 91, n.11, p.1791-1802, Oct. 1986.

KELLER, M.; VARNER, R.; DIAS, J.D.; SILVA, H.; CRILL, P.; DE OLIVEIRA, R.C.J.; ASNER, G.P. Soil-atmosphere Exchange of Nitrous Oxide, Nitric Oxide, Methane, and Carbon Dioxide in logged and undisturbed forest in the Tapajós National Forest, Brazil. **Earth Interactions**, Boston, v.9, n.23, p. 1-28, 1 of Nov. 2005.

KEPPLER, F., HAMILTON, J. T. G., BRASS, M. AND RÖCKMANN, T. 'Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions', **Nature**, v.439, n. 7073, p.187–191. 2006.

LEHMANN, J. A handful of carbon. **Nature**, v. 447, p. 143-144, 10 of May. 2007

LIKENS, G.E.; BORMANN, F.H.; JOHNSON, N. M. Some Perspectives of the Major Biogeochemical Cycles **Edited by Gene E. Likens**, SCOP, p. 100. 1981.

LIMA, M. A. Agropecuária brasileira e as mudanças climáticas globais: caracterização do problema, oportunidades e desafios. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v.19, n. 3, p.451-472, p.454 set.- dez. 2002.

MARIK, T.; FISCHER, H.; CONEN, F.; SMITH, K. Seasonal variations in stable carbon and hydrogen isotope ratios in methane from rice fields. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v. 16, n.4, p.41-52, Oct., 2002.

MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M. G. P.; CULF, A., SCOTT S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain Forest. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, Washington, v. 103, p. 31593-31612. 1998.

JUSTE, M. Amazônia emite 23% do metano mundial. Disponível em: <  
<http://www.tudosobreplantas.com.br/blog/index.php/2007/05/30/amazonia-emite-23-do-metano-mundial>> Acesso em 30 mai. 2011.

MACHADO, A.- Emissão de metano da Amazônia. Disponível em: [http://www.istoeamazonia.com.br/index.php?option=com\\_content&task=view&id=667&Itemid=2](http://www.istoeamazonia.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=667&Itemid=2)>. Acesso em: 30 mai.2011.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretária de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento – SEPED. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima – CGMC. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**, 2013.

MARINI, L. Estudo da emissão de metano no Pantanal Sul-Matogrossense. 2007. **Tese** (Doutorado em Geofísica Espacial)-Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

MARTENS, C.S., BLAIR, N.E.; GREEN, C.D.; DES MARAIS, D.J. Seasonal variations in the stable carbon isotopic signature of biogenic methane in a coastal sediment. **Science**, Washington. v. 233, n. 4770, p. 1300-1303, Sep., 1986.

MARTINELLI, A. L.; OMETTO, J.P.H.B.; FERRAZ, E. S.; VICTORIA, R.L.; CARMAGO, P. B de; MOREIRA, M.Z. **Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 144p. (Ciclos Biogeoquímicos, 2). Bibliografia: p. 19-33. ISBN 9978-85-86238-85-7

MCLEOD, A. R., FRY, S. C., LOAKE, G. J., MESSENGER, D. J., REAY, D. S., SMITH, K. A.; YUN, B. W. 'Ultraviolet radiation drives methane emissions from terrestrial plant pectins', **New Phytologist**, v. 180, n. 1, p124–132. 2008.

MEIER, P.; GRACE, J.; MIRANDA, A.; LLOYD, J. Soil respiration in Amazônia and in cerrado in central Brazil In: GASH, J. C. H.; NOBRE, C. A.; J. M. ROBERTS, J. M.; VICTÓRIA, R. Amazonian deforestation and climate. **Chichester**: John Wiley, p. 319-330. 1996.

MILLER, J. B., GATTI, L. V., D'AMELIO, M. T. S., CROTWELL, A. M., DLUGOKENCKY, E. J., BAKWIN, P., ARTAXO, P.; TANS, P. P. Airborne measurements indicate large methane emissions from the eastern Amazon basin, **Geophysical Research Letters**, v.34, n. 10, L10809. (2007).

MOSIER, A.; WASSMANN, R.; VERCHOT, L.; VERCHOT L.; KING J.; e PALM.; C. Methane and Nitrogen Oxide Fluxes in Tropical Agricultural Soils: Sources, Sinks and Mechanisms. **Environment, Development and Sustainability** v.6: p.11-49, 2004.

MOURA, J.M. S. Fontes de metano em florestas tropicais da Amazônia: Análise da composição isotópica e uso de técnicas indiretas para determinação de balanços gasosos nesses ecossistemas. 2010. **Tese** (Doutorado em Ciências)-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

NEPSTAD, D. C.; MOUTINHO, P.; DIAS, M.B.; DAVIDSON, E.; CARDIONOT, G.; MARKEWITZ, D.; FIGUEIREDO, R.; VIANNA, N.; CHAMBERS, J.; RAY, D.; GUERREIROS, J.B.; LEFEBVRE, P.; STERNBERG, L.; MOREIRA, M.; BARROS, L.; ISHIDA, F.Y.; TOHLVER, I.; BELK, E.; KALIF, K.; SCHWALBE, K. The effects of partial through fall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. **Jornal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington, v.107, n.D20, Oct, 2002.

OMETTO, J.P.H.B.; NOBRE, A.D.; DA ROCHA, H.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L.A. Amazonia and the modern carbono cycle: lessons learned. **Oecologia**, New York, v. 143, n.4, p. 483-500, May, 2005.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, LR.; SENTELHAS, P.C. AGROMETEOROLOGIA – Fundamentos e aplicações práticas. **Editores agropecuária**, Guaíba, v.1, 478p. 2002.

QADERI, M. M. e REID, D. M. ‘Methane emissions from six crop species exposed to three components of global change: Temperature, ultraviolet-B radiation and water stress’, **Physiologia Plantarum**, v. 137, n. 2, p139–147.2009.

QUEIROZ, J. M. T. Estudo do fluxo de metano em cupinzeiros epígeos em sistemas agroflorestrais, Floresta Primária e pastagens na Amazônia Ocidental. (**Dissertação de Mestrado**)-Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, Manaus, 2004.

QUERINO, C. A. S.;SMEETS, C. J. P. P.; VIGANO, I.; HOLZINGER, R.; MOURA, V.; GATTI, L. V.; MARTINEWSKI, A.; MANZI, A. O.; ARAÚJO, A. C. DE.; RÖCKMANN, T. (2011) Methane flux, vertical gradient and mixing ratio measurements in a tropical forest. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**. ACPD, v.11, p.5313-5350, 2011.

**RADAMBRASIL**. Departamento Nacional de Produção Mineral. Folha AS. 21-Santarém. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: (Levantamento dos Recursos Naturais) v.10, DNPM, p. 1976. 510

RAICH, J. W. AND SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**, v.44B, p. 81-89. 1992.

RAMASWAMY V, BOUCHER O, HAIGH J ET AL. Radiative forcing of climate change. In: **Climate Change 2001: The Scientific Basis** (eds Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ), Cambridge University Press, Cambridge, UK. p. 349–416.

RAYNER, P. J., I. G. ENTING, R. J. FRANCEY, AND R. LANGENFELS. Reconstructing the recent carbon cycle from atmospheric CO<sub>2</sub>, δ<sup>13</sup>C and O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> observations, **Tellus**, v. B51, p. 213-232. 1999.

SALESKA, S. R.; MILLER, S.D.; MATROSS, D. M.; GOULDEN, M. L.; WOFYSY, S. C.; ROCHA, H. R.; CAMARGO, P. B.; CRILL, P.; DAUBE, 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**, Washington. v. 302, n. 5650, p.1554-1557, Nov. 2003.

SADOWSKY, M.; MEYERS, S.; MULLINS, F.; SATHAYE, J.; WISNIEWSKI, J. Methods for assessing greenhouse gas mitigation for countries with economies in transition: summary of workshop presentations and discussions. **Environmental Management**, v. 20, p. S3-S13. 1996. Supplement 1.

SAMPAIO, I. C. G. Analise do fluxo de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso em uma plantação com e sem queima e em uma capoeira no município de Igarapé Açú. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) Universidade Federal do Pará, Belém. 2006.

SCHLESINGER, W. H.; Carbon balance in terrestrial detritus. **Annual Review of Ecology and Systematic**. v. 8, p. 51-81. 1997.

SCHNEISING, O., BUCHWITZ, M., BURROWS, J. P., BOVENSMANN, H., BERGAMASCHI, P. AND PETERS, W. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 2: Methane, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, p.443–465. 2009.

SILVER, W.L.; NEFF, J.; MCGRODDY, M.; VELDKAMP, E.; KELLER, M.; COSME, R. Efeitos od soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem. **Ecosystems**, New York, v. 3, n.2, p. 1993-209, Mar. 2000.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J.; REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v. 54, p. 779-791, 2003.

SOUSA NETO, E.; CARMO, J.B.;KELLER, M.; MARTINS, S. C.; ALVES, L.F.; VIEIRA, S.A.; PICCOLO, M. C.; CAMARGO, P.; COUTO, H.T.Z.; JOLY C.A.; MARTINELLI, A.

Soil-atmosphere Exchange of nitrous oxide, methane and carbon dioxide in a gradient of elevation in the coastal Brazilian Atlantic forest. **Biogeosciences**, v.8, p.133-742, 2011.

SUGIMOTO, A.; WADA, E. Hydrogen isotopic composition of bacterial methane: CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> reduction and acetate fermentation. **Geochimical et Cosmochimica Acta**, Oxford. v. 59, n.7, p. 1329-1337, Apr. 1995.

TELLES, E. C.C.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; COSTA., A. S.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N.; OLIVEIRA, R. C. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical Forest soils of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 17, n.2, p. 1029-2002, May. 2003.

TONELLO, V. M.M. Principais aspectos do ciclo biogeoquímico do elemento carbono e seu contexto na atualidade. 2007. **Dissertação** de mestrado (Ecologia Aplicada) -Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

VIGANO, I., HOLZINGER, R., VAN WEELDEN, H., KEPPLER, F., MCLEOD, A. AND RÖCKMANN, T. 'Effect of UV radiation and temperature on the emission of methane from plant biomass and structural components', **Biogeosciences**, v. 5, p. 937–947. 2008.

WHITICAR, M.J.; FABER, E.; SCHOELL, M. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO<sub>2</sub> reduction vs. Acetate fermentation – Isotope evidence. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. Oxford, v.50, n.5, p.693-709, May. 1986.

## **2-CAPÍTULO**

### **PRODUÇÃO E FLUXO DE METANO EM ÁREA DE FLORESTA DE TERRA-FIRME NA FLONA TAPAJÓS\***

**Alírio Tenório Furtado Neto**

**José Mauro Sousa de Moura**

**Rodrigo da Silva**

**Raimundo Cosme de Oliveira Junior**

**Luciana Vanni Gatti**

**Thomas Röckmann**

---

\* Regras da revista ACTA AMAZONICA. ISSN 0044-5967 versão impressa; ISSN 1809-4392 versão on-line.

## **Produção e fluxo de metano em área de floresta de terra-firme na FLONA Tapajós**

Alírio Tenório Furtado NETO<sup>1\*</sup>, José Mauro Sousa de MOURA<sup>2</sup>, Rodrigo da SILVA<sup>3</sup>,  
Raimundo Cosme de Oliveira JUNIOR<sup>4</sup>, Luciana Vanni GATTI<sup>5</sup>, Thomas Röckmann<sup>6</sup>.

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia – Laboratório de Física da Atmosfera e Laboratório de Processamentos de Dados Ambientais (TE&LBA) – Universidade Federal do Oeste do Pará – Rua Vera Paz, S/N, 68040, Santarém – PA, Brasil.  
[furtadofpa@yahoo.com.br](mailto:furtadofpa@yahoo.com.br)\*

## **Produção e fluxo de metano em área de floresta de terra-firme na FLONA Tapajós**

### **RESUMO**

O metano (CH<sub>4</sub>) é o segundo gás de efeito estufa e sua concentração na atmosfera aumentou 259% desde 1750. A média global da fração molar de CH<sub>4</sub> atingiu um novo recorde de 1813 ± 2 ppb em 2011. Estudos para verificar o balanço regional de CH<sub>4</sub> são realizados com baixa intensidade na Amazônia. Deste modo, conhecer a produção e o fluxo desse gás para atmosfera na região é de grande importância na avaliação da dinâmica do carbono neste ecossistema e para melhor entendimento de seu ciclo biogeoquímico. Este trabalho tem como objetivo quantificar a concentração e fluxo de metano no perfil vertical da floresta, assim como, determinar a emissão de metano na interface solo-atmosfera na FLONA-Tapajós durante o período chuvoso e de estiagem para o ano de 2012. Amostras de ar foram coletadas *in situ* diretamente do solo através do uso de câmaras estáticas e no perfil vertical da floresta em três alturas diferentes (2 m, 16 m e 36 m) e acima da copa (63 m) através do uso da torre micrometeorológica. Posteriormente, as amostras de ar foram analisadas por cromatografia gasosa. A concentração de metano na estratificação vertical da vegetação foi de 1,866 ± 0,038 ppm (média ± desvio padrão), ou seja, 1866 ± 38 ppb e o fluxo foi ~ 15,50 mg de CH<sub>4</sub>.m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e a emissão de metano no solo foi 0,45 ± 0,71 mg de CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Portanto, no período de estudo o ecossistema florestal de terra-firme atuou como fonte de CH<sub>4</sub> para atmosfera.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ciclo biogeoquímico, Ecossistema florestal, Emissão de Metano.

## ABSTRACT

Methane (CH<sub>4</sub>) is the second greenhouse gas and its concentration in the atmosphere has increased 259% since 1750. The overall average of the molar fraction of CH<sub>4</sub> reached a new record of 1813 ± 2 ppb in 2011. Studies to verify the regional balance of CH<sub>4</sub> are performed with low intensity in the Amazon, so know the contribution of tropical rainforest in the production and flow of this gas to the atmosphere in the region is important to address carbon dynamics in this ecosystem to better conceptualization of balance its biogeochemical cycle. This study aims to quantify the concentration and flow of methane in the vertical profile of the forest, as well as determine the emission of methane in the atmosphere-soil interface FLONA-Tapajós during the rainy season and the dry season for the year 2012. Ar samples were collected directly *in situ* soil through the use of static chambers and the vertical profile of the wood in three different Heights (2m, 16m, and 36m) and above the canopy (63m) through the use of the tower micrometeorological. Subsequently, the air samples were analyzed by gas chromatography. The concentration of methane in the vertical stratification of the vegetation was 1.866 ± 0,038 ppm (mean ± standard deviation), that is 1.866 ± 38 ppb and the flow was ~ 15.50 mg de CH<sub>4</sub>.m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> and the emission of methane the soil was 0.45 ± 0,71 mg CH<sub>4</sub>.m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Therefore, for the period of study, the ecosystem of upland forest acted as a source of CH<sub>4</sub> to the atmosphere.

**KEYWORDS:** Biogeochemical cycle, Forest ecosystem, Methane emission

## 1. INTRODUÇÃO

O metano ( $\text{CH}_4$ ) é o segundo gás de efeito estufa mais importante e sua concentração aumentou 259% desde 1750 (~700 ppb). Em 2011, a média global da fração molar de  $\text{CH}_4$  atingiu um novo recorde de  $1813 \pm 2$  ppb um aumento de 5 ppb em relação ao ano de 2010 e nos últimos 10 anos obteve um acréscimo de  $3,2 \text{ ppb.ano}^{-1}$ . No período de 1999 a 2006 o  $\text{CH}_4$  permaneceu estável na atmosfera e a partir de 2007 voltou a crescer a uma taxa de  $5 \text{ ppb.ano}^{-1}$  (WMO, 2012). Esse gás é um forte absorvedor de luz infravermelha na região espectral de  $7,66 \mu\text{m}$  (Dickinson e Cicerone, 1986), por isso, o potencial de aquecimento do  $\text{CH}_4$  na atmosfera é alto, sendo 21 vezes maior que o  $\text{CO}_2$  para um cenário de 100 anos e sua forçante radiativa de  $48 \text{ Wm}^{-2}$  representa aproximadamente 18% <sup>[1]</sup> da média total global dos gases de efeito estufa de vida longa. A durabilidade do  $\text{CH}_4$  na atmosfera é estimado em 12 anos (IPCC, 2007).

As fontes de  $\text{CH}_4$  da biosfera para a atmosfera foram sempre atribuídas aos processos microbianos anaeróbicos em solos úmidos, áreas inundadas, a cultivo de arroz, a intestinos de cupins e ruminantes, a decomposição de dejetos humanos e agrícolas, a queima de biomassa, a mineração de combustível fóssil e a fontes geológicas incluindo as erupções vulcânicas.

Medidas realizadas a nível regional por Frankenberg et al., (2005) usando dados de satélite da Agência Espacial Europeia constataram que as concentrações de  $\text{CH}_4$  para as florestas tropicais foram maiores do que o esperado, os mesmos atribuíram a fontes já conhecidas como as zonas úmidas, queima de biomassa, cupins, gado e também incluiu uma fonte de  $\text{CH}_4$  até então desconhecidas podendo esta diretamente relacionada as florestas tropicais.

---

<sup>[1]</sup> Esta percentagem é calculada como a contribuição relativa do gás (es) mencionado para o aumento da radiação de escala global provocada por todos os gases de efeito estufa de vida longa desde 1750.

Bergamaschi et al., (2007) e Schneising et al., (2009) também detectaram uma emissão significativa em florestas tropicais a partir das observações por satélite. Frankenberg et al., (2008) retrabalharam seus dados de CH<sub>4</sub> pois suas medidas para as florestas tropicais poderiam ser influenciadas pela interferência de espectroscopia do vapor d'água, mesmo assim, ainda obtiveram uma emissão substancial de CH<sub>4</sub> das florestas tropicais.

Miller et al., (2007) também realizaram medidas regionais, mas com metodologia diferente da supracitada, pois, coletaram amostras de ar em frascos para análise da concentração de CH<sub>4</sub> utilizando uma aeronave que sobrevoava (perfil vertical) a uma altitude de 300 a 4300 m acima do nível do mar em dois sítios localizados na Amazônia Oriental e Central. Os cálculos para emissão de CH<sub>4</sub> nestas florestas apresentaram média de 27 mg de CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, entretanto, não souberam interpretar seus dados de forma a explicar as possíveis fontes pois poderia está relacionada a diversos fatores, dentre eles, a emissão de 4 mg de CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> das plantas, segundo Keller et al., (2006) e aproximadamente uma média de 7 mg de CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> de emissão desconhecidas no período noturno (Carmo et. al., 2006).

Carmo et al., (2006) usando medidas locais diretas da concentração de CH<sub>4</sub> em perfis verticais de florestas de terra-firme da Amazônia e medidas de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, estimaram que a emissão líquida de CH<sub>4</sub> varia entre 2 e 21 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, apresentando uma estimativa de emissão anual variando de 4 e 38 Tg CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>.

Observações experimentais realizadas em laboratórios por Keppler et al., (2006) verificaram a produção efetiva de CH<sub>4</sub> sob condições aeróbicas a partir de folhas vivas e mortas, estimando uma emissão global entre 62 e 236 Tg de CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup> a partir de plantas vivas e 0,5 a 6,6 Tg de CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup> a partir de plantas mortas. Além disso, pesquisas realizadas por Vigano et al., (2008) mostraram o efeito da radiação UV e da temperatura elevada na emissão de CH<sub>4</sub> em folhas secas e frescas de mais de 20 espécies de plantas e de componentes estruturais incluindo a pectina, lignina e celulose. Eles demonstraram que a emissão de CH<sub>4</sub>

aumenta em função da irradiância UV indicando um processo fotoquímico direto. Outros pesquisadores como McLeod et al., (2008) ; Bruhn et al., (2009) também observaram que as emissões de CH<sub>4</sub> eram estimulados pela radiação UV.

Qaderi e Reid (2009) relataram o efeito da temperatura, da radiação UV-B e do estresse hídrico na emissão de CH<sub>4</sub>. A diferença com relação aos estudos citados anteriormente foi que os raios UV influenciavam na emissão de CH<sub>4</sub> da planta após a interrupção do estresse hídrico. Portanto, observa-se que a irradiação UV, a temperatura elevada pode conduzir a formação de CH<sub>4</sub> na planta, na folhagem, e nos componentes estruturais das plantas.

Estes fatores podem explicar a discrepância observada na emissão de CH<sub>4</sub> oriundas em áreas de florestas tropicais. Entretanto, Querino et al., (2011) verificaram o fluxo turbulento e o gradiente vertical da razão de mistura do CH<sub>4</sub> em florestas de terra firme localizada na Reserva Biológica de Cuieiras (aproximadamente 60 Km ao Norte de Manaus, Brasil). Eles observaram um gradiente contínuo de CH<sub>4</sub> no interior da copa originado da superfície, no entanto, não há evidência clara da emissão de CH<sub>4</sub> aeróbico.

Pesquisas realizadas por meio da técnica de covariância de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*) mostrou que as florestas tropicais da Amazônia apresentam valores altos de concentração de CH<sub>4</sub> durante o período noturno. Este aumento na concentração de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no perfil vertical do dossel da floresta, durante as estações seca e chuvosa, fortalecem a hipótese de que durante a noite, ocorreria a produção de metano em microsítios anaeróbios, e que este se acumularia nos compartimentos do dossel da floresta e/ou emissões noturnas ainda desconhecidas (Wofsk et al. 1988; Kuck et al. 2000; Martens et al. 2004; Carmo et. al. 2006; Querino et. al. 2011).

Este microsítio anaeróbico pode estar associado às altas taxas de precipitação, temperatura elevada e os elevados índices de umidade relativa do ar, que chegam a 100%

mesmo nos períodos de seca, proporcionam a condensação de vapor d'água no interior da floresta durante a noite. Na floresta Nacional do Tapajós, por exemplo, a ocorrência de várias espécies de bromélias e árvores cujos troncos possibilitam o armazenamento de água (Parotta et al. 1995) podem fornecer condições de anaerobiose e assim permitir a decomposição de matéria orgânica e conseqüentemente a produção de metano.

Estudos para verificar o balanço regional de CH<sub>4</sub> ainda são realizados com baixa intensidade na Amazônia e com precisões duvidosas. Deste modo, conhecer a produção e o fluxo desse gás para atmosfera na região é de grande importância na avaliação da dinâmica do carbono neste ecossistema para melhor entendimento de seu ciclo biogeoquímico.

O principal objetivo deste trabalho foi quantificar a concentração e fluxo de metano no perfil vertical da floresta, assim como, determinar a emissão de metano na interface solo-atmosfera em uma área de floresta de terra firme na FLONA Tapajós. Além disso, procurou-se definir a variabilidade sazonal da concentração e do fluxo neste ecossistema e verificar a influência de fatores ambientais (umidade e temperatura do solo) atuando diretamente no comportamento do metano.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Descrição da área de estudo**

A Floresta Nacional do Tapajós (FNT) está localizada no Estado do Pará, entre os paralelos de 2° 45' e 4° 10' de latitude sul e entre os meridianos de 54° 45' e 55° 30' de longitude oeste e limita-se: ao norte, com o paralelo que cruza o km 50 da rodovia Cuiabá-Santarém (BR 163); ao sul, com a Rodovia Transamazônica e os rios Cupari e Cuparitinga ou Santa Cruz; a leste, com a BR 163; e a oeste com o rio Tapajós (Espírito Santo, 2003).

A FNT, atualmente sob a jurisdição do ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade), foi criada pelo decreto nº 73.683 de fevereiro de 1974, e alterada pela Lei Federal nº 12.678 de junho de 2012 a qual diminui sua área de 600.000 para 527.319 hectares conforme a demarcação circulada (Figura 5), abrange os municípios de Aveiro, Rurópolis, Placas e Belterra. Esta unidade federal tem como objetivo básico o uso múltiplo sustentável dos recursos florestais e a pesquisa científica, por isso, a FNT é classificada como uma unidade de conservação da categoria de uso sustentável.

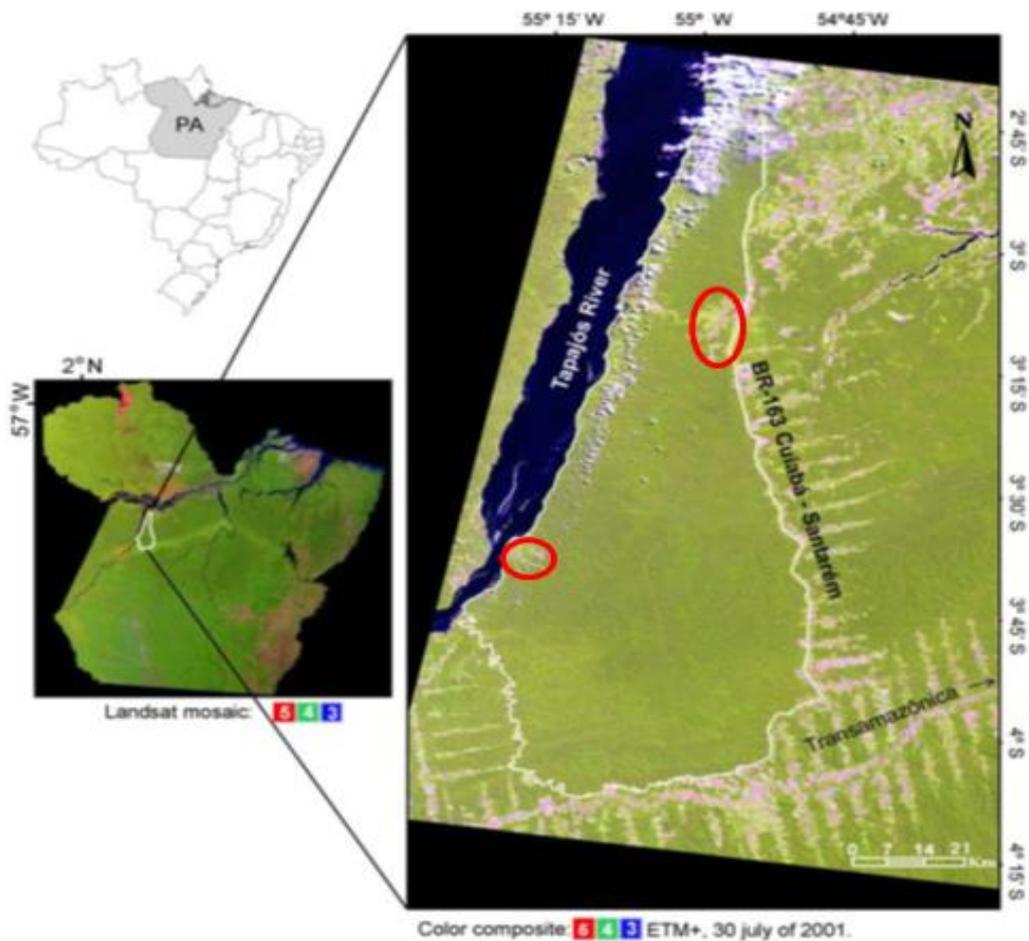


Figura 5 - Localização da Floresta Nacional do Tapajós (PA) adaptada de Espírito Santo, 2003.

A área de estudo nesse trabalho compreende a região definida na figura 6 pertencente ao município de Belterra - PA, a 67 km da cidade de Santarém ao longo da BR 163. O local dispõe de uma torre metálica de 65 m (S 02° 51' 18,4" e W 54°57' 32,7") a qual é utilizada na coleta de dados micro meteorológicos pertencente ao projeto de experimento de Grande – escala da Biosfera – Atmosfera na Amazônia (LBA) administrada pelo escritório regional do LBA em Santarém – PA. Essa torre permite o acesso ao dossel da floresta.

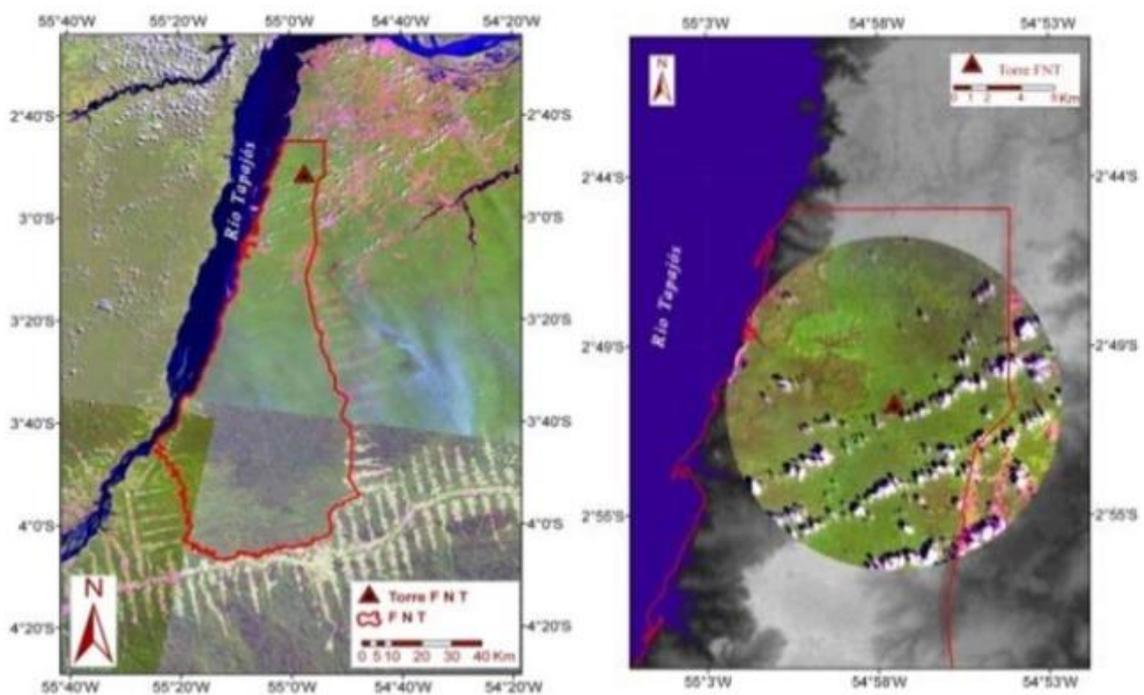


Figura 6 - Localização da área de estudo Belterra – PA adaptada de Moura, 2010. Cobertura vegetal: Recorte dos mosaicos de imagens ETM+/Landsat sobreposto aos mapas de elevação do terreno (SRTM). Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo Ami (clima megatérmico, tropical úmido), sendo a temperatura média do mês mais frio acima de 18°C, também apresenta uma temperatura média anual em torno de 24,8°C, umidade relativa do ar em média 90% e precipitação média anual de 2100 mm (Pereira et al., 2002; Costa et al., 2008).

A conceituação fisionômico-ecológica do RADAMBRASIL (1976) classifica a FNT em Florestal Tropical Densa (FTD) e em Floresta Tropical Aberta (FTA), sendo que a primeira se subdivide em duas subcategorias: (1) Floresta Tropical Densa de Baixas Altitudes (FTDBA) e (2) Floresta Tropical Densa Submontana (FTDS). A subcategoria da FTDBA ocorre em áreas de terras baixas, com cotas altimétricas inferiores a 100 m, pouca variação no declive e em solos predominantemente argiloso.

As espécies predominantes nesse tipo de floresta incluem: Sucupira (*Diplotropis* sp), Acariquara (*Minquara guianensis* Aubl.), Castanheira (*Bertholletia excelsa* H.B.K), e Cupiúba (*Goupia glaba* Aubl.). Estas florestas apresentam um alto volume de madeira de grande valor comercial. Já a FTDS é caracterizado por possuir árvores menores que ocupam um relevo dissecado do Pré-Cambriano, entre cotas altimétricas de 100 a 600 m. São características dessa floresta: Muiraúba (*Mouriribrevipes* Hook), Itaúba (*Mezilaurus itauba* (Meiss) Taube ex Mez), Mandioqueiras (*Qualea* sp.) e Maçaranduba (*Manilkara huber* (Ducke) Standil).

O segundo grande grupo fisionômico, FTA ocorre geralmente nos platôs intensamente dissecados com erosão nos declives, vales estritos e solos com textura média. Esta região é caracterizada por florestas com lianas e várias espécies de palmeiras como Açai (*Euterpe oleracea* Mart) e Babaçu (*Orbignya phalerata* Mart.) (Espírito Santo, 2003). É importante lembrar que, a vegetação predominante no entorno da torre usada para as coletas, localiza-se no alto platô, também chamada de florestas de terra-firme, do tipo ombrófila densa (de baixas altitudes e/ou submontana), composta por árvores com altura do dossel variando entre 30-35 m e algumas árvores alcançando 40-45 m (Moura 2010).

Nesta região ocorre a predominância de LATOSSOLO AMARELO Distrófico, caracterizado por diferentes texturas, com predomínio de argila principalmente nas áreas de platô onde as torres de fluxo estão localizadas (Silver et al., 2000; Nepstad et al., 2002; Telles

et al., 2004). Como variação desta unidade, ocorre o LATOSSOLO AMARELO Distrófico Plíntico, de textura média argilosa. Associadas a estas classes, são encontrados os solos PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários, de textura indeterminada e o NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico. Os ARGIOSSOLOS VERMELHO-AMARELO também ocupam grande porção da FNT. Estes últimos são encontrados em relevo plano a fortemente ondulado (RABAMBRASIL, 1976 e Espírito Santo, 2003).

## 2. 2. Regime pluviométrico

A precipitação média anual para o ano de 2012 na região da FNT foi de 1539,2 mm, valor obtido pela estação Meteorológica de Observação de Superfície, sendo a estação seca (menos de 100 mm por mês) no mês de junho e entre os meses de agosto a novembro (Figura 7).

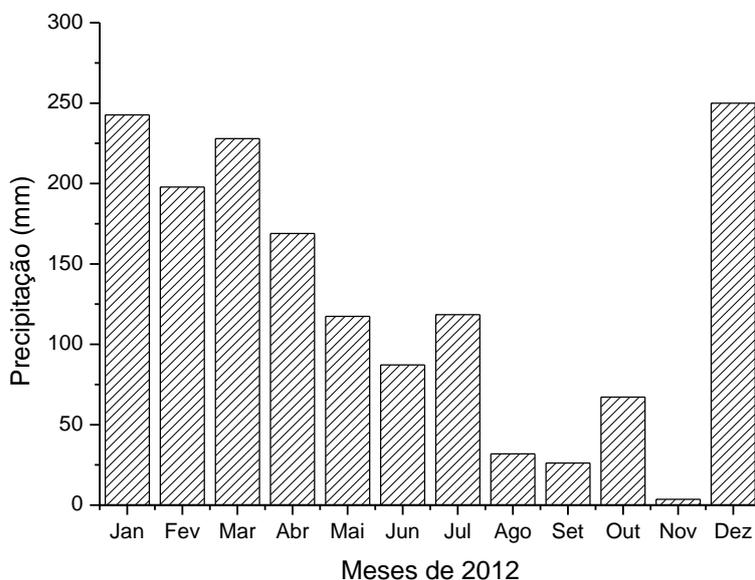


Figura 7 - Média mensal de precipitação no município de Belterra - PA. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: [www.inmet.gov.br/sim/sonobra/convenionais.php](http://www.inmet.gov.br/sim/sonobra/convenionais.php)

## 2.3. Amostragem

### 2.3.1. Coleta das amostras de CH<sub>4</sub> emitido pelo solo

As amostras de ar emitido pelo solo (Tabela 3) foram coletadas para análise de sua concentração e determinação das taxas de emissões de CH<sub>4</sub> na interface solo-atmosfera em intervalos de 30 minutos a partir da instalação da base (anel) da câmara estática e, em intervalos de 1 a 10 minutos, seringas foram conectadas a câmara de concentração para uso manual (Figura 9d ). As câmaras utilizadas foram de PVC (cloreto de polivinil) de formato frustum, com 12 cm de altura e 24 e 25 cm de diâmetro a base do anel apresenta diâmetro de 25 cm e altura de 9 cm. Para determinar o volume exato da câmara estática, todas as bases têm a sua altura medida até o solo em três pontos diferentes. Paralelamente foi determinada a temperatura do ar e do solo em °C através de Termopares (Cooper – Constantan) (Figura 9d).

Tabela 3- Período de coleta e número (n) de amostragem analisadas em cada estação do ano de 2012 quanto à concentração e fluxo de metano [CH<sub>4</sub>], na Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T).

Local	Estação	Período de coleta		n [CH <sub>4</sub> ]	
		Solo	Perfil vertical da floresta	Solo	Perfil
F. N. T.	Chuvosa	Dez/12 (06)	Fev/12 (01, 03, 10, 13) Dez/12 (13)	12	38
	Intermediária	Jun/12 (29); Jul/12 (13);		23	
	Seca	Out/12 (19); Nov/12 (30);	Ago/12 (03,20); Out/12 (05,11); Nov/12 (30);	24	37

O procedimento para obtenção da amostra deu-se da seguinte maneira: ajustou-se a câmara de PVC sobre o anel para proporcionar a vedação da câmara estática para acumular o

ar em seu interior. Posteriormente, coletou-se a primeira amostra de gás (tempo 1 minuto), para isso, foi utilizada uma seringa de polipropileno de 20 mL equipada com uma válvula de fechamento no orifício de saída. Esse mesmo procedimento foi repetido durante os três tempos restantes (10, 20 e 30 minutos).

O material coletado foi transportado para o Laboratório da EMBRAPA-Santarém onde foram analisadas num intervalo de 48 horas após a coleta por cromatografia gasosa. O desenho amostral para o conjunto de dados ambientais está representado pela figura 8, formada por quatro pontos (1, 2, 3 e 4), onde em cada ponto foram instaladas três câmaras para a determinação das medidas de fluxos de gases do solo para atmosfera, totalizando 12 câmaras nos dois transectos em uma área aproximada de 0,5 hectares.

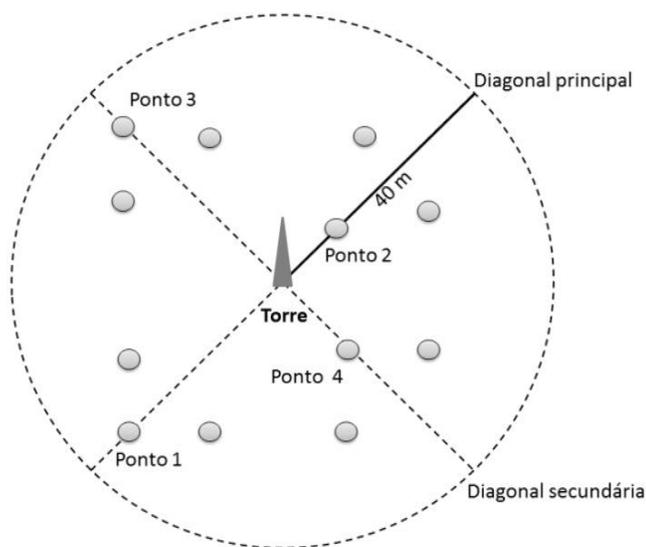


Figura 8 - Desenho experimental da distribuição das câmaras nos transectos

### 2.3.2. Coleta das amostras de CH<sub>4</sub> no perfil vertical da floresta

As amostras de ar atmosférico foram coletadas durante as estações chuvosa e seca (Tabela 3). A amostragem foi feita ao longo do perfil da torre, sendo que os níveis de altura

corresponderam a (2m) próximo ao solo, no sub-bosque (16 m) e próximo ao topo do dossel (36 m) e acima das copas (63 m) de altura (Figura 9). As coletas foram realizadas nos horários de 11 às 15 horas local devido à atmosfera apresentar maior camada limite diurna, isso implica no maior escoamento de gases do ecossistema para atmosfera. Essas amostras serviram para análise da concentração e fluxo de metano no perfil vertical da floresta.

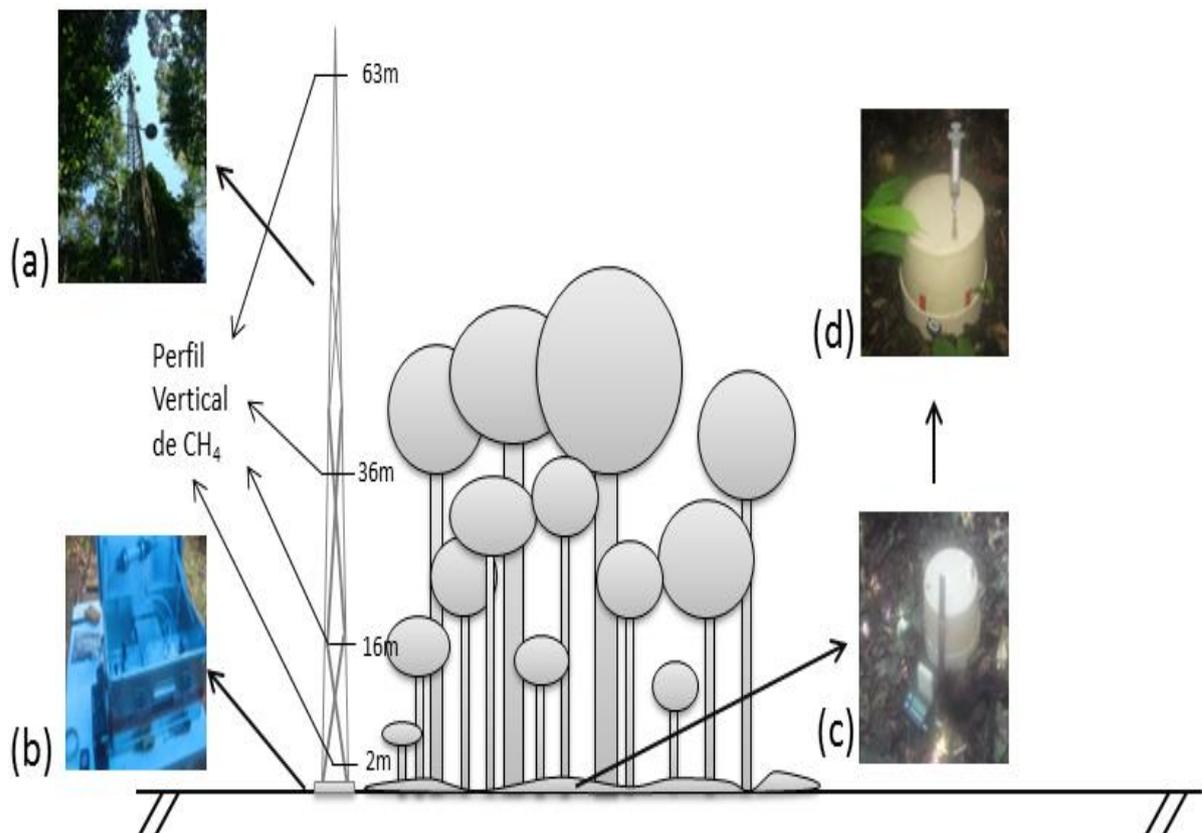


Figura 9 - Panorama esquemático para coleta de metano no perfil vertical da floresta. (a) torre (b) sistema de coleta de ar (c) medidor de umidade, régua (d) câmara de concentração estática e termômetro.

As amostras foram puxadas por uma bomba através de tubo de teflon com 6 mm de diâmetro que esteve fixado a torre, sendo que, na extremidade do tubo continha um filtro de ar (PALL 0,45 $\mu$ m PTFE ACRODISC CR) para evitar a contaminação de impurezas e posteriormente o teflon foi conectado aos frascos de vidros com capacidade de 1 L para

armazenar a amostra de ar atmosférico, mas antes disso a umidade do ar era removida quimicamente com DRIERITE™ antes da amostra ser armazenada (Figura 10).

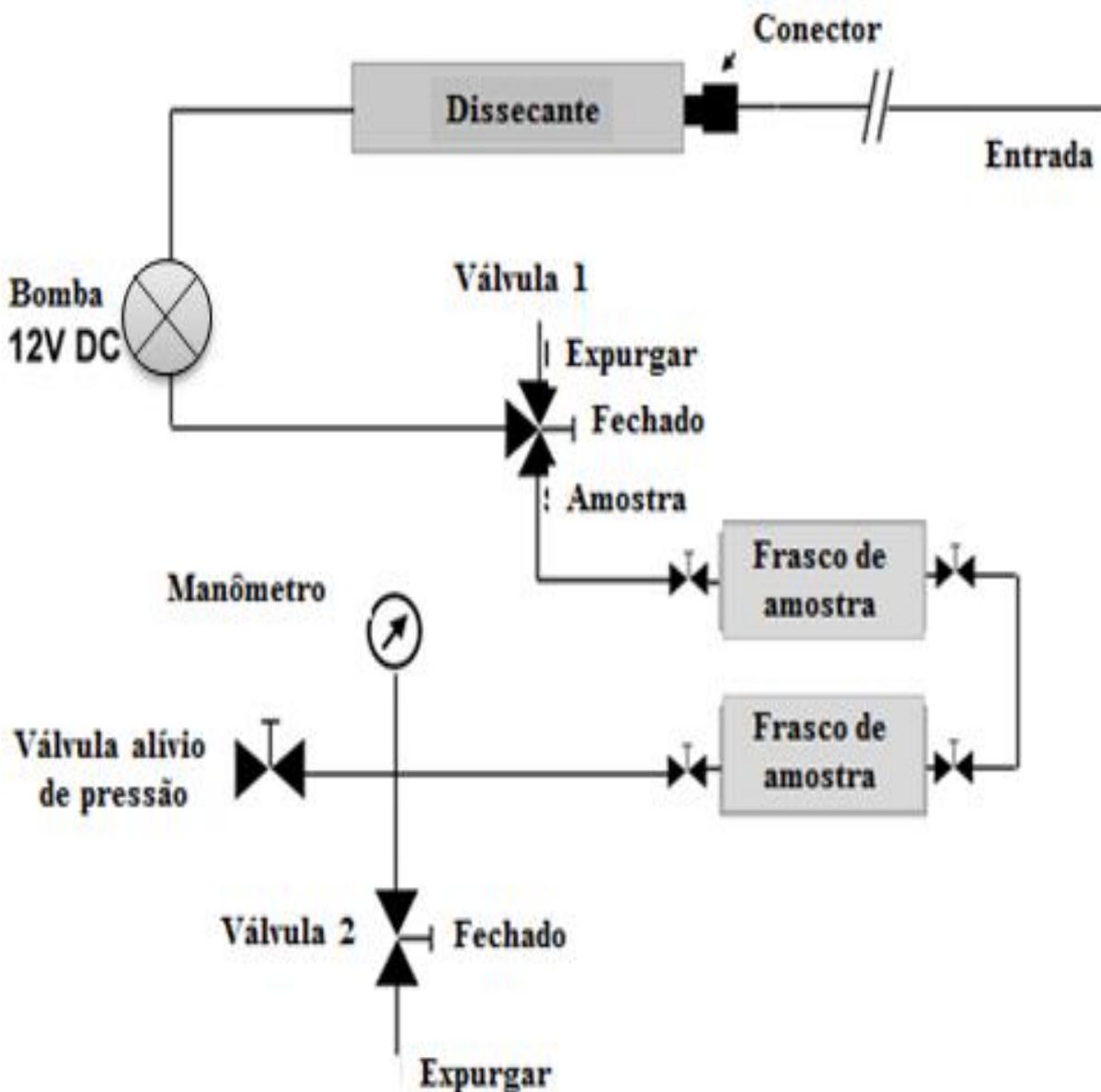


Figura 10 - Visão geral do sistema de coleta do ar na torre

Antes de cada amostragem o ar acumulado no tubo era expelido durante 5 minutos para garantir que o ar coletado estivesse na altura desejada do perfil da floresta. As análises por cromatografia gasosa dessas amostras foram realizadas no Laboratório de Química Atmosférica (LQA) do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), São Paulo.

### 2.3.3. Temperatura e umidade do solo

A temperatura em graus Célsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) do ar foi medida através do uso do Termohigrômetro Digital Portátil ITHT 2220 e a temperatura do solo pelo Termômetro Digital do tipo Espeto da marca Taylor que foi introduzido no solo a uma profundidade de 5 cm, próximo a câmara (Figura 9d). A umidade do solo foi mensurada em percentagem através do Sistema Portátil HydroSense<sup>TM</sup> Modelo CS620, CD620 a 12 cm de profundidade em três pontos distintos ao entorno da câmara estática de concentração para obter a média da umidade *in situ* (Figura 9c).

### 2.4. Análise das amostras de $\text{CH}_4$ – Cromatografia gasosa

A cromatografia é definida como um processo físico-químico de separação onde os constituintes da amostra são distribuídos entre uma fase estacionária e uma fase móvel. A fase estacionária é sempre um fluido (líquido, na chamada cromatografia líquida ou gás, na cromatografia gasosa). Na cromatografia gasosa, a amostra é carregada por um gás, chamado de **gás de arraste**, através de uma **coluna**, onde diferenças entre a interação dos constituintes da amostra com o material que compõe a coluna (chamado de **fase estacionária**) faz com que cada constituinte a percorra em diferentes tempos, o que causa a separação. O tempo transcorrido entre a injeção da amostra e o pico do constituinte é denominado tempo de retenção. Após percorrer a coluna, os compostos de interesse são detectados por um detector apropriado. A figura 11 ilustra a configuração típica do sistema de cromatografia gasosa. As principais partes de um cromatógrafo são a coluna cromatográfica (responsável pela separação dos constituintes da amostra), o forno (onde a coluna é aquecida e mantida a uma

temperatura constante), o detector e o integrador que são responsáveis pela detecção e determinação dos picos dos constituintes de interesse.

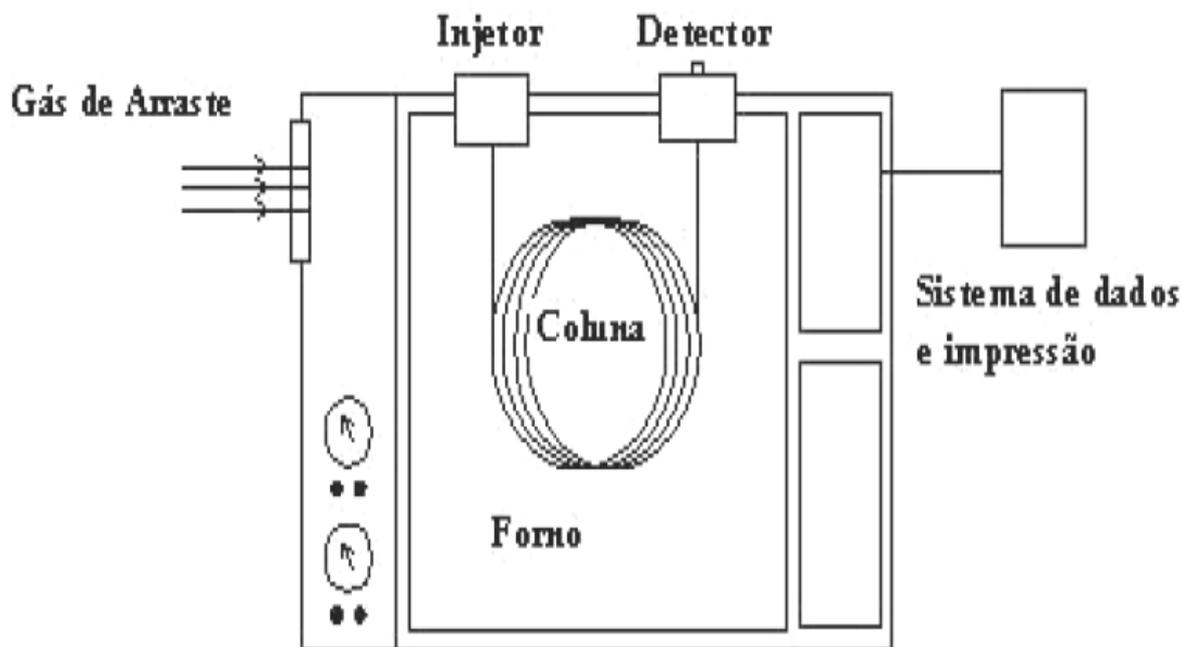


Figura 11 - Componentes básicos de um cromatógrafo a gás. Adaptado de Ciola (1985) *apud* Marani (2007).

Em uma análise, a amostra é inserida na coluna através de um sistema de injeção e levada através da coluna pelo gás de arraste a uma velocidade constante. Na coluna, os constituintes migram entre a fase móvel e a fase estacionária, de acordo com sua propriedade físico-química. Para a análise de  $\text{CH}_4$ , o gás adotado é o nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), mantido em condições de alta pressão em cilindros especiais e que flui através do sistema a um fluxo constante.

O detector utilizado para a análise do  $\text{CH}_4$  é o de ionização de chama (FID) produzida pela combustão do ar e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) destruindo a amostra. A chama produzida na queima da amostra se encontra em um campo elétrico. Ao sair da coluna, o gás (componentes da amostra + gás de arraste) é misturado com hidrogênio e ar sintético, então queimado em um aquecedor de aço inoxidável. Os compostos orgânicos produzem íons e elétrons que podem

conduzir a eletricidade através da chama. Um eletrodo polarizador sobre a chama coleta os íons formados, gerando uma corrente que é amplificada. O sinal gerado é enviado a um integrador, que realiza a análise dos cromatogramas, calculando o tempo de retenção, a área e a altura dos picos de cada molécula de metano.

As amostras de ar do solo analisadas no Laboratório da EMBRAPA-Santarém mediram as concentrações de CH<sub>4</sub> por cromatografia gasosa, através do cromatógrafo Shimadzu (14A), com detector de chama (FID). As temperaturas do injetor, do detector e da coluna foram ajustadas para 125°C, 125°C e 40°C, respectivamente. O gás carreador foi o N<sub>2</sub> com fluxo de 30 ml.min<sup>-1</sup>. Os picos desses gases foram comparados através de padrões primários (P<sub>alto</sub> = 1,810 ppm CH<sub>4</sub>; P<sub>baixo</sub> = 0,910 ppm CH<sub>4</sub>). As áreas dos picos foram integradas utilizando-se software da Hewlett Packard (HPCHEM).

As amostras de ar do perfil vertical da floresta foram analisadas no LQA do IPEN através de um sistema integrado de análise dos gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> e SF<sub>6</sub>, denominado MAGICC (*Multiple Analysis of Gases Influence Climate Change*), desenvolvido pelo ESRL/NOAA (*Earth System Research Laboratory / National Oceanic Atmospheric Administration*). A precisão da análise está de acordo com o padrão de referência internacional do NOAA ver descrição detalhada (D' Amelio, 2006 e Basso, 2011).

## **2.5. Método quantitativo para determinar o fluxo de CH<sub>4</sub>**

### **2.5.1. Determinação do Fluxo de CH<sub>4</sub> do solo**

A determinação do fluxo de metano emitido pela superfície do solo é feita a partir da variação temporal da sua concentração no interior da câmara. A concentração de metano em uma amostra de gás pode ser escrita como a razão entre sua pressão parcial ( $p_i$ ) e a pressão total ( $p$ ), ou pela razão entre o número de moles de CH<sub>4</sub> ( $n_{CH_4}$ ) e o número total de moles da

mistura ( $n_t$ ). O número de moles de uma substância presente na amostra é dado pela razão entre a massa da substância ( $m_{CH_4}$ ) e sua massa molar ( $M_{CH_4}$ ) ou  $n_{CH_4} = m_{CH_4} / M_{CH_4}$ . Adotando-se uma variação no número de moles de metano ( $\Delta n_{CH_4}$ ), e aplicando-se a equação dos gases ideais ( $pV = nRT/M$ ), pode-se escrever:

$$\frac{\Delta n_{CH_4}}{n_t} = \frac{\Delta m_{CH_4} RT}{M_{CH_4} pV} = \Delta \chi_{CH_4} \quad \text{Equação 1.}$$

ou

$$\Delta m_{CH_4} = \frac{\Delta \chi_{CH_4} pVM_{CH_4}}{RT} \quad \text{Equação 2.}$$

Onde  $p$  é a pressão total (atm),  $V$  o volume total (litros),  $M_{CH_4}$  é a massa molar do metano (16,04 g mol<sup>-1</sup>),  $R$  é a constante dos gases (0,082 atm 1mol<sup>-1</sup>k<sup>-1</sup>) e  $T$  é a temperatura (K). Admitindo-se que a variação do fluxo através da área  $A$  (m<sup>2</sup>) é constante durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , pode-se escrever o fluxo  $\Phi_{CH_4}$  (em mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) como:

$$\Phi_{CH_4} = \frac{\Delta \chi_{CH_4} pVM_{CH_4}}{\Delta t ART} = \frac{pVM_{CH_4}}{ART} \frac{\Delta \chi_{CH_4}}{\Delta t} = \frac{pVM_{CH_4}}{ART} \frac{\partial \chi_{CH_4}}{\partial t} \quad \text{Equação 3.}$$

A mais importante variável na equação 3 é  $\frac{\partial \chi_{CH_4}}{\partial t}$ , que é derivada das medidas de concentração. Todas as demais variáveis são medidas diretamente no momento da coleta. A grandeza  $\frac{\partial \chi_{CH_4}}{\partial t}$  é estimada a partir da regressão linear, considerando-se  $\frac{\partial \chi_{CH_4}}{\partial t}$  como o “b” em  $\chi = \chi_0 + bt$ , e o coeficiente de correlação  $r$  entre  $\chi$  e  $t$  é uma medida da incerteza em  $\frac{\partial \chi_{CH_4}}{\partial t}$ . Para se utilizar a regressão linear na obtenção de  $\frac{\partial \chi_{CH_4}}{\partial t}$ , considera-se o fluxo constante durante o tempo de coleta de amostras (Marani, 2007).

### 2.5.2. Determinação do Fluxo de CH<sub>4</sub> no perfil vertical da floresta

Para calcular a razão de mistura de cada gás na camada do dossel foi realizada a interpolação dos dados entre os níveis de acordo com a equação 4.

$$\frac{dC}{dt} = P - k(C - C_t) \quad \text{Equação 4}$$

Onde  $C$  é a razão de mistura do gás na camada do dossel,  $P$  e a produção líquida da camada incluindo o fluxo solo-atmosfera,  $K$  e um coeficiente da troca entre a camada do dossel e da atmosfera acima e  $C_t$  é a razão de mistura do gás na atmosfera acima da copa das árvores.

Faz-se o mesmo procedimento da equação 4 para o CO<sub>2</sub> para obter a seguinte relação:

$$\frac{d[CH_4]}{d[CO_2]} = \frac{P_{CH_4} k([CH_4] - [CH_4]_t)}{P_{CO_2} k([CO_2] - [CO_2]_t)} \quad \text{Equação 5.}$$

Quando a troca ( $K(C - C_t)$ ) é relativamente pequena para a emissão de gases traço então se tem:

$$\frac{d[CH_4]}{d[CO_2]} \approx \frac{P_{CH_4}}{P_{CO_2}} \quad \text{Equação 6.}$$

Assumindo que os processos de transporte para todos os gases traços são similares entre a camada de dossel da floresta e da atmosfera acima. A quantidade  $d[CH_4]/d[CO_2]$  em cada estação foi calculada pela regressão linear ortogonal.

O fluxo de CO<sub>2</sub> ( $J_{CO_2\text{ solo}}$ ) do solo foi medido através da câmara estática de concentração conectada a um analisador de gás por infravermelho – IRGA (Li-8000). A emissão de CO<sub>2</sub> do ecossistema foi estimada pela razão ( $\rho = 2,4$ ) do fluxo do solo baseado nos estudos de respiração do solo (Chambers *et al.*, 2004). A estimativa do fluxo de CH<sub>4</sub> foi calculada pela equação 7 em mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (Carmo *et al.* 2006)

$$P_{CH_4} \approx \rho J_{CO_2 \text{ solo}} \frac{d[CH_4]}{d[CO_2]} \quad \text{Equação 7.}$$

## 2.6. Análise dos dados

Os dados foram submetidos ao tratamento estatístico de normalidade a partir do teste de Kolmogorov-Smirnov, admitindo-se  $p < 0,05$  como nível de significância. O teste utilizado demonstrou que os dados apresentavam distribuição normal. Os resultados foram expressos através da média  $\pm$  desvio padrão (DP). A dependência da concentração e fluxo de  $CH_4$  em relação à temperatura e umidade do solo foi avaliada a partir da significância dos coeficientes de correlação de Pearson e a estimativa do fluxo de  $CH_4$  no perfil vertical da floresta foi avaliada através da regressão linear com significância estatística de  $p < 0,05$ . O efeito da sazonalidade na concentração de  $CH_4$  no perfil vertical da floresta durante as estações úmida e seca foi investigado através do teste  $t$ . O software Origin 8.5.1 foi utilizado na elaboração de gráficos e testes estatísticos.

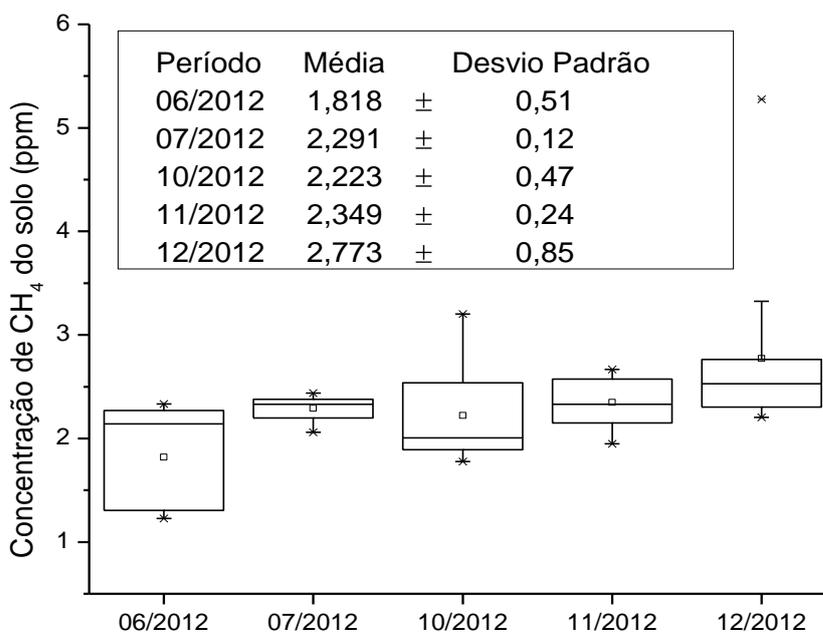
## 2.7. Aspectos éticos e legais

Pesquisa autorizada para atividade com finalidade científica (protocolo de aprovação nº 32397-1) com base na Instrução Normativa nº 154/2007. Através do código de autenticação 51922595 qualquer cidadão poderá verificar a autenticidade ou regularidade deste documento, por meio da página do Sisbio/ICMBio na Internet ([www.icmbio.gov.br/sisbio](http://www.icmbio.gov.br/sisbio)).

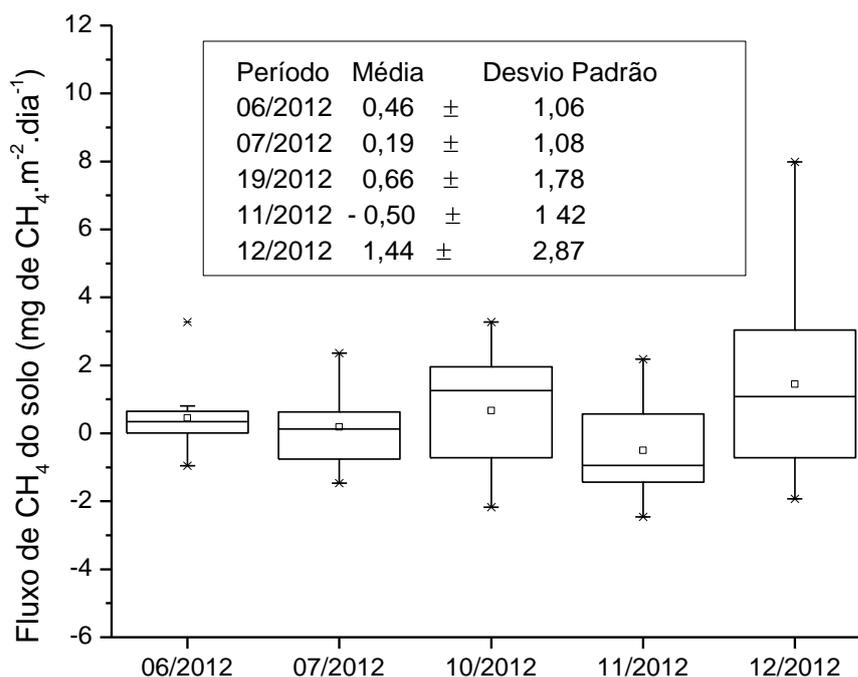
### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Concentração e Fluxo de CH<sub>4</sub> do solo

A concentração de metano na interface solo-atmosfera na região da FNT no km 67 oscilou de 1,227 a 5,274 ppm e apresentou (média  $\pm$  desvio padrão) de  $2,291 \pm 0,340$  ppm durante o período de investigação (11 às 15horas-local), sendo que, a menor produção desse gás foi no mês de junho em torno de  $1,818 \pm 0,507$  ppm mês que corresponde a transição entre o período chuvoso para o seco e a maior concentração em dezembro (início do período chuvoso para o ano de 2013) com valor igual a  $2,773 \pm 0,847$  ppm (Figura 12a). O fluxo de metano do solo variou de  $-0,50 \pm 1,36$  mg de CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> em novembro (período seco) a  $1,45 \pm 2,75$  mg de CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> em dezembro para o ano de 2012. A taxa média da emissão de metano do solo para atmosfera foi de  $0,45 \pm 0,71$  mg de CH<sub>4</sub>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> o que corresponde para um período de um ano, aproximadamente 1,64 Mg de CH<sub>4</sub> por hectare. Se extrapolarmos para toda a FLONA Tapajós obtém-se um valor igual a 0,89 Gg de CH<sub>4</sub> a<sup>-1</sup>.



(a)



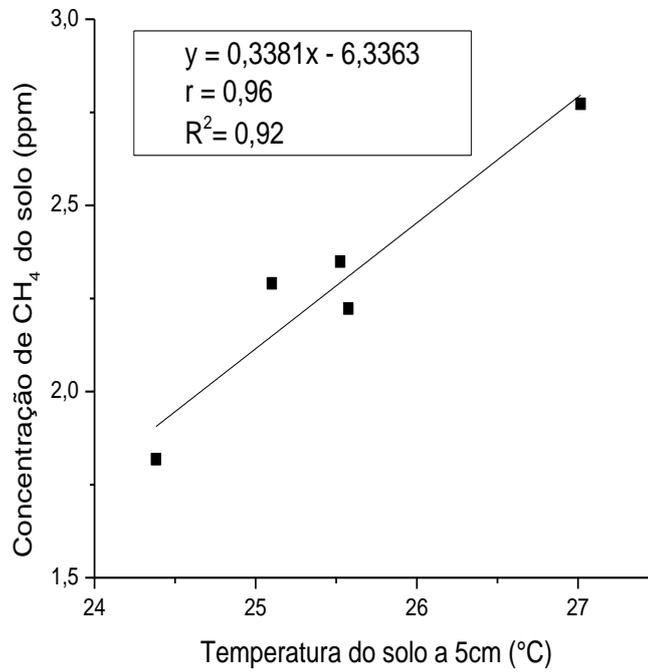
(b)

Figura 12 - Concentração (a) e fluxo (b) de CH<sub>4</sub> do solo para os meses de 2012.

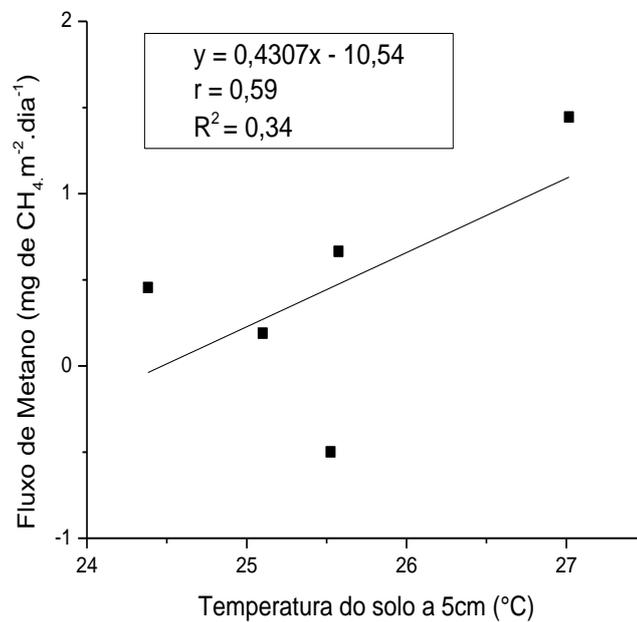
A umidade do solo na Amazônia é diretamente afetada pelo regime sazonal de precipitação (Figura 7). Neste trabalho, a umidade média do solo a 12 cm de profundidade foi de 20,9% variando de 11,1 a 34,7% nos meses de novembro e junho, respectivamente. A temperatura média do solo a 5 cm de espessura foi de 25,5°C sendo a mínima em junho 24,4°C e a máxima em dezembro 27,0°C. A variação da umidade e temperatura do solo foi significativa ( $p < 0,05$ ).

Para analisar a variação da concentração e fluxo de CH<sub>4</sub> do solo para atmosfera foi feita a correlação de Pearson ( $r$ ) com a temperatura do solo para verificar a associação entre essas variáveis. Posteriormente, aplicou-se a técnica de regressão linear para determinar ( $R^2$ ) atuando diretamente na flutuação de CH<sub>4</sub> nos meses de investigação. Observou-se, então, uma

relação estatisticamente significativa para a produção e emissão de CH<sub>4</sub> ( $r = 0,96$  e  $R^2 = 0,92$ ) e ( $r = 0,59$  e  $R^2 = 0,34$ ), respectivamente (Figura 13).



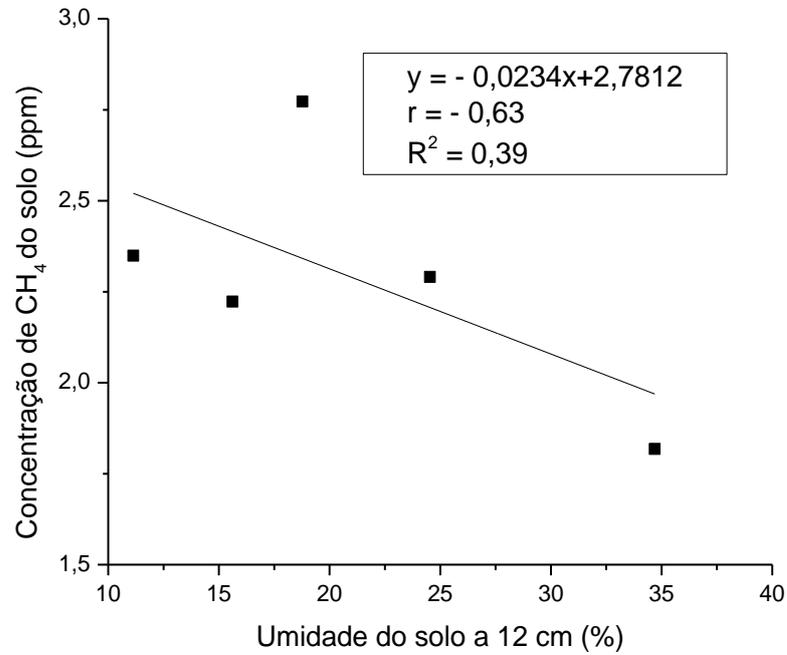
(a)



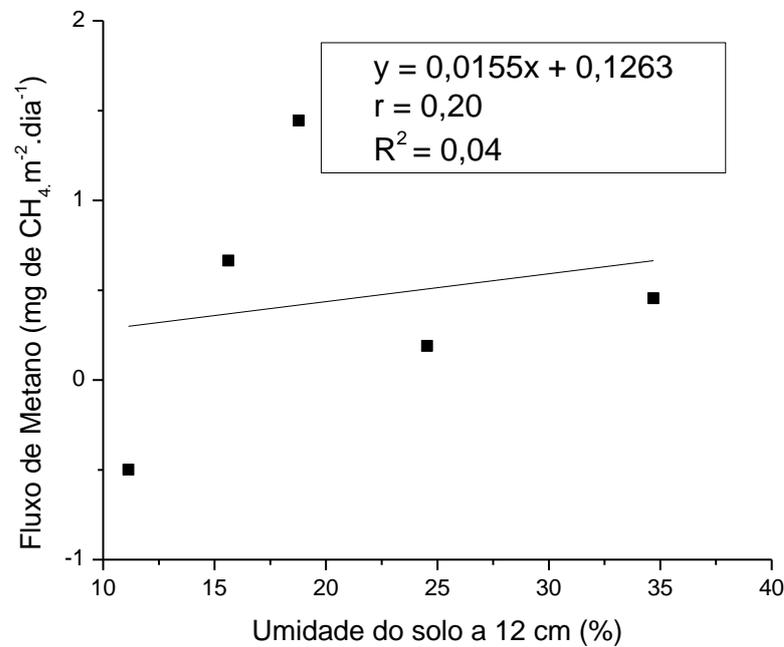
(b)

Figura 13- Correlação e regressão da Concentração (a) e Fluxo de Metano (b) do solo com a temperatura do solo a 5 cm de profundidade.

Já em analogia ao teor de umidade no solo a associação foi significativa para a produção de metano, porém decrescente  $r = - 0,63$ , o coeficiente de determinação foi de  $R^2 = 0,39$ . A taxa de variação do gás não apresentou índice estatístico significativo (Figura 14b).



(a)



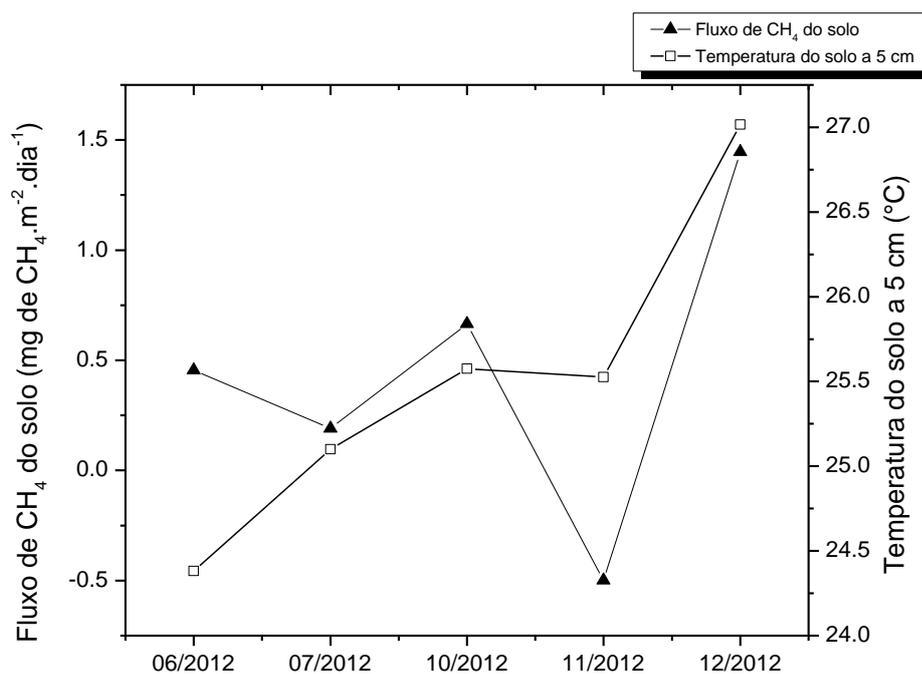
(b)

Figura 14 - Correlação e regressão da Concentração (a) e Fluxo de Metano (b) do solo com a umidade do solo a 12 cm de profundidade.

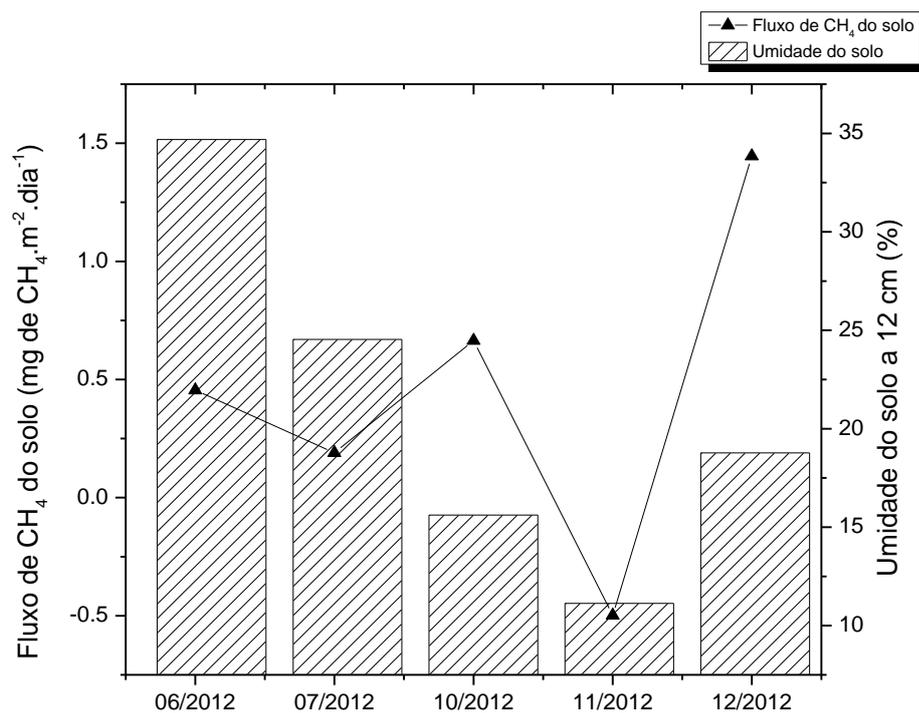
De acordo com a Figura 13a observou-se que a variação da temperatura no solo pode aumentar a atividade microbiana, aumentando desta forma a produção de metano (Escobar, 2008). Só que, parte dessa produção pode ser consumida por bactérias metanotróficas as quais obtêm energia e carbono da oxidação do  $\text{CH}_4$ , uma vez que, a influência da temperatura no solo explica 34% do efluxo desse gás para atmosfera (Figura 13b).

A umidade no solo favorece o desenvolvimento de bactérias metanogênicas, que por sua vez produzem metano a partir da decomposição da matéria orgânica disponível no solo e na serrapilheira. Entretanto, o que se observa é uma relação negativa, ou seja, com o aumento da umidade no solo diminuiu a concentração de metano, porém, pode existir uma faixa ótima de saturação nesse solo variando entre 10 e 25% (Figura 14a) o qual pode beneficiar uma melhor atividade dos microrganismos anaeróbicos.

Apesar da associação entre as variáveis ambientais (temperatura e umidade do solo) não serem altamente significativa a figura 15 apresenta o comportamento do fluxo de  $\text{CH}_4$  no solo de acordo com o comportamento dessas variáveis ao longo do período amostral.



(a)



(b)

Figura 15 - Fluxo de Metano do solo com as variáveis ambientais temperatura do solo (a) e umidade do solo (b) para os meses de 2012

### 3.2. Concentração e Fluxo de CH<sub>4</sub> no perfil vertical da floresta

Na Floresta Nacional do Tapajós a concentração de CH<sub>4</sub> variou entre 1,801 a 1,928 ppm, sendo o valor (médio ± desvio padrão) para todas as amostras igual a 1,866 ± 0,038 ppm, ou seja, 1866 ± 38 ppb. Na estação chuvosa a concentração foi de 1,882 ± 0,030 ppm e durante o período seco foi de 1,832 ± 0,028 ppm. Aplicando o teste *t*, observou-se um resultado significativo ( $p < 0,05$ ), ou seja, a diferença na concentração de CH<sub>4</sub> igual a 0,05 ppm entre as médias amostrais é expressiva o que caracteriza um efeito na produção de metano de acordo com a sazonalidade (Figura 16).

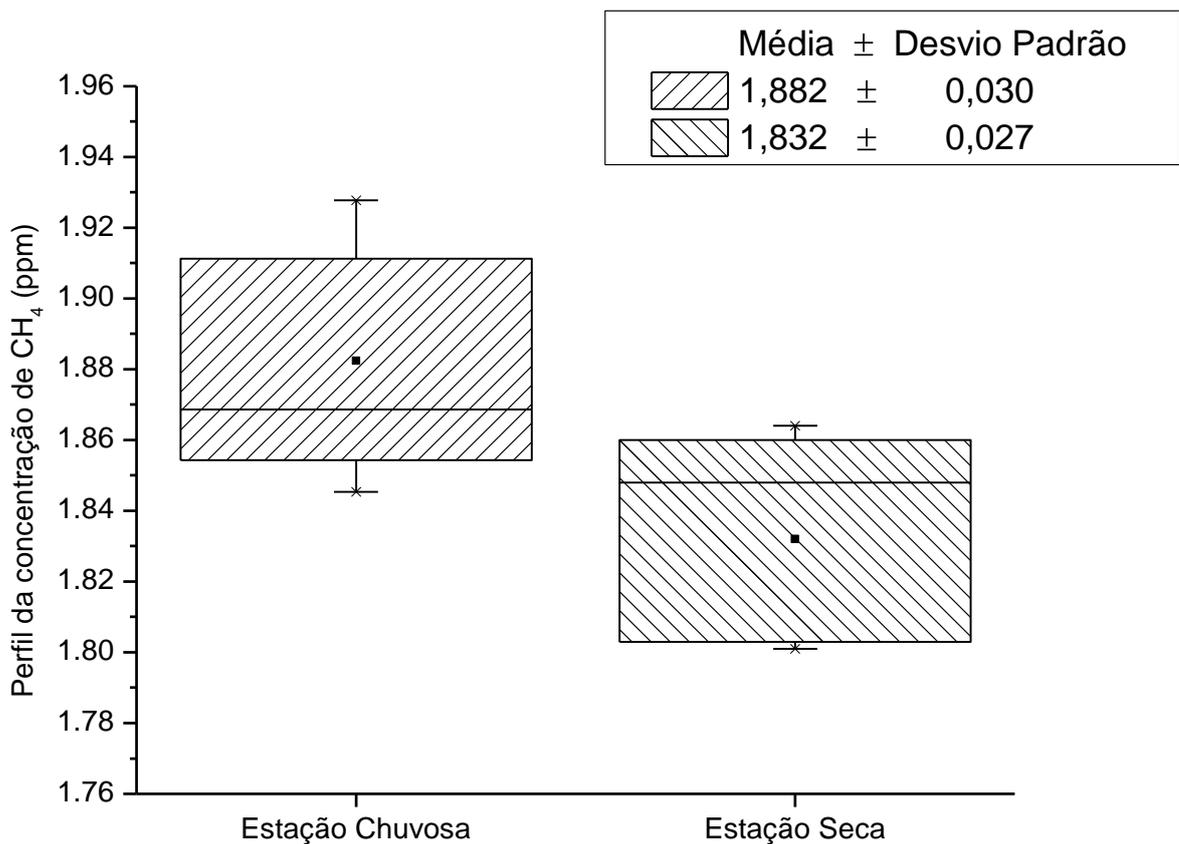
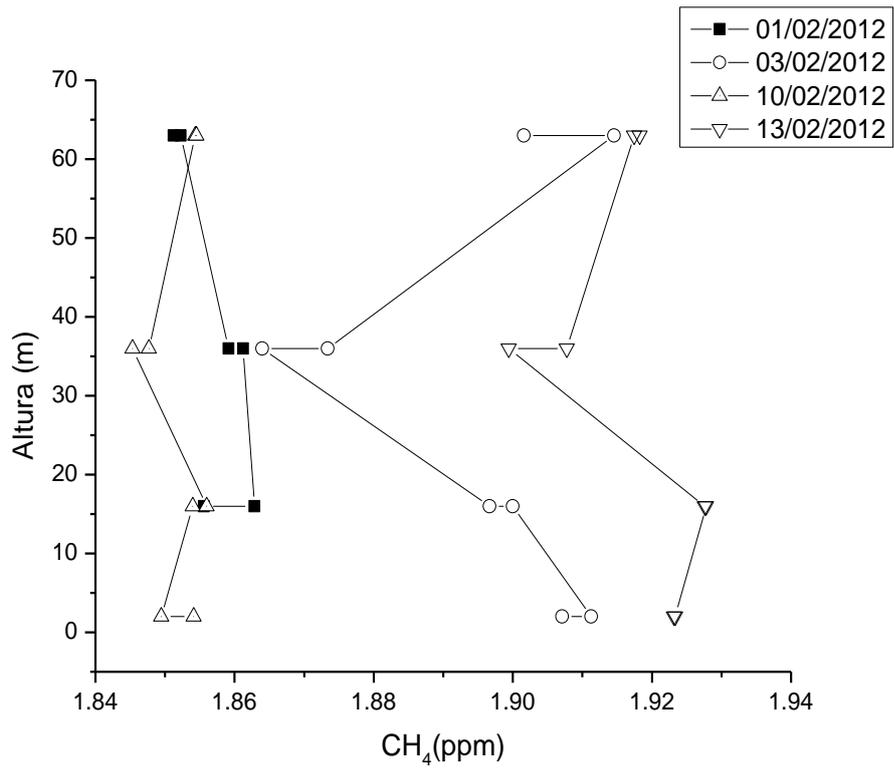


Figura 16 - Concentração de CH<sub>4</sub> no perfil vertical da floresta durante as estações chuvosa e seca.

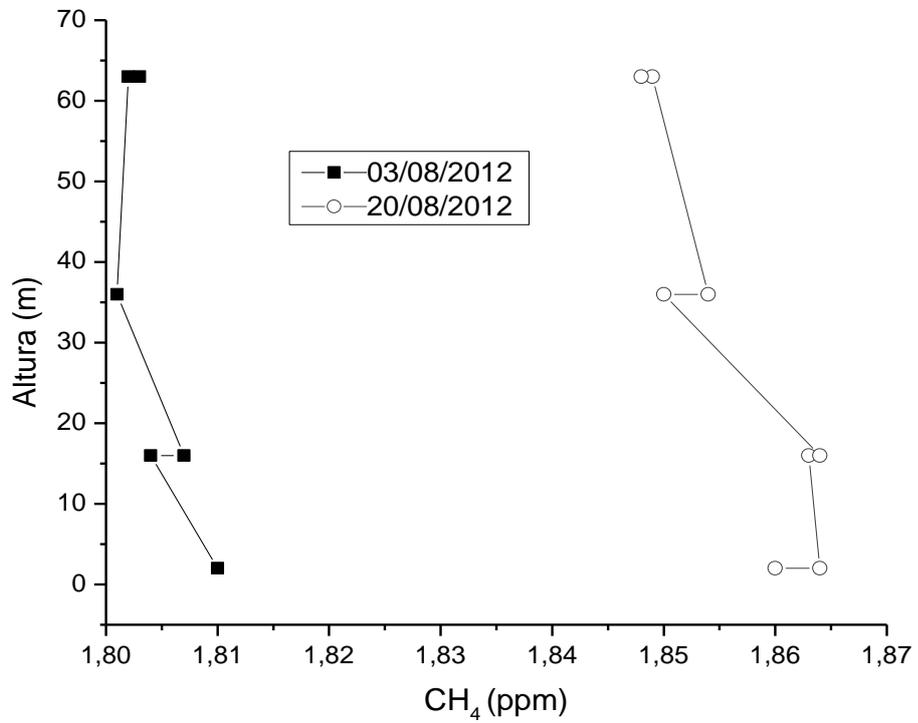
A concentração de CH<sub>4</sub> ao longo do perfil da floresta entre os compartimentos amostrados próximos ao solo, no sub-bosque, na copa e na atmosfera logo acima da floresta durante as estações úmida e seca (Figura 17) não apresentaram diferenças significativas entre as alturas (Tabela 4).

Tabela 4 - Média e os valores de *p* obtidos na análise não paramétrica de “Kruskal-Wallis” na comparação entre os valores das amostras de CH<sub>4</sub> coletadas ao longo do perfil vertical da floresta entre as estações chuvosa e seca.

<b>Local</b>	<b>Item</b>	<b>Estação</b>	<b>Solo (2m)</b>	<b>Sub-Bosque (16m)</b>	<b>Copa (36m)</b>	<b>Acima das copas (63m)</b>	<b><i>p</i></b>
<b>F. N. T</b>	<b>[CH<sub>4</sub>] (ppm)</b>	Chuvosa	1,895	1,885	1,870	1,883	0,6138
		Seca	1,845	1,835	1,827	1,826	0,3024



(a)



(b)

Figura 17 - Medidas de CH<sub>4</sub> em diferentes alturas durante a estação chuvosa (a) e seca (b)

Durante as campanhas realizadas a proporção de mistura do CH<sub>4</sub> aumentou em relação à proporção de mistura do CO<sub>2</sub> (Figura 18).

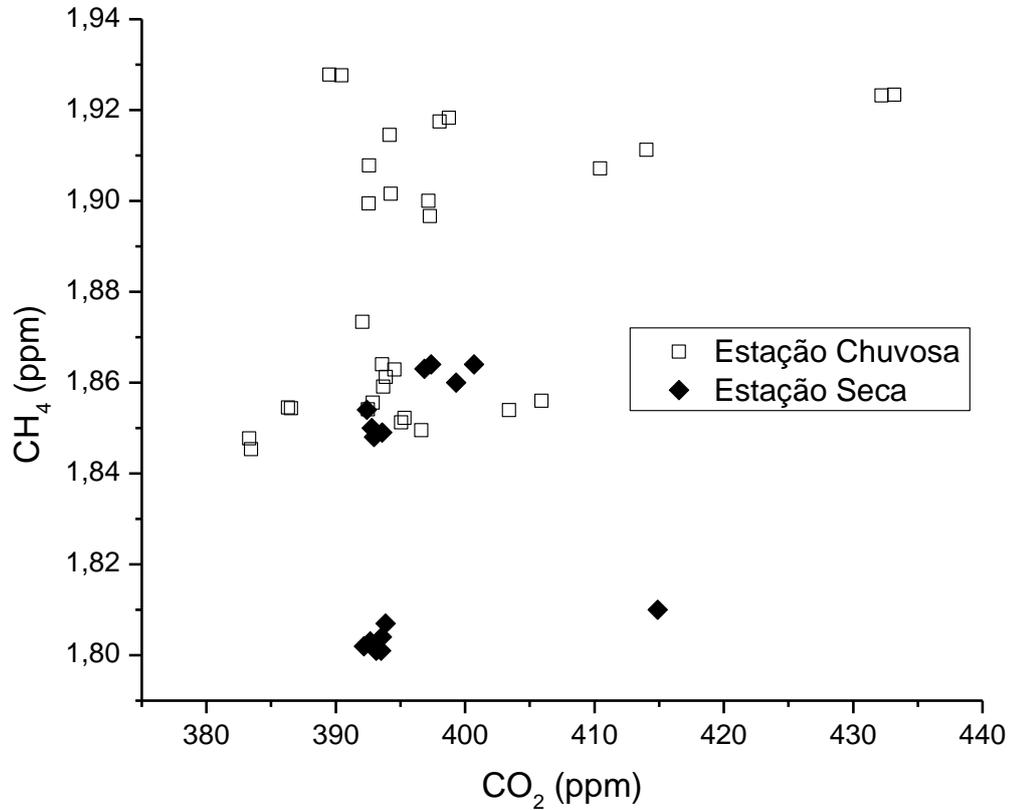


Figura 18 - Proporção de mistura de CH<sub>4</sub> em relação ao CO<sub>2</sub> para todos os perfis.

Os valores médios de  $d[\text{CH}_4] / d[\text{CO}_2]$  durante as estações de amostragem variaram em até uma ordem de grandeza. A média para o fluxo de CO<sub>2</sub> na interface solo-atmosfera variou de 5,6 a 6,2  $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e a emissão estimada de CH<sub>4</sub> para o ecossistema variou de 6,7 a 24,4  $\text{mg de CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para as estações seca e chuvosa, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 - A taxa de  $d[CH_4] / d[CO_2]$  calculado para dois períodos de amostragem na Floresta Nacional do Tapajós (F. N. T) e o fluxo de  $CH_4$  correspondente ao fluxo de  $CO_2$  do solo.

Local	Estação	$d[CH_4] / d[CO_2]$	Fluxo de $CO_2$ do solo ( $\pm$ Desvio Padrão), $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .	Fluxo de $CH_4$ , $\text{mg CH}_4.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .
F. N. T	Chuvosa	0,0012 <sup>a</sup>	$6,2 \pm 1,7$	24,4
	Seca	0,0004	$5,6 \pm 3,1$	6,7

<sup>a</sup>Regressão estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ).

A taxa média da emissão de metano ao longo do perfil vertical da floresta para atmosfera foi de  $15,5 \text{ mg de } CH_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  o que corresponde para um período de um ano, aproximadamente  $56,6 \text{ Mg de } CH_4$  por hectare. Se extrapolarmos para toda a FLONA Tapajós obtém-se um valor corresponde a  $29,8 \text{ Gg de } CH_4 \text{ a}^{-1}$ .

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Concentração e Fluxo de $CH_4$ do solo

A produção média de metano no solo  $2,291 \pm 0,340 \text{ ppm}$  ( $2291 \pm 340 \text{ ppb}$ ) esteve acima da média global para este gás na atmosfera, o qual corresponde a  $1,800 \text{ ppm}$  (Keppler et al. 2006) e  $1813 \pm 2 \text{ ppb}$  para o ano de 2011 (WMO, 2012). Oliveira Junior (2006) apresentou valores de 39 e 59% superiores à concentração de  $2 \text{ ppm}$ , no período seco e úmido, respectivamente a uma profundidade de  $5 \text{ cm}$  para a mesma área de estudo.

A variação do fluxo de  $CH_4$  foi de  $-0,34$  a  $7,99 \text{ mg de } CH_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e a média para a emissão desse fluido na interface solo-atmosfera foi de  $0,45 \pm 0,71 \text{ mg de } CH_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . A maior parte das medidas apresentou resultados de fluxo positivo, indicando uma emissão de metano para atmosfera, no entanto, pesquisas realizadas por Keller et al. (2005) e Moura (2010) encontraram fluxos negativos. O primeiro quantificou uma variação entre  $-0,3 \pm 0,2$  e

-  $0,1 \pm 0,9 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em solo do tipo LATOSSOLO VERMELHO e em ARGISSOLO alterando entre -  $1,0 \pm 0,2$  e -  $0,9 \pm 0,3 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em solos não perturbados pelo corte seletivo de madeira na FNT no km 83. E o segundo, uma média de -  $1,17 \pm 0,28 \text{ mg de CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  na FNT no km 67. Nestes períodos o solo atuou como um sumidouro de metano.

Apesar de o saldo ser positivo, neste trabalho, grande parte das coletas apresentaram valores negativos para o fluxo durante as medidas, principalmente no período de estiagem (novembro) em que se obteve uma absorção de metano pelo solo de -  $0,50 \pm 1,36 \text{ mg de CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Figura 12b). Entretanto, Oliveira Junior (2006) obteve um comportamento positivo tanto para o período úmido quanto para o seco igual a  $0,1696 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  e  $0,1507 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , respectivamente e um fluxo anual aproximado de  $0,16 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  ( $14,08 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ).

É evidente que o estudo de gases traço, principalmente o metano na interface solo-atmosfera é de extrema complexidade, pois é sabido que os solos tropicais são um sumidouro para metano, porém, neste trabalho, assim como no de Oliveira Junior (2006) na Flona Tapajós e com características semelhantes em relação ao tipo de solo e cobertura vegetal, o solo emitiu gás metano para atmosfera, mesmo levando-se em consideração o seu consumo no período seco. Segundo Castro et al. (1994) os solos florestais consomem menos metano quando torna-se mais úmido. Isto pode estar diretamente associada à atuação de organismos metanogênicos (metanogênese), os quais catalisam a quebra da matéria orgânica, resultando na produção de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , pois na camada superficial se concentra uma boa quantidade de liteira a qual pode servir de alimento para estes microorganismos.

A variação de temperatura na superfície do solo em torno de  $2,6^\circ\text{C}$  pode causar um efeito na atividade microbiológica em relação ao fluxo desse gás. Embora, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) possa explicar apenas 34% dessa emissão (Figura 13a). No entanto, em relação à importância na produção/concentração de metano o  $R^2$  explica 92% ainda que parte

dessa produção seja absorvida pelo próprio solo. Dessa forma, é evidente que os fatores ambientais como a temperatura e a umidade do solo são relevantes no controle das taxas de variação do fluxo de metano (Figura 15).

#### **4.2. Concentração e Fluxo de CH<sub>4</sub> no perfil vertical da floresta**

Os dados apresentados sobre a concentração de CH<sub>4</sub> ao longo do perfil vertical da floresta neste trabalho foi de  $1,866 \pm 0,038$  ppm ( $1866 \pm 38$  ppb), levemente superior à média global para esse gás na atmosfera  $1813 \pm 2$  ppb (WMO, 2012). Entretanto, foi abaixo dos resultados encontrados por Moura (2010) para a Floresta Nacional de Caxiuanã (2,080 ppm) e para Floresta Nacional do Tapajós (2,110 ppm). Essa diferença na produção de CH<sub>4</sub> nos perfis florestais pode estar associada ao nível de precipitação pluviométrica nos anos em que foram realizadas as pesquisas, sendo de,  $2296 \text{ mm.ano}^{-1}$  e  $2200 \text{ mm.ano}^{-1}$  para Caxiuanã e FLONA Tapajós, respectivamente. Enquanto que, para a FLONA Tapajós no ano de 2012 (ano de realização do presente trabalho) foi de 1539,2 mm.

Foi possível observar uma diferença na produção de CH<sub>4</sub> influenciada pela sazonalidade meteorológica entre o período chuvoso e de estiagem para o conjunto de dados amostrados. A maior geração de CH<sub>4</sub> durante a estação úmida pode estar relacionada à presença de microsítios anaeróbicos em troncos de árvores, bromélias onde a água da chuva ou a umidade elevada podem criar um ambiente anóxico favorável à sua produção por meio de atividades de microorganismos anaeróbicos atuando na decomposição da matéria orgânica presente na floresta em diferentes alturas (Figura 16).

Ao longo do perfil foram encontrados valores diferentes para a concentração (Figura 17), embora essa diferença não seja expressiva do ponto de vista estatístico (Tabela 5) ainda existe a hipótese proposta por Keppler et. al. (2006) de que existe a produção de metano derivada de plantas vivas ou morta em condições aeróbicas. Crill et al (2007) mostraram que a

concentração média de CH<sub>4</sub> medida na mesma área de estudo variou em torno de 1,700 e 1,900 ppmv. Além disso, coletas realizadas em sobrevoos na FLONA Tapajós encontraram valores de concentrações de CH<sub>4</sub> logo acima da floresta maiores do que em elevadas altitudes indicando que a superfície da vegetação funcione como uma fonte de metano (D' Amelio, 2006 e Basso, 2011). Pesquisadores utilizando a técnica de sensoriamento remoto constataram uma produção de CH<sub>4</sub> significativa oriunda de florestas tropicas de fontes até então desconhecidas (Frankenberg et al., 2005; Bergamaschi et al., 2007; Schneising et al., 2009).

A formação de CH<sub>4</sub> oriunda da floresta de terra firme, encontrada neste trabalho, principalmente no período de estiagem, também pode estar relacionado a fenômenos físicos como radiação UV e temperatura que, interagindo com folhas frescas e secas e com os componentes estruturais da planta como: pectina, lignina e celulose através de um processo fotoquímico direto podem estar contribuindo para a produção e posteriormente emissão de CH<sub>4</sub> em área de vegetação elevada, como a FLONA Tapajós (Vigano et al., 2008; McLeod et al., 2008; Bruhn et al., 2009; Qaderi e Reid, 2009). Além do mais, durante o período seco é comum à existência de focos de incêndios, o que pode contribuir para a concentração de metano suspenso no ar (Moura, 2010). Embora, sua concentração tenha sido menor do que o período chuvoso, essa diminuição do gás na atmosfera pode estar vinculada a um aumento das taxas de difusão do CH<sub>4</sub> para o solo (Dorr et al. 1993; Striegl, 1993).

A FLONA Tapajós no km 67 apresentou um fluxo médio anual de metano igual a 15,5 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, sendo que, na fase mais intensa de chuva o fluxo de emissão correspondeu a 24,4 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> demonstrando uma alta emissão natural em relação ao período seco o qual registrou uma emissão de 6,7 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (Tabela 5). A associação observada de CH<sub>4</sub> com o CO<sub>2</sub> (Figura 18) pode sugerir a existência de uma fonte de CH<sub>4</sub> na camada do dossel devida à razão de mistura proporcional a esses gases e que a taxa de emissão para o metano varia de acordo com a estação (Tabela 5).

Basso (2011) encontrou fluxo médio anual de CH<sub>4</sub> de 42 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e Miller et al. (2007) uma taxa anual de 35 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> ambas realizadas em sobrevoos sobre a FLONA Tapajós. Note que, os valores supracitados estão bem acima da média encontrada neste estudo, no entanto, todos os dados indicam que o ecossistema florestal de terra firme é um potencial emissor de metano para atmosfera.

Carmo et al. (2006) usando medidas diretas da concentração de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> em perfis verticais de florestas de terra-firme da Amazônia e medidas de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, estimaram a emissão líquida de CH<sub>4</sub> alterando entre 2 e 21 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> durante as estações seca e chuvosa de Caxiuanã, Manaus e Sinop. O que também corrobora com o pressuposto de que a vegetação de terra firme de fato é um potencial emissor de metano para atmosfera.

## 5. CONCLUSÃO

Por tudo isso, é evidente que a floresta de terra firme localizada na FLONA Tapajós tem um papel importante na produção e fluxo de CH<sub>4</sub> desse ecossistema para atmosfera.

Constatou-se a variabilidade sazonal da concentração e emissão desse gás ao longo do período de estudo, possivelmente em função das diferenças no volume pluviométrico durante a estação chuvosa e seca e ao efeito das alterações nos teores de umidade e temperatura do solo os quais podem favorecer a produção de CH<sub>4</sub> durante o período chuvoso ou o consumo deste no período de estiagem em razão da atividade de microorganismos no solo.

É importante lembrar que, outros parâmetros podem ser levados em consideração no que diz respeito às fontes localizadas de produção e emissão de CH<sub>4</sub> ao longo da estratificação vegetal como: emissão aeróbica pelas folhas (apesar de não ter apresentado diferença

significativa), microsítios de produção anaeróbicas nas cascas dos troncos e galhos, cupins, emissão via transpiração das plantas e queima de combustível orgânico.

## **6. AGRADECIMENTOS**

A CAPES pelo apoio financeiro através da concessão de uma bolsa de mestrado.

Ao programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia-PGRNA/UFOPA.

Ao Dr. Raimundo Cosme de Oliveira Junior, por suas colaborações e por conceder o Laboratório da EMBRAPA-Santarém para análises das amostras de solo. Agradeço também ao técnico responsável, Cleuton Pereira por me auxiliar nas análises.

Ao Dr. T. Röckmann por disponibilizar o equipamento para a realização das amostras de ar no perfil vertical da floresta.

À Dra. Luciana Vanni Gatti por colaborar nas análises dessas amostras de ar em seu laboratório de Química da Atmosfera do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN e ao técnico Alexandre responsável por essas análises, meu muito obrigado.

Ao programa LBA/Santarém pelo apoio logístico e a seus funcionários Elisangela, Marduck, Gene, Edilson, Loro e Kleber.

## **7. BIBLIOGRAFIA CITADA**

Costa, D. H. M.; Silva, J.N.M.; Carvalho, J.O.P. 2008. Crescimento de árvores em uma área de terra firme na floresta nacional do Tapajós após a colheita de madeira. *Revista de Ciência Agrária*. 50: 63-76.

Basso, L. S. 2011. *Estudo da Emissão de Metano da Bacia Amazônica utilizando Perfis Verticais com Avião*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares /Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. 103p.

Bergamaschi, P.; Frankenberg, C.; Meirink, J. F.; Krol, M.; Entener, F.; Wagner, T.; Platt, U.; Kaplan, J. O.; Korner, S.; Heimann, M.; Dlugokencky, E. J.; Goede, A. 2007. Satellite

cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: 2. Evaluation based on inverse model simulations, *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 112: D2-D02304.

Bruhn, D.; Mikkelsen, T. N.; Obro, J., Willats, W. G. T.; Ambus, P. 2009. Effects of temperature, ultraviolet radiation and pectin methyl esterase on aerobic methane release from plant material, *Plant Biology*, 11: 43 - 48.

Carmo, J.B.; Keller, M.; Dias, J.B.; de Camargo, PB.; Crill, P. A. 2006. Source of methane from upland forests in the Brazilian Amazon. *Geophysical Research letters*. 33: 1-4.

Castro, M.S. et al. 1994. Soil moisture as a predictor of methane uptake by temperate forests soils. *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 1805-1810.

Chambers, J. Q., E. S. Tribuzi, L. C. Toledo, B. F. Crispim, N. Higuchi, J. Santos, A. C. Araujo, B. Kruijt, Nobre, A. D.; Trumbore, S. E. 2004. Respiration from a tropical forest ecosystem: Partitioning of sources and low carbon use efficiency, *Ecol. Appl*, 14: 72–88.

Costa, D. H. M.; Silva, J.N.M.; Carvalho, J.O.P. 2008. Crescimento de árvores em uma área de terra firme na floresta nacional do Tapajós após a colheita de madeira. *Revista de Ciência Agrária*. 50: 63-76.

Crill, P.; Keller, M.; Silva, H.; Dias, J.D.; Albuquerque, S.; Czepiel, P; Oliveira, R.C. 2007. Trace gas fluxes through-canopy measurements in an upland forest of the Eastern Brazilian Amazon. In: LBA-ECO 11th *Science team Meeting*. Salvador.

D'Amelio, M. T. S. 2006. *Estudo de gases de efeito estufa na Amazônia*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares/Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. 178p.

Dickinson, R.E.; Cicerone, R.J. 1986. Future global warming from atmospheric trace gases. *Nature*, 319: 109-115.

- Dorr, H.; Katruff, L; Levin, I. 1993. Soil texture parameterization of the methane uptake in aerated soil. *Chemosphere*, 26; 697-713.
- Espírito santo, F.D.B. 2003. *Caracterização e mapeamento da vegetação da região da Floresta Nacional do Tapajós através de dados óticos, radar e inventários florestais*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo. 279p.
- Frankenberg, C., Meirink, J. F., Van Weele, M., Platt, U.; Agner, T. Assessing methane emissions from global space-borne observations. *Science*, 308: 1010 - 1014.
- Houghton, J. 1994. The climate convention and the latest scientific understanding of climate change. *Renewable Energy*, 5:1-4.
- Keller, M.; Varner, R.; Dias, J.D.; Silva, H.; Crill, P.; De Oliveira, R.C.J.; Asner, G.P. 2005. Soil-atmosphere Exchange of Nitrous Oxide, Nitric Oxide, Methane, and Carbon Dioxide in logged and undisturbed forest in the Tapajós National Forest, Brazil. *Earth Interactions*, 9: 1-28.
- Keppler, F.; Hamilton, J. T. G.; Brass, M.; Röckmann, T. 2006. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, 439:187–191.
- Kuck, L.R.; Smith, T.; Balsley, B.B.; Helmig, D.; Conway, T.J.; tans, P.P.; Davis, K.; Jensen, M.L.; Bognar, J.A.; Arrieta, R.V.; Rodriguez, R.; Birks, J.W. 2000. Measurements of landscape-scale fluxes of carbon dioxide in the Peruvian Amazon by vertical profiling through the atmospheric boundary layer. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 105: 22137-22146.
- Martens, C.S.; Shay, T.J.; Mendlovitz, H.P.; Matross, D.M.; Saleska, S.; Wofsy, S.C.; Woodward, S.; Menton, M.C.; Moura, J.M.S.; Cril, P.; Moraes, O.L.L.; Lima, R.L. 2004. Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: night- CO<sub>2</sub> net ecosystem

exchange derived from radon and eddy covariance methods. *Global Change Biology*. 10: 1-12.

MARINI, L. 2007. *Estudo da emissão de metano no Pantanal Sul-Matogrossense*. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo. 110p.

Mcleod, A. R.; Fry, S. C.; Loake, G. J.; Messenger, D. J.; Reay, D. S.; Smith, K. A.; Yun, B. W. 2008. Ultraviolet radiation drives methane emissions from terrestrial plant pectins. *New Phytologist*, 180: 124 – 132.

Miller, J. B.; Gatti, L. V.; D'Amelio, M. T. S.; Crotwell, A. M.; Dlugokencky, E. J.; Bakwin, P.; Artaxo, P.; Tans, P. P. 2007. Airborne measurements indicate large methane emissions from the eastern Amazon basin. *Geophysical Research Letters*, 34: 8-9.

MOURA, J.M. S. 2010. *Fontes de metano em florestas tropicais da Amazônia: Análise da composição isotópica e uso de técnicas indiretas para determinação de balanços gasosos nesses ecossistemas*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo. 108p.

Nepstad, D. C.; Moutinho, P.; Dias, M.B.; Davidson, E.; Cardionot, G.; Markewitz, D.; Figueiredo, R.; Vianna, N.; Chambers, J.; Ray, D.; Guerreiros, J.B.; Lefebvre, P.; Sternberg, L.; Moreira, M.; Barros, L.; Ishida, F.Y.; Tohlver, I.; Belk, E.; Kalif, K.; Schwalbe, K. 2002. The effects of partial through fall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. *Jornal of Geophysical Research-Atmospheres*. 107: 1-20.

Oliveira, R.C.J. 2006. *Quantificação e caracterização química da água da chuva e de throughfall e fluxos de gases traço em Floresta de Terra Firme na Flona Tapajós, Belterra – Pará*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica/Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. 143p.

- Parotta, J.A.; Francis, J.K., de Almeida, R.R. 1995. Trees of the Tapajos: a photographic field guide. Rio Piedras: General Technical Report IITF-1,1995, 371p.
- Pereira, A.R.; Angelocci, LR.; Sentelhas, P.C. 2002. *AGROMETEOROLOGIA – Fundamentos e aplicações práticas*. Editora agropecuária, Guaíba, 2002, 478p.
- Qaderi, M. M. e Reid, D. M. 2009. Methane emissions from six crop species exposed to three components of global change: Temperature, ultraviolet-B radiation and water stress. *Physiologia Plantarum*, 137: 139 – 147.
- RADAMBRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Folha AS. 21- Santarém. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: (Levantamento dos Recursos Naturais) v.10, DNPM, p. 1976. 510
- Schneising, O.; Buchwitz, M.; Burrows, J. P.; Bovensmann, H.; Bergamaschi, P.; Peters, W.2009. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 2: Methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9: 443 - 465.
- Striegl, R.G. 1993. Diffusional limits to the consumption of atmospheric methane by soils. *Chemosphere*, 26: 715 – 720.
- Telles, E. C.C.; Camargo, P. B.; Martinelli, L. A.; Costa., A. S.; Santos, J.; Higuchi, N.; Oliveira, R. C. 2003. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical Forest soils of Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 17: 1029-2002.
- Vigano, I.; Holzinger, R.; Van Weelden, H.; Keppler, F.; Mcleod, A.; Röckmann, T. 2008. Effect of UV radiation and temperature on the emission of methane from plant biomass and structural components. *Biogeosciences*, 5: 937 - 947.
- WMO Greenhouse Gas Bulletin – The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations though 2011, n° 8, 19November 2012.
- Wofsy, S.C.; Harriss, R.C.; Kaplan, W.A. 1988. Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 93: 1377-1387.

Wuebbles, D.J.; Hayhoe, K. 2002. Atmospheric methane and global change. *Earth Science Reviews*, 52: 177-210.