AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NA
COSTA NORTE/NORDESTE DO BRASIL**

VIVIANE FRANCISCA BORGES

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

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

**São Paulo
2018**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NA
COSTA NORTE/NORDESTE DO BRASIL**

VIVIANE FRANCISCA BORGES

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

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

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2018

*Dedico este trabalho aos meus
pais, Eulanda e Jorge...*

AGRADECIMENTOS

À meus pais, Eulanda e Jorge, pela educação que me deram, ensinando-me a respeitar todos ao meu redor, a ter responsabilidade por minhas escolhas, e ao amor por mim dedicado. Agradeço à minha irmã Bianca, que mesmo com a distância, sei que torcia por mim.

Ao meu amor Mauro, que além de marido, foi sempre um grande companheiro e amigo, tornando meus dias mais alegres em sua companhia, agradeço por todo carinho, amor, dedicação e pela compreensão de minha ausência em alguns momentos para que eu pudesse realizar este trabalho.

À minha família e amigos por todo carinho e torcida nesta caminhada.

À Dra. Luciana Vanni Gatti, pela oportunidade, orientação, apoio, compreensão, amizade e momentos de descontração ao longo desses anos.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pela infraestrutura para a realização do projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela bolsa de estudo concedida para a realização do doutorado.

Às agências de fomento, NERC, NOAA, FAPESP, MCTI e CNPq pelo apoio financeiro e científico na realização dos estudos na costa brasileira.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia, ao Rádio Farol de Salinópolis do 4º Distrito Naval da Marinha do Brasil, ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e ao Centro Regional do Nordeste, ao 3º Distrito Naval da Marinha do Brasil de Natal e também da Agência da Capitânia dos Portos de Camocim, ao Complexo Eólico Itarema, e ao Instituto Federal do Ceará, pela disponibilidade, colaboração, apoio e realização das coletas deste estudo.

Aos amigos, colegas, professores e funcionários, tanto do IPEN como do INPE, pela amizade, apoio, colaboração na realização deste trabalho, e por toda torcida para que esta etapa pudesse ser alcançada.

CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NA COSTA NORTE/NORDESTE DO BRASIL

Viviane Francisca Borges

RESUMO

Para se determinar o balanço dos Gases de Efeito Estufa (GEE) na Amazônia é necessário se conhecer a concentração de entrada destes gases nas massas de ar que chegaram à costa Norte/Nordeste brasileira, provenientes do Oceano Atlântico. Esta foi a principal motivação deste estudo, que abrangeu o período de 2006 até 2017. Amostras de ar atmosférico foram coletadas semanalmente em Arembepe/BA (ABP), Salinópolis/PA (SAL), Natal/RN (NAT), Camocim/CE (CAM) e Itarema/CE (ITA), totalizando 1762 amostras. As amostras de ar foram analisadas quantificando os gases: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hexafluoreto de enxofre (SF_6) e monóxido de carbono (CO). A posição geográfica de cada local de estudo determinou como cada um deles pôde ser influenciado pelo deslocamento da Zona de Convergência Intertropical. Esta influência pôde ser confirmada pelas simulações das trajetórias das massas de ar retrocedentes. Em SAL, CAM e ITA, as massas de ar foram provenientes do Oceano Atlântico Norte e Sul, dependendo da época do ano, já em NAT e ABP as massas de ar foram provenientes apenas do Oceano Atlântico Sul. Foi observado ainda que cada local de estudo apresentou sazonalidade quando comparado às estações de monitoramento global de GEE. SAL, CAM e ITA apresentaram concentrações dos GEE mais elevadas entre janeiro a maio, comportamento semelhante à estação global de Barbados, e no restante do ano, as concentrações foram similares à estação global de Ascension, assim como observado em NAT e ABP, onde as concentrações foram mais baixas e homogêneas durante todo o ano. Durante todo o período de estudo, todos os GEE apresentaram aumento nas concentrações ano após ano, acompanhando o mesmo padrão de aumento observado nas concentrações médias globais.

Palavras-chave: *Concentração, Gases de Efeito Estufa, Costa Brasileira.*

CHARACTERIZATION OF DISTRIBUTION OF THE GREENHOUSE GASES IN THE NORTH/NORTHEAST COAST OF BRAZIL

Viviane Francisca Borges

ABSTRACT

In order to determine greenhouse gases balances (GHG) for Amazon, it is necessary to know the air masses concentration of GHG that arriving in the North / Northeast coast from the Atlantic Ocean. This was the main motivation of this study, which covered the period from 2006 to 2017. Atmospheric air samples were collected weekly at Arembepe/BA (ABP), Salinópolis/PA (SAL), Natal/RN (NAT), Camocim/CE (CAM) and Itarema/CE (ITA), totaling 1762 samples. The air samples were analyzed quantifying the gases: carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), sulfur hexafluoride (SF₆) and carbon monoxide (CO). The geographical position of each study site to determined how each of them could be influenced by the displacement of the Intertropical Convergence Zone. This influence could be confirmed by simulation of the air masses trajectories. At SAL, CAM and ITA, the air masses came from North and South Atlantic Ocean, depending on the time of the year, and at NAT and ABP the air masses came from only of the South Atlantic Ocean. In these sense, the results showed that each study site presented seasonality when compared to the GHG monitoring global stations. SAL, CAM and ITA showed highest GHG concentrations between January and May, similar behavior with Barbados global station, and, in the rest of the year, the concentrations were similar with Ascension global station, as observed in NAT and ABP, where the concentrations were lowest and homogeneous throughout the year. During the period of the study, all GHG showed increase on its concentrations year by year, following the same standards of increasing observed on the global average concentrations.

Keywords: *Concentration, Greenhouse Gases, Brazilian Coast.*

SUMÁRIO

Página

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	24
2.1	Objetivo Geral	24
2.2	Objetivos Específicos	24
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1	Dióxido de carbono (CO ₂)	25
3.2	Metano (CH ₄)	30
3.3	Óxido nitroso (N ₂ O)	34
3.4	Hexafluoreto de enxofre (SF ₆)	37
3.5	Monóxido de carbono (CO)	39
3.6	Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)	41
4	METODOLOGIA	43
4.1	Locais de coleta	43
4.2	Sistema de amostragem	45
4.3	Estrutura local	46
4.4	Armazenamento das amostras	50
4.5	Periodicidade das coletas	50
4.6	Qualidade da amostragem	51
4.7	Sistema analítico para a quantificação dos GEE	52
4.8	Precisão e Acurácia	58
4.8.1	Curva de calibração	60
4.8.2	Estabilidade do sistema analítico	61
4.9	Análise dos dados obtidos nos locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil	62
4.9.1	Determinação da concentração dos GEE nas amostras coletadas em cada um dos locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil	62
4.9.2	Comparação das concentrações dos GEE dos locais de coleta na costa com as concentrações de duas estações de monitoramento global da NOAA	63

4.9.3	Comparação das concentrações dos GEE dos locais de coleta na costa com as concentrações de outras estações de monitoramento global localizadas no Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico	63
4.9.4	Comparação da concentração média anual dos GEE dos locais de coleta na costa com a concentração média anual global e com a concentração média anual por latitude	65
4.9.5	Determinação da tendência de aumento médio anual da concentração dos GEE dos locais de coleta na costa e comparação com a tendência de aumento médio anual global	65
4.9.6	Simulação e entendimento da origem das trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em cada um dos locais de coleta na costa, e caracterização de cada local a partir de dados meteorológicos	65
4.9.7	Comparação das concentrações de CO ₂ com dados de perfis verticais de avião em Salinópolis – PA, e com dados de satélite da concentração de <i>Clorofila a</i>	68
4.9.8	Comparação das concentrações de CO obtidas nos locais de coleta na costa com os focos de queimadas obtidos a partir de dados de satélite	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1	Intercomparação do LaGEE e NOAA	72
5.2	Trajetoórias das massas de ar	75
5.3	Dados meteorológicos	80
5.4	Séries temporais	84
5.4.1	Concentrações de CO ₂	84
5.4.2	Concentrações de CH ₄	100
5.4.3	Concentrações de N ₂ O	104
5.4.4	Concentrações de SF ₆	108
5.4.5	Concentrações de CO	113
5.5	Compar��o da concentração média anual dos GEE dos locais de coleta na costa com a concentração média anual global e com a concentração média anual por latitude	127
5.6	Compar��o das concentrações dos GEE dos locais de coleta na costa com as concentrações de outras estações de monitoramento global localizadas no Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico	131
6	CONCLUSÕES	137
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	140
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1: Concentração média global dos principais GEE nos relatórios da WMO/GAW.....	22
Tabela 2: Informações dos locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil	43
Tabela 3: Concentrações dos padrões das curvas de calibração de CO e N ₂ O...	60
Tabela 4: Concentrações dos padrões para a curva de calibração do CO ₂	61
Tabela 5: Precisão na análise dos gases quantificados no laboratório LaGEE e precisão recomendada pela NOAA/ESRL/GMD e WMO	62
Tabela 6: Estações globais selecionadas na faixa de 30° N e 30° S, localizadas no Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico.....	64
Tabela 7: Estações automáticas do INMET próximas dos locais de coleta	67
Tabela 8: Quantidade de amostras coletadas em cada local de estudo.....	72
Tabela 9: Média da diferença entre as concentrações obtidas pelos laboratórios LaGEE e NOAA para cada etapa de estudo de intercomparação.....	73
Tabela 10: Concentração média anual, desvio padrão e tendência de aumento médio anual para o gás CO ₂ nos locais de coleta na costa brasileira	87
Tabela 11: Concentração média anual, desvio padrão e tendência de aumento médio anual para o gás CH ₄ nos locais de coleta na costa brasileira	103
Tabela 12: Concentração média anual, desvio padrão e tendência de aumento médio anual para o gás N ₂ O nos locais de coleta na costa brasileira	108
Tabela 13: Concentração média anual, desvio padrão e tendência de aumento médio anual para o gás SF ₆ nos locais de coleta na costa brasileira	112
Tabela 14: Concentração média anual e desvio padrão para o gás CO nos locais de coleta na costa brasileira	127

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1: Balanço radiativo do sistema terrestre sem o efeito estufa e com o efeito estufa.....	16
Figura 2: Média anual global do balanço de energia terrestre (2000 – 2010).....	17
Figura 3: Forçante radiativa (W m^{-2}) de 1750 a 2011..	19
Figura 4: Dados de testemunho de gelo Antártico. Variações de deutério (δD) do gelo antártico utilizado como indicador de temperatura local, e concentrações dos gases CO_2 , CH_4 e N_2O nas bolhas de ar aprisionadas no testemunho de gelo e medições atmosféricas recente	20
Figura 5: Concentrações de CO_2 , CH_4 e N_2O , à esquerda antes de 1750 e à direita após 1750.....	21
Figura 6: Crescimento da população mundial	21
Figura 7: Média mensal global da concentração de CO_2 e taxa de crescimento mensal entre 1984 a 2016	26
Figura 8: Representação da perturbação do ciclo global do carbono.....	27
Figura 9: Variação da concentração global de CO_2 de 1983 – 2015	28
Figura 10: Média mensal das concentrações de CO_2 e tendência a longo prazo de 1983 – 2015 para cada 30° de latitude	28
Figura 11: Ciclo sazonal médio da concentração de CO_2 de 1983 – 2015 a cada 30° de latitude	29
Figura 12: Emissões globais de CO_2 por tipo de combustível, combustível fóssil e indústria e mudança no uso da terra.....	29
Figura 13: Emissões brutas de CO_2 por setor para 2005, 2010 e 2014.....	30
Figura 14: Taxa de desmatamento anual na Amazônia Legal de 1988 a 2017	30
Figura 15: Média mensal global da concentração de CH_4 e taxa de crescimento mensal entre 1984 a 2016	31
Figura 16: Variação da concentração global de CH_4 de 1984 – 2015	32
Figura 17: Média mensal das concentrações de CH_4 e tendência a longo prazo de 1984 – 2015 para cada 30° de latitude.	33
Figura 18: Ciclo sazonal médio da concentração de CH_4 de 1984 – 2015 a cada 30° de latitude	34
Figura 19: Percentual de emissões de CH_4 no setor da agropecuária em 2014...	34

Figura 20: Média mensal global da concentração de N_2O e taxa de crescimento mensal entre 1980 a 2016	35
Figura 21: Variação da concentração global de N_2O de 1980 – 2015	36
Figura 22: Concentração média de N_2O nos Hemisférios Norte e Sul.....	36
Figura 23: Percentual de emissões de N_2O no setor da agropecuária em 2014. .	37
Figura 24: Concentração média global de SF_6 de 1995 – 2016	38
Figura 25: Variação da concentração global de CO de 1992 – 2015	40
Figura 26: Média mensal das concentrações de CO e tendência a longo prazo de 1992 – 2015 para cada 30° de latitude.	41
Figura 27: Ciclo sazonal médio da concentração de CO de 1992 – 2015 a cada 30° de latitude	41
Figura 28: Locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil. ASC (Ascension) e RPB (Barbados) são as estações globais da NOAA.	44
Figura 29: Esquema geral do sistema de amostragem.	45
Figura 30: Detalhamento do amostrador portátil construído no laboratório e utilizado na amostragem de ar atmosférico.	46
Figura 31: ABP – Praia de Arembepe em frente a antiga sede do INMET.	47
Figura 32: SAL – Praia Corvina e a passarela onde foram realizadas as coletas.	47
Figura 33: NAT – Farol de Mãe Luiza, e o antigo local de coleta no observatório em Maxaranguape.....	48
Figura 34: CAM – Vista do alto do Farol de Camocim em frente ao mar.	48
Figura 35: ITA – Vista do alto da torre meteorológica do Parque Eólico.....	49
Figura 36: Sistema de amostragem de ar atmosférico instalado em cada local da costa como filtro, tubo de teflon, amostrador portátil e frascos de vidro	49
Figura 37: Sistema LaGEE	53
Figura 38: Esquema de funcionamento do sistema analítico instalado no LaGEE.	54
Figura 39: Esquema de entrada e saída do gás referência e da amostra nas células do monitor de CO_2 , e Componentes de uma célula do monitor de CO_2	55
Figura 40: Esquema de funcionamento do cromatógrafo na análise do CH_4	56
Figura 41: Esquema do DIC na análise do gás CH_4 , e Esquema do DCE na análise dos gases N_2O e SF_6	57
Figura 42: Esquema de funcionamento do cromatógrafo na análise do gás CO , e Esquema do detector do cromatógrafo do gás CO	58
Figura 43: Exemplo de uma curva do tanque de calibração do N_2O	59
Figura 44: Intercomparação dos laboratórios, brasileiro e filiados à NOAA, para os gases CO_2 , CH_4 e N_2O	60
Figura 45: Análise de CO_2 mostrando a sequência das referências.....	61

Figura 46: Estações globais em parceria com a NOAA e locais de estudo na costa brasileira.....	63
Figura 47: Estações globais selecionadas na faixa de 30° N a 30° S, localizadas no Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico e locais de coleta na costa brasileira.	64
Figura 48: Intercomparação dos laboratórios LaGEE x NOAA no decorrer das 3 etapas, mostrando a dispersão da concentração média para os gases CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SF ₆ e CO, para as coletas realizadas em NAT e ABP.....	75
Figura 49: Posições sazonais da Zona de Convergência Intertropical	76
Figura 50: Trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em SAL de 2010 – 2017.....	77
Figura 51: Trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em CAM de 2014 – 2017.....	78
Figura 52: Trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em ITA de 2016 – 2017.....	78
Figura 53: Trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em NAT de 2010 – 2017.....	79
Figura 54: Trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em ABP de 2006 – 2010.....	79
Figura 55: Direção e velocidade dos ventos, de 2010 – 2017 em SAL e NAT, de 2014 – 2017 em CAM, de 2016 – 2017 em ITA, e de 2006 – 2010 em ABP....	81
Figura 56: Precipitação média mensal e temperatura do ar em: SAL (2008 – 2017), CAM - ITA (2009 – 2017), NAT (2003 – 2017) e ABP (2002 – 2010).....	83
Figura 57: Série temporal para CO ₂ em SAL (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.....	84
Figura 58: Série temporal para CO ₂ em CAM (2014 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.....	85
Figura 59: Série temporal para CO ₂ em ITA (2016 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.....	85
Figura 60: Série temporal para CO ₂ em NAT (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.....	86
Figura 61: Série temporal para CO ₂ em ABP (2006 – 2009) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.....	86
Figura 62: Descarga total da Bacia Amazônica de 2003 – 2013	89
Figura 63: Perfis verticais em SAH: concentração de CO ₂ e concentração inicial. Média mensal da absorção de carbono para o período de 2013 – 2015 e descarga em Óbidos e descarga total da Bacia do Rio Amazonas referente ao ano de 2013.....	90
Figura 64: Concentração de <i>Clorofila a</i> , em 2010 no Oceano Atlântico tropical. ...	93
Figura 65: Concentração de <i>Clorofila a</i> , em 2011 no Oceano Atlântico tropical. ...	94

Figura 66: Concentração de <i>Clorofila a</i> , em 2012 no Oceano Atlântico tropical. ...	95
Figura 67: Concentração de <i>Clorofila a</i> , em 2013 no Oceano Atlântico tropical. ...	96
Figura 68: Concentração de <i>Clorofila a</i> , em 2014 no Oceano Atlântico tropical. ...	97
Figura 69: Concentração de <i>Clorofila a</i> , em 2015 no Oceano Atlântico tropical. ...	98
Figura 70: Concentração de <i>Clorofila a</i> , em 2016 no Oceano Atlântico tropical. ...	99
Figura 71: Série temporal para CH ₄ em SAL (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	100
Figura 72: Série temporal para CH ₄ em CAM (2014 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	101
Figura 73: Série temporal para CH ₄ em ITA (2016 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	101
Figura 74: Série temporal para CH ₄ em NAT (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	102
Figura 75: Série temporal para CH ₄ em ABP (2006 – 2009) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	102
Figura 76: Série temporal para N ₂ O em SAL (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	105
Figura 77: Série temporal para N ₂ O em CAM (2014 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	106
Figura 78: Série temporal para N ₂ O em ITA (2016 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	106
Figura 79: Série temporal para N ₂ O em NAT (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	107
Figura 80: Série temporal para N ₂ O em ABP (2006 – 2009) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	107
Figura 81: Série temporal para SF ₆ em SAL (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	109
Figura 82: Série temporal para SF ₆ em CAM (2014 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	110
Figura 83: Série temporal para SF ₆ em ITA (2016 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	110
Figura 84: Série temporal para SF ₆ em NAT (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	111
Figura 85: Série temporal para SF ₆ em ABP (2006 – 2009) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	111
Figura 86: Série temporal para CO em SAL (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	114
Figura 87: Série temporal para CO em CAM (2014 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	114

Figura 88: Série temporal para CO em ITA (2016 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	115
Figura 89: Série temporal para CO em NAT (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	115
Figura 90: Série temporal para CO em ABP (2006 – 2009) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.	116
Figura 91: Número de focos de queimadas mensal no Brasil, onde a linha vermelha representa a média mensal, e o destaque representa o número total anual de focos de queimadas, ambos para o período total de 2006 – 2017.	116
Figura 92: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2010..	119
Figura 93: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2011..	120
Figura 94: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2012..	121
Figura 95: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2013..	122
Figura 96: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2014..	123
Figura 97: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2015..	124
Figura 98: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2016..	125
Figura 99: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2017..	126
Figura 100: Concentração média anual para os gases CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SF ₆ e CO em SAL, NAT, CAM, e ABP, comparando com: a concentração média anual global dos relatórios da WMO/GAW, e com a concentração média anual por latitude da rede mundial NOAA.	130
Figura 101: Comparação da concentração de CO ₂ , em SAL e NAT com as estações globais de 30° N – 0°, localizadas nos Oceanos Atlântico e Pacífico.	132
Figura 102: Comparação da concentração de CO ₂ , em SAL e NAT com as estações globais de 0° – 30° S, localizadas nos Oceanos Atlântico e Pacífico.	133
Figura 103: Comparação da concentração de CH ₄ , em SAL e NAT com as estações globais de 30° N – 0°, localizadas nos Oceanos Atlântico e Pacífico.	135
Figura 104: Comparação da concentração de CH ₄ , em SAL e NAT com as estações globais de 0° – 30° S, localizadas nos Oceanos Atlântico e Pacífico.	136

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

ABP	Arembepe - Bahia
ASC	Ilha de Ascension
ATSM	Anomalias de Temperatura da Superfície do Mar
CAM	Camocim – Ceará
CCG	<i>Carbon Cycle Gases</i>
CMDL	<i>Climate Monitoring & Diagnostics Laboratory</i>
CRN	Centro Regional do Nordeste
DCE	Detector de Captura Eletrônica
DIC	Detector de Ionização de Chama
ENOS	El Niño – Oscilação Sul
ESRL	<i>Earth System Research Laboratory</i>
FR	Forçante Radiativa
GAW	<i>Global Atmosphere Watch</i>
GDAS	<i>Global Data Assimilation System</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GMD	<i>Global Monitoring Division</i>
GOSAT	<i>Greenhouse Gases Observing Satellite</i>
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
HYSPLIT	<i>Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory</i>
IFCE	Instituto Federal do Ceará
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPA	Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
ITA	Itarema – Ceará
LaGEE	Laboratório de análises de Gases de Efeito Estufa
LQA	Laboratório de Química Atmosférica
MERIS	<i>MEdium-spectral Resolution, Imaging Spectrometer</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NAT	Maxaranguape/Natal – Rio Grande do Norte
NDIR	Radiação Infravermelha Não Dispersivo
NOAA	<i>National Oceanic & Atmospheric Administration</i>

OA	Oceano Atlântico
OAN	Oceano Atlântico Norte
OAS	Oceano Atlântico Sul
OP	Oceano Pacífico
OPN	Oceano Pacífico Norte
OPS	Oceano Pacífico Sul
PAG	Potencial de Aquecimento Global
RPB	Ilha de Barbados (<i>Ragged Point Barbados</i>)
SAH	Salinópolis – Pará (perfil vertical de avião)
SAL	Salinópolis – Pará
SeaWIFS	<i>Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VIIRS	<i>Visible Infrared Imaging Radiometer Suite</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

1 INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno que ocorre naturalmente na atmosfera devido a presença de gases, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), vapor d'água (H_2O), ozônio (O_3), entre outros, que possuem a capacidade de absorver energia na faixa do infravermelho que a crosta terrestre emite. Com isso, os gases impedem o regresso da radiação da superfície ao espaço, conseguindo manter a troposfera aquecida com uma temperatura média de 15°C , o que possibilita a existência de vida no planeta. Contudo, sem a presença destes gases de efeito estufa (GEE), a temperatura média seria de -18°C , como mostra a Figura 1 [1, 2].

Porém, o aumento de emissões antrópicas está elevando a concentração destes gases na atmosfera, aumentando o efeito estufa devido à maior retenção de calor e elevando a temperatura terrestre. Consequentemente, ocasionando mudanças no clima [3, 4], pois quanto mais gases são lançados na atmosfera, maior será a capacidade dessa de acumular calor na troposfera, sendo que nos dois últimos séculos vem ocorrendo esta tendência [5, 6].

Figura 1: Balanço radiativo do sistema terrestre sem o efeito estufa (à esquerda) e com o efeito estufa (à direita) [1].
(Adaptada de Ahrens, 2000)

O fluxo de energia de entrada e saída determina o clima terrestre, pois dirige a circulação oceânica, alimenta a evaporação da água da superfície terrestre

e governa o ciclo hidrológico do planeta. Assim, a alteração no balanço de energia da superfície também controla como o ciclo hidrológico responde aos pequenos desequilíbrios energéticos que forçam a mudança climática [7].

A evaporação da superfície ($88 \pm 10 \text{ W m}^{-2}$), relacionada com o fluxo de calor é o processo que consome a maior parte do excesso da energia radiante ($165 \pm 6 \text{ W m}^{-2}$), seguido pela emissão de radiação de onda longa de superfície ($398 - 345 = 53 \pm 9 \text{ W m}^{-2}$), e pelo calor sensível ($24 \pm 7 \text{ W m}^{-2}$). O calor transferido para a atmosfera, através do calor latente e do calor sensível, equilibra a perda de energia radiante da atmosfera ($-112 \pm 15 \text{ W m}^{-2} = 74 + 398 - 239 - 345$). O efeito albedo das nuvens, na radiação de onda curta, aumenta o fluxo solar refletido ($47,5 \pm 3 \text{ W m}^{-2}$), enquanto as nuvens reduzem o fluxo de onda longa em relação ao céu claro em $26,4 \pm 4 \text{ W m}^{-2}$ (medida do seu efeito estufa), resultando em uma perda de radiação da Terra por nuvens de $21,1 \pm 5 \text{ W m}^{-2}$ [7]. A média anual global do balanço de energia terrestre, de 2000 a 2010, está representada na Figura 2.

A radiação de onda longa pode ser modificada pelo efeito dos GEE, podendo absorvê-la e reemitir-la alterando sua quantidade de saída. O albedo pode ser alterado por mudanças na vegetação ou nas propriedades da superfície terrestre, neve ou cobertura de gelo, e cor do oceano. E, estas alterações são conduzidas tanto por modificações naturais como por influência humana [8].

Figura 2: Média anual global do balanço de energia terrestre (2000 – 2010). Fluxo solar (amarelo) e infravermelho (rosa) são medidos em W m^{-2} . Caixas (lilás) representam os principais componentes do balanço de energia [7].

(Adaptada de Stephens et al., 2012)

O desequilíbrio energético líquido no topo da atmosfera varia naturalmente em resposta ao clima e às variações climáticas, sendo a variação mais característica a do fenômeno El Niño – Oscilação Sul (ENOS). Também se tem a variação devido ao ciclo da mancha solar. Além disso, o fluxo de energia líquido no topo da atmosfera pode ser profundamente influenciado por erupções vulcânicas, assim como a capacidade de calor dos oceanos. Todas essas influências ocorrem sobrepostas aos sinais das mudanças climáticas associadas com as mudanças na composição atmosférica [9].

O clima terrestre vem sofrendo com a intervenção humana há milhares de anos. Contudo, esta intervenção se intensificou nos últimos séculos, alterando muitos dos ciclos biogeoquímicos. A primeira e mais importante mudança foi a modificação do ciclo global do carbono [10].

As mudanças induzidas por atividades naturais e antrópicas, que ocorrem na atmosfera, na terra, no oceano, na biosfera, perturbam o balanço da radiação terrestre, produzindo uma forçante radiativa (FR) que é uma medida da alteração líquida no balanço de energia, dada em W m^{-2} , em resposta a uma perturbação externa que influencia o clima, causando alterações no balanço da radiação solar e na radiação infravermelha. Essas alterações levam ao aquecimento ou resfriamento do sistema, sendo que os principais GEE apresentam uma FR positiva pois absorvem radiação infravermelha. Um resumo dos principais componentes da FR nas mudanças climáticas está apresentada na Figura 3 [8, 11]. Como cada GEE absorve energia com diferente intensidade, foi elaborado um índice do potencial de aquecimento global (PAG), estimando seu efeito climático baseado na FR e no tempo de vida de cada GEE.

O delicado balanço entre os processos físicos, químicos e biológicos do sistema terrestre tem sido perturbado desde a revolução industrial. O crescimento exponencial da população mundial acarretou na mudança do uso da terra e florestas, intensificação da industrialização, aumento das atividades agrícolas e pecuárias, aumento da queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás mineral) e na queima de biomassa [12, 13]. A abundância de gases na atmosfera, levam a mudanças na temperatura e precipitação, aumentando a ocorrência de eventos extremos [12, 14], derretimento de geleiras, aumento do nível do mar, aumento de inundações, causando alterações nos padrões climáticos e afetando ecossistemas, prejudicando a saúde humana, e causando prejuízos no

fornecimento de água em várias regiões do mundo [6, 15]. Embora as alterações climáticas não possam ser totalmente evitadas, tentar reduzir substancialmente a liberação de GEE na atmosfera é imprescindível para a preservação do planeta [6].

Figura 3: Forçante radiativa (W m⁻²) de 1750 a 2011. Barra horizontal: incerteza total; Barra vertical: componente individual, a incerteza $\pm 50\%$ é igual à largura da barra, e a incerteza relativa é proporcional ao comprimento da barra. Estimativas das componentes total e individual são dadas na coluna da direita [11].

(Adaptada de Stocker et al., 2013)

Devido a precipitação de neve a cada ano sobre as geleiras, fez com que bolhas de ar ficassem aprisionadas no gelo, guardando informações das concentrações atmosféricas de poeira, sal marinho, cinzas, bolhas de gases e poluentes humanos. Assim, a análise das propriedades físicas e químicas deste gelo foram capazes de revelar as variações climáticas que ocorreram há centenas de milhares de anos. O testemunho de gelo é uma amostra de gelo em formato cilíndrico proveniente da perfuração de uma geleira, e os registros desses testemunhos são considerados uma forma mais direta de se investigar as condições climáticas e atmosféricas do passado. A partir dos registros desses testemunhos de gelo foi possível reconstruir as temperaturas ao longo das últimas

centenas de milhares de anos, mostrando, claramente, os períodos glaciais e interglaciais. A proporção de isótopos estáveis presente na água, como o deutério (δD), possui relacionamento direto com a temperatura, sendo assim utilizado para inferir as temperaturas do passado. Na Figura 4, é mostrado um exemplo do registro obtido em testemunho de gelo Antártico, possibilitando verificar as variações de temperatura e concentração dos gases CO_2 , CH_4 e N_2O ao longo dos milhares de anos. A partir dessas evidências, cientistas concluíram que o aumento da concentração dos GEE na atmosfera é o responsável pelo aquecimento do planeta [16].

Figura 4: Dados de testemunho de gelo Antártico. Variações de deutério (δD) do gelo antártico utilizado como indicador de temperatura local, e concentrações dos gases CO_2 , CH_4 e N_2O nas bolhas de ar aprisionadas no testemunho de gelo e medições atmosféricas recente. Os dados cobrem 650 mil anos e as sombras indicam períodos interglaciais quentes atuais e períodos anteriores [16].

(Adaptada de Solomons et al., 2007)

A concentração dos principais GEE, CO_2 , CH_4 e N_2O , vem crescendo principalmente desde 1750, como mostra a Figura 5. Crescimento este causado por emissões antrópicas devido ao uso de combustíveis fósseis como fonte de energia e alterações no uso da terra e florestas decorrentes do aumento da população mundial [17] como mostra a Figura 6, sendo consideradas como principais causas da mudança climática atribuída às atividades humanas [18, 19].

Figura 5: Concentrações de CO_2 , CH_4 e N_2O , à esquerda antes de 1750 e à direita após 1750. Símbolos coloridos: dados em testemunho de gelo. Linha azul: medidas realizadas no observatório de Cape Grim na Austrália ^[19].

(Adaptada de Ciais et al., 2013).

Figura 6: Crescimento da população mundial ^[17].

As concentrações médias globais dos principais GEE vêm crescendo anualmente, como mostram os relatórios da WMO/GAW (*World Meteorological Organization/ Global Atmosphere Watch*) ^[20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32], dados estes representados na Tabela 1, para o período de 2004 – 2016. Atualmente, a GAW coordena atividades e distribuição de dados de 31 estações globais, de mais de 400 estações regionais, e de cerca de 100 estações contribuintes ligadas a rede de cooperação ^[33], alimentando modelos de previsão de mudanças climáticas. Sendo que atualmente o Brasil apresenta apenas um local de medidas contínuas

incorporado a esta rede desde maio de 2010, pois um outro local de medidas contínuas que funcionou de 2006 a início de 2010 precisou ser desativado.

Tabela 1: Concentração média global dos principais GEE nos relatórios da WMO/GAW [20-32]

Concentração média global			
Ano	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)	N ₂ O (ppb)
2004	377,1	1783,0	318,6
2005	379,1	1783,0	319,2
2006	381,2	1782,0	320,1
2007	383,1	1789,0	320,9
2008	385,2	1797,0	321,8
2009	386,8	1803,0	322,5
2010	389,0	1808,0	323,2
2011	390,9	1813,0	324,2
2012	393,1	1819,0	325,1
2013	396,0	1824,0	325,9
2014	397,7	1833,0	327,1
2015	400,0	1845,0	328,0
2016	403,3	1853,0	328,9

Diante deste panorama, o grupo de pesquisa coordenado pela Dra. Luciana Vanni Gatti, em atividade no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) na cidade de São José dos Campos no estado de São Paulo, tem trabalhado ao longo dos anos para ampliar essas informações, com foco tanto na Bacia Amazônica como em locais da costa brasileira, pois existe uma escassez de medidas de GEE em áreas tropicais, o que pode gerar significativas incertezas nos resultados obtidos por modelos de previsão climática, visto que maior parte do monitoramento de GEE no globo se concentra no Hemisfério Norte (HN).

Cerca de 50% da floresta tropical do globo está localizada na América do Sul, a Floresta Amazônica (8 milhões de km²) [34], e a maior parte da área da Bacia Amazônica (em torno de 62%) está localizada no território brasileiro [35], com cerca de 6,7 milhões de km², constituindo o maior reservatório de carbono orgânico acima do solo, e possuindo um quarto da biodiversidade global [36, 37].

Entretanto, a floresta tem sofrido com a ação humana devido à exploração de madeira, conversão da floresta e outras formas de exploração de seus recursos, com isso, nas últimas duas décadas, tem experimentado temperaturas cada vez mais elevadas, além de frequentes inundações e secas [38]. Estudos mostraram um aquecimento nas florestas tropicais de $0,26 \pm 0,05$ °C por

década ^[39], e outros sugerem um aquecimento de 1,9 a 7,9 °C para o fim do século XXI ^[40], tais fatos, estão relacionados ao desmatamento nas áreas tropicais.

Buscando compreender o comportamento da Floresta Amazônica no cenário de emissão e/ou absorção, a partir do cálculo do fluxo e balanço de GEE em escala regional ^[41, 42], se faz necessário conhecer as concentrações dos GEE que chegam no território brasileiro.

Devido à escassez de dados que possam representar a região tropical, em especial a costa brasileira, a motivação deste estudo foi quantificar as concentrações de entrada dos GEE e entender o comportamento das massas de ar que chegam na costa Norte e Nordeste do Brasil provenientes do Oceano Atlântico e quais são suas origens e influências sobre as concentrações.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinar as concentrações de Gases de Efeito Estufa nas massas de ar que chegam a costa Norte e Nordeste do Brasil, e entender os padrões de circulação atmosférica nesta região e quais os fatores que influenciam na variabilidade geográfica, temporal e sazonal dessas concentrações.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a concentração dos GEE nas amostras coletadas em cada um dos locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil;
- Comparar as concentrações dos GEE dos locais de coleta na costa com as concentrações de duas estações de monitoramento global da rede *National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA;
- Comparar as concentrações dos GEE dos locais de coleta na costa com as concentrações de outras estações de monitoramento global localizadas no Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico;
- Comparar a concentração média anual dos GEE dos locais de coleta na costa com a concentração média anual global e com a concentração média anual por latitude;
- Determinar a tendência de aumento médio anual da concentração dos GEE dos locais de coleta na costa e comparar com a tendência de aumento médio anual global;
- Simular e entender a origem das trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em cada um dos locais de coleta na costa, assim como caracterizar cada local a partir de dados meteorológicos;
- Comparar as concentrações de CO₂ com os dados obtidos em perfis verticais de avião apenas para o local de coleta em Salinópolis – PA, e também comparar com a concentração de *Clorofila a* obtida a partir de dados de satélite;
- Comparar as concentrações de CO obtidas nos locais de coleta na costa com os focos de queimadas obtidos a partir de dados de satélite;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono é um gás inodoro e incolor de massa molar de 44 g mol⁻¹, também conhecido como gás carbônico, possui dois átomos de oxigênio e um átomo de carbono sendo representado pela fórmula molecular CO₂, apresenta geometria linear (O=C=O) e caráter apolar. O CO₂ é considerado o principal GEE antrópico, representando cerca de 65% do aumento total da FR desde 1750 pelos GEE de longa duração na atmosfera [43]. O equilíbrio dos fluxos entre a atmosfera, os oceanos e a biosfera determina a concentração deste gás na atmosfera. Como sua concentração tem aumentado constantemente desde o início do século, isto representa que sua taxa de remoção não tem sido grande o suficiente para superar a taxa de seu crescimento devido às altas emissões antrópicas [44].

No período pré-industrial em 1750, a concentração do CO₂ registrada era de 278 ppm, e desde então sofreu um aumento de 45%, alcançando no ano de 2016 a máxima de 403,3 ± 0,1 ppm [32, 45], como pode ser observado na Figura 7. Um aumento de 3,3 ppm em relação ao ano de 2015, valor este considerado maior que o aumento de 2012 – 2013, e 50% maior que a taxa de crescimento da última década de 2,2 ppm [32]. Esse crescimento deve-se, em parte, ao aumento das emissões naturais relacionado ao evento mais recente de El Niño.

O evento de El Niño é uma flutuação natural do sistema climático, onde a água excepcionalmente quente se acumula no Oceano Pacífico Equatorial. Esse evento é associado a padrões climáticos anormais, como fortes tempestades em alguns lugares e secas ou inundações em outros. O evento de El Niño tem duração de 9 meses a 2 anos, sendo que o fenômeno ocorre aproximadamente a cada 2 a 7 anos. Durante o evento de El Niño o aumento na emissão líquida é provavelmente devido ao aumento da seca nas regiões tropicais, levando a menor absorção de carbono pela vegetação e ao aumento das emissões de CO₂ por incêndios. Outras mudanças esperadas estão relacionadas à perda de gelo em larga escala no Ártico, aumento das secas internas devido ao aquecimento, derretimento do *permafrost* e mudanças na circulação termohalina do oceano, onde o El Niño é na verdade um modulador menor dessas mudanças [31].

Figura 7: Média mensal global da concentração de CO₂ e taxa de crescimento mensal entre 1984 a 2016 ^[45].

O balanço global de carbono apresentado na Figura 8, se baseia nas variações e tendências da perturbação atmosférica de CO₂, levando em consideração a entrada de CO₂ na atmosfera devido às emissões provenientes das atividades humanas, taxa de crescimento do CO₂, mudanças no armazenamento de carbono nos reservatórios terrestres e oceânicos, mudanças climáticas e variabilidade, e outras mudanças antropogênicas e naturais. Compreender a perturbação ao longo do tempo, sua variabilidade e as tendências do ciclo natural do carbono são necessárias para entender a resposta dos sumidouros naturais diante das mudanças no clima. Em 2016 as emissões de CO₂, provenientes do uso de combustíveis fósseis e indústrias foi de $9,4 \pm 0,5 \text{ Gt C ano}^{-1}$, e as emissões devido à mudança no uso de terras e florestas foi de $1,3 \pm 0,7 \text{ Gt C ano}^{-1}$ [46, 47].

Como fontes de emissão de CO₂ se tem a oxidação química do monóxido de carbono e de gases orgânicos, a erupção vulcânica, a queima de biomassa e combustíveis fósseis, entre outras [3].

O desmatamento, as queimadas, os incêndios acidentais liberam grande quantidade de CO₂. A maior parte da queima de biomassa ocorre nos trópicos, sendo altamente sazonal, tendo seu ápice na estação seca, entre janeiro a abril no Trópico Norte, e de agosto a novembro no Trópico Sul [8, 36, 41].

A biosfera e os oceanos são importantes reservatórios para promover a troca de carbono da atmosfera, pois atuam como fonte e sumidouro de CO₂. A troca

de CO₂ entre a atmosfera e a biosfera ocorre através da absorção pela fotossíntese e emissão pela respiração das plantas, além da decomposição de solos orgânicos. Já a troca entre a atmosfera e os oceanos ocorre por estes absorverem o CO₂ utilizando na fotossíntese do fitoplâncton, e também pelo gradiente da concentração de CO₂ e variando em função do tempo e espaço [43].

Figura 8: Representação da perturbação do ciclo global do carbono [46].
(Adaptada de Le Quéré et al., 2017)

Essas atividades biogênicas resultam em grandes variações sazonais na concentração atmosférica de CO₂. No Hemisfério Norte (HN) e nas latitudes médias essa variação sazonal apresenta maior amplitude, já no Hemisfério Sul (HS) essas variações são menores, como apresenta a Figura 9. Ao observar as concentrações de CO₂ a cada 30° de latitude, para o período de 1983 – 2015, fica evidente a diferença na variação sazonal entre os Hemisférios, como mostra a Figura 10, sendo que ambos os Hemisférios mostram um contínuo aumento na concentração.

Figura 9: Variação da concentração global de CO₂ de 1983 – 2015 [43].
(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

Figura 10: Média mensal das concentrações de CO₂ (pontos pretos) e tendência a longo prazo (linhas vermelhas) de 1983 – 2015 para cada 30° de latitude [43].
(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

Analisando o ciclo sazonal médio da concentração de CO₂, a cada 30° de latitude, como mostra a Figura 11, claramente se observa uma grande amplitude nas latitudes acima da linha do Equador onde esta região é principalmente dominada pela biosfera terrestre. Essa se caracteriza por expressivas diminuições de junho a agosto, e um acentuado retorno de setembro a dezembro. Já no Hemisfério Sul, como as variações são mais discretas, não se observa essa sazonalidade [43].

Com o desenvolvimento da economia mundial e o aumento de emissões antrópicas, a taxa de crescimento do CO₂ tem se elevado e, a longo prazo, esses aumentos podem implicar no declínio da eficiência dos sumidouros sobre a terra e oceanos [48].

Figura 11: Ciclo sazonal médio da concentração de CO₂ de 1983 – 2015 a cada 30° de latitude ^[43].

(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

As maiores emissões de CO₂ estão relacionadas ao uso de carvão, petróleo e gás natural. Emissões resultantes da queima de gás natural como subproduto do processamento e extração do petróleo ocorrem em menor escala, assim como as emissões decorrentes do processo de fabricação de cimento pela conversão de carbonato de cálcio (CaCO₃) à óxido de cálcio (CaO) ^[49]. Em 2016, as emissões de CO₂ foram distribuídas entre carvão (40%), petróleo (34%), gás (19%), cimento (5,6%) e queima de gás (0,7%) ^[46]. Já entre as emissões totais de CO₂, considerando a metade do último século, 82% foram causadas pelo uso de combustíveis fósseis e indústria, e os 18% restantes pela mudança no uso da terra, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12: Emissões globais de CO₂ por tipo de combustível, combustível fóssil e indústria e mudança no uso da terra ^[46].

(Adaptada de Le Quéré et al., 2017)

De acordo com as estimativas anuais de emissões de GEE no Brasil, a maior parcela da emissão bruta de CO₂ foi proveniente da mudança no uso da terra e florestas, sendo essa responsável por 76% das emissões em 2005, 54% em 2010

e 49% em 2014. Contudo, essas emissões tem apresentado uma diminuição ao longo dos anos, diferentemente do setor da agropecuária e da energia que vem apresentando crescimento [50, 51, 52], como pode ser observado na Figura 13.

Esta redução nas emissões provenientes do setor de mudança no uso da terra e florestas tem relação com a diminuição da taxa de desmatamento a partir de 2005, como mostra a Figura 14, devido ao plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Amazônia Legal lançado em 2004 [53].

Figura 13: Emissões brutas de CO₂ por setor para 2005, 2010 e 2014 [52].
(Adaptada de MCTIC, 2016)

Figura 14: Taxa de desmatamento anual na Amazônia Legal de 1988 a 2017 [53].

3.2 Metano (CH₄)

O metano é um gás inodoro e incolor de massa molar de 16 g mol⁻¹, representado pela fórmula molecular CH₄, possui quatro átomos de hidrogênio ligados a um átomo de carbono, apresentando geometria tetraédrica ( ) e caráter apolar. Considerado o segundo mais importante GEE, o CH₄ representa cerca de 17% do aumento total da FR desde 1750, pelos GEE de longa duração presentes na atmosfera [32], apresentando um tempo de vida de 12 anos, além de um potencial de aquecimento global (PAG) 28 vezes maior que o CO₂ em um cenário de cem anos [54].

A concentração de CH₄ em relação ao período pré-industrial, onde foi registrado uma média de 722 ppb, sofrendo um aumento de aproximadamente 157%, atingindo uma nova máxima de 1853 ± 2 ppb em 2016, como mostra a Figura 15. Isso também representou um aumento de 9 ppb em relação a 2015 [32]. Análises do ar retido em núcleos de gelo Antártico e Ártico revelaram que a atual concentração de CH₄ é a mais elevada dos últimos 680.000 anos [55].

Figura 15: Média mensal global da concentração de CH₄ e taxa de crescimento mensal entre 1984 a 2016 [45].

No início da década de 1980 a taxa de crescimento anual do CH₄ era de aproximadamente 13 ppb. Já na década de 1990 diminuiu claramente, mas permaneceu positiva. Outros declínios evidentes aconteceram durante a metade de 1992, em 1996, durante quase todo ano 2000, e em 2004/2005, sendo menor que 5 ppb ano⁻¹ em todas as latitudes. Apesar das altas taxas de crescimento em 1998 e 2002/2003, durante os eventos de El Niño, a concentração média global foi relativamente estável de 1999 a 2006. Entretanto, desde 2007, a concentração atmosférica de CH₄ vem aumentando, provavelmente devido a elevadas temperaturas, que promovem o degelo de áreas que expõem camadas emissoras de metano, como por exemplo, áreas contendo *permafrost*, além de emissões provenientes de áreas alagadas nos trópicos, relacionadas com a maior precipitação durante episódio de La Niña [56], além de fontes antrópicas nas médias latitudes do Hemisfério Norte [43].

Aproximadamente 40% das emissões globais de CH_4 são provenientes de fontes naturais e 60% de fontes antrópicas [42, 57]. Como fontes antrópicas conhecidas temos a queima de combustíveis fósseis e de biomassa, aterros sanitários, tratamento de resíduos, pecuária, cultura de arroz, entre outros. E como fontes naturais se tem as áreas alagadas, os pântanos, oceanos, florestas, cupins, fontes geológicas e reações químicas atmosféricas [58, 59, 60]. Muitas das fontes e sumidouros de CH_4 já foram identificadas, contudo sua contribuição em relação aos níveis atmosféricos ainda permanece incerta [61].

O CH_4 é produzido em ambientes anaeróbicos, a partir da ação das bactérias metanogênicas que consomem a matéria orgânica liberando gás, como ocorre nas plantações de arroz, nos aterros, nas áreas alagadas e também no sistema digestivo de bovinos, ovinos e cupins. A partir da decomposição de carbono fóssil no solo se obtém um gás com mais de 90% de CH_4 , que tanto pode ser lançado para a atmosfera como utilizado na produção de energia [3, 44, 61]. Na atmosfera a remoção de CH_4 ocorre principalmente por reação com o radical hidroxila (OH) na troposfera e estratosfera [5, 12, 44], sendo essa uma das mais importantes fontes de vapor d'água na estratosfera [3, 60].

Grande parte da emissão de CH_4 ocorre no Hemisfério Norte, como pode ser observado pelas altas variações sazonais apresentadas na Figura 16. Quando se analisam as concentrações a cada 30° de latitude, para o período de 1984 – 2015, uma menor magnitude é observada entre a linha do Equador e 30° ao Sul, como mostra a Figura 17.

Figura 16: Variação da concentração global de CH_4 de 1984 – 2015 [43].
(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

Figura 17: Média mensal das concentrações de CH₄ (pontos pretos) e tendência (linhas vermelhas) a longo prazo de 1984 – 2015 para cada 30° de latitude ^[43].
(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

Observações atmosféricas para este período de 1984 – 2015, mostram uma diferença em torno de 140 ppb entre as latitudes do Hemisfério Norte e Hemisfério Sul, sendo que o aumento do gradiente entre os Hemisférios reflete o impacto dominante das emissões do HN, onde se situam maioria das fontes antrópicas e naturais. Este gradiente no Norte e nas latitudes médias em direção aos trópicos, sugerem a existência de grandes sumidouros nos trópicos, onde há maior concentração dos radicais OH ^[43].

Os ciclos sazonais também são impulsionados pela reação com radicais OH, considerados como maior sumidouro de CH₄ na atmosfera. Estes ciclos também são afetados pela magnitude e tempo das emissões de CH₄ provenientes de fontes de áreas alagadas, queima de biomassa, bem como pelo seu transporte atmosférico. As amplitudes das concentrações de CH₄ foram maiores nas altas e médias latitudes de janeiro a abril, assim como observado no Hemisfério Sul de junho a dezembro. O HN mostra amplitudes mínimas no verão e máximas no inverno, enquanto o HS mostra um ciclo sazonal de dois terços a três quartos de ano de atraso, como pode ser visto na Figura 18 ^[43].

De acordo com as estimativas anuais de emissões de GEE no Brasil, a maior parcela da emissão de CH₄, no ano de 2014, foi proveniente do setor da agropecuária ^[52]. A parcela de contribuição das diferentes fontes deste setor, teve como principal fonte emissora a fermentação entérica do gado de corte responsável por 76% das emissões, seguida da fermentação entérica do gado de leite com 11%. Esta diferença é explicada pela quantidade da população de bovinos, tanto de corte como de leite. Os outros 13% das emissões foram provenientes da fermentação

entérica de outros animais, assim como o manejo dos dejetos dos animais, a queima de resíduos agrícolas da cana-de-açúcar e do cultivo de arroz ^[52], conforme pode ser observado na Figura 19.

Figura 18: Ciclo sazonal médio da concentração de CH₄ de 1984 – 2015 a cada 30° de latitude ^[43].

(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

Figura 19: Percentual de emissões de CH₄ no setor da agropecuária em 2014 ^[52].

(Adaptada de MCTIC, 2016)

3.3 Óxido nitroso (N₂O)

O óxido nitroso é um gás incolor e inodoro ou ainda com odor suave e agradável, de massa molar de 44 g mol⁻¹, também conhecido como gás hilariante, possui dois átomos de nitrogênio e um átomo de oxigênio é representado pela fórmula molecular N₂O e apresenta geometria linear (N≡N⁺—O⁻ ↔ ⁻N=N⁺=O). O

N₂O é o terceiro mais importante GEE na atmosfera, representando cerca de 6% do aumento total da FR desde 1750, pelos GEE de longa duração na atmosfera, possuindo um PAG 265 vezes maior que o CO₂ em um cenário de cem anos, e apresentando um tempo de vida de 121 anos [43, 54, 58].

Em 2016, a concentração deste gás foi de $328,9 \pm 0,1$ ppb, como apresentado na Figura 20, o que representou um aumento de 0,8 ppb acima da concentração do ano de 2015, e cerca de 22% em relação ao período pré-industrial que era de 270 ppb. O aumento de 2015 – 2016 foi levemente menor que a taxa de crescimento da última década ($0,9 \text{ ppb ano}^{-1}$). Uma provável causa para este aumento está relacionada ao uso de fertilizantes na agricultura, e ao aumento da liberação do gás pelos solos devido a um excesso de deposição de nitrogênio [32].

Figura 20: Média mensal global da concentração de N₂O e taxa de crescimento mensal entre 1980 a 2016 [45].

Antes da era industrial, a concentração de N₂O na atmosfera refletia o equilíbrio entre as emissões dos sistemas naturais, como solos e oceanos, e perdas químicas na estratosfera. A partir da era industrial, houve um aumento nas emissões resultantes do uso de fertilizantes nitrogenados (emissões diretas de campos agrícolas e emissões indiretas das vias navegáveis afetadas pelo escoamento agrícola), combustão de combustíveis fósseis, queima de biomassa e outros processos menores [43]. A maior parte do N₂O antrópico que entra na atmosfera é resultado da transformação do nitrogênio do fertilizante em N₂O, e da emissão de solos agrícolas. A decomposição de N₂O ocorre por processos

fotoquímicos na estratosfera, no entanto o ciclo de N_2O como parte do ciclo de nitrogênio global ainda não é bem compreendido.

Aproximadamente 60% da emissão de N_2O para a atmosfera ocorre a partir de fontes naturais e 40% por fontes antrópicas [32, 58]. Emissões antrópicas são provenientes da queima de biomassa, atividades agrícolas e processos industriais. Emissões a partir de fontes naturais são relativas a ação de bactérias no solo e por fontes biológicas nos solos e na água, sendo o solo tropical uma importante fonte individual deste gás, assim como os oceanos [5, 41, 62].

As concentrações globais de N_2O entre os anos de 1980 a 2015, apresentaram pequenas variações sazonais entre o Hemisfério Norte e o Hemisfério Sul, como pode ser observado na Figura 21. Entre os anos de 1980 a 2015 as concentrações globais de N_2O apresentaram uma diferença de 1,1 ppb entre os Hemisférios indicando uma fonte de emissão um pouco maior do HN, como observado na Figura 22, proveniente principalmente da agricultura [43].

Figura 21: Variação da concentração global de N_2O de 1980 – 2015 [43].
(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

Figura 22: Concentração média de N_2O nos Hemisférios Norte e Sul [43].
(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

Estudos a partir de modelos revelam fontes adicionais de emissão de N_2O como rios, estuários e plataformas continentais, que têm aumentado a emissão deste gás como resultado das atividades humanas que resultam em maior disponibilidade de nitrogênio nos sistemas aquáticos, estimando uma emissão a partir de rios e estuários de $1,50 \cdot 10^{-3} \text{ Pg N ano}^{-1}$. Os estudos revelam também que maior parte da emissão do N_2O foi proveniente do Oceano Atlântico [63].

De acordo com as estimativas anuais de emissões de GEE no Brasil, a maior parcela de emissão de N_2O em 2014 foi do setor da agropecuária. As diferentes atividades deste setor contribuíram com 59% das emissões totais provenientes das emissões diretas dos solos agrícolas, como esterco dos animais em pastagem, uso de fertilizantes sintéticos, aplicação de adubo, incorporação no solo dos resíduos agrícolas, mineralização de nitrogênio (N_2) associada ao cultivo de solos orgânicos, sendo a maior contribuição dentro dessas emissões diretas oriunda dos animais em pastagem totalizando 33%. As emissões indiretas referentes ao N_2 adicionado aos solos (fertilizantes e esterco) e a lixiviação totalizam 37% [52], como representado na Figura 23.

Figura 23: Percentual de emissões de N_2O no setor da agropecuária em 2014 [52].
(Adaptada de MCTIC, 2016)

3.4 Hexafluoreto de enxofre (SF_6)

O hexafluoreto de enxofre é um gás incolor, inodoro, não inflamável e quimicamente estável. Sua estabilidade se dá pelo arranjo simétrico de seis átomos de flúor em torno de um átomo central de enxofre. É representado pela fórmula molecular SF_6 e sua massa molar é de 146 g mol^{-1} , apresentando geometria octaédrica ($\begin{array}{c} \text{F} \\ | \\ \text{F}-\text{S}-\text{F} \\ | \\ \text{F} \end{array}$). O SF_6 é considerado um potente GEE, apresentando um PAG

23.500 vezes maior que o CO_2 , além de uma vida útil extremamente longa de 3.200 anos de modo que as emissões acabam se acumulando na atmosfera [32, 43, 54].

A concentração média do SF_6 em 2016 esteve em aproximadamente 9,5 ppt, praticamente o dobro do nível observado em meados da década de 1990 [32]. Como é um gás muito estável na atmosfera, sua taxa de crescimento anual se mostrou relativamente constante desde a década de 1980, e ainda vem aumentando de modo bem linear [64, 65]. O contínuo aumento da concentração média deste gás, observada em 20 estações de monitoramento global, pode ser visto na Figura 24. Estudos sugerem que as emissões reais do SF_6 dos países desenvolvidos, durante a última década, são pelo menos o dobro dos valores relatados [66]. As principais fontes do SF_6 estão no Hemisfério Norte, e a sua abundância atmosférica tem aumentado globalmente em resposta às emissões e ao seu longo tempo de vida [65]. Estudos revelam que 94% do total da contribuição mundial são relativos ao HN [67].

Figura 24: Concentração média global de SF_6 de 1995 – 2016 [32].
(Adaptada de WMO, 2017)

Como o gás é produzido artificialmente, as principais fontes de emissões atmosféricas do SF_6 estão relacionadas com os sistemas de distribuição de eletricidade, produção de magnésio e fabricação de semicondutores [64, 66]. Assim, 96% a 99% de suas emissões se acumulam na atmosfera e podem ser estimadas diretamente a partir do aumento de sua concentração [68].

O SF_6 tem sido utilizado como traçador de massas de ar, avaliando o transporte atmosférico, tanto na troposfera quanto na estratosfera, pois sua emissão está ligada diretamente à atividade humana [67, 69, 70]. As taxas de transporte de poluentes para dentro e fora da estratosfera são parâmetros importantes que regulam a composição estratosférica. As características básicas

da circulação estratosférica são conhecidas a partir de observações de gases traço como o SF_6 , pois o ar entra na estratosfera, na tropopausa tropical, sobe em latitudes tropicais e desce nas médias e altas latitudes para retornar à troposfera. Compreender a taxa deste transporte em escala global é crucial para prever a resposta do ozônio estratosférico às mudanças climáticas ou químicas [65].

O SF_6 é essencialmente inerte na troposfera até a média estratosfera, sendo removido por ligação eletrônica e por fotólise na estratosfera superior e mesosfera [65]. Devido sua solubilidade extremamente baixa, sua taxa de absorção se torna muito lenta, com isso, sumidouros como a mesosfera e os oceanos acabam sendo insignificantes quando comparados às emissões antrópicas [69]. Portanto, o SF_6 se mostra um ideal traçador, devido sua importância como indicador de escala de tempo, na circulação estratosférica e na obtenção de informações sobre a circulação das massas de ar [65, 71].

O Brasil não é produtor de SF_6 , assim sendo, as emissões informadas no inventário brasileiro devem-se apenas a vazamentos em equipamentos instalados no país devido a sua manutenção ou descarte [50].

3.5 Monóxido de carbono (CO)

O monóxido de carbono é um gás inodoro, incolor, inflamável e tóxico, sua massa molar é de 28 g mol^{-1} , possui um átomo de oxigênio e um átomo de carbono sendo representado pela fórmula molecular CO e apresentando geometria linear ($\text{C} \equiv \text{O}$). O CO é um gás antropogênico de vida curta que contribui para uma FR positiva. As emissões de CO não têm efeito direto sobre a FR, mas afetam indiretamente o clima, devido ao seu impacto nas concentrações dos radicais hidroxila (OH) e no tempo de vida do CH_4 [66]. Este gás influencia a capacidade de oxidação da atmosfera através da sua reação com OH, que controla o tempo de vida de outros GEE. Assim, o CO é monitorado devido à sua influência indireta sobre os GEE [43].

Este gás tem um tempo de vida na atmosfera relativamente curto, variando de 10 dias no verão nos trópicos, até mais de um ano no inverno nas regiões polares. Diante disso, não ocorre acumulação das emissões antrópicas na atmosfera. Entretanto, a distribuição desigual das fontes acaba causando grandes variações espaciais e temporais na concentração de CO [43], como pode ser

observado na Figura 25, onde a variação sazonal com maior amplitude ocorre no Hemisfério Norte, e com menor amplitude no Hemisfério Sul.

Figura 25: Variação da concentração global de CO de 1992 – 2015 ^[43].
(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

As fontes de CO para a atmosfera incluem a queima de combustíveis fósseis e biomassa, juntamente com a oxidação do metano e hidrocarbonetos não metânicos ^[66], assim como de emissões industriais e desflorestamento ^[72]. Apenas uma pequena parcela resulta de processos produtivos, como a produção de alumínio ^[3, 12, 50]. Os principais sumidouros incluem a reação com OH e deposição superficial, sendo que a reação de CO com OH é responsável por toda a perda química de CO na troposfera ^[5, 43, 44].

As variações sazonais a cada 30°, apresentadas na Figura 26, mostram que as variações sazonais de CO foram maiores no Hemisfério Norte e menores no Hemisfério Sul, provavelmente devido à presença de numerosas fontes antrópicas de CO nas médias latitudes do Norte combinadas com a destruição de CO nos trópicos, onde os radicais OH são mais abundantes. A concentração média global de CO foi de 91 ± 2 ppb no ano de 2015 ^[43].

O ciclo sazonal do CO é impulsionado principalmente por variações sazonais devido à abundância de OH como um sumidouro de CO como apresentado na Figura 27 para cada 30° de latitude. Esta sazonalidade e a curta duração (apenas alguns meses) resultaram em uma queda acentuada a partir de maio, seguida de um aumento relativamente lento a partir de setembro observados para as concentrações de CO no Hemisfério Norte ^[43].

Figura 26: Média mensal das concentrações de CO (pontos pretos) e tendência (linhas vermelhas) a longo prazo de 1992 – 2015 para cada 30° de latitude ^[43].
(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

Figura 27: Ciclo sazonal médio da concentração de CO de 1992 – 2015 a cada 30° de latitude ^[43].
(Adaptada de WMO/GAW, 2017)

3.6 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é considerada um importante sistema gerador de precipitação sobre a região equatorial dos oceanos e áreas continentais adjacentes, que pode ser visualizada a partir de imagens de satélite onde mostram a formação de uma banda de nuvens convectivas que se estende em uma faixa ao longo da região equatorial ^[73].

Na região do Atlântico equatorial, a ZCIT migra sazonalmente, de sua posição mais ao Norte (em torno de 14° N) durante a agosto – setembro, para sua posição mais ao Sul (em torno de 2° S) durante março – abril. Essa migração associada aos fatores que causam o fortalecimento ou enfraquecimento dos ventos

alísios é que determina a qualidade da estação chuvosa da região Nordeste do Brasil, pois é influenciada pelo tempo de permanência da ZCIT em suas posições mais ao Norte ou mais ao Sul ^[73].

Durante a deficiência das estações chuvosas no Nordeste brasileiro, na qual a ZCIT tende a se posicionar mais ao Norte, verifica-se anomalias negativas de temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico Sul. A posição da ZCIT é influenciada pela TSM no Atlântico tropical e, a região de maior cobertura de nuvens geralmente se localiza próximo à região de águas mais quentes, pois toda a estrutura da ZCIT encontra-se sobre a região de máxima TSM ^[73].

O oceano Atlântico tem uma espécie de variabilidade interna de anomalias assimétricas em relação ao Equador, chamada de “dipolo”, que se caracteriza pelas anomalias de temperatura da superfície do mar (ATSM) de sinais opostos, ou seja, positivas no Atlântico Norte e negativas no Atlântico Sul. Esse padrão gera um gradiente meridional de temperatura inter-hemisférico sobre o Atlântico equatorial exercendo influência no deslocamento Norte – Sul da ZCIT ^[73].

A variabilidade da TSM no Atlântico tropical tem sido relacionada ao fenômeno El Niño – Oscilação Sul (ENOS). A influência dos eventos El Niño no Pacífico e o dipolo de TSM no Atlântico Norte e Sul, durante a estação chuvosa do Nordeste do Brasil, infere-se que a ZCIT posiciona-se ao Norte da linha do Equador em casos de dipolo quente (águas mais quentes no Atlântico Norte), em anos El Niño ou La Niña, deixando o Nordeste do Brasil com precipitação abaixo da média. Na ocorrência do dipolo frio (águas mais quentes no Atlântico Sul), a ZCIT posiciona-se ao Sul da linha do Equador nos anos de El Niño e La Niña, porém, nos anos de El Niño, esse sistema afeta apenas o extremo Norte do Nordeste do Brasil, com precipitação acima da média, enquanto que, as outras áreas apresentam condições de seca. E, nos anos de La Niña, toda a área do Nordeste do Brasil apresenta anomalias positivas de chuva ^[73].

A posição da ZCIT ao Norte da linha do Equador na maior parte do ano, está relacionada com as águas mais frias na região equatorial Leste dos oceanos Pacífico e Atlântico, pois a assimetria no escoamento do vento à superfície estão associadas às características geográficas próximas à costa Oeste da África e da América do Sul. Climatologicamente, a costa Norte/Nordeste do Brasil, do Rio Grande do Norte ao Amapá, no período de janeiro a junho, é afetada pela ZCIT ^[73].

4 METODOLOGIA

4.1 Locais de coleta

A região do Brasil escolhida para efetuar o estudo da caracterização da distribuição dos GEE foi a que abrange a costa Norte e Nordeste do Brasil. Esta região foi escolhida devido a alguns estudos, com foco na Amazônia [36, 37, 59, 60], evidenciarem que uma grande quantidade de massas de ar que chegaram à Bacia Amazônica passaram antes por esta região da costa do Brasil.

A partir disso, entre 2006 a 2017, foram estabelecidos alguns locais de coleta nesta região de estudo que estão descritos na Tabela 2, sendo apresentadas informações como as siglas utilizadas para denominação de cada local de coleta, a posição geográfica do ponto de coleta, a altitude em que foram realizadas as coletas e o período específico da realização das coletas. Na Figura 28 é mostrado a região do Brasil escolhida para este estudo, sendo que cada local de coleta está denominado pela sua sigla correspondente.

Tabela 2: Informações dos locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil

Local	Estado	Sigla	Latitude	Longitude	Altitude	Início	Término
Arembepe	BA	ABP	12°45'46,8"S	38°10'08,4"O	15 m	10/2006	01/2010
Salinópolis	PA	SAL	00°36'15,0"S	47°22'25,0"O	10 m	01/2010	02/2017
Maxaranguape	RN	NAT	05°29'22,1"S	35°15'39,6"O	15 m	05/2010	07/2015
Natal	RN	NAT	05°47'42,8"S	35°11'07,1"O	87 m	11/2015	-
Camocim	CE	CAM	02°51'47,0"S	40°51'36,7"O	22 m	07/2014	-
Itarema	CE	ITA	02°55'57,1"S	39°50'38,5"O	115 m	12/2016	-

- Local em atividade até o presente momento. Altitude: considerar metros acima do nível do mar.

Em outubro de 2006 as primeiras coletas de amostras de ar na costa brasileira foram iniciadas em Arembepe, localizada no município de Camaçari, distante 30 km ao Norte da capital Salvador, no estado da Bahia. As coletas em Arembepe foram realizadas em parceria com o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET até início de 2010, quando precisou ser finalizada devido ao encerramento das atividades do Instituto neste local.

Em janeiro de 2010, coletas foram iniciadas na praia Corvina localizada na cidade de Salinópolis, no estado do Pará, em parceria com o Rádio Farol de

Salinópolis, 4º Distrito Naval da Marinha do Brasil, sendo que as atividades foram encerradas no início do ano de 2017.

Figura 28: Locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil (siglas amarelas). ASC (Ascension) e RPB (Barbados) são as estações globais da NOAA.
(Imagem Satélite: Google Earth, 2017)

Em maio de 2010, outro local de coleta que teve início foi em Maxaranguape, cerca de 50 km ao Norte da capital Natal, no estado do Rio Grande do Norte. Neste local, as coletas foram realizadas até julho de 2015, pois a estação em que eram realizadas as coletas foi desativada. Assim, as coletas foram transferidas para o Farol de Natal, também conhecido como Farol de Mãe Luiza, localizado na cidade de Natal, iniciando as atividades em novembro de 2015 até o presente momento. As coletas foram realizadas em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/CRN (Centro Regional do Nordeste), e no fim de 2015, também em parceria com o 3º Distrito Naval da Marinha do Brasil.

Em julho de 2014, outro local de coleta foi iniciado na cidade de Camocim, no estado do Ceará, em parceria com a Agência da Capitania dos Portos de Camocim do 3º Distrito Naval da Marinha do Brasil.

Em dezembro de 2016, outro local de coleta foi iniciado na cidade de Itarema, no estado do Ceará, em parceria com o Parque Eólico de Itarema e com o Instituto Federal do Ceará - IFCE.

Entre todos os locais de coleta, apenas Salinópolis está situada na região Norte e todos os outros locais se concentram na região Nordeste do país.

4.2 Sistema de amostragem

Para a realização das coletas de amostras de ar atmosférico, em cada local de estudo foram utilizados os seguintes materiais: tubo de teflon de $\frac{1}{4}$ " diâmetro, filtro de $1\ \mu\text{m}$ (para filtrar o aerossol marinho), frascos de vidro e um amostrador portátil [74]. A utilização do tubo de teflon se deu devido as suas características, tais como: ser inodoro, atóxico, além de apresentar boa resistência, certa flexibilidade e não sofrer alterações em baixas e altas temperaturas (entre -90°C a 250°C), além de ser antiaderente e estável à intempéries.

O esquema geral do sistema de amostragem dos locais de coleta está representado na Figura 29. Como primeira etapa temos um filtro externo e o tubo de teflon, que possibilitam a entrada do ar atmosférico, sendo que o tubo é engatado ao amostrador portátil. Também são engatados ao amostrador os frascos de vidro que recebem a amostra do ar. O amostrador portátil, quando em funcionamento, faz com que o ar atmosférico entre pelo tubo e percorra todo o sistema tubo-amostrador-frascos.

Figura 29: Esquema geral do sistema de amostragem.

O amostrador portátil foi construído no Brasil, baseado em projeto sugerido pelos Doutores Doug Guenther e John B. Miller (pesquisadores da NOAA). Trata-se de uma maleta em alumínio com dimensões externas de 42 cm x 28 cm x 12 cm (comprimento x largura x altura) e internamente protegida com uma espuma resistente. Esse amostrador consiste ainda em um sistema que possui uma bomba KNF® de diafragma de teflon, um medidor de pressão, um filtro, um medidor de

fluxo e um regulador de pressão de retorno (controla a pressão máxima dentro do frasco). A Figura 30 detalha cada componente do amostrador. Este sistema possibilita o controle de fluxo durante a coleta e a pressurização final dos frascos.

Figura 30: Detalhamento do amostrador portátil construído no laboratório e utilizado na amostragem de ar atmosférico.
(Fotos: Viviane Borges)

4.3 Estrutura local

Em cada local as amostras de ar foram coletadas em uma determinada altitude, conforme representado anteriormente na Tabela 2. Essa altitude foi definida levando em consideração a infraestrutura física disponível do local.

Em ABP, a infraestrutura disponível era a antiga sede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), como representado na Figura 31. Desta forma, as amostras foram coletadas em um mastro de 3 metros de comprimento fixado sobre a laje do prédio do INMET e, neste mastro, foram fixados o filtro e o tubo de teflon que era então engatado ao amostrador portátil.

Em SAL, como representado na Figura 32, a infraestrutura disponível era a de uma passarela sobre a areia na praia Corvina em frente ao mar. Desta forma, foi utilizado um mastro de 3 metros de comprimento onde foi inserido o tubo

de teflon para a entrada do ar atmosférico, e então este tubo era engatado ao amostrador portátil para a realização das coletas.

Figura 31: ABP – Praia de Arembepe em frente a antiga sede do INMET.
(Imagem Satélite: Google Earth, 2017; Fotos: Luciana Gatti)

Figura 32: SAL – Praia Corvina e a passarela onde foram realizadas as coletas.
(Imagem Satélite: Google Earth, 2017; Fotos: Luciana Gatti)

Em NAT, no início do projeto, a infraestrutura disponível era o observatório Espacial de Maxaranguape. Sobre a laje deste observatório havia um tubo metálico. Assim, neste tubo, foram fixados o filtro e o tubo de teflon com aproximadamente 7 metros de comprimento para chegar até dentro do observatório, onde então era engatado ao amostrador portátil. Posteriormente, com o encerramento das atividades do observatório e com a mudança do local de coleta para a capital, como representado na Figura 33, a infraestrutura disponível para a realização das coletas passou a ser o topo do Farol de Mãe Luiza. Desta forma, foi fixado o filtro para a entrada de ar e, neste filtro foi fixado o tubo de teflon, com

aproximadamente 40 metros de comprimento para chegar ao térreo do Farol, onde então o tubo era engatado ao amostrador portátil.

Em CAM, a infraestrutura disponibilizada para a realização das coletas foi o topo do Farol de Camocim, como representado na Figura 34. O filtro foi fixado logo abaixo da lâmpada sinalizadora do farol. Neste filtro foi fixado o tubo de teflon, com aproximadamente 25 metros de comprimento para chegar ao térreo do farol, onde então esse era engatado ao amostrador portátil.

Em ITA, a infraestrutura disponibilizada foi o topo de uma torre meteorológica do Parque Eólico de Itarema, apresentado na Figura 35. Nesta torre foi fixada uma caixa metálica contendo o filtro para a entrada de ar e, neste filtro, foi então fixado o tubo de teflon com aproximadamente 120 metros de comprimento para chegar ao pé da torre, onde então era engatado ao amostrador portátil.

Figura 33: NAT – Farol de Mãe Luiza (setas amarelas), e o antigo local de coleta no observatório em Maxaranguape (setas vermelhas).

(Imagem Satélite: Google Earth, 2017; Fotos: Farol-Viviane Borges; Observatório-Tércio Penha)

Figura 34: CAM – Vista do alto do Farol de Camocim em frente ao mar.

(Imagem Satélite: Google Earth, 2017; Fotos: Viviane Borges)

Figura 35: ITA – Vista do alto da torre meteorológica do Parque Eólico.
(Imagem Satélite: Google Earth, 2017; Fotos: Luís Calixto)

A instalação dos equipamentos necessários para a realização da coleta de amostras de ar atmosférico, assim como a infraestrutura disponível de cada local deste estudo estão representadas na Figura 36.

Figura 36: Sistema de amostragem de ar atmosférico instalado em cada local da costa como filtro, tubo de teflon, amostrador portátil e frascos de vidro.
(Fotos: ABP/SAL-Luciana Gatti; NAT_{max}-Tércio Penha; NAT_{farol}/CAM/ITA-Viviane Borges)

4.4 Armazenamento das amostras

Os frascos de vidro para o acondicionamento da amostra de ar atmosférico tem capacidade volumétrica de 2,5 litros. Estes frascos de vidro foram previamente preparados no Laboratório de Química Atmosférica do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LQA/IPEN) até abril de 2015 e, posteriormente, no Laboratório de Análises de Gases de Efeito Estufa do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LaGEE/INPE – São José dos Campos).

Antes de serem enviados aos locais de estudo, os frascos foram preparados seguindo duas etapas: primeiramente, passando ar seco com umidade relativa de no máximo 2% por 2 horas. E, logo em seguida, condicionando os frascos com a passagem de mistura padrão de aproximadamente 350 ppm de CO₂, em balanço de nitrogênio, com pressão no cilindro de 5 psi, para um fluxo moderado, até que a pressão fosse reduzida em 50 psi no cilindro, após isso, foi feita a pressurização dos frascos, sendo a pressão final de 5 psi ^[74].

A função deste procedimento foi garantir que o gás pressurizado dentro do frasco, antes da amostragem, tivesse concentrações menores que a concentração dos GEE que foram medidos no ar evitando, desta forma, a variação na concentração devido a adsorção pelos sítios ativos do vidro do frasco. Assim, o CO₂ teve a função de evitar que esse processo pudesse ocorrer, conservando o frasco em condições adequadas até o momento da coleta.

4.5 Periodicidade das coletas

A coleta das amostras de ar foram realizadas semanalmente, sendo efetuadas entre as 12:00 – 13:00 horas (horário local), exceto em condições de tempo desfavoráveis como dia chuvoso.

Primeiramente, o tubo de teflon e os frascos foram engatados ao amostrador portátil, sendo utilizados dois frascos conectados um ao outro usando uma pequena mangueira (como visto anteriormente na Figura 29, Figura 30 e Figura 36). Depois, as válvulas dos frascos foram abertas para poder passar ar atmosférico para ambientá-los às condições locais, aproximadamente 60 litros de ar foram passados pelos frascos (6 l min⁻¹).

Após este procedimento, a válvula do último frasco foi fechada, pressurizando o sistema entre 6 – 7 psi acima da pressão atmosférica, então

fechou-se a válvula do primeiro frasco e as válvulas intermediárias, desligando assim o amostrador e finalizando a coleta.

4.6 Qualidade da amostragem

Para garantia da qualidade da amostragem foi realizada a coleta simultânea de um par de frascos, de acordo com a recomendação da *National Oceanic and Atmospheric Administration / Earth System Research Laboratory / Global Monitoring Division* (NOAA/ESRL/GMD).

A diferença de resultado entre um frasco e outro conferem a confiabilidade da coleta. Assim, a diferença máxima aceita para o CO₂ foi de 0,5 ppm, CH₄ e CO foi de 6,0 ppb, N₂O foi de 1,0 ppb e para o SF₆ foi de 0,1 ppt. Quando a diferença era maior do que estes valores, poderia significar algum vazamento durante o processo de amostragem e, com isso, o resultado do par amostrado era desprezado.

Outro mecanismo importante de qualidade relativo às análises dos GEE é o programa de intercomparação entre o laboratório brasileiro LaGEE e o laboratório da NOAA/ESRL/GMD. Realizado inicialmente em ABP (2006 a 2009) e, posteriormente em NAT (desde 2010).

Assim, tanto em ABP quanto em NAT, foram coletados quatro frascos simultaneamente, para serem analisadas nos dois laboratórios, e assim realizar semanalmente uma intercomparação entre eles, sendo dois frascos para o laboratório brasileiro LaGEE e os outros dois para o laboratório da NOAA/ESRL/GMD. Este procedimento serve para medir a acurácia do laboratório brasileiro. Para verificar a precisão, foi utilizado o desvio padrão de 20 medidas de um padrão conhecido.

Para a realização dessa intercomparação dos laboratórios LaGEE e NOAA, foi realizado a diferença (Δ) entre as concentrações médias ($[\bar{x}]$), obtidas por cada laboratório e para cada par de frascos, representado pela Equação (1):

$$\Delta_{LaGEE - NOAA} = [\bar{x}]_{par\ LaGEE} - [\bar{x}]_{par\ NOAA} \quad \text{Eq. (1)}$$

Posteriormente, em ABP foi calculada a média das diferenças ($\bar{x}$) obtidas entre os laboratórios, para o período de outubro de 2006 a dezembro de

2009. A média das diferenças ($\bar{x}$) consistiu na somatória das diferenças (Δ) entre os laboratórios dividida pelo número de amostras, representada pela Equação (2):

$$\bar{x}_{\Delta LaGEE - NOAA_{2006-2009}} = \frac{\sum \Delta LaGEE - NOAA_{2006-2009}}{n} \quad \text{Eq. (2)}$$

Da mesma maneira, em NAT foi calculada a média das diferenças ($\bar{x}$) obtidas entre os laboratórios para dois períodos, o primeiro período de maio de 2010 a julho de 2015 e, o segundo período de novembro de 2015 a dezembro de 2017, sendo representada pelas Equações (3) e (4):

$$\bar{x}_{\Delta LaGEE - NOAA_{2010-2015}} = \frac{\sum \Delta LaGEE - NOAA_{2010-2015}}{n} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\bar{x}_{\Delta LaGEE - NOAA_{2015-2017}} = \frac{\sum \Delta LaGEE - NOAA_{2015-2017}}{n} \quad \text{Eq. (4)}$$

Os frascos contendo as amostras de ar de cada local da costa foram enviados para o LQA/IPEN até março de 2015 e, posteriormente, começaram a ser enviados para LaGEE/INPE, sendo quantificados os gases dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), monóxido de carbono (CO) e hexafluoreto de enxofre (SF_6).

4.7 Sistema analítico para a quantificação dos GEE

O laboratório de análises de gases de efeito estufa (LaGEE) em operação no Brasil, é uma réplica do sistema existente na NOAA/ESRL/GMD, possuindo um sistema automatizado de análises de gases traço ^[74].

Este equipamento de análise foi construído na NOAA pelos Doutores Andrew Crotwell e Luciana Vanni Gatti, sendo instalado no IPEN em fevereiro de 2004, permanecendo nesta instituição até março de 2015. Depois disso foi transferido e instalado no INPE, na cidade de São José dos Campos.

O sistema de análise instalado no laboratório brasileiro está demonstrado na Figura 37. Os gases de interesse foram quantificados neste sistema que direciona uma alíquota da amostra contida no frasco para o respectivo instrumento de análise.

Figura 37: Sistema LaGEE: 1) linha de gases, 2) cromatógrafo $\text{N}_2\text{O}/\text{SF}_6/\text{CH}_4$, 3) monitor CO_2 , 4) interface do cromatógrafo, 5) amostra/ CO referência, 6) válvula de seleção, 7) interfaces das válvulas e cromatógrafo CO , 8) microcomputador, 9) controlador de fluxo, 10) interface monitor CO_2 , 11) medidor de vácuo e receptor de amostras, 12) cromatógrafo CO e 13) banho resfriador.

(Fotos menores: Viviane Borges; Foto maior: Caio Correia)

A representação analítica deste sistema é apresentada na Figura 38. O sistema de separação dos gases de referência e amostras para os respectivos instrumentos de análise é composto por três válvulas de múltiplas posições. Todas as válvulas possuem um sistema de funcionamento semelhante, sendo permitida a passagem de apenas um gás por vez. Assim é possível fazer a seleção dos gases. A *válvula 1* denominada “*Seleção de Amostra e Gás Referência*”, seleciona entre a entrada de amostra ou do gás referência (dos vários gases a serem analisados), ou dos padrões da curva de calibração do CO_2 . A *válvula 2* denominada “*Seleção de Padrões*” possui várias entradas e apenas uma saída, selecionando os gases padrões das curvas de calibração do CO e N_2O . Já a *válvula 3* chamada de “*Seleção dos Equipamentos*” possui apenas uma entrada e várias saídas que permitem o direcionamento de cada gás ou amostra para os respectivos equipamentos analíticos. O gás a ser analisado (que pode ser a amostra ou o gás

referência) é selecionado pela *válvula 1* direcionando o mesmo para um controlador de fluxo, sendo um fluxo de 150 ml min^{-1} para os gases CH_4 , N_2O , SF_6 e CO , e de 200 ml min^{-1} para o CO_2 . A amostra ou o gás referência passa por um *loop*, resfriado por um banho contendo álcool a uma temperatura em torno de $-60,0^\circ\text{C}$, para a remoção de possível água existente na amostra e, posteriormente, é transferido para a *válvula 3* onde se direciona o gás para os instrumentos analíticos dos gases a serem determinados [74].

Figura 38: Esquema de funcionamento do sistema analítico instalado no LaGEE.

Na quantificação do gás CO_2 , foi utilizado um monitor de CO_2 contendo uma fonte de radiação infravermelha (LICOR modelo LI-7000), diferencial, não dispersivo de alta precisão (NDIR), com precisão na análise de $0,03 \text{ ppm}$. A fonte de infravermelho é constituída por um filamento de tungstênio selado a vácuo. O

sistema diferencial trabalha por diferença de absorção da radiação infravermelha onde o gás passa por duas células de amostragem [74, 75, 76].

A Figura 39a, apresenta um esquema de entrada e saída do gás referência e da amostra nas células do monitor de CO₂. Na célula A é passado o gás de referência com concentração em torno de 350 ppm e fluxo constante de 5 ml min⁻¹, sempre abaixo da concentração da amostra e dos padrões, e na célula B é passada a amostra. A Figura 39b, apresenta um esquema mais detalhado de uma célula. A radiação infravermelha é transmitida para as duas células que possuem detectores que absorvem a radiação, medindo a mesma. São usados filtros ópticos para ajustar o detector de CO₂ para absorção na faixa de 4,255 microns (banda emitida pelo CO₂), rejeitando radiação em outra banda aumentando a precisão do instrumento. A concentração da amostra é calculada em relação à concentração conhecida do gás de referência.

Figura 39: a) Esquema de entrada e saída do gás referência e da amostra nas células do monitor de CO₂, e b) Componentes de uma célula do monitor de CO₂.

Na quantificação do gás CH₄ foi utilizado um cromatógrafo gasoso (HP - Hewlett Packard modelo HP 6890 series Plus) com detector de ionização de chama (DIC), com precisão de 1,5 ppb na análise, com uma coluna de 198 cm de

comprimento e 3/16" de diâmetro externo (*coluna 1*), empacotada com sílica gel 60/80 mesh e outra coluna de 106 cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo (*coluna 2*), empacotada com Peneira Molecular 5A 60/80 mesh. O sistema utiliza uma válvula de 10 vias com duas posições *inject* e *load*, e um *loop* de 12 ml para a injeção da amostra ou do gás referência. O uso das *colunas 1* e *2* tem como função a separação de compostos indesejados na análise [59, 74, 75, 60].

O esquema de funcionamento do cromatógrafo para análise do gás CH_4 está representado na Figura 40. O gás carreador utilizado foi o Nitrogênio 6.0 a 95 ml min^{-1} , mantendo o forno a uma temperatura constante de 70°C . Quando a válvula está na posição *load*, Figura 40a, a amostra passa pelo *loop* por 3 minutos para limpeza e descontaminação, enquanto que o gás carreador se subdivide e passa pela *coluna 2* levando a amostra ao detector e também retirando o que estava retido na *coluna 1* para a saída, levando os contaminantes indesejados da amostra. Quando a válvula muda para a posição *inject*, Figura 40b, a amostra contida no *loop* é transferida para a *coluna 1* com o auxílio do gás carreador.

Figura 40: Esquema de funcionamento do cromatógrafo na análise do CH_4 onde a) é posição de espera e b) a posição de injeção da amostra no equipamento.

No momento em que a amostra atinge a *coluna 2*, a válvula de 10 vias retorna para a posição *load* evitando que os contaminantes cheguem até a *coluna 2*, e inicia-se a limpeza da *coluna 1* através da passagem do gás carreador em sentido oposto. No DIC, a amostra é queimada na chama alimentada por uma mistura de hidrogênio a 45 ml min^{-1} e ar sintético especial enriquecido de O_2 (60% N_2 e 40% O_2) a 250 ml min^{-1} . Quando a amostra passa pela chama o CH_4 é

oxidado a CO_2 , em estado excitado e é atraído pelo cátodo gerando uma corrente elétrica proporcional a quantidade de CH_4 na amostra, como exemplificado na Figura 41a.

A quantificação dos gases N_2O e SF_6 foi realizada em um cromatógrafo gasoso (HP - Hewlett Packard modelo HP 6890 series Plus) com detector de captura eletrônica (DCE), esquematizado na Figura 41b, sendo a precisão na análise de 0,2 ppb e 0,02 ppt, respectivamente. Este cromatógrafo possui duas colunas de 183 cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo empacotadas com Haysep Q 100/120 mesh (*Coluna 1 e Coluna 2*), além de um *loop* de 15 ml, em um forno a 70 °C. Este sistema também possui uma válvula de 10 vias com duas posições (*inject* e *load*), sendo o mecanismo de funcionamento deste cromatógrafo idêntico ao descrito anteriormente na Figura 40 para o CH_4 porém, neste caso, o gás de arraste foi uma mistura de argônio com 5% de CH_4 (74 ml min^{-1}). O DCE utiliza uma fonte de níquel (^{63}Ni) aquecida à 350 °C a qual ioniza as moléculas e são formados elétrons lentos que migram para o ânodo (célula voltaica), os quais produzem uma corrente padrão. Quando a amostra ionizada entra no detector, a corrente é reduzida, e a diferença é proporcional à quantidade de composto [74, 75].

Figura 41: a) Esquema do DIC na análise do gás CH_4 , e b) Esquema do DCE na análise dos gases N_2O e SF_6 .

Na quantificação do gás CO foi utilizado um cromatógrafo (*Peak Laboratories*), que consiste em uma coluna de 30 1/4" x 1/8" empacotada com pérolas esféricas de sílica porosa 1S 60/80 (*Coluna 1*), e outra coluna de 51" x 1/8" empacotada com Peneira Molecular 13x 60/80 (*Coluna 2*), em um forno com temperatura constante a 100 °C. O gás carreador utilizado foi o Ar Sintético a 20 ml min^{-1} . A amostra passa por um *loop* de 20 ml e é inserida nas *Colunas 1 e 2*. O esquema geral do funcionamento deste cromatógrafo está apresentado na

Figura 42a. Para remover contaminação de CO no gás carreador utilizou-se um catalizador, desenvolvido pela NOAA, que oxida o CO a CO_2 . O detector, como ilustrado na Figura 42b, consiste em um leito de óxido de mercúrio (HgO) aquecido a 265°C , com precisão de 1,1 ppb na análise do gás. O CO contido na amostra reage com o HgO indo ao estado metálico, sendo quantificado pela absorção de luz ultravioleta (254 nm) que atravessa a câmara de leitura. A diferença entre a radiação emitida e a radiação presente no fotômetro, produz um sinal proporcional a concentração do CO [74, 75].

Figura 42: a) Esquema de funcionamento do cromatógrafo na análise do gás CO, e b) Esquema do detector do cromatógrafo do gás CO.

4.8 Precisão e Acurácia

A precisão dos resultados é alcançada intercalando a detecção de padrões referência e a detecção das amostras. Este procedimento garante que as variações de temperatura e pressão do ambiente, que poderiam ocasionar alguma alteração na resposta do detector sejam normalizadas. Desta forma, o gás referência sofre as mesmas variações garantindo a precisão da análise, uma vez

que sua quantificação sempre é o produto da relação entre a amostra e o gás referência (de concentração conhecida), podendo a sequência ser representada da seguinte maneira:

Referência | Amostra | Referência | Amostra | Referência | Amostra | Referência

Para o cálculo da concentração, é realizada uma média da referência anterior e da referência posterior à amostra, e a quantificação é a razão da amostra pela média dessas referências, como exemplificado pelo retângulo vermelho na Figura 43. Para analisar a variabilidade, devido a mudança de temperatura e pressão, foram realizadas 30 medidas sequenciais no tanque de calibração e foi observado que a resposta do instrumento varia ao longo do dia, assim como o padrão referência. Estas variações são minimizadas utilizando a razão entre a resposta da amostra pela média da referência anterior e posterior à amostra.

Figura 43: Exemplo de uma curva do tanque de calibração do N₂O.

A acurácia dos resultados pode ser verificada a partir da: a) utilização de padrões primários, de trabalho e de referência calibrados pelo laboratório da rede mundial da WMO – NOAA/ESRL/GMD; b) realização da calibração do tanque de calibração por 20 vezes e o acompanhamento deste resultado ao longo do tempo; c) participação na intercomparação da rede mundial, denominado *WMO-20XX World Round Robin Comparison Experiment*, realizada a cada 4 anos; e, d)

intercomparação semanal entre o LaGEE e a NOAA através das amostragens realizadas em Natal (NAT), que serão apresentadas no capítulo dos resultados.

A intercomparação entre o laboratório no Brasil com outros laboratórios filiados à NOAA, Figura 44, revela que as diferenças apresentadas nas concentrações dos principais GEE são próximas de zero, garantindo a acurácia do resultado.

Figura 44: Intercomparação dos laboratórios, brasileiro e filiados à NOAA, para os gases CO_2 , CH_4 e N_2O .

4.8.1 Curva de calibração

Os gases CH_4 e SF_6 possuem relação linear da concentração com a área. Assim, apenas um gás de referência se faz necessário para o cálculo da concentração, uma vez que o gás de referência tem uma concentração muito próxima da medida nas amostras. Os gases CO e N_2O não possuem relação linear da concentração com a área. Assim, as curvas de calibração são construídas a partir de padrões descritos na Tabela 3. Padrões estes, calibrados no laboratório CCG/CMDL/NOAA (*Carbon Cycle Gases*) que recomenda uma calibração quinzenal para o CO e mensal para o N_2O .

Tabela 3: Concentrações dos padrões das curvas de calibração de CO e N_2O

CO			N ₂ O		
Referência	Padrão	Concentração (ppb)	Referência	Padrão	Concentração (ppb)
CA05938	1	0,00	FA03075	1	257,04 ± 0,12
CA03823	2	53,00	FF13160	2	294,41 ± 0,13
CA03885	3	71,80	FF138	3	321,75 ± 0,16
CA03801	4	76,00	FF35820	4	337,27 ± 0,14
CA06539	5	122,10	FF17254	5	377,15 ± 0,28
CA03900	6	199,20			
CA03803	7	295,50			

Na quantificação do CO₂, uma curva de calibração é construída a cada duas amostras (Figura 45) utilizando três gases de referência (Tabela 4).

Figura 45: Análise de CO₂ mostrando a sequência das referências (círculos vermelhos) e as amostras (círculos azuis).

Tabela 4: Concentrações dos padrões para a curva de calibração do CO₂

CO ₂		
Referência	Padrão	Concentração (ppb)
CA08222	Low	381,77 ± 0,02
CA06352	Medium	405,74 ± 0,01
CA08191	High	429,58 ± 0,00

Neste caso, o sistema pode ser representado da maneira abaixo:

Referência (L)	Referência (M)	Amostra	Referência (H)	Amostra	Referência (L)	Amostra	Referência (M)	Amostra	Referência (H)	Amostra	Referência (L)	Amostra	Referência (M)	Amostra	Referência (H)
As letras L, M e H significam: concentrações baixa "Low", média "Medium" e alta "High".															

4.8.2 Estabilidade do sistema analítico

A estabilidade do sistema analítico é verificada por meio da realização da calibração de dois cilindros constituídos de ar natural, previamente calibrado no laboratório da NOAA/ESRL/GMD. Essa calibração dos cilindros vem ocorrendo ao longo de vários anos, onde em cada cilindro são realizadas 20 medidas, sendo a

precisão dessa calibração verificada pela variabilidade dessas medidas. A precisão do LaGEE, Tabela 5, se encontra dentro do recomendado pela WMO para os gases CO₂, CH₄, CO e SF₆, apresentando divergência apenas para o N₂O, contudo, para este gás, a precisão do LaGEE se encontra dentro do recomendado pela NOAA/ESRL/GMD.

Tabela 5: Precisão na análise dos gases quantificados no laboratório LaGEE e precisão recomendada pela NOAA/ESRL/GMD e WMO

Precisão nas análises dos gases					
Precisão	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)	N ₂ O (ppb)	CO (ppb)	SF ₆ (ppt)
LaGEE	0,02	1,5	0,2	1,1	0,02
NOAA/ESRL/GMD	0,03	< 1	0,2	0,5	0,02
WMO	0,05	2	0,1	2	0,02

4.9 Análise dos dados obtidos nos locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil

Seguindo o que foi estabelecido anteriormente nos objetivos específicos, aqui serão descritos como estes foram atingidos no decorrer deste estudo.

4.9.1 Determinação da concentração dos GEE nas amostras coletadas em cada um dos locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil

Cada série temporal que será discutida a seguir no item Resultados e Discussão, é o resultado do tratamento dos dados obtidos nos locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil, que consistiu em calcular a concentração média para cada par de frascos ($[\bar{x}]$), de cada um dos gases analisados (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆ e CO), de cada um dos locais de coleta (SAL, CAM, ITA, NAT e ABP), sendo que cada símbolo de cada gráfico da série temporal representa a concentração média, que pode ser dada pela Equação (5) abaixo:

$$[\bar{x}]_{par\ de\ frascos} = \frac{([x]_{frasco\ 1} + [x]_{frasco\ 2})}{2} \quad \text{Eq. (5)}$$

Posteriormente, foi calculada a concentração média anual, baseada na somatória da concentração média do par de frascos ($[\bar{x}]$) dividida pelo número de amostras de cada ano, sendo representada pela Equação 6:

$$[\bar{x}]_{anual} = \frac{\sum [\bar{x}]_{par\ de\ frascos}}{n} \quad \text{Eq. (6)}$$

4.9.2 Comparação das concentrações dos GEE dos locais de coleta na costa com as concentrações de duas estações de monitoramento global da NOAA

Como a área de estudo na costa brasileira abrange uma região tropical do Oceano Atlântico onde o número de estações globais é escasso, foi necessário verificar quais estações estariam em uma latitude mais próxima dos locais de coleta para possibilitar a realização da comparação dos resultados. Assim, foram escolhidas duas estações de monitoramento global da rede NOAA, uma na Ilha de Ascension (ASC 07°96'67,00"S; 14°0'00,00"O, Oceano Atlântico Sul) e a outra em Ragged Point – Barbados (RPB 13°16'50,00"N, 59°43'20,00"O, Oceano Atlântico Norte). Nessas estações as coletas de CO₂, CH₄, N₂O, SF₆ e CO são realizadas duas vezes por semana em ASC, e apenas uma vez por semana em RPB.

4.9.3 Comparação das concentrações dos GEE dos locais de coleta na costa com as concentrações de outras estações de monitoramento global localizadas no Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico

A maioria das estações globais, que tem parceria com a NOAA, está localizada em áreas costeiras, assim as amostras de ar são geralmente realizadas dentro da camada limite marítima [77]. Podemos observar na Figura 46, que a maioria das estações globais estão situadas acima da linha do Equador, sendo que na região tropical do Oceano Atlântico Sul temos um menor número de estações.

Figura 46: Estações globais em parceria com a NOAA e locais de estudo na costa brasileira.

Assim, existe uma grande dificuldade em avaliar os resultados de uma região tropical por falta de mais investigação nessa área. Os locais de coleta na costa brasileira representam dados de apenas uma pequena parte dessa imensa área tropical. Diante disso, estações globais da rede mundial, localizadas no Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico, em uma faixa de 30° N a 30° S da linha do Equador (incluindo ASC e RBP), foram selecionadas para compararmos com os locais de estudo na costa brasileira. As estações globais selecionadas estão descritas na Tabela 6 e também são apresentadas na Figura 47.

Tabela 6: Estações globais selecionadas na faixa de 30° N e 30° S, localizadas no Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico

Local	Sigla	Latitude	Longitude	Altitude	Oceano
<i>Izana</i>	IZO	28°N	16°O	2373 m	OAN
<i>Key Biscayne</i>	KEY	26°N	80°O	1 m	OAN
<i>Ragged Point/Barbados</i>	RPB	13°N	59°O	15 m	OAN
<i>Gobabeb/Namibia</i>	NMB	24°S	15°L	456 m	OAS
<i>Ascension Island</i>	ASC	08°S	14°O	85 m	OAS
<i>Sand Island/Midway</i>	MID	28°N	177°O	11 m	OPN
<i>Lulin</i>	LLN	23°N	121°L	2862 m	OPN
<i>Dongsha Island</i>	DSI	21°N	117°L	3 m	OPN
<i>Mauna Loa</i>	MLO	20°N	156°O	3397 m	OPN
<i>Cape Kumukahi</i>	KUM	20°N	155°O	3 m	OPN
<i>Mariana Islands/Guam</i>	GMI	13°N	145°L	0 m	OPN
<i>Christmas Island</i>	CHR	02°N	157°O	0 m	OPN
<i>Tutuila/American Samoa</i>	SMO	14°S	171°O	42 m	OPS
<i>Easter Island</i>	EIC	27°S	109°O	47 m	OPS

Siglas: OPN-Oceano Pacífico Norte; OPS-Oceano Pacífico Sul; OAN-Oceano Atlântico Norte; OAS-Oceano Atlântico Sul

Figura 47: Estações globais selecionadas na faixa de 30° N a 30° S, localizadas no Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico e locais de coleta na costa brasileira.

4.9.4 Comparação da concentração média anual dos GEE dos locais de coleta na costa com a concentração média anual global e com a concentração média anual por latitude

A concentração média anual dos GEE dos locais de coleta na costa Norte e Nordeste do Brasil foi comparada com a concentração média anual global, sendo que estes dados globais estão disponíveis nos relatórios anuais elaborados pela WMO/GAW [20-32].

E, a concentração média anual dos GEE dos locais de coleta na costa também foi comparada com os dados fornecidos pela NOAA/ESRL/GMD, levando em consideração a concentração de cada GEE por latitude. A NOAA calcula a concentração média por latitude semanalmente agrupando todas as estações de medidas do globo a cada 3° de latitude. Para realizar esta comparação, foi escolhida a latitude mais próxima de cada local de coleta da costa, e então foi calculada a concentração média anual de cada GEE para a latitude correspondente.

4.9.5 Determinação da tendência de aumento médio anual da concentração dos GEE dos locais de coleta na costa e comparação com a tendência de aumento médio anual global

Para se determinar a tendência de aumento médio anual da concentração de cada GEE, foi utilizada uma regressão linear considerando o período total de estudo de cada local de coleta na costa. E, a tendência de aumento médio anual global de cada GEE foi calculada a partir dos dados disponíveis nos relatórios anuais elaborados pela WMO/GAW.

4.9.6 Simulação e entendimento da origem das trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em cada um dos locais de coleta na costa, e caracterização de cada local a partir de dados meteorológicos

4.9.6.1 Simulação das trajetórias retrocedentes das massas de ar

O modelo de trajetória HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) da NOAA Air Resources Laboratory's (ARL) é um sistema de simulação de trajetórias das massas de ar, assim como simulações de transporte,

dispersão, transformação química e de deposição de poluentes atmosféricos. O HYSPLIT é um dos modelos de transporte e dispersão atmosférica muito utilizado em ciências atmosféricas. Uma das aplicações mais comuns do modelo é a simulação das trajetórias retrocedentes para determinar a origem das massas de ar e assim poder estabelecer relações entre fonte – receptor. O método de cálculo do modelo HYSPLIT é um híbrido entre a abordagem *Lagrangiana*, usando um referencial móvel para os cálculos de advecção e difusão à medida que as trajetórias se movem de sua posição inicial, e a metodologia *Euleriana*, que usa uma rede tridimensional fixa como um referencial para calcular as concentrações dos poluentes no ar ^[78].

Desta forma, para poder se caracterizar a região de estudo, é muito importante avaliar a procedência das massas de ar que chegaram a cada um dos locais de coleta da costa brasileira. Para isso, foi utilizado o modelo de trajetória HYSPLIT disponível na página <<http://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtime=archive>> ^[79], sendo que na simulação de cada trajetória é preciso informar os parâmetros necessários para o modelo HYSPLIT.

Para a simulação de cada trajetória de cada local de coleta foi informado os seguintes parâmetros:

- ✓ No campo “*tipos de trajetórias*” – foi utilizado o número 1 (um) para o número de trajetória do local de partida e tipo de trajetória normal;
- ✓ No campo “*meteorologia e local inicial*” – foi utilizado o sistema operacional GDAS (*Global Data Assimilation System*), o qual apresenta uma resolução horizontal de 1º, cobertura geográfica global, período disponível de 2004 – presente, e saída de dados a cada 3 horas ^[78], e na localização foi informado a latitude e longitude de cada local de coleta;
- ✓ No campo “*arquivo de meteorologia*” – foi escolhido o arquivo com o período referente a data da coleta, visto que os períodos estão arquivados por semana.
- ✓ No campo “*detalhes para execução do modelo*” – foi utilizada na direção da trajetória a opção *Backward*, no movimento vertical foi utilizada a opção velocidade vertical do modelo, no tempo inicial foi utilizada a data e hora em que ocorreu cada coleta, no tempo total de horas foi utilizado o tempo de 240 horas, visto que quanto maior o tempo da trajetória menor poderá ser a sua precisão, e na altura foi utilizada a altitude de coleta de cada local considerando a altitude acima do nível do mar;
- ✓ No campo “*opções de exibição*” – foi utilizado o padrão dado pelo modelo;

Após informar todos os parâmetros desejados é feito a simulação da trajetória onde é gerado um arquivo no formato “.txt” contendo informações como ano, mês, dia, hora, minuto, tempo da trajetória em horas, a posição da latitude, da longitude e da altitude para cada hora retrocedente que foi percorrida pela trajetória, e por último a pressão atmosférica. A partir dessas informações foi possível produzir os mapas das trajetórias das massas de ar para cada local de coleta.

4.9.6.2 Dados meteorológicos

No portal do Instituto Nacional de Meteorologia – (INMET) ^[80], foi possível obter os dados meteorológicos das estações automáticas mais próximas dos locais de coleta. As estações automáticas selecionadas estão apresentadas na Tabela 7, sendo que a distância da estação automática até o local de coleta em SAL era de 3 km, em CAM a distância foi de 90 km e em ITA de 34 km, em NAT anteriormente era de 40 km e atualmente no Farol é 5 km, já em ABP não houve diferença pois as coletas ocorriam sobre a laje da própria estação. A estação mais próxima encontrada para representar CAM e ITA foi a estação de Acaraú.

Tabela 7: Estações automáticas do INMET próximas dos locais de coleta

Local	Estado	Latitude	Longitude	Altitude	Abertura	Término
Arembepe A-403	BA	12°45'46,8"S	38°10'08,4"O	11 m	26/03/2002	13/10/2013
Salinópolis A-215	PA	00°37'07,9"S	47°21'23,7"O	23 m	14/06/2008	-
Acaraú A-360	CE	03°07'15,8"S	40°05'14,2"O	67 m	22/04/2009	-
Natal A-304	RN	05°50'13,9"S	35°12'28,5"O	47 m	22/02/2003	-

- Estação em atividade até o presente momento.

Uma estação automática coleta, a cada minuto, as informações meteorológicas representativas da área em que a estação está localizada. E, a cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos para a sede do INMET, onde os dados recebidos são validados através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados, além de serem disponibilizados gratuitamente, em tempo real, na página do INMET <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>.

A coleta de dados é feita através de sensores para medição dos parâmetros meteorológicos a serem observados como: temperatura do ar (instantânea, máxima e mínima), umidade relativa do ar (instantânea, máxima e mínima), temperatura do ponto de orvalho (instantânea, máxima e mínima),

pressão atmosférica do ar (instantânea, máxima e mínima), velocidade instantânea do vento, direção do vento, intensidade da rajada do vento, radiação solar e precipitação acumulada no período.

Esses dados meteorológicos foram utilizados para se caracterizar cada local de coleta, sendo utilizados neste estudo apenas os dados como a direção e velocidade do vento, precipitação e a temperatura do ar, levando em consideração apenas os dias em que foram realizadas coletas de amostras nos locais da costa.

4.9.7 Comparação das concentrações de CO₂ com dados de perfis verticais de avião em Salinópolis – PA, e com dados de satélite da concentração de *Clorofila a*

4.9.7.1 Perfis verticais de avião em Salinópolis (SAH)

Entre os anos de 2013 – 2015 houve um projeto com foco em validação do satélite – GOSAT (*Greenhouse Gases Observing Satellite*) para medidas de CO₂ e CH₄, onde foram realizadas coletas com um avião modelo Caravan em Salinópolis (neste caso, o local de coleta era denominado SAH, de latitude 00°45'36"S e longitude 47°50'24"O), distante 55 km do local de coleta em superfície de SAL.

As amostragens em SAH foram realizadas com um avião de pequeno porte equipado com um sistema semiautomático, compreendido em duas malas, uma delas contendo dois compressores e baterias recarregáveis, e a outra mala contendo 17 frascos de vidro para armazenamento da amostra de ar, além de um microprocessador para controle do voo e armazenamento das informações da coleta [59, 75, 76]. Este avião realizava a amostragem em forma espiral iniciando a coleta do primeiro frasco em 7200 m e terminando o último frasco em 300 m de altitude, sendo realizada uma coleta mensal.

A concentração obtida nos perfis verticais de avião possibilita verificar se uma região atua como fonte ou sumidouro do gás. Os dados obtidos em perfis verticais de avião em SAH para o gás CO₂, foram utilizados para analisar se havia processo de absorção deste gás assim como observado em superfície em SAL.

A concentração observada nestes perfis realizados em SAH é uma resultante da distribuição dos GEE no globo terrestre e seus mecanismos de circulação atmosférica, além dos processos que ocorreram sobre o Oceano

Atlântico antes da massa de ar chegar ao local de coleta. Foi observado, no geral, a partir de 3000 m de altitude até próximo da superfície uma diminuição das concentrações de CO₂. Para se determinar o fluxo de absorção de carbono, foi utilizada a equação (7) abaixo, onde foi necessário determinar uma concentração inicial (*i*) para SAH. Para se determinar a concentração inicial, de cada perfil vertical realizado em SAH, foi definida a altura no perfil, anterior ao início da diminuição de concentração. Sendo assim, a concentração inicial foi o valor máximo logo anterior ao início do processo de redução da concentração de CO₂ no perfil vertical.

O fluxo de absorção de carbono foi calculado baseado na integração da diferença das concentrações do topo do perfil vertical (7200 m) à superfície (300 m) dividido pelo tempo gasto pela massa de ar ao percorrer a região da plataforma continental até chegar ao local de coleta, sendo este cálculo efetuado para cada perfil vertical em SAH [36, 37, 41, 42], como exemplificado pela equação (7) abaixo:

$$F_{CO2} = \frac{\int_{zi}^{zf} [(x_{CO2})_{SAH} - (x_{CO2})_i] dz}{t} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde, $(x_{CO2})_{SAH}$ é a concentração de CO₂ que foi determinada em cada perfil vertical em SAH, levando em consideração a variação da temperatura do ar e da pressão, de acordo com as altitudes de coleta. Já, $(x_{CO2})_i$ é a concentração inicial que foi definida para cada perfil. E, z_i e z_f são as altitudes inicial e final da integração vertical, definida pelas altitudes do menor e do maior nível do perfil, sendo a integração realizada a cada dois pontos subsequentes e, para minimizar algum erro, considera-se a concentração do primeiro frasco como sendo a mesma da superfície, sendo assim realizada a integração entre a superfície e o primeiro ponto de coleta. Por fim, t é o tempo gasto pela massa de ar, em dias, ao percorrer a região da plataforma continental até chegar ao local de coleta em SAH.

4.9.7.2 Concentração de *Clorofila a*

O projeto *GlobColour* apoia a pesquisa global do ciclo do carbono dos oceanos, fornecendo aos cientistas uma série de informações globais em relação a cor do oceano que são calibradas de forma consistente, podendo ser acessado através do portal <<http://hermes.acri.fr/index.php>>, ou ainda através do endereço

do servidor FTP disponível em <ftp://ftp.hermes.acri.fr>, onde é necessário criar um usuário e senha para acesso aos dados ^[81].

Um dos conjuntos de dados fornecidos pelo *GlobColour* é a concentração de *Clorofila a*, possuindo um tempo de cobertura desde 1997 até o presente (praticamente em tempo real), com uma resolução temporal diária, semanal e mensal. Com uma cobertura espacial global e resolução dos dados de 4, 25 e 100 km, sendo para a Europa de até 1 km, além de zonas de extração que podem ser definidas pelo usuário. Podendo ser utilizado um único sensor, ou ainda a combinação de vários sensores como SeaWIFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* – SWF), MERIS (*MEdium-spectral Resolution, Imaging Spectrometer* – MER), MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MOD) e VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* – VIR).

Neste estudo foram utilizados os dados médios de *Clorofila a* para a elaboração dos mapas, onde a concentração do fitoplâncton domina sobre as partículas inorgânicas. Também foi utilizado uma resolução temporal mensal com cobertura espacial global, com uma resolução de 4 km, além da combinação de sensores conforme disponibilidade do projeto, sendo que os sensores utilizados em 2010 foram MER/MOD/SWF, em 2011 foram MER/MOD, já em 2012 foram MER/MOD/VIR, e por fim de 2013 a 2016 foram MOD/VIR.

4.9.8 Comparação das concentrações de CO obtidas nos locais de coleta na costa com os focos de queimadas obtidos a partir de dados de satélite

O número de focos de queimadas que ocorreram apenas no território brasileiro foram obtidos a partir do banco de dados de queimadas do INPE disponível no portal <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas> ^[82], onde foi utilizado o satélite referência Aqua tarde, abrangendo todos os biomas brasileiros, referente ao período de 2006 – 2017. A partir destes dados foi elaborado um gráfico mostrando o período de maior incidência de focos de queimadas no Brasil.

Os dados utilizados neste estudo para a elaboração dos mapas com os focos de queimadas foram coletados pelo sensor MODIS instalado nos satélites Terra e Aqua, sendo que os dados utilizados neste estudo são referentes apenas ao satélite referência Aqua.

Os produtos referentes ao sensor MODIS apresentam resolução temporal de 1 a 2 dias, resolução espacial de 250 m, 500 m ou 1000 m, e a área

de cobertura global é dividida de 10° por 10° . É composto por um *scanner* óptico de varredura transversal e um conjunto de detectores individuais, que são capazes de fornecer imagens da superfície terrestre em 36 bandas espectrais distribuídas entre o visível e o infravermelho ^[83].

Estes dados de focos de queimadas são distribuídos a partir de um servidor FTP da Universidade de Maryland, situada nos Estados Unidos da América, podendo ser acessado no endereço `<ftp://fuoco.geog.umd.edu/modis/C6/mcd14ml/>` ^[84]. O produto global de localização dos focos de queimadas mensais contém a localização geográfica como latitude e longitude, data e outras informações adicionais para cada pixel de incêndio detectado pelo sensor MODIS, sendo estes dados distribuídos como um arquivo no formato `“.txt”`.

A partir da obtenção destes dados, para o período de 2010 – 2017, foram elaborados os mapas mensais de focos de queimadas para cada ano de estudo, sendo incluído em cada um destes mapas mensais as trajetórias retrocedentes das massas de ar, de cada local de coleta na costa brasileira. Desta forma, estes mapas de focos de queimadas juntamente com as trajetórias das massas de ar foram relacionados com a concentração de CO obtida em cada local de coleta na costa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O período de estudo na costa brasileira, compreendido entre 2006 – 2017, teve um total de 881 coletas de ar (portanto, 1762 amostras), sendo 293 coletas em SAL, 124 coletas em CAM, 30 coletas em ITA, 325 coletas em NAT, e de 109 coletas em ABP. Neste estudo serão apresentados os dados obtidos nestes cinco locais, onde a quantidade de coletas realizadas em cada um deles está apresentada na Tabela 8.

Tabela 8: Quantidade de amostras coletadas em cada local de estudo

Quantidade de amostragens													
Locais	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Total
SAL					55	39	48	47	23	29	46	6	293
CAM									22	22	44	36	124
ITA											3	27	30
NAT					30	48	40	45	45	24	49	44	325
ABP	9	27	23	46	4								109

5.1 Intercomparação do LaGEE e NOAA

Um programa de intercomparação entre os laboratórios de GEE do IPEN-INPE e NOAA/ESRL/GMD foi realizado inicialmente com dados de ABP e posteriormente de NAT. Foi realizada a comparação da concentração média do par de frasco do LaGEE em relação ao par da NOAA. Na Tabela 9 é apresentada a média dessa diferença de 2010 – 2017 em NAT, e de 2006 – 2009 em ABP, e na Figura 48 é apresentada a dispersão da concentração entre os dois laboratórios.

Ao longo do tempo o programa de intercomparação entre os laboratórios brasileiro de americano já passou por três etapas, sendo elas:

- 1ª) As coletas em ABP, no período de outubro de 2006 a janeiro de 2010, foram realizadas utilizando o amostrador automático da NOAA que coletava dois frascos por vez (sendo o primeiro par de frascos para a NOAA, e em seguida, o segundo par de frascos para o LaGEE, com diferença média de tempo entre as coletas de 20 min).

- 2ª) As coletas em NAT, foram realizadas primeiramente na estação remota de Maxaranguape, localizada a 50 km ao Norte da cidade de Natal, no período de maio de 2010 a julho de 2015. As coletas foram realizadas utilizando o amostrador automático da NOAA que coletava dois frascos por vez (sendo o primeiro par de frascos para a NOAA, e em seguida, o segundo par de frascos para o LaGEE, com diferença média entre as coletas de 13 min).
- 3ª) As coletas em NAT, foram transferidas para o Farol de Mãe Luiza, localizado na região urbana da cidade de Natal, em novembro de 2015 até os dias atuais. As coletas foram realizadas utilizando o amostrador construído no LaGEE, com coleta simultânea dos quatro frascos.

Tabela 9: Média da diferença entre as concentrações obtidas pelos laboratórios LaGEE e NOAA para cada etapa de estudo de intercomparação

Locais	ABP				NAT: Maxaranguape				NAT: Farol Mãe Luiza			
Etapas	1ª) 2006/2009				2ª) mai 2010 a jul 2015				3ª) nov 2015 a dez 2017			
Gás	n	Média	DP	r	n	Média	DP	r	n	Média	DP	r
CO ₂ (ppm)	88	0,06 ± 0,18	1,00		162	-0,05 ± 0,38	0,99		82	-0,55 ± 0,42	0,96	
CH ₄ (ppb)	87	2,38 ± 3,21	0,97		177	0,46 ± 2,86	0,98		85	-0,24 ± 2,16	0,98	
N ₂ O (ppb)	92	0,54 ± 0,58	0,87		183	0,33 ± 0,45	0,95		55	-0,47 ± 1,47	0,38	
SF ₆ (ppt)	100	-0,01 ± 0,04	0,99		167	-0,04 ± 0,17	0,92		62	-0,15 ± 0,41	0,68	
CO (ppb)	87	-2,61 ± 2,70	0,98		185	-2,05 ± 2,10	0,99		56	-1,37 ± 4,38	0,98	

n – número de amostras; *DP* – desvio padrão da média; *r* – coeficiente de correlação

Observando as 3 etapas, foi verificado que a melhor etapa de intercomparação foi a 2ª etapa em NAT na estação remota de Maxaranguape, que utilizava o amostrador automático da NOAA e apresentava o tempo de 13 min entre as coletas dos dois laboratórios. Na 3ª etapa, em que o amostrador foi trocado para poder fazer coletas simultâneas entre os dois laboratórios, foi observado que os resultados pioraram. Assim, foi verificado que o equipamento automático de coleta da NOAA, apesar de não coletar os dois pares de frascos simultaneamente, apresentou melhor eficiência na realização das coletas que o amostrador manual construído no LaGEE. Esta ineficiência do amostrador portátil pode advir de: a) vazamento nas conexões de teflon no encaixe dos bicos esmerilhados dos frascos, e b) tempo insuficiente de passagem de ar pelo tubo de coleta (agora com 40 m de comprimento) para condicionamento dos frascos de vidro e renovação do ar que seria amostrado.

O CO₂ apresentou melhores resultados na 1ª e 2ª etapa, no entanto, na 3ª etapa apresentou uma piora. Esta piora tanto pode ter ocorrido devido a vazamento durante as coletas (troca de amostrador de automático para manual), como também devido a problemas técnicos que levaram ao uso de três instrumentos LICOR diferentes durante este período. Por um ano foi utilizado um antigo equipamento do INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia), além de um novo adquirido pelo INPE que apresentou também defeito técnico, e o antigo equipamento do LaGEE que foi consertado.

O CH₄ apresentou melhora em seus resultados no decorrer das três etapas de intercomparação, no entanto, está acima do recomendado pela WMO que seria de 2 ppb.

O CO quando comparando a 1ª e a 2ª etapa, apresentou melhora nos resultados, no entanto, na 3ª etapa apresentou uma menor média das diferenças das concentrações entre os laboratórios, porém seu desvio padrão aumentou. Este comportamento também poderia ser justificado pela troca dos padrões gasosos e pelo fato do antigo referência ter sofrido “*drift*” ao longo do tempo, isto é, sofreu alteração na sua concentração e com isso foi alterando o resultado paulatinamente. Este padrão já foi trocado e este problema está sendo monitorado. O problema de precisão é difícil de ser identificado, pois pode estar ligado ao alto teor de contaminação do gás carreador (ar sintético), além de outros fatores da metodologia analítica.

O SF₆ apresentou um problema analítico na sua quantificação entre o período de outubro de 2013 até a metade de 2016, pois teve seu método de integração alterado, causando um erro que afetou igualmente o N₂O. Assim, os dados do SF₆ desde período deverão ser reprocessados, após a alteração metodológica, sendo que este trabalho deverá ser realizado em parceria com a NOAA.

Foi verificado na intercomparação das concentrações das amostras que, de maneira geral, NAT apresentou uma maior correlação para todos os gases quando comparada com as amostras de ABP, como apresenta a Figura 48. O fato do número de amostragens em NAT ter sido superior ao número de amostragens em ABP melhora a correlação.

Figura 48: Intercomparação dos laboratórios LaGEE x NOAA no decorrer das 3 etapas, mostrando a dispersão da concentração média para os gases CO₂, CH₄, N₂O, SF₆ e CO, para as coletas realizadas em NAT e ABP.

5.2 Trajetórias das massas de ar

Estudos mostram que na região tropical, ao longo do ano, ocorre o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que fica facilmente identificável pela formação do cinturão de nuvens convectivas ^[85], fenômeno que influencia a chegada das massas de ar nesta porção da costa brasileira. Embora a ZCIT esteja situada na maior parte do ano no Hemisfério Norte (HN) ^[86], quando nesta região é verão ela se desloca para o Hemisfério Sul (HS), onde seu deslocamento máximo ocorre entre março e abril ^[87]. Estudos realizados a partir de

uma simulação da ZCIT em modelos climáticos para a região do Atlântico tropical próximo à costa Sul-americana revelaram que a ZCIT, de janeiro a abril, fica compreendida entre 0° a 2° S de latitude, então começa a se elevar gradativamente chegando em até 10° N em outubro [73]. Podemos observar na Figura 49, que o deslocamento máximo da ZCIT ao Sul da linha do Equador ocorre em abril [88], sendo que sua posição se encontra abaixo da latitude de SAL (00°36'15,0"S), CAM (02°51'47,0"S) e ITA (02°55'57,1"S), porém acima de NAT (05°47'42,8"S) e ABP (12°45'46,8"S). Quando a ZCIT vai se deslocando sentido Norte, verifica-se que em maio, CAM e ITA já não recebem massas de ar do HN, ao contrário do que ocorre em SAL. E no deslocamento da ZCIT mais ao Norte da linha do Equador, faz com que os locais da costa passem a ter influência apenas do HS.

Figura 49: Posições sazonais da Zona de Convergência Intertropical [88].
(Adaptada de Barry et al., 2013)

As trajetórias das massas de ar permitiram observar como cada local apresentou um comportamento específico com respeito à dinâmica da circulação atmosférica no Oceano Atlântico.

SAL está localizada muito próximo da linha do Equador, com isso sofre maior influência da ZCIT entre janeiro a maio pois, neste período, a ZCIT se encontra mais ao Sul da linha do Equador. Considerando os 7 anos de estudo em SAL, foi verificado que 26% das massas de ar foram provenientes do Oceano Atlântico Norte (OAN) e, a partir de junho, período em que a ZCIT está localizada mais ao Norte da linha do Equador, 74% das massas de ar foram provenientes do

Oceano Atlântico Sul (OAS) como mostrado na Figura 50, onde 293 trajetórias das massas de ar representam o total de coletas realizados em SAL de 2010 – 2017.

Figura 50: Trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em SAL de 2010 – 2017. A legenda à esquerda representa a cor de cada trajetória para cada mês do ano, e a legenda à direita representa os símbolos de cada local de coleta na costa brasileira e as estações globais da NOAA, para ambas figuras.

CAM está localizada cerca de 3° ao Sul da linha do Equador, recebendo influência da ZCIT no período de janeiro a abril, onde em 3 anos de estudo, 9% das massas de ar que foram provenientes do OAN, e de maio à dezembro, 91% das massas foram provenientes do OAS, como mostrado na Figura 51, onde 124 trajetórias das massas de ar representam o total de coletas realizados em CAM de 2014 – 2017.

ITA, também localizada cerca de 3° ao Sul da linha do Equador, recebeu influência da ZCIT no período de fevereiro a março, sendo 14% das massas de ar provenientes do OAN, e 86% das massas foram provenientes do OAS referente ao mês de janeiro e de abril à dezembro, como mostrado na Figura 52, onde 30 trajetórias das massas de ar representam o total de coletas realizados em ITA de 2016 – 2017. No entanto, como ITA teve menor número de coletas em relação à CAM, esta diferença percentual entre os dois locais pode não ser expressiva.

Figura 51: Trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em CAM de 2014 – 2017. A legenda à esquerda representa a cor de cada trajetória para cada mês do ano, e a legenda à direita representa os símbolos de cada local de coleta na costa brasileira e as estações globais da NOAA, para ambas figuras.

Figura 52: Trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em ITA de 2016 – 2017. A legenda à esquerda representa a cor de cada trajetória para cada mês do ano, e a legenda à direita representa os símbolos de cada local de coleta na costa brasileira e as estações globais da NOAA, para ambas figuras.

NAT e ABP estão localizadas abaixo de 5° ao Sul da linha do Equador e não tiveram trajetórias das massas de ar influenciadas pela ZCIT. Em ambos locais, 100% das massas de ar foram provenientes apenas do OAS, com apenas uma

exceção em NAT. Na Figura 53, 325 trajetórias das massas de ar representam o total de coletas realizados em NAT de 2010 – 2017 e, na Figura 54, 109 trajetórias das massas de ar representam o total de coletas em ABP de 2006 – 2010.

Figura 53: Trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em NAT de 2010 – 2017. A legenda à esquerda representa a cor de cada trajetória para cada mês do ano, e a legenda à direita representa os símbolos de cada local de coleta na costa brasileira e as estações globais da NOAA, para ambas figuras.

Figura 54: Trajetórias retrocedentes das massas de ar que chegaram em ABP de 2006 – 2010. A legenda à esquerda representa a cor de cada trajetória para cada mês do ano, e a legenda à direita representa os símbolos de cada local de coleta na costa brasileira e as estações globais da NOAA, para ambas figuras.

Como SAL, CAM e ITA recebem massas de ar do OAN, e levando em consideração que as concentrações dos GEE no HN são mais elevadas em relação ao HS, foi observado no período de janeiro a abril (CAM e ITA) e de janeiro a maio (SAL), que estes locais geralmente apresentaram concentrações mais elevadas, possivelmente influenciadas pelas massas de ar vindas do HN.

5.3 Dados meteorológicos

A direção e velocidade do vento, apresentados na Figura 55, foram obtidas para o período total de estudo em cada local da costa, sendo que na rosa dos ventos foram utilizados apenas os dados relativos ao horário da coleta de cada local, permitindo observar de qual direção o vento veio em maior frequência.

Entre 2010 – 2017 os resultados mostraram que SAL teve como característica direção do vento entre 45° a 90° , proveniente do quadrante N – L, apresentando maior período de calmaria e menor velocidade do vento em relação aos outros locais, sendo a velocidade média dos ventos de $3,1 \text{ m s}^{-1}$. Em CAM, a direção do vento foi predominante de 90° a 120° , proveniente do quadrante L – S, com velocidade média de $4,7 \text{ m s}^{-1}$ para o período de 2014 – 2017. Em ITA, a direção do vento foi entre 70° a 120° , proveniente do quadrante N – S, com velocidade média de $3,7 \text{ m s}^{-1}$ para o período de 2016 – 2017. Em NAT, a velocidade média do vento foi de $4,9 \text{ m s}^{-1}$, sendo a direção do vento predominantemente de 120° a 150° , proveniente do quadrante L – S, considerando o período de 2010 – 2017. Entre 2006 – 2010 em ABP, a direção do vento predominante foi de 70° a 160° , proveniente do quadrante N – S, abrangendo uma maior porção em relação aos outros locais da costa, como também apresentando maior velocidade média do vento de $5,9 \text{ m s}^{-1}$.

Analisando a direção do vento de cada local, foi observado que as massas de ar em geral vêm do oceano, porém CAM apresentou uma forte componente que passa sobre o continente, e para excluir essa influência continental a direção do vento deveria ser de no máximo 70° , pois valores maiores que 70° já teriam massas de ar que passaram pela região de Jericoacoara e outras cidades turísticas desta porção do estado do Ceará, sendo que isto poderia causar alteração na concentração dos GEE coletados em CAM.

Figura 55: Direção e velocidade dos ventos, de 2010 – 2017 em SAL e NAT, de 2014 – 2017 em CAM, de 2016 – 2017 em ITA, e de 2006 – 2010 em ABP. Os dados apresentados são relativos apenas ao horário da coleta de cada local.

A região Norte do Brasil tem como característica o clima equatorial chuvoso quase sem estação seca. Já a região Nordeste, é caracterizada por um clima semiárido, apresentando variados regimes de chuvas, como no Norte da região onde o período de chuva ocorre de março a maio ^[89], e no leste da região de maio a julho. Porém a principal estação chuvosa da região Nordeste, incluindo o Norte e leste da região responsável por 60% da chuva anual, ocorre de abril a julho, e a estação seca, para a maior parte da região ocorre de setembro a dezembro ^[50]. As variações das chuvas sobre o Nordeste estão ligadas à posição da ZCIT no Atlântico ^[90], pois a migração da ZCIT determina a sazonalidade, intensidade e distribuição espacial das precipitações em todo o trópico ^[91].

Os dados de precipitação e temperatura apresentados na Figura 56 foram elaborados a partir dos dados disponíveis desde a abertura das estações automáticas do INMET até o final de 2017 (detalhadas anteriormente na Tabela 7), exceto para ABP que foi encerrada as atividades em 2010.

Foi observado a partir dos dados do INMET, para o período de 2008 – 2017, que SAL apresentou maior precipitação no período de janeiro a julho com oscilação da temperatura do ar, e menor precipitação de agosto a dezembro onde se teve uma contínua elevação da temperatura. Para CAM e ITA, foram analisados os dados para o período de 2009 – 2017, da estação mais próxima que fica no município de Acaraú. Foi observado que esta região apresentou maior precipitação de janeiro a julho, sendo que a temperatura do ar sofreu um declínio até março se elevando lentamente, até que no período de menor precipitação, que ocorreu de agosto a dezembro, voltou a aumentar. Em NAT foram analisados dados do período de 2003 – 2017, e foi observado um longo período de precipitação compreendido de janeiro a setembro. De outubro a dezembro foi quando ocorreu menor precipitação. A temperatura do ar foi mais elevada de janeiro até março, quando então começou a sofrer um declínio que se estendeu até julho, começando nova elevação de agosto até dezembro. Em ABP, foram analisados os dados para o período de 2002 – 2010, já que este local encerrou as coletas no início de 2010, e os dados mostraram que este local apresentou precipitação durante todo o ano, porém, como esperado, a temperatura do ar sofreu uma oscilação anual, sendo que de janeiro a março foi mais elevada, começando um declínio de abril até agosto, voltando a se elevar de setembro até dezembro.

SAL apresentou período de precipitação similar ao característico para a região Norte, sendo seu ápice de 515,1 mm no mês de março e seu mínimo de 1,2 mm em setembro. CAM - ITA e ABP apresentaram ápice de precipitação em abril, 200,6 mm e 203,9 mm, respectivamente, e o mínimo ocorreu em outubro, sendo 0,4 mm em CAM - ITA e 32,3 mm em ABP. Em NAT, o ápice da precipitação foi de 329,6 mm em junho e o mínimo foi de 18,9 mm em dezembro, sendo estas características semelhantes ao que tange a maior parte da região Nordeste.

Figura 56: Precipitação média mensal e temperatura do ar em: SAL (2008 – 2017), CAM - ITA (2009 – 2017), NAT (2003 – 2017) e ABP (2002 – 2010). As barras pretas e vermelhas representam o desvio padrão dos dados.

5.4 Séries temporais

5.4.1 Concentrações de CO₂

Na série temporal para o gás CO₂ em SAL, como mostra a Figura 57, foi observado um aumento das concentrações entre o período de janeiro – abril, podendo se estender até maio, como no ano de 2015. Em CAM, na Figura 58, foram observados que apenas 2 anos, apresentaram concentrações próximas àquelas do Hemisfério Norte até abril em 2015 e até março em 2016. Em ITA, na Figura 59, também foram observadas concentrações mais elevadas entre janeiro até abril. Este padrão sazonal foi associado com as massas de ar provenientes do Oceano Atlântico Norte, pois neste período a ZCIT está posicionada mais ao Sul da linha do Equador, com isso, esses locais da costa apresentaram semelhança com a estação global de RPB durante este período do ano. No restante do ano acompanharam a estação global de ASC. Por outro lado, NAT e ABP, na Figura 60 e na Figura 61, respectivamente, apresentaram comportamento semelhante à estação global de ASC durante todo o ano, mostrando que as concentrações de CO₂ na região do Oceano Atlântico Sul tenderam a ser mais homogêneas.

Figura 57: Série temporal para CO₂ em SAL (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 58: Série temporal para CO₂ em CAM (2014 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 59: Série temporal para CO₂ em ITA (2016 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 60: Série temporal para CO₂ em NAT (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 61: Série temporal para CO₂ em ABP (2006 – 2009) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

A concentração média anual calculada para o CO₂ em cada local da costa brasileira durante o período estudado, está apresentada na Tabela 10, onde pode ser observado, ano após ano, que todos os locais apresentaram uma

tendência de aumento nas concentrações. Utilizando uma regressão linear para o período total de estudo foi calculado a tendência de aumento médio anual de cada local na costa. Em SAL, a tendência de aumento médio anual no período de 2010 a 2017 foi de 2,5 ppm. Em CAM, a tendência de aumento médio anual de 2014 a 2017 foi de 2,4 ppm. Em NAT, a tendência de aumento médio anual de 2010 a 2017 foi de 2,3 ppm. Em ABP, a tendência de aumento médio anual de 2006 a 2009 foi de 1,9 ppm. Em ITA não foi possível verificar essa tendência de aumento pois houve apenas um ano de estudo. A tendência de aumento médio anual global do CO₂, calculado a partir dos dados apresentados anteriormente na Tabela 1, para o período de 2010 a 2016, que corresponde ao período estudado em SAL e NAT, foi de 2,4 ppm de CO₂ ao ano. Este valor está em acordo com a tendência de aumento médio anual de 2,5 ppm em SAL e de 2,3 ppm em NAT, onde NAT apresentou uma tendência de aumento médio anual 8% inferior ao de SAL.

Tabela 10: Concentração média anual, desvio padrão e tendência de aumento médio anual para o gás CO₂ nos locais de coleta na costa brasileira

Concentração média anual de CO ₂ (ppm) em SAL, CAM, ITA, NAT e ABP					
Ano	SAL	CAM	ITA	NAT	ABP
2006					^a 381,2 ± 0,6
2007					^b 381,7 ± 0,8
2008					^c 384,1 ± 1,3
2009					385,8 ± 0,9
2010	^d 388,0 ± 1,3			^e 388,6 ± 0,9	
2011	390,0 ± 1,6			^f 390,0 ± 1,3	
2012	392,1 ± 1,1			392,6 ± 1,8	
2013	395,0 ± 1,2			394,8 ± 1,3	
2014	^g 396,9 ± 0,8	^h 397,1 ± 0,7		397,3 ± 1,1	
2015	ⁱ 399,7 ± 1,7	^j 399,1 ± 2,1		^k 399,0 ± 1,5	
2016	402,4 ± 1,1	402,6 ± 1,7	^l 404,8 ± 0,1	402,1 ± 1,5	
2017	^m 406,5 ± 0,7	ⁿ 403,7 ± 1,9	^o 405,1 ± 2,2	403,3 ± 1,2	
Tendência	2,5 ppm	2,4 ppm	-	2,3 ppm	1,9 ppm

Média: ^aout-dez; ^bfev-set; ^cmar-dez; ^djan/mar-dez; ^emai-dez; ^fjan-nov; ^gjan-fev/jul-dez; ^hjul-dez; ⁱjan-set/nov-dez; ^jjan-jul/nov-dez; ^kjan-jun/nov-dez; ^ldez; ^mjan; ⁿjan-nov; ^ojan-jul/set.

Uma particularidade observada em SAL, foi de concentrações de CO₂ inferiores ao observado nas estações globais de ASC e RPB no período de maio – agosto, sugerindo a ocorrência de um processo de absorção deste gás, neste local de coleta.

Analisando os resultados dos perfis verticais em SAH, também foi observado um declínio da concentração de CO₂ em direção à superfície. A

concentração obtida nos perfis verticais possibilita verificar se uma região atua como fonte ou sumidouro do gás. Geralmente, o topo do perfil corresponde a concentração de entrada no continente e o aumento observado próximo da superfície representa a emissão do gás ^[60] e sua diminuição representa uma absorção.

SAL e SAH estão situadas em uma área da costa na região amazônica, formada por muitas ilhas, estuários e uma das maiores áreas contínuas de manguezais do mundo, representando uma fonte significativa de nutrientes orgânicos e inorgânicos para as águas costeiras ^[92].

A plataforma continental nesta região Norte da costa brasileira é considerada um dos ecossistemas mais produtivos do mundo ^[93], e tem uma extensão de aproximadamente 200 km em SAL, 80 km em CAM, 70 km em ITA, 30 km em NAT e de 15 km em ABP.

Esta região recebe grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes que são levadas pelo Rio Amazonas até o Oceano Atlântico, resultando em uma extensa pluma de aproximadamente $1,3 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ^[94], contribuindo para o aumento da produtividade primária, e resultando no sequestro de carbono ^[95], visto que esta região da plataforma continental brasileira é considerada um forte sumidouro de CO_2 ^[94, 96, 97].

Estudos estipularam que a contribuição interanual do Rio Amazonas para o Oceano, de 1972 – 2003, seria de $206.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \pm 6\%$, o que representaria 17% do volume total de água doce que deságua nos oceanos ^[38, 98].

Outro estudo estimou a descarga total da Bacia Amazônica, mostrado na Figura 62, baseado na mudança da gravidade induzida pela variação da massa de água ^[99], onde se verifica uma descarga máxima em maio a junho.

E, outro estudo também relatou que a variação da descarga apresenta dois períodos característicos, um de maio a junho, ocorrendo a elevação da descarga atingindo até $240.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, e o outro, de novembro a dezembro, com a diminuição da descarga para $90.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ^[100].

Figura 62: Descarga total da Bacia Amazônica de 2003 – 2013. Linha vermelha é a descarga total da Bacia Amazônica, linha preta é a descarga de Óbidos e, linha azul é a soma da descarga de Óbidos, Altamira e Itaituba. A descarga total da Bacia Amazônica é cerca de 23% maior que a descarga de Óbidos ^[99].

(Adaptada de J. Eom et al., 2017)

Nos dados obtidos em SAH, foi observado que a partir de uma altitude média de 2845 m até próximo da superfície uma diminuição das concentrações de CO₂, como mostrada na Figura 63, onde está apresentada a concentração de CO₂ obtida em cada perfil vertical em SAH, assim como o valor da concentração inicial, e o valor do fluxo de carbono absorvido em cada perfil e o fluxo médio para o período de 2013 – 2015. Na Figura 63b, a linha azul representa a descarga em Óbidos, e a linha vermelha representa a descarga total da Bacia do Rio Amazonas (descarga apenas para 2013, visto na Figura 62), e as barras são as médias mensais do fluxo de absorção de carbono calculadas a partir dos perfis verticais em SAH.

O valor médio de absorção de carbono ao longo do ano foi de 3,1 g C m⁻² dia⁻¹. Observa-se uma relação entre a sazonalidade da descarga no oceano e os fluxos de absorção. O período de maior absorção encontrado foi de março a maio, com média de 4,2 g C m⁻² dia⁻¹, mostrando um acréscimo aproximado de 30% na absorção de carbono na média anual, isto mostra a influência do aumento da descarga do Rio Amazonas nesta região, no oceano.

O processo de absorção de carbono na plataforma continental, nesta região do litoral Norte, ocorre o ano todo, porém neste período tem uma maior contribuição da descarga de nutrientes oriundos do Rio Amazonas no Oceano Atlântico.

Figura 63: a) Perfis verticais em SAH: concentração de CO₂ e concentração inicial (linha vertical preta). A área cinza em cada perfil representa o valor do fluxo de carbono absorvido. b) Média mensal da absorção de carbono para o período de 2013 – 2015 e descarga em Óbidos (linha azul) e descarga total da Bacia do Rio Amazonas (linha vermelha) referente ao ano de 2013.

As águas costeiras da região amazônica são fortemente influenciadas pela energia hidrodinâmica e descarga fluvial dos sistemas estuarinos, mantendo a água bem oxigenada, turva e rica em nutrientes dissolvidos e com concentrações relativamente altas de *Clorofila a* [92]. A partir de dados de satélite foi possível produzir mapas das médias mensais de *Clorofila a* para o Oceano Atlântico tropical [81], como pode ser visto na Figura 64, Figura 65, Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70, de 2010 – 2016, respectivamente, onde se observa maior concentração de *Clorofila a* próxima a região Norte da costa geralmente entre maio a agosto. A presença de fitoplâncton em águas oceânicas pode ser evidenciada pela quantidade de *Clorofila a*, que nesta região da costa, geralmente coincide com o período de aumento da descarga do Rio Amazonas no Oceano Atlântico.

No entanto, a relação encontrada não foi tão intensa, pois em 2013, por exemplo, os perfis em SAH de maior absorção foram em março e maio, enquanto que, o período de maior concentração de *Clorofila a* ocorreu entre junho e agosto, como pode ser observado na Figura 67. Analisando os demais anos, observamos que em 2014, os meses de maior absorção de carbono foram em maio, agosto e dezembro, enquanto que o período de maior concentração de *Clorofila a* ocorreu entre junho a agosto, como pode ser observado na Figura 68. Já em 2015, foram realizados apenas três perfis de avião, sendo dois em fevereiro e um em junho, e analisando o mapa de *Clorofila a* na Figura 69, observamos uma maior concentração no período de maio a julho, sendo que a maior concentração ocorreu no mês de junho, no entanto, o mês de fevereiro também apresentou uma maior concentração de *Clorofila a* em concordância com os resultados encontrados para este ano em SAH. De maneira geral, uma maior concentração de *Clorofila a* indica uma tendência a uma maior absorção de carbono. No entanto, outros fatores também devem contribuir para o aumento da absorção de carbono, como temperatura da superfície do mar, radiação incidente, concentração de nutrientes na descarga do Rio Amazonas, entre outros.

Analisando as Figuras 62 a 68, observa-se que o ano de 2010 foi o que teve maior concentração de *Clorofila a* em relação aos outros anos, e quando analisamos a série temporal de CO₂ em SAL, observamos também que o ano de 2010 foi o que apresentou as menores concentrações de CO₂ quando comparada com a estação global de ASC. Isto implica de que neste ano houve maior absorção de CO₂ da atmosfera nesta região quando comparamos com os demais anos.

Analisando a série temporal de CO₂ em SAL na Figura 57, foi observado que em 2010, as concentrações de CO₂ estiveram abaixo daquelas da estação global de ASC no período de maio a agosto. Ao analisar a Figura 64, observou-se que uma maior concentração de *Clorofila a* ocorreu no período de abril a agosto, coincidindo com a diminuição da concentração de CO₂ na região de SAL. No ano seguinte, em 2011, o período de concentrações mais baixas em SAL ocorreu de maio a setembro e, observando a Figura 65, uma maior concentração de *Clorofila a* ocorreu entre março a setembro. Em 2012, concentrações mais baixas de CO₂ foram observadas apenas em julho e agosto, sendo que a concentração de *Clorofila a* foi maior entre junho a agosto, como pode ser observado na Figura 66. Já em 2013, houve um período maior de concentrações mais baixas de CO₂ abrangendo os meses de maio a outubro, já a concentração de *Clorofila a* foi maior entre os meses de maio a setembro, como pode ser observado na Figura 67. Em 2014, no primeiro semestre, não houve muitas coletas em SAL. No entanto, o mês de julho apresentou concentração de CO₂ inferior a estação global de ASC, e analisando a Figura 68, uma maior concentração de *Clorofila a* ocorreu entre junho a agosto. Em 2015, apenas uma coleta no mês de junho apresentou concentração mais baixa, coincidindo com o mês de maior concentração de *Clorofila a*, conforme observado na Figura 69. Por fim, em 2016, foi observado concentrações mais baixas de CO₂ entre março a setembro, sendo que o período de maior concentração de *Clorofila a* ocorreu entre abril a outubro, como observado na Figura 70.

Assim, de maneira geral, verifica-se que as concentrações medidas em superfície em SAL apresentaram maior relação com o aumento da concentração de *Clorofila a*, nesta região da costa Norte do Brasil, pois abrange uma pequena área de representatividade da costa Norte do Brasil, enquanto que, ao comparar os perfis verticais de avião em SAH (que abrangem uma maior área de representação da costa) com as concentrações de *Clorofila a*, não houve uma relação tão intensa como observada em superfície.

Figura 64: Concentração de *Clorofila a*, em 2010 no Oceano Atlântico tropical.

Figura 65: Concentração de *Clorofila a*, em 2011 no Oceano Atlântico tropical.

Figura 66: Concentração de *Clorofila a*, em 2012 no Oceano Atlântico tropical.

Figura 67: Concentração de *Clorofila a*, em 2013 no Oceano Atlântico tropical.

Figura 68: Concentração de *Clorofila a*, em 2014 no Oceano Atlântico tropical.

Figura 69: Concentração de *Clorofila a*, em 2015 no Oceano Atlântico tropical.

Figura 70: Concentração de *Clorofila a*, em 2016 no Oceano Atlântico tropical.

5.4.2 Concentrações de CH₄

Na série temporal para o gás CH₄, observa-se mais claramente o aumento das concentrações entre janeiro – abril em SAL, Figura 71. Devido à posição da ZCIT estar abaixo da latitude de SAL, as massas de ar que chegam nesse local são provenientes do Oceano Atlântico Norte. Isso faz com que SAL apresente um comportamento semelhante à estação global de RPB durante este período do ano. No restante do ano, as concentrações acompanharam a estação global de ASC. Em CAM e ITA, Figura 72 e Figura 73, respectivamente, foi observado comportamento similar a SAL, porém com menor intensidade. Os locais de coleta na costa apresentaram concentrações intermediárias à RPB e ASC no período em que a ZCIT estava abaixo da linha do Equador. Analisando as concentrações de NAT e ABP, Figura 74 e Figura 75, respectivamente, mais uma vez foi observado que estes locais apresentaram semelhança apenas com a estação global de ASC durante todo o ano, mostrando que nestes locais as massas de ar sempre tem origem no próprio Hemisfério Sul, como pode ser observado anteriormente na Figura 53 e na Figura 54.

Figura 71: Série temporal para CH₄ em SAL (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 72: Série temporal para CH_4 em CAM (2014 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 73: Série temporal para CH_4 em ITA (2016 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 74: Série temporal para CH_4 em NAT (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 75: Série temporal para CH_4 em ABP (2006 – 2009) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

O cálculo da concentração média anual para o CH_4 em cada um dos locais na costa brasileira está apresentada na Tabela 11, onde observa-se, ano após ano, que todos os locais apresentaram aumento nas concentrações.

Utilizando uma regressão linear para o período total de estudo foi calculado a tendência de aumento médio anual de cada local na costa. Em SAL, a tendência de aumento médio anual para o período de 2010 a 2017 foi de 7,5 ppb. Em CAM, a tendência de aumento médio anual de 2014 a 2017 foi de 7,3 ppb. Em NAT, a tendência de aumento médio anual de 2010 a 2017 foi de 7,0 ppb. Em ABP, a tendência de aumento médio anual de 2006 a 2009 foi de 7,1 ppb. E, em ITA não foi possível verificar essa tendência de aumento pois houve apenas um ano de estudo.

A tendência de aumento médio anual global do CH₄, calculado a partir dos dados apresentados anteriormente na Tabela 1, para o período de 2010 a 2016, que corresponde ao período estudado em SAL e em NAT, foi de 7,5 ppb de CH₄ ao ano. Este valor está em acordo com a tendência de aumento médio anual de 7,5 ppb encontrada em SAL. No entanto, em NAT, a tendência de aumento médio anual para o mesmo período foi de 7,0 ppb, representando uma tendência de aumento médio menor em 7%.

O fato da tendência de aumento médio em SAL, que tem forte influência do HN, ser 7% superior ao de NAT, que tem apenas contribuição do HS, é um indicativo de que a maior causa deste aumento mundial está localizada no HN.

Tabela 11: Concentração média anual, desvio padrão e tendência de aumento médio anual para o gás CH₄ nos locais de coleta na costa brasileira

Concentração média anual de CH₄ (ppb) em SAL, CAM, ITA, NAT e ABP					
Ano	SAL	CAM	ITA	NAT	ABP
2006					^a 1743,0 ± 9,3
2007					^b 1746,8 ± 8,6
2008					^c 1759,6 ± 9,0
2009					1760,2 ± 12,2
2010	^d 1784,4 ± 11,8			^e 1771,7 ± 6,6	
2011	1790,3 ± 13,2			^f 1780,6 ± 9,3	
2012	1793,3 ± 14,7			1782,1 ± 11,0	
2013	1804,5 ± 16,7			1785,2 ± 12,7	
2014	^g 1802,6 ± 13,1	^h 1807,2 ± 9,8		1794,0 ± 10,0	
2015	ⁱ 1827,5 ± 18,6	^j 1813,7 ± 13,8		^k 1800,8 ± 17,5	
2016	1825,4 ± 18,6	1823,1 ± 10,8	^l 1823,3 ± 12,9	1812,1 ± 11,5	
2017	^m 1861,2 ± 7,6	ⁿ 1827,6 ± 12,0	^o 1832,9 ± 15,2	1819,6 ± 11,5	
Tendência	7,5 ppb	7,3 ppb	-	7,0 ppb	7,1 ppb

Média: ^aout-dez; ^bfev-set; ^cmar-dez; ^djan/mar-dez; ^emai-dez; ^fjan-nov; ^gjan-fev/jul-dez; ^hjul-dez; ⁱjan-set/nov-dez; ^jjan-jul/nov-dez; ^kjan-jun/nov-dez; ^ldez; ^mjan; ⁿjan-nov; ^ojan-jul/set.

Considerando que o CH₄ ficou com seu crescimento estacionado por quase uma década ^[33] e, que após 2007 voltou a apresentar crescimento global, chegando a 12 ppb em 2015, ainda é uma incógnita o porquê deste crescimento nas emissões mundiais, e qual a sua origem ou origens. Existe uma suspeita de que poderia ser das áreas alagáveis, e portanto, a Amazônia poderia ser uma das causas deste aumento mundial.

As emissões de CH₄ também podem ser provenientes de áreas de solos congelados, conhecidos como *permafrost*, onde a produção de CH₄ ocorre em uma camada de degelo sazonal. Assim, mudanças na profundidade e no comprimento do degelo também afetariam a taxa de emissão anual de CH₄ ^[101].

Assim, um aquecimento no clima pode induzir mudanças ambientais, acelerando a decomposição microbiana do carbono orgânico e a liberação de gases como CO₂ e CH₄, já que uma grande quantidade de carbono orgânico é armazenada no *permafrost* em regiões árticas e subárticas. Algumas das maiores emissões de CH₄ na região do *permafrost* têm sido observadas em lagos e terrenos formados por descongelamento abrupto, pois o degelo abrupto influencia as emissões e também altera a hidrologia que é crítica para determinar o equilíbrio das emissões. No entanto, o fundo marinho subjacente às plataformas do Ártico também acumulou CH₄ fóssil armazenado como gás CH₄ livre. Estas plataformas rasas são também áreas de deposição de carbono proveniente da erosão do *permafrost* costeiro e do transportado pelos rios do Ártico, juntos, esses processos são fontes de altas emissões de CH₄ para a atmosfera. Um estudo estimou a partir da plataforma do Ártico da Sibéria Oriental, a emissão de 17 Tg CH₄ ano⁻¹ depois de contabilizar tanto as emissões de bolhas difusivas como as pontuais, sendo que essas emissões podem ter sido persistentes ao longo dos milhares de anos de submersão terrestre ^[102].

5.4.3 Concentrações de N₂O

Observando a série temporal das concentrações de N₂O em SAL, apresentada na Figura 76, vemos que grande parte das concentrações de N₂O apresentaram similaridade com RPB, notando-se também uma elevação no início do ano, como também foi observado nos demais gases. Em CAM, Figura 77, pode ser observado que as concentrações estiveram entre as concentrações das estações globais de ASC e RPB, já em ITA, Figura 78, não foi possível análise das

amostras devido a problemas técnicos. Em NAT e ABP, Figura 79 e Figura 80, respectivamente, também pode ser observado que as concentrações de N_2O estiveram entre as concentrações das estações globais. Podemos observar pela série temporal do N_2O , nos locais de coleta na costa, que não há uma grande variação na amplitude das concentrações das estações globais de ASC e RPB. Por exemplo, segundo o relatório da GAW de 2015^[103], foi observado uma diferença global das concentrações de N_2O entre o HN e o HS de 1,6 ppb no ano de 2013.

Esse comportamento observado nas concentrações de N_2O nos diferentes locais da costa Norte e Nordeste do Brasil pode estar relacionado com as condições favoráveis de emissão de N_2O devido à ressurgência das águas costeiras, bem como aos estuários pela abundância de nutrientes, também pela contribuição na fertilização pelos rios que deságuam no oceano, e também devido a plataforma continental, que sustenta cerca de 30% da produção oceânica total, influenciado pelas correntes marítimas^[104, 105]. Estudos revelam que as maiores emissões de N_2O , a partir de rios e estuários se encontram no Oceano Atlântico, totalizando $708 \cdot 10^{-6} \text{ Pg N ano}^{-1}$, sendo que a América do Sul apresenta uma emissão de $390 \cdot 10^{-6} \text{ Pg N ano}^{-1}$, e estimando a emissão de todos os oceanos chega a $1500 \cdot 10^{-6} \text{ Pg N ano}^{-1}$ ^[105].

Figura 76: Série temporal para N_2O em SAL (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 77: Série temporal para N₂O em CAM (2014 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 78: Série temporal para N₂O em ITA (2016 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 79: Série temporal para N_2O em NAT (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 80: Série temporal para N_2O em ABP (2006 – 2009) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

O cálculo da concentração média anual para o N_2O em cada um dos locais na costa brasileira está apresentada na Tabela 12, onde todos os locais apresentaram aumento na concentração ano após ano. Utilizando uma regressão linear para o período total de estudo foi calculado a tendência de aumento médio

anual de cada local na costa. Em SAL, a tendência de aumento médio anual para o período de 2010 a 2017 foi de 0,9 ppb. Em CAM, a tendência de aumento médio anual de 2014 a 2017 foi de 0,7 ppb. Em NAT, a tendência de aumento médio anual de 2010 a 2017 foi de 0,9 ppb. Em ABP, a tendência de aumento médio anual de 2006 a 2009 foi de 1,0 ppb. Já em ITA, não foi possível verificar essa tendência de aumento médio anual.

A tendência de aumento médio anual global do N₂O, calculado a partir dos dados apresentados anteriormente na Tabela 1, para o período de 2010 a 2016, que corresponde ao período estudado em SAL e em NAT, foi de 0,9 ppb de N₂O ao ano, valor este em acordo com a tendência de aumento médio anual encontrado em SAL e em NAT que também foi de 0,9 ppb.

Tabela 12: Concentração média anual, desvio padrão e tendência de aumento médio anual para o gás N₂O nos locais de coleta na costa brasileira

Concentração média anual de N ₂ O (ppb) em SAL, CAM, ITA, NAT e ABP					
Ano	SAL	CAM	ITA	NAT	ABP
2006					^a 320,4 ± 0,6
2007					^b 320,4 ± 0,8
2008					^c 321,7 ± 0,6
2009					322,7 ± 0,6
2010	^d 324,0 ± 0,8			^e 323,6 ± 0,5	
2011	324,9 ± 0,7			^f 324,3 ± 0,5	
2012	325,9 ± 0,5			325,7 ± 0,4	
2013	326,7 ± 0,4			326,3 ± 0,5	
2014	^g 327,6 ± 1,1	^h 327,7 ± 0,9		327,3 ± 0,7	
2015	ⁱ 328,6 ± 0,7	^j 328,2 ± 0,5		^k 328,3 ± 0,6	
2016	329,5 ± 0,6	329,4 ± 0,4	^l 329,1 ± 0,2	329,0 ± 0,5	
2017	^m 329,6 ± 0,4	ⁿ 329,3 ± 0,7	^o 329,5 ± 0,2	^p 329,5 ± 0,6	
Tendência	0,9 ppb	0,7 ppb	-	0,9 ppb	1,0 ppb

Média: ^aout-dez; ^bfev-set; ^cmar-dez; ^djan/mar-dez; ^emai-dez; ^fjan-nov; ^gjan-fev/jul-dez; ^hjul-dez; ⁱjan-set/nov-dez; ^jjan-jul/nov-dez; ^kjan-jun/nov-dez; ^ldez; ^mjan; ⁿjan/ago-nov; ^ojan/set; ^pjan/set-dez.

5.4.4 Concentrações de SF₆

As séries temporais para o SF₆, em SAL, CAM e NAT, apresentadas na Figura 81, Figura 82 e Figura 84, respectivamente, tiveram um período com dados anômalos a partir de outubro de 2013 até metade de 2016. Este período com dados anômalos ficou compreendido em SAL de janeiro de 2014 a maio de 2016, em NAT de outubro de 2013 até a primeira quinzena de março de 2016 e, em CAM de julho de 2014 a março de 2016. Isto se deve ao problema analítico na quantificação deste gás devido à alteração do método de integração, assim estes dados deverão ser

reprocessados em parceria com a NOAA. Como os dados deste período anômalo ainda não estão validados estes não serão apresentados na série temporal de SF₆.

Em SAL, na Figura 81, foi observada uma elevação nas concentrações entre janeiro a abril, evidenciando que este local de coleta é influenciado por massas de ar provenientes do Oceano Atlântico Norte, devido à posição da ZCIT estar abaixo da latitude de SAL. Em CAM, na Figura 82, observamos uma elevação mais discreta do que em SAL, já que CAM teve um período de menor influência da ZCIT, que foi de janeiro a abril. Em ITA, Figura 83, não foi possível análise das amostras devido a problemas técnicos. Em NAT e ABP, Figura 84 e Figura 85, respectivamente, pode ser observado que nesta faixa do Oceano Atlântico Sul as concentrações seguem o mesmo padrão observado na estação global de ASC, portanto, não apresentando período de concentrações mais elevadas como nos demais locais. Isto confirma que para a latitude em torno de 5° ao Sul já não se observa a influência do HN, indicando, que a ZCIT não se desloca tão ao Sul.

Figura 81: Série temporal para SF₆ em SAL (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 82: Série temporal para SF_6 em CAM (2014 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 83: Série temporal para SF_6 em ITA (2016 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 84: Série temporal para SF_6 em NAT (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 85: Série temporal para SF_6 em ABP (2006 – 2009) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

O cálculo da concentração média anual para o SF_6 em cada um dos locais na costa brasileira está apresentado na Tabela 13. Porém, para este cálculo da concentração média anual, foi descartado os dados de janeiro de 2014 a maio

de 2016 em SAL, de outubro de 2013 até a primeira quinzena de março de 2016 em NAT e, de julho de 2014 a março de 2016 em CAM, períodos estes em que ocorreram o problema analítico de quantificação do gás. Nesta tabela pode ser observado que a concentração média anual, em todos os locais, apresentou um aumento no decorrer dos anos.

Utilizando uma regressão linear foi calculado a tendência de aumento médio anual de cada local estudado. Contudo, dados do período que apresentou problemas analíticos foram descartados. Assim, em SAL a tendência de aumento médio anual para o período de 2010 a 2013 e de junho de 2016 a 2017 foi de 0,3 ppt. Em CAM, a tendência de aumento médio anual de junho de 2016 a 2017 foi de 0,4 ppt. Em NAT, a tendência de aumento médio anual de 2010 a setembro de 2013 e da segunda quinzena de março de 2016 a 2017 foi de 0,3 ppt. Em ABP, a tendência de aumento médio anual de 2006 a 2009 foi de 0,3 ppt. E, em ITA não foi possível verificar esta tendência de aumento pois os dados são referentes apenas a um ano de coleta, porém com um período curto de análise para o SF₆. Observando a tendência de aumento médio anual global do SF₆, entre 2010 a 2016, correspondendo ao período estudado em SAL e NAT, esta foi de 0,3 ppt de SF₆ ao ano, valor este em acordo com o aumento médio anual de SAL e NAT que também foi de 0,3 ppt.

Tabela 13: Concentração média anual, desvio padrão e tendência de aumento médio anual para o gás SF₆ nos locais de coleta na costa brasileira

Concentração média anual de SF ₆ (ppt) em SAL, CAM, ITA, NAT e ABP					
Ano	SAL	CAM	ITA	NAT	ABP
2006					^a 5,9 ± 0,1
2007					^b 6,1 ± 0,1
2008					^c 6,3 ± 0,1
2009					6,6 ± 0,1
2010	^d 7,0 ± 0,1			^e 7,0 ± 0,1	
2011	7,3 ± 0,1			^f 7,2 ± 0,1	
2012	7,5 ± 0,1			7,5 ± 0,1	
2013	7,9 ± 0,1			^g 7,8 ± 0,1	
2016	^h 9,0 ± 0,1	ⁱ 8,9 ± 0,1	^j 9,0 ± 0,0	^k 8,9 ± 0,1	
2017	^l 9,1 ± 0,1	^m 9,2 ± 0,2	ⁿ 9,1 ± 0,2	^o 9,0 ± 0,0	
Tendência	0,3 ppt	0,4 ppt	-	0,3 ppt	0,3 ppt

Média: ^aout-dez; ^bfev-set; ^cmar-dez; ^djan/mar-dez; ^emai-dez; ^fjan-nov; ^gjan-set; ^hjun-dez; ⁱjun-dez; ^jdez; ^kmar-dez; ^ljan; ^mjan/ago-nov; ⁿjan/set; ^ojan/set-dez.

5.4.5 Concentrações de CO

Analisando as séries temporais para o gás CO em SAL, CAM e ITA, representadas na Figura 86, na Figura 87 e na Figura 88, respectivamente, foi observado um aumento das concentrações no período de janeiro a março em SAL e ITA, e de janeiro a abril em CAM. Esse comportamento se deve à posição da ZCIT estar mais ao Sul da linha do Equador, com isso existe uma maior influência de massas de ar provenientes do Hemisfério Norte. Este aumento pode ser devido as massas de ar que trazem plumas de queima de biomassa, assim como um ar mais enriquecido devido ao maior consumo de combustível fóssil, tanto pelo fato de 75% da população mundial viver no HN, como pelo fato de ser inverno no HN e o consumo aumentar neste período, assim como pela maior queima de outros materiais utilizados com fonte aquecimento ou energia, como por exemplo o carvão.

Em SAL, outro fator que pode ter contribuído para este aumento na concentração esteve relacionado com as emissões antropogênicas provenientes do litoral Nordeste, pois a direção do vento neste período é Leste-Sudeste. Por exemplo, a 8 km de SAL na direção Leste está localizada a Praia do Atalaia, muito visitada no período de alta temporada pela população do estado do Belém do Pará e região, o que poderia contribuir com o aumento da concentração de CO em SAL.

Analisando a série temporal para NAT, apresentada na Figura 89, observou-se que apenas nos anos de 2016 e 2017 houve maior concentração de CO nos primeiros meses do ano. Este período corresponde ao novo local de coleta de NAT no Farol de Mãe Luiza, na área urbana na cidade de Natal, portanto, provavelmente está se observando uma contaminação do ar amostrado devido às emissões urbanas. Em ABP, Figura 90, não se observa uma elevação das concentrações no início do ano.

Ainda analisando a série temporal de CO em SAL, CAM e ITA, foi observado que estes locais também apresentaram um aumento das concentrações de CO entre agosto a outubro. Ao analisar a série temporal para os dados de NAT e ABP, também observou-se um aumento das concentrações neste período, como pode ser visto na Figura 89 e Figura 90, respectivamente.

A partir de dados de focos de queimadas no Brasil de 2006 – 2017, obtidos no portal do Programa Queimadas – INPE ^[82], apresentado na Figura 91, observa-se uma maior incidência de queimadas no período de agosto a outubro, coincidindo com o aumento das concentrações de CO nos locais de estudo devido

ao transporte atmosférico realizado pelas massas de ar. Isto é um indicativo de que processos de transporte atmosférico trazem contaminação desta emissão por queimada para os locais de coleta na costa.

Figura 86: Série temporal para CO em SAL (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 87: Série temporal para CO em CAM (2014 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 88: Série temporal para CO em ITA (2016 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 89: Série temporal para CO em NAT (2010 – 2017) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 90: Série temporal para CO em ABP (2006 – 2009) comparado com dados das estações globais de ASC e RPB.

Figura 91: Número de focos de queimadas mensal no Brasil, onde a linha vermelha representa a média mensal, e o destaque representa o número total anual de focos de queimadas, ambos para o período total de 2006 – 2017.

Outra análise efetuada para compreensão deste aumento nas concentrações de CO nos locais de coleta na costa brasileira foi a realização de um estudo a partir das trajetórias retrocedentes das massas de ar juntamente com os dados globais de focos de queimadas ^[84]. Para isto, os dados referentes as trajetórias das massas de ar que chegaram nos locais de coleta, apresentados

anteriormente no item 5.2, foram utilizados neste estudo para se produzir os mapas mensais para o período de 2010 a 2017.

Em 2010, na Figura 92, foi observado em janeiro, fevereiro e março que existe um maior número de focos de queimadas acima da linha do Equador, tanto no continente Americano como no continente Africano. Já em agosto, setembro e outubro, observamos um aumento no número de focos de queimadas abaixo da linha do Equador. Apesar das trajetórias das massas de ar não deixarem claro a influência dessas áreas de queimadas, sabe-se que a precisão das trajetórias vai diminuindo com o aumento do número de dias retrocedentes. Existem também processos atmosféricos em menor escala na região continental que levam até os locais de coleta a influência desse aumento de concentração na atmosfera devido as emissões da queima de biomassa.

Em 2011, na Figura 93, observamos tanto em janeiro como em março trajetórias que passaram por regiões na Europa que estão com alguns evidentes focos de queimadas. No mês de julho observamos claramente massas de ar que passaram sobre o território brasileiro, portanto evidenciando que existem massas de ar que passam primeiramente sobre o continente antes de chegar aos locais de coleta de dados na costa Norte e Nordeste do Brasil. Como visto anteriormente na Figura 55, podemos observar que várias coletas ocorreram com massas de ar oriundas de dentro do território brasileiro.

Em 2012, na Figura 94, observamos tanto em janeiro, fevereiro e março, massas de ar provenientes do continente Africano e Europeu, passando sobre regiões que apresentaram focos de queimadas. Em julho e agosto, as massas de ar passaram muito próximas à região continental e até mesmo sobre o continente Americano, mostrando que realmente existe a influência do continente sobre as massas de ar que estão sendo coletadas nos locais de coleta na costa brasileira.

Em 2013, na Figura 95, também foi observado um período em que as massas de ar foram provenientes do continente Africano e Europeu seguindo de janeiro até maio. Em julho, agosto e setembro, as massas de ar passaram muito próximas da costa brasileira, podendo influenciar as concentrações de CO nessas regiões.

Em 2014, na Figura 96, houveram poucas coletas em SAL, sendo apenas duas em janeiro e duas fevereiro. Foram observadas apenas em fevereiro massas de ar vindas do HN, trazendo contaminação de emissões dessas regiões.

Em julho, agosto, setembro e outubro, foram observadas massas de ar passando sobre o território brasileiro ou muito próximo da região litorânea, mostrando que a influência das queimadas na área continental ficam evidente na região de coleta.

Em 2015, na Figura 97, foram observadas massas de ar provenientes do HN nos meses de fevereiro, março, abril e em maio (apenas para SAL), mostrando a influência da queima de biomassa nas regiões do continente Africano e Europeu. Em julho e agosto, as massas de ar passaram muito próximo da região litorânea ou até mesmo sobre o continente, trazendo influência das emissões de queima de biomassa na região Nordeste do Brasil.

Em 2016, na Figura 98, observamos trajetórias de massas de ar vindas do HN em janeiro, fevereiro, março, abril e maio, mostrando a influência tanto do continente Africano como Europeu nas amostras analisadas. A partir de junho até agosto, as massas de ar passaram sobre o continente ou muito próximo da área litorânea brasileira, trazendo a influência de queimadas para esta região da costa.

Em 2017, na Figura 99, ano em que começaram coletas em ITA, foi observado claramente que este local também recebe a influência de massas de ar provenientes do HN, quando a ZCIT se desloca para baixo da latitude deste local nos meses de janeiro, fevereiro e março. A partir de abril, todas as massas de ar foram provenientes do HS. Em maio, junho, julho, agosto e setembro as massas de ar passaram sobre o território brasileiro, assim como na zona costeira das praias do Nordeste brasileiro. Isso também levaria a influência das emissões nestas regiões até os locais de coleta, influenciando as amostras coletadas na costa.

A análise realizada observando os mapas de focos de queimadas, para cada ano de estudo concorda com os dados de focos de queimadas apresentado anteriormente na Figura 91, a partir dos dados obtidos no portal do Programa Queimadas – INPE. Analisando os dados de focos de queimadas no Brasil, verifica-se que o ano de 2017 apresentou maior número de focos de queimadas, seguido pelo ano de 2010 que foi 9% menor que o número de focos de queimadas do ano de 2017, em seguida vem o ano de 2015 que apresentou 14% a menos, depois 2012, 2016 e 2014, que foram anos similares apresentando focos de queimadas 30%, 31% e 33% menores do que em 2017, respectivamente. Já os anos de 2011 e 2013, apresentaram baixo número de focos de queimadas, estando 52% e 58% menores que o observado em 2017.

Figura 92: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2010. Cores das trajetórias: vermelho (SAL), verde (CAM), azul (NAT) e lilás (ITA).

Figura 93: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2011.
Cores das trajetórias: vermelho (SAL), verde (CAM), azul (NAT) e lilás (ITA).

Figura 94: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2012. Cores das trajetórias: vermelho (SAL), verde (CAM), azul (NAT) e lilás (ITA).

Figura 95: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2013. Cores das trajetórias: vermelho (SAL), verde (CAM), azul (NAT) e lilás (ITA).

Figura 96: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2014. Cores das trajetórias: vermelho (SAL), verde (CAM), azul (NAT) e lilás (ITA).

Figura 97: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2015.
Cores das trajetórias: vermelho (SAL), verde (CAM), azul (NAT) e lilás (ITA).

Figura 98: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2016. Cores das trajetórias: vermelho (SAL), verde (CAM), azul (NAT) e lilás (ITA).

Figura 99: Focos de queimadas global e trajetórias das massas de ar em 2017. Cores das trajetórias: vermelho (SAL), verde (CAM), azul (NAT) e lilás (ITA).

Analisando a concentração média anual para o CO em cada um dos locais de coleta na costa brasileira, que está apresentada na Tabela 14, pode ser observado para todos os locais que não existe uma tendência de aumento nas concentrações de CO, pois essas apresentaram oscilações ano a ano, devido à influência de emissões oriundas de queimadas.

Entretanto, em NAT foi observado que a concentração média anual de CO, nos 5 primeiros anos, apresentava um declínio. Porém, de 2015 para 2016, houve um aumento de 15,0 ppb. Este aumento em NAT foi provavelmente relacionado à transferência do local de coleta de Maxaranguape para o Farol de Mãe Luiza, localizado próximo à área urbana da cidade de Natal. Mesmo a coleta sendo efetuada a 87 m de altitude, a influência antrópica está provavelmente sendo evidenciada nos dados.

Tabela 14: Concentração média anual e desvio padrão para o gás CO nos locais de coleta na costa brasileira

Concentração média anual de CO (ppb) em SAL, CAM, ITA, NAT e ABP					
Ano	SAL	CAM	ITA	NAT	ABP
2006					^a 78,0 ± 12,5
2007					^b 66,3 ± 8,3
2008					^c 74,3 ± 18,3
2009					68,8 ± 10,3
2010	^d 94,3 ± 11,7			^e 80,0 ± 16,0	
2011	93,8 ± 14,9			^f 77,4 ± 13,6	
2012	95,4 ± 21,4			76,0 ± 13,8	
2013	91,8 ± 19,9			73,1 ± 15,0	
2014	^g 87,2 ± 13,1	^h 84,7 ± 12,9		70,9 ± 12,3	
2015	ⁱ 101,4 ± 17,1	^j 83,5 ± 17,2		^k 71,6 ± 15,9	
2016	96,1 ± 25,5	94,3 ± 19,0	^l 108,7 ± -	86,7 ± 20,2	
2017	^m 139,7 ± 3,1	ⁿ 92,2 ± 17,9	^o 97,9 ± 18,2	94,6 ± 16,5	

média: ^aout-dez; ^bfev-set; ^cmar-dez; ^djan/mar-dez; ^emai-dez; ^fjan-nov; ^gjan-fev/jul-dez; ^hjul-dez; ⁱjan-set/nov-dez; ^jjan-jul/nov-dez; ^kjan-jun/nov-dez; ^ldez; ^mjan; ⁿjan-nov; ^ojan-jul/set.

5.5 Comparação da concentração média anual dos GEE dos locais de coleta na costa com a concentração média anual global e com a concentração média anual por latitude

O primeiro estudo a ser apresentado aqui se baseou na comparação dos dados da concentração média anual dos locais de coleta na costa brasileira com a concentração média anual global. Os dados estão disponíveis nos relatórios anuais

elaborados pela WMO/GAW, que também podem ser vistos na Tabela 1 apresentada anteriormente.

O segundo a ser apresentado é a comparação entre a concentração média anual dos GEE com a sua concentração média anual por latitude.

Analisando a Figura 100, em relação ao primeiro estudo, foi observado que a concentração anual para o CO₂ esteve abaixo da concentração global, sendo esta diferença em média 0,8 ppm em SAL, 0,9 ppm em ABP, e 0,7 ppm em NAT e CAM. A concentração média de CO₂ em 2016 em SAL, CAM e NAT foi de 402,4 ppm, 402,6 ppm e 402,1 ppm, respectivamente, estando abaixo do recorde global de 403,3 ppm. Em relação ao segundo estudo, com resultados também apresentados na Figura 100, foi observado que SAL apresentou concentração anual de CO₂ ligeiramente menor que a concentração média por latitude. Foi calculada uma diferença em torno de 0,5 ppm abaixo da concentração por latitude, sendo isto provavelmente relacionado ao processo de absorção do CO₂ nessa região. Em CAM não foi observada uma diferença significativa, confirmando que realmente existe um processo de absorção em SAL que não foi observado em CAM. Já em NAT e ABP, a concentração foi levemente superior ao da média da latitude, com uma diferença de 0,2 ppm.

Vale ressaltar que as concentrações anuais obtidas nos locais de coleta na costa nem sempre refletem um ano todo de medidas, pois alguns anos apresentaram problemas na amostragem, ou até mesmo não houve coleta.

Para o gás CH₄, a concentração anual também esteve abaixo da concentração global, porém com uma maior variação de acordo com o local de coleta. Em SAL foi calculada uma diferença média em torno de 24,4 ppb. Em CAM essa diferença foi de 29,3 ppb, em NAT de 38,9 ppb e em ABP foi de 42,4 ppb. Percebe-se que estas diferenças em SAL e CAM foram menores em relação à concentração global por cota desses locais receberem a influência do HN durante o período em que a ZCIT está em sua posição mais ao Sul da linha do Equador. Diferentemente do que ocorreu em NAT e ABP, que receberam influência apenas do HS e, sendo assim, a diferença em relação à concentração global tende a ser maior. Em 2016, a concentração média de CH₄ foi de 1825,4 ppb, 1823,1 ppb e 1812,1 ppb em SAL, CAM e NAT, respectivamente, valores estes abaixo dos 1853 ppb da média global. A concentração anual do CH₄ nos locais de coleta na costa apresentaram, de maneira geral, uma maior variação em relação à

concentração por latitude de aproximadamente 9 ppb. Isto pode indicar fontes locais de emissão de CH_4 na costa Norte e Nordeste brasileira, como mangues, descarga de efluentes no oceano, ou ainda uma representação pobre das concentrações médias de CH_4 por latitude na faixa dos locais de coleta na costa.

Já para o N_2O foi observado que a concentração anual em todos os locais sempre estiveram próximas da concentração global, como pode ser observado na Figura 100. Foi observado que as concentrações anuais do N_2O também estiveram próximas à concentração por latitude em SAL, NAT, CAM e ABP.

Para o SF_6 foi encontrada uma concentração anual inferior à concentração global em torno de 0,3 ppt em SAL, NAT, CAM e ABP. Foi observado também o mesmo comportamento quando comparou-se a concentração anual desse gás com a concentração média por latitude.

A concentração anual de CO em CAM, NAT e ABP foi inferior à concentração global, onde a diferença média calculada foi cerca de 5,4 ppb, 15,3 ppb e 19,7 ppb, respectivamente. Já em SAL, a concentração anual foi em torno de 3,8 ppb superior à concentração global. De maneira geral, a concentração anual de CO, em todos os locais, foi superior à concentração por latitude. SAL apresentou uma diferença média de 20,5 ppb, seguido de CAM com 15,7 ppb, ABP com 7,7 ppb, e NAT com 5,5 ppb. Estes valores mais elevados nas concentrações dos locais de coleta na costa podem ser devido aos locais sofrerem influência da queima de biomassa, como visto anteriormente na discussão sobre a série temporal de CO.

De maneira geral, a diferença entre as concentrações obtidas na costa Norte e Nordeste do Brasil, em relação à concentração global, se deve aos dados da costa brasileira representarem apenas uma pequena parte da região tropical. Por outro lado, a concentração média global abrange dados de várias estações localizadas no HN e no HS.

Figura 100: Concentração média anual para os gases CO₂, CH₄, N₂O, SF₆ e CO em SAL, NAT, CAM, e ABP, comparando com: a concentração média anual global dos relatórios da WMO/GAW, e com a concentração média anual por latitude da rede mundial NOAA.

5.6 Comparação das concentrações dos GEE dos locais de coleta na costa com as concentrações de outras estações de monitoramento global localizadas no Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico

Como a maioria das estações globais em parceria com a NOAA estão situadas acima da linha do Equador, isto causa, como já foi observado, uma diferença entre as medidas onde as concentrações globais são superiores às encontradas nos locais de coleta na costa brasileira, exceto para o gás CO, como discutido anteriormente.

As estações globais selecionadas já foram descritas anteriormente na Tabela 6 e apresentadas na Figura 47. Assim, os dados referentes ao período de 2010 a 2016 para os gases CO₂ e CH₄, de dois locais de coleta na costa brasileira, SAL e NAT, foram comparados com os dados obtidos nessas estações globais para o mesmo período.

Comparando os dados para o gás CO₂, na faixa de 30° N – 0°, foi observado que SAL, no período de janeiro a abril, apresentou uma sazonalidade próxima àquela das estações localizadas tanto no Oceano Atlântico como no Oceano Pacífico, como apresentado na Figura 101. Pode ser observado também que há uma maior dispersão nas concentrações no Oceano Pacífico Norte (OPN) do que no Oceano Atlântico Norte (OAN). Esse é provavelmente devido as duas estações, DSI e LLN, pertencentes a Taiwan, estarem localizadas em uma região que recebe influência de emissões principalmente da China, Japão, Taiwan, e de outras regiões. Já no período de maio a dezembro, SAL passou a apresentar as mesmas características das estações da faixa de 0° – 30° S, como pode ser observado na Figura 102.

Figura 101: Comparação da concentração de CO₂, em SAL e NAT com as estações globais de 30° N – 0°, localizadas nos Oceanos Atlântico e Pacífico.

Figura 102: Comparação da concentração de CO₂, em SAL e NAT com as estações globais de 0° – 30° S, localizadas nos Oceanos Atlântico e Pacífico.

Analisando a faixa de 0° – 30° S, ainda na Figura 102, observou-se que as concentrações de CO₂ em NAT apresentaram similaridade com as estações globais localizadas nesta faixa. Além disso, observa-se que as concentrações nas estações desta faixa do globo apresentam baixa variabilidade e significativa homogeneidade. Cenário muito diferente do observado no HN na faixa de 30° N – 0°. O HN é a parte do globo onde vivem 75% da população mundial e,

portanto, tem a maioria significativa das emissões globais, além do ciclo biológico das plantas com a sua hibernação durante o inverno. Já o HS, além de não apresentar hibernação das plantas e ter apenas 25% da população mundial, apresenta um padrão de consumo energético inferior ao dos países do HN, como por exemplo os Estados Unidos, China e Europa.

Analisando os dados referentes ao gás CH₄ apresentados na Figura 103, para a faixa de 30° N – 0°, foi observado que SAL também apresentou, no período de janeiro a abril, sazonalidade semelhante à das estações localizadas no OAN e no OPN, porém com concentrações mais baixas. Também pode ser observado no OPN, na faixa de 30° N – 0°, que as concentrações de CH₄ são bem mais elevadas, principalmente nas regiões onde estão localizadas as estações DSI e LLN, pertencentes a Taiwan, por estarem em uma localidade que recebe influência de emissões principalmente da China e de outras regiões próximas. No período de maio a dezembro, as concentrações de CH₄ apresentaram características similares às das estações globais do OAS e OPS, porém com concentrações ligeiramente mais elevadas do que as estações do OPS, como observado na Figura 104.

A comparação entre as concentrações de CH₄ em NAT e as estações do HS na faixa de 0° – 30° S, apresentada na Figura 104, mostra que as concentrações apresentaram maior similaridade com as estações do OAS. No entanto, foi possível perceber uma diferença na sazonalidade das estações do OPS, que apresentam concentrações mais baixas, além de uma importante redução no período de janeiro a março nesta faixa de latitude.

Figura 103: Comparação da concentração de CH_4 , em SAL e NAT com as estações globais de 30° N – 0°, localizadas nos Oceanos Atlântico e Pacífico.

Figura 104: Comparação da concentração de CH_4 , em SAL e NAT com as estações globais de 0° – 30° S, localizadas nos Oceanos Atlântico e Pacífico.

6 CONCLUSÕES

A principal motivação deste estudo foi conhecer a concentração de entrada dos gases de efeito estufa nas massas de ar que chegam à costa Norte e Nordeste do Brasil, provenientes do Oceano Atlântico no período de 2006 até 2017, e a circulação atmosférica que domina esta região. Foi observado no transcorrer deste longo período de estudo que muitos fatores podem influenciar as concentrações dos GEE em cada local de coleta estabelecido na costa brasileira.

A posição geográfica de cada local de coleta de dados desse estudo na costa Norte e Nordeste do Brasil determina o quanto cada um deles recebe influência da Zona de Convergência Intertropical. Caso a ZCIT se desloque para latitudes inferiores ao local de coleta, este receberá massas de ar vindas do Hemisfério Norte. Este processo ocorre no período de janeiro a maio, onde a ZCIT se desloca para sua posição mais ao Sul da linha do Equador. Assim, quanto mais próximo da linha do Equador estiver uma determinada localidade mais afetada ela será pelas massas de ar do HN nesta fase do ano. Neste estudo, foi observado influência do HN até o local de coleta ITA (2,93° S) e não foi observado influência em NAT (5,80° S). SAL apresentou maior número de trajetórias oriundas do HN de janeiro a maio, CAM de janeiro a abril, e ITA de fevereiro a março. Assim, neste período as concentrações dos gases estudados são próximas às do HN. Já em NAT e ABP, as concentrações de CO₂, CH₄, N₂O e SF₆ não apresentaram essa influência, pois estes locais receberam massas de ar apenas do Hemisfério Sul, onde as concentrações são mais baixas e mais homogêneas.

As concentrações de CO são mais elevadas no período de agosto a outubro em SAL, CAM, ITA, NAT e ABP. Essas foram relacionadas com a ocorrência de focos de queimadas tanto do território brasileiro, visto que as trajetórias das massas de ar passaram sobre o continente neste período, como também podem sofrer influência do transporte atmosférico de massas de ar oriundas do continente Africano. E, no início do ano, quando ocorrem as queimadas acima da linha do Equador foi observado, em SAL, CAM e ITA, a chegada de plumas com concentrações elevadas de CO devido ao deslocamento da ZCIT.

Em SAL, concentrações de CO₂ abaixo daquelas das estações globais de ASC e RPB, no período de maio a agosto, além de estudos realizados em SAH que apresentaram um declínio nas concentrações abaixo de 3 km durante todo o ano, evidenciaram que nesta região da costa Norte ocorre absorção de CO₂. Isso é provavelmente devido à extensão de cerca de 200 km da plataforma continental nesta região, somada ao aporte gerado pela descarga do Rio Amazonas, que contribui para o aumento da produtividade primária marinha, resultando em um maior sequestro de carbono da atmosfera.

A concentração do CO₂ e CH₄ em SAL e NAT, quando comparada com a média global por faixa de latitude, apresentou médias inferiores a faixa de 30° N – 0°. Comparando ainda as estações do Oceano Pacífico (OP) com as estações do Oceano Atlântico (OA), foi observado que a concentração destes gases no OP são superiores ao do OA. Isso se deve ao fato de existirem mais estações no OP, estando este oceano mais representado na média global por faixa de latitude do que o OA.

Foi observado que no OP, na faixa de 30° N – 0°, concentrações de CH₄ são superiores às do OA nesta mesma faixa. Estas altas concentrações foram observadas nas estações globais de DSI e LLN, pertencentes a Taiwan, por estarem em uma região que recebe influência de emissões principalmente da China e de outros países pertencentes a esta região. Na faixa de 0° – 30° S, observou-se que as concentrações de CH₄ das estações do OP apresentam maior sazonalidade e, no período de janeiro a março, apresentam concentrações inferiores às do OA. Considerando que o CH₄ ficou com seu crescimento estacionado por quase uma década, e que após 2007 voltou a apresentar crescimento global, ainda é uma incógnita a origem deste crescimento nas emissões mundiais. Porém, este crescimento global poderia também estar relacionado com o descongelamento do *permafrost* no HN, sendo que a maior concentração de *permafrost* se encontra na Rússia, onde este já está descongelando. Assim, comparando as concentrações no HN com às do HS, foi observado que a razão deste atual crescimento provavelmente deve estar localizada no HN. E, as concentrações encontradas em SAL, 7% superiores a de NAT, corroboram com esta hipótese.

De maneira geral, as concentrações do CO₂ e CH₄, no Oceano Atlântico Sul apresentam maior homogeneidade, indicando que a variabilidade e gradientes

são muito inferiores aos observados no Oceano Atlântico Norte, este último representa uma região de onde provem as maiores emissões globais.

A intercomparação realizada entre os dados dos laboratórios LaGEE e NOAA, separadas em três etapas diferentes ao longo desses anos mostrou-se como uma importante ferramenta para verificar os resultados obtidos pelo Brasil em relação a um laboratório de padrão internacional. O melhor resultado obtido ocorreu na época em que as coletas de NAT eram realizadas em Maxaranguape com o equipamento automático de coleta. A partir da mudança de local de coleta, será revisto o procedimento realizado atualmente no Farol em Natal.

Desde o início dos estudos em 2006 até o ano de 2017, foi observado que todos os gases de efeito estufa deste estudo na costa Norte e Nordeste brasileira (CO_2 , CH_4 , N_2O , SF_6 e CO) apresentaram o mesmo padrão de aumento observado nas concentrações médias globais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Primeiramente, antes de sugerir alguns trabalhos futuros, gostaria de comentar que este estudo de longa duração efetuado na costa Norte e Nordeste do Brasil apresentou algumas dificuldades no decorrer de sua execução. Como a logística entre os locais de coleta e o laboratório situado no estado de São Paulo, sendo esta logística totalmente dependente dos serviços dos correios, assim muitas vezes sofrendo com atrasos na entrega, avarias e até mesmo greves. Outras dificuldades enfrentadas foram a quebra da válvula dos frascos de vidro, tanto por manuseio quanto pelo transporte, a manutenção e/ou troca de equipamento utilizado na análise, assim como a manutenção do amostrador portátil, ou ainda a troca da equipe parceira nos locais de coleta, sendo assim necessário novo treinamento, demandando novos custos com viagens até o local de coleta na costa.

Como sugestões para trabalhos futuros que podem ser realizados a partir deste estudo realizado na costa brasileira estão:

a) a partir dos dados meteorológicos, fazer a separação por direção do vento e assim verificar a contaminação das regiões urbanas em relação aos locais de coleta na costa brasileira, como por exemplo em CAM, separando os dados meteorológicos que se apresentaram com mais de 70° de direção do vento e comparar estes com os dados que apresentaram um ângulo abaixo de 70°;

b) a realização de uma análise estatística da correlação da absorção de CO₂, observada em SAL e SAH, com a concentração de *Clorofila a* nesta região de estudo;

c) analisar a estrutura vertical da atmosfera para cada data de perfil vertical realizado em SAH, para se entender a diferença de absorção de CO₂ de um perfil para outro, por qual motivo um determinado perfil apresentou maior absorção que em outro.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ BAIRD, C.; RECIO, M.A.L.; CARRERA, L.C.M. **Química Ambiental**. 2ª ed. São Paulo: Bookman, 2002.
- ² AHRENS, C.D. **Essentials of Meteorology: an invitation to the atmosphere**. 3ª ed. Canadá: Brooks/Cole Thomson Learning, 2000.
- ³ JACOBSON, M.Z. **Atmospheric Pollution: history, science and regulation**. 1ª ed. United Kingdom: Cambridge, 2002.
- ⁴ SOARES, T.J.; HIGUCHI, N., A convenção do clima e a legislação brasileira pertinente, com ênfase para a legislação ambiental no amazonas, **Acta Amazonica**, v.36(4), p.573–580, **2006**.
- ⁵ SEINFELD, J.H.; PANDIS, S.N., **Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change**. 2ª ed. New York: Wiley, 2006.
- ⁶ VENKATARAMAN, S.V.; INIYANB, S.; GOIC R., A review of climate change, mitigation and adaptation, **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, n.16, p.878–897, **2012**. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.009>.
- ⁷ STEPHENS, G.L.; LI, J.; WILD, M.; CLAYSON, C.A.; LOEB, N.; KATO, S.; L'ECUYER, T.; STACKHOUSE JR, P.W.; LEB SOCK, M.; ANDREWS, T., An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations, **Nature Geoscience**, v.5, p.691-696, **2012**. doi:10.1038/ngeo1580.
- ⁸ FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D.W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D.C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R., **Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing**. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. ISBN 978 0521 88009-1.
- ⁹ TRENBERTH, K.E.; FASULLO, J.T.; BALMASEDA, M.A., Earth's Energy Imbalance, **Journal of Climate**, v.27, p.3129-3144, **2014**. doi:10.1175/JCLI-D-13-00294.1.
- ¹⁰ MALHI Y.; MEIR P.; BROWN S., Forests, carbon and global climate, **Philosophical Transactions Royal Society London A**, v.360, p.1567-1591, **2002**. doi:10.1098/rsta.2002.1020.
- ¹¹ STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; ALEXANDER, L.V.; ALLEN, S.K.; BINDOFF, N.L.; BRÉON, F.-M.; CHURCH, J.A.; CUBASCH, U.; EMORI, S.; FORSTER, P.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GILLET, N.; GREGORY, J.M.; HARTMANN, D.L.; JANSEN, E.; KIRTMAN, B.; KNUTTI, R.; KRISHNA KUMAR, K.; LEMKE, P.; MAROTZKE, J.; MASSON-DELMOTTE, V.; MEEHL, G.A.; MOKHOV, I.I.; PIAO, S.; RAMASWAMY, V.; RANDALL, D.; RHEIN, M.; ROJAS, M.; SABINE, C.; SHINDELL, D.; TALLEY, L.D.; VAUGHAN, D.G.; XIE, S.-P., **Technical Summary**. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press,

- Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. ISBN 978-1-107-05799-1.
- ¹² BRASSEUR, G.P.; ORLANDO, J.J.; TYNDALL, G.S., ***Atmospheric Chemistry and Global Change***, 1ª ed. New York: Oxford University Press, 1999.
- ¹³ LE QUÉRE, C.; ANDRES, R.J.; BODEN, T.; CONWAY, T.; HOUGHTON, R.A.; HOUSE, J.I.; MARLAND, G.; PETERS, G.P.; van der WERF, G.R.; AHLSTRÖM, A.; ANDREW, R.M.; BOPP, L.; CANADELL, J.G.; CIAIS, P.; DONEY, S.C.; ENRIGHT, C.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HUNTINGFORD, C.; JAIN, A.K.; JOURDAIN, C.; KATO, E.; KEELING, R.F.; KLEIN GOLDEWIJK, K.; LEVIS, S.; LEVY, P.; LOMAS, M.; POULTER, B.; RAUPACH, M.R.; SCHWINGER, J.; SITCH, S.; STOCKER, B.D.; VIOVY, N.; ZAEHLE, S.; ZENG, N., The global carbon budget 1959–2011, ***Earth System Science Data***, v.5, p.165–185, 2013. doi:10.5194/essd-5-165-2013.
- ¹⁴ LE TREUT, H.; SOMERVILLE, R.; CUBASCH, U.; DING, Y.; MAURITZEN, C.; MOKSSIT, A.; PETERSON, T.; PRATHER, M., ***Historical Overview of Climate Change***. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. ISBN 978 0521 88009-1.
- ¹⁵ MARENGO, J.A., ***Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI***, 2ª ed. Brasília: MMA, 2007.
- ¹⁶ SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; ALLEY, R.B.; BERNTSEN, T.; BINDOFF, N.L.; CHEN, Z.; CHIDTHAISONG, A.; GREGORY, J.M.; HEGERL, G.C.; HEIMANN, M.; HEWITSON, B.; HOSKINS, B.J.; JOOS, F.; JOUZEL, J.; KATTSOV, V.; LOHMANN, U.; MATSUNO, T.; MOLINA, M.; NICHOLLS, N.; OVERPECK, J.; RAGA, G.; RAMASWAMY, V.; REN, J.; RUSTICUCCI, M.; SOMERVILLE, R.; STOCKER, T.F.; WHETTON, P.; WOOD, R.A.; WRATT, D., ***Technical Summary***. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. ISBN 978 0521 88009-1.
- ¹⁷ UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. Population Division, Population Estimates and Projections Sections. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wpp/>>. Acesso em: 29 dez 2017.
- ¹⁸ WALLACE, J.M., HOBBS, P.V., ***Atmospheric Science: an introductory survey***, 2ª ed. United States: Academic Press, 2006.
- ¹⁹ CIAIS, P.; SABINE, C.; BALA, G.; BOPP, L.; BROVKIN, V.; CANADELL, J.; CHHABRA, A.; DEFRIES, R.; GALLOWAY, J.; HEIMANN, M.; JONES, C.; LE QUÉRE, C.; MYNENI, R.B.; PIAO, S.; THORNTON, P., ***Carbon and Other Biogeochemical Cycles***. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. ISBN 978-1-107-05799-1.
- ²⁰ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletin. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations up to***

- December 2004.** n.1, 2006. Disponível em: <ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/arep/gaw/ghg-bulletin-en-03-06_000.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017.
- ²¹ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletin. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2005.*** n.2, 2006. Disponível em: <ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/arep/gaw/ghg-bulletin-en-11-06.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017.
- ²² WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletin. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2006.*** n.3, 2007. Disponível em: <ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/arep/gaw/ghg-bulletin-3.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017.
- ²³ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletin. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2007.*** n.4, 2008. Disponível em: <ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/arep/gaw/ghg-bulletin-4-final-english.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017.
- ²⁴ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletins. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2008.*** n.5, 2009. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG-bulletin2009_en.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017.
- ²⁵ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletins. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2009.*** n.6, 2010. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG_bull_6en.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017.
- ²⁶ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletins. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2010.*** n.7, 2011. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHGbulletin_7_en.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017. ISSN 2078-0796.
- ²⁷ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletins. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2011.*** n.8, 2012. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG_Bulletin_No.8_en.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017. ISSN 2078-0796.
- ²⁸ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletins. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2012.*** n.9, 2013. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG_Bulletin_No.9_en.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017. ISSN 2078-0796.
- ²⁹ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletins. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2013.*** n.10, 2014. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG_Bulletin_10_Nov2014_EN.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017. ISSN 2078-0796.
- ³⁰ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletins. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2014.*** n.11, 2015. Disponível em: <https://library.wmo.int/pmb_ged/ghg-bulletin_11_en.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2017. ISSN 2078-0796.
- ³¹ WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletins. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through***

2015. n.12, 2016. Disponível em: <https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3084>. Acesso em: 28 dez. 2017. ISSN 2078-0796.
- ³² WMO. World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletins. ***The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2016***. n.13, 2017. Disponível em: <https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=4022>. Acesso em: 28 dez. 2017. ISSN 2078-0796.
- ³³ WMO/GAW/WDCGG. World Meteorological Organization. World Global Atmosphere Watch. World Data Centre for Greenhouse Gases. ***GAW stations network and other measurements***. Disponível em: <<http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/measurements.html>>. Acesso em: 28 dez. 2017.
- ³⁴ MALHI, Y.; GRACE, J., Tropical forests and atmospheric carbon dioxide, ***Trends in Ecology & Evolution***, v.15, n.8, p.332-337, **2000**. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)01906-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)01906-6).
- ³⁵ GLOOR, M.; GATTI, L.; BRIENEN, R.; FELDPAUSCH, T.R.; PHILLIPS, O. L.; MILLER, J.; OMETTO, J.P.; ROCHA, H.; BAKER, T.; JONG, B. de; HOUGHTON, R.A.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L.E.O.C.; GUYOT, J.-L.; ZHAO, K.; JACKSON, R.; PEYLIN, P.; SITCH, S.; POULTER, B.; LOMAS, M.; ZAEHLE, S.; HUNTINGFORD, C.; LEVY, P.; LLOYD, J., The carbon balance of South America: a review of the status, decadal trends and main determinants, ***Biogeosciences***, v.9, p.5407-5430, **2012**. doi:10.5194/bg-9-5407-2012.
- ³⁶ GATTI, L.V.; MILLER, J.B.; D'AMELIO, M.T.S.; MARTINEWSKI, A.; BASSO, L.S.; GLOOR, M.E.; WOFSY, S.; TANS, P., Vertical profiles of CO₂ above eastern Amazonia suggest a net carbon flux to the atmosphere and balanced biosphere between 2000 and 2009, ***Tellus B***, v.62, p.581-594, **2010**. doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00484.x.
- ³⁷ GATTI, L.V.; GLOOR, M.; MILLER, J.B.; DOUGHTY, C.E.; MALHI, Y.; DOMINGUES, L.G.; BASSO, L.S.; MARTINEWSKI, A.; CORREIA, C.S.C.; BORGES, V.F.; FREITAS, S.; BRAZ, R.; ANDERSON, L.O.; ROCHA, H.; GRACE, J.; PHILLIPS, O.L.; LLOYD, J. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. ***Nature Letter***, v.506, p.76-80, **2014**. doi:10.1038/nature12957.
- ³⁸ GLOOR, M.; BRIENEN, R.J.W.; GALBRAITH, D.; FELDPAUSCH, T.R.; SCHÖNGART, J.; GUYOT, J.-L.; ESPINOZA, J.C.; LLOYD, J.; PHILLIPS, O.L., Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades, ***Geophysical Research Letters***, v.40, p.1-5, **2013**. doi:10.1002/grl.50377.
- ³⁹ MALHI, Y.E.; WRIGHT, J., Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions, ***Philosophical Transactions of The Royal Society of London Series B-Biological Sciences***, v.359, p.311-329, **2004**. doi:10.1098/rstb.2003.1433.
- ⁴⁰ CRAMER, W.; BONDEAU, A.; SCHAPHOFF, S.; LUCHT, W.; SMITH, B.; SITCH, S., Tropical forests and the global carbon cycle: impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation, ***Philosophical Transactions of The Royal Society of London Series B-Containing Papers of a Biological Character***, v.359, n.1443, p.331-343, **2004**. doi:10.1098/rstb.2003.1428.
- ⁴¹ D'AMELIO, M.T.S.; Gatti, L.V.; MILLER, J.; TANS, P., Regional N₂O fluxes in Amazonia derived from aircraft vertical profiles, ***Atmospheric Chemistry and Physics***, v.9, p.8785-8797, **2009**. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-9-8785-2009>.
- ⁴² 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, L10809, **2007**. doi:10.1029/2006GL029213.
- ⁴³ WMO/GAW. World Meteorological Organization - Global Atmosphere Watch - World Data Centre for Greenhouse Gases. **WMO WDCGG Data Summary**, n.41. Japan Meteorological Agency em cooperação com WMO, 2017. Disponível em: <<https://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/pub/products/summary/sum41/sum41contents.html>>. Acesso em: 24 jan. 2018.
- ⁴⁴ HOBBS, P.V., **Introduction to atmospheric chemistry**. 1ª ed. United States of America: Cambridge University Press, 2000.
- ⁴⁵ WMO/GAW/WDCGG. Global Atmosphere Watch. World Data Centre for Greenhouse Gases. **Global mean mole fractions**. Disponível em: <<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/pub/global/globalmean.html#content1>>. Acesso em: 30 dez. 2017.
- ⁴⁶ LE QUÉRE, C.; ANDREW, R.M.; FRIEDLINGSTEIN, P.; SITCH, S.; PONGRATZ, J.; MANNING, A.C.; KORSBAKKEN, J.I.; PETERS, G.P.; CANADELL, J.G.; JACKSON, R.B.; BODEN, T.A.; TANS, P.P.; ANDREWS, O.D.; ARORA, V.K.; BAKKER, D.C.E.; BARBERO, L.; BECKER, M.; BETTS, R.A.; BOPP, L.; CHEVALLIER, F.; CHINI, L.P.; CIAIS, P.; COSCA, C.E.; CROSS, J.; CURRIE, K.; GASSER, T.; HARRIS, I.; HAUCK, J.; HAVERD, V.; HOUGHTON, R.A.; HUNT, C.W.; HURTT, G.; ILYINA, T.; JAIN, A.K.; KATO, E.; KAUTZ, M.; KEELING, R.F.; GOLDEWIJK, K.K.; KÖRTZINGER, A.; LANDSCHÜTZER, P.; LEFÈVRE, N.; LENTON, A.; LIENERT, S.; LIMA, I.; LOMBARDOZZI, D.; METZL, N.; MILLERO, F.; MONTEIRO, P.M.; MUNRO, D.R.; NABEL, J.E.M.S.; NAKAOKA, S.-I.; NOJIRI, Y.; PADÍN, X.A.; PEREGON, A.; PFEIL, B.; PIERROT, D.; POULTER, B.; REHDER, G.; REIMER, J.; RÖDENBECK, C.; SCHWINGER, J.; SÉFÉRIAN, R.; SKJELVAN, I.; STOCKER, B.D.; TIAN, H.; TILBROOK, B.; LAAN-LUIJKX, I.T. van der; WERF, G.R. van der; HEUVEN, S. van; VIOVY, N.; VUICHARD, N.; WALKER, A.P.; WATSON, A.J.; WILTSHIRE, A.J.; ZAEHLE, S.; ZHU, D., Global Carbon Budget 2017, **Earth System Science Data Discussion**, in review, **2017**. doi:<https://doi.org/10.5194/essd-2017-123>.
- ⁴⁷ CIAIS, P.; DOLMAN, A.J.; BOMBELLI, A.; DUREN, R.; PEREGON, A.; RAYNER, P.J.; ZEHNER, C., Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system, **Biogeosciences**, v.11, p.3547–3602, **2014**. doi:10.5194/bg-11-3547-2014.
- ⁴⁸ CANADELL, J.G.; QUÉRE, C.L.; RAUPACH, M.R.; FIELD, C.B.; BUITENHUIS, E.T.; CIAIS, P.; CONWAY, T.J.; GILLETT, N.P.; HOUGHTON, R.A.; MARLAND, G., Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.104, n.47, p.18866–18870, **2007**. doi:10.1073/pnas.0702737104.
- ⁴⁹ ANDRES, R.J.; BODEN, T.A.; BRÉON, F.-M.; CIAIS, P.; DAVIS S.; ERICKSON, D.; GREGG, J.S.; JACOBSON, A.; MARLAND, G.; MILLER, J.; ODA, T.; OLIVIER J.G.J.; RAUPACH, M.R.; RAYNER, P.; TREANTON, K., A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion, **Biogeosciences**, v.9, p.1845–1871, **2012**. doi:10.5194/bg-9-1845-2012.

- ⁵⁰ MCT. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Segunda Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**, Brasília, 2010.
- ⁵¹ MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**, Brasília, 2013.
- ⁵² MCTIC. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**, 3ª edição, Brasília, 2016.
- ⁵³ PRODES. Coordenação Geral de Observação da Terra – OBT. Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>>. Acesso em: 30 dez. 2017.
- ⁵⁴ MYHRE, G.; SHINDELL, D.; BRÉON, F.M.; COLLINS, W.; FUGLESTVEDT, J.; HUANG, J.; KOCH, D.; LAMARQUE, J.F.; LEE, D.; MENDOZA, B.; NAKAJIMA, T.; ROBOCK, A.; STEPHENS, G.; TAKEMURA, T.; ZHANG, H., **Anthropogenic and Natural Radiative Forcing**. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. **2013**. ISBN: 978-1-107-05799-1.
- ⁵⁵ NISBET, E.G.; DLUGOKENCKY, E.J.; BOUSQUET, P., Methane on the rise-again, **Science**, v.343, p.493-495, **2014**. doi:10.1126/science.1247828.
- ⁵⁶ DLUGOKENCKY, E.J.; Bruhwiler, L.; White, J.W.C.; Emmons, L.K.; Novelli, P.C.; Montzka, S.A.; Masarie, K.A.; Lang, P.M.; Crotwell, A.M.; Miller, J.B.; GATTI, L.V., Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden, **Geophysical Research Letters**, v.36, p.L18803, **2009**. doi:10.1029/2009GL039780.
- ⁵⁷ DENMAN, K.L.; BRASSEUR, G.; CHIDTHAISONG, A.; CIAIS, P.; COX, P.M.; DICKINSON, R.E.; HAUGLUSTAINE, D.; HEINZE, C.; HOLLAND, E.; JACOB, D.; LOHMANN, U.; RAMACHANDRAN, S.; SILVA DIAS, P.L. da; WOFSY, S.C.; ZHANG, X., **Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry**. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, **2007**. ISBN 978 0521 88009-1.
- ⁵⁸ SCHEUTZ, C.; KJELDSSEN, P.; GENTIL E., Greenhouse gases, radiative forcing, global warming potential and waste management an introduction, **Waste Manage Research**, v.27, p.716-723, **2009**. doi:10.1177/0734242X09345599.
- ⁵⁹ BASSO, L.S. **Estudo da Emissão de Metano da Bacia Amazônica utilizando Perfis Verticais com Avião**, 2011. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- ⁶⁰ BASSO, L.S. **Determinação da Emissão de Metano da Bacia Amazônica**. 2014. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2014.
- ⁶¹ KIRSCHKE, S.; BOUSQUET, P.; CIAIS, P.; SAUNOIS, M.; CANADELL, J.G.; DLUGOKENCKY, E.J.; BERGAMASCHI, P.; BERGMANN, D.; BLAKE, D.R.; BRUHWILER, L.; CAMERON-SMITH, P.; CASTALDI, S.; CHEVALLIER, F.; FENG, L.; FRASER, A.; HEIMANN, M.; HODSON, E.L.; HOUWELING, S.; JOSSE, B.; FRASER, P.J.; KRUMMEL, P.B.; LAMARQUE, J.-F.;

- LANGENFELDS, R.L.; LE QUÉRÉ, C.; NAIK, V.; O'DOHERTY, S.; PALMER, P.I.; PISON, I.; PLUMMER, D.; POULTER, B.; PRINN, R.G.; RIGBY, M.; RINGEVAL, B.; SANTINI, M.; SCHMIDT, M.; SHINDELL, D.T.; SIMPSON, I.J.; SPAHNI, R.; STEELE, L.P.; STRODE, S.A.; SUDO, K.; SZOPA, S.; VAN DER WERF, G.R.; VOULGARAKIS, A.; VAN WEELE, M.; WEISS, R.F.; WILLIAMS, J.E.; ZENG, G., Three decades of global methane sources and sinks, **Nature Geoscience**, p.1-11, **2013**. doi:10.1038/NGEO1955.
- ⁶² D'AMELIO, M.T.S., **Estudo de Fluxo de Óxido Nitroso (N₂O) regional na Bacia Amazônica**, 2010. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- ⁶³ KROEZE, C.; DUMONT, E.; SEITZINGER, S.P., New estimates of global emissions of N₂O from rivers and estuaries, **Environmental Sciences**, v.2(2-3), p.159-165, **2005**. doi:10.1080/15693430500384671.
- ⁶⁴ ZHOU, M.; LANGEROCK, B.; VIGOUROUX, C.; WANG, P.; HERMANS, C.; STILLER, G.; WALKER, K.A.; DUTTON, G.; MAHIEU, E.; MAZIÈRE, M., Ground-based FTIR retrievals of SF₆ at Réunion Island, **Atmospheric Measurement Techniques Discussions**, p.1-19, **2017**. doi:https://doi.org/10.5194/amt-2017-348.
- ⁶⁵ KOVÁCS, T.; FENG, W.; TOTTERDILL, A.; PLANE, J.M.C.; DHOMSE, S.; GÓMEZ-MARTÍN, J.C.; STILLER, G.P.; HAENEL, F.J.; SMITH, C.; FORSTER, P.M.; GARCÍA, R.R.; MARSH, D.R.; CHIPPERFIELD, M.P., Determination of the atmospheric lifetime and global warming potential of sulfur hexafluoride using a three-dimensional model, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.17, p.883–898, **2017**. doi:10.5194/acp-17-883-2017.
- ⁶⁶ HARTMANN, D.L.; KLEIN TANK, A.M.G.; RUSTICUCCI, M.; ALEXANDER, L.V.; BRÖNNIMANN, S.; CHARABI, Y.; DENTENER, F.J.; DLUGOKENCKY, E.J.; EASTERLING, D.R.; KAPLAN, A.; SODEN, B.J.; THORNE, P.W.; WILD, M.; ZHAI, P.M., **Observations: Atmosphere and Surface**. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. **2013**. ISBN: 978-1-107-05799-1.
- ⁶⁷ RIGBY, M.; MUHLE, J.; MILLER, B.R.; PRINN, R.G.; KRUMMEL, P.B.; STEELE, L.P.; FRASER, P.J.; SALAMEH, P.K.; HARTH, C.M.; WEISS, R.F.; GREALLY, B.R.; O'DOHERTY, S.; SIMMONDS, P.G.; VOLLMER, M.K.; REIMANN, S.; KIM, J.; KIM R.K.; WANG, H.J.; OLIVIER, J.G.J.; DLUGOKENCKY, E.J.; DUTTON, G.S.; HALL, B.D.; ELKINS, J.W., History of atmospheric SF₆ from 1973 to 2008, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.10, p.10305–10320, **2010**. doi:10.5194/acp-10-10305-2010.
- ⁶⁸ LEVIN, I.; NAEGLER, T.; HEINZ R.; OSUSKO, D.; CUEVAS, E.; ENGEL, A.; ILMBERGER, J.; LANGENFELDS, R.L.; NEININGER, B.; ROHDEN, C.V.; STEELE, L.P.; WELLER, R.; WORTHY, D.E.; ZIMOV, S.A., The global SF₆ source inferred from long-term high precision atmospheric measurements and its comparison with emission inventories, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.10, p.2655–2662, **2010**. doi:https://doi.org/10.5194/acp-10-2655-2010.
- ⁶⁹ GLOOR, M.; DLUGOKENCKY, E.; BRENNINKMEIJER, C.; HOROWITZ, L.; HURST, D.F.; DUTTON, G.; CREVOISIER, C.; MACHIDA, T.; TANS, P., Three-dimensional SF₆ data and tropospheric transport simulations: Signals, modeling

- accuracy, and implications for inverse modeling, *Journal of Geophysical Research*, v.112, D15112, **2007**. doi:10.1029/2006JD007973.
- ⁷⁰ PATRA, P.K.; TAKIGAWA, M.; DUTTON, G.S.; UHSE, K.; ISHIJIMA, K.; LINTNER, B.R.; MIYAZAKI, K.; ELKINS, J.W., Transport mechanisms for synoptic, seasonal and interannual SF₆ variations in troposphere, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, v.8, p.12737–12767, **2008**. doi:www.atmos-chem-phys.net/9/1209/2009/.
- ⁷¹ RAY, E.A.; MOORE, F.L.; ELKINS, J.W.; K. H. ROSENLOF, J. C. LAUBE, RÖCKMANN, T.; MARSH, D.R.; ANDREWS, A.E., Quantification of the SF₆ lifetime based on mesospheric loss measured in the stratospheric polar vortex, *Journal Geophysical Research Atmospheres*, v.122, p.4626–4638, **2017**. doi:10.1002/2016JD026198.
- ⁷² ANDREAE, M.O.; ARTAXO, P.; BECK, V.; BELA, M.; FREITAS, S.; GERBIG, C.; LONGO, K.; MUNGER, J.W.; WIEDEMANN, K.T.; WOFSY, S.C. Carbon monoxide and related trace gases and aerosols over the Amazon Basin during the wet and dry seasons. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, v.12, p.8107–8168, **2012**. doi:10.5194/acpd-12-8107-2012.
- ⁷³ MELO, A.B.C; CAVALCANTI, I.F.A.; SOUZA, P.P., *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo – SP: Oficina de Textos, 2009. cap.2, Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. p.25–41.
- ⁷⁴ BORGES, V.F. *Determinação da Concentração de Entrada dos Gases de Efeito Estufa na Costa Norte/Nordeste Brasileira*. 2013. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2013.
- ⁷⁵ D'AMÉLIO, M.T.S. *Estudo de gases de efeito estufa na Amazônia*. 2006. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- ⁷⁶ DOMINGUES, L.G. *Estudo do papel da Bacia Amazônica na emissão/absorção de dióxido de carbono durante o ano de 2010*. 2012. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- ⁷⁷ WMO - World Meteorological Organization. Technical report of global analysis method for major greenhouse gases by the World Data Centre for Greenhouse Gases. GAW Report No.184 (WMO/TD-No.1473). Geneva, pp. 29, **2009**. Disponível em: <https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/TD_1473_GAW184_web.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2018.
- ⁷⁸ STEIN, A.F.; DRAXLER, R.R.; ROLPH, G.D.; STUNDER, B.J.B.; COHEN, M.D.; NGAN, F. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *American Meteorological Society*. p.2059–2078, **2015**. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
- ⁷⁹ DRAXLER, R.R. AND ROLPH, G.D., HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY. NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD. Disponível em: <<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>>.
- ⁸⁰ INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 20 dez. 2017.
- ⁸¹ GLOBCOLOUR. Dados *GlobColour* utilizados neste estudo foram desenvolvidos, validados e distribuídos por ACRI-ST, França. Disponível em: <<http://globcolour.info>>. Acesso em: 09 jul. 2018.

- ⁸² INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016. Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas>>. Acesso em: 20 dez. 2017.
- ⁸³ GIGLIO, L., **MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide**. Revision A. University of Maryland, (USA): Department of Geographical Sciences, mar. 2015. Disponível em: <http://modis-fire.umd.edu/files/MODIS_C6_Fire_User_Guide_A.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2018.
- ⁸⁴ MODIS Active Fire and Burned Area Products website, 2017. Disponível em: <<ftp://fuoco.geog.umd.edu/modis/C6/mcd14ml/>>. Acesso em: 20 dez. 2017.
- ⁸⁵ SCHNEIDER, T.; BISCHOFF, T.; HAUG, G.H. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. **Nature Review**, v.513, p.45–53, **2014**. doi:10.1038/nature13636.
- ⁸⁶ ARBUSZEWSKI, J.A.; MENOCAL, P.B.; CLÉROUX, C.; BRADTMILLER, L.; MIX, A. Meridional shifts of the Atlantic intertropical convergence zone since the Last Glacial Maximum. **Nature Geoscience**, v.6, p.959-962, **2013**. doi:10.1038/NGEO1961.
- ⁸⁷ SOUZA, P.; CAVALCANTI, I.F.A. Atmospheric centres of action associated with the Atlantic ITCZ position. **International Journal of Climatology**, v.29, p.2091–2105, **2009**. doi:10.1002/joc.1823.
- ⁸⁸ BARRY, R.G.; CHORLEY, R.J., **Atmosfera, tempo e clima**. 9ªed. p.512, Porto Alegre – RS: Bookman, 2013.
- ⁸⁹ POLZIN, D.; HASTENRATH, S. Climate of Brazil's nordeste and tropical atlantic sector: preferred time scales of variability. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.2, p.153–160, **2014**. doi:<http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v29n2/a01v29n2.pdf>.
- ⁹⁰ RODRIGUES, R.R.; HAARSMA, R.J.; CAMPOS, E.J.D.; AMBRIZZI, T. The impacts of inter–El Niño variability on the tropical Atlantic and Northeast Brazil climate. **Journal of Climate**, v.24, p.3402–3422, **2011**. doi:10.1175/2011JCLI3983.1.
- ⁹¹ MCGEE, D.; DONOHUE, A.; MARSHALL, J.; FERREIRA, D. Changes in ITCZ location and cross-equatorial heat transport at the Last Glacial Maximum, Heinrich Stadial 1, and the mid-Holocene. **Earth and Planetary Science Letters**, v.390, p.69–79. **2014**. doi:10.1016/j.epsl.2013.12.043.
- ⁹² PEREIRA, L.C.C.; OLIVEIRA, S.M.O.; COSTA, R.M.; COSTA, K.G.; VILA-CONCEJO, A. What happens on an equatorial beach on the Amazon coast when La Niña occurs during the rainy season?, **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.135, p.116–127, **2013**. doi:10.1016/j.ecss.2013.07.017.
- ⁹³ ISAAC, V.J.; FERRARI, S.F. Assessment and management of the North Brazil Shelf Large Marine Ecosystem. **Environmental Development**, v.22, p.97–110, **2017**. doi:10.1016/j.envdev.2016.11.004.
- ⁹⁴ SUBRAMANIAM, A.; YAGER, P.L.; CARPENTER, E.J.; MAHAFFEY, C.; BJORKMAN, K.; COOLEY, S.; KUSTKA, A.B.; MONTROYA, J.P.; SANUDO-WILHELMY, S.A.; SHIPE, R.; CAPONE, D.G., Amazon River enhances diazotrophy and carbon sequestration in the tropical North Atlantic Ocean, **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.105, n.30, p.10460–10465, **2008**. doi:10.1073/pnas.0710279105.
- ⁹⁵ CARVALHO, A.C.O.; MARINS, R.V.; DIAS, F.J.S.; REZENDE, C.E.; LEFÈVRE, N.; CAVALCANTE, M.S.; ESCHRIQUE, S.A. Air-sea CO₂ fluxes for the Brazilian

- northeast continental shelf in a climatic transition region. **Journal of Marine Systems**, v.173, p.70–80, **2017**. doi:10.1016/j.jmarsys.2017.04.009.
- ⁹⁶ TERNON, J.F.; OUDOT, C.; DESSIER, A.; DIVERRES, D., A seasonal tropical sink for atmospheric CO₂ in the Atlantic ocean: the role of the Amazon River discharge, **Marine Chemistry** v.68, p.183–201. **2000**. doi:10.1016/S0304-4203(99)00077-8.
- ⁹⁷ FRATANTONI, D.M.; GLICKSON, D.A., North Brazil Current Ring Generation and Evolution Observed with SeaWiFS, **Journal of Physical Oceanography**, v.32, p.1058-1074, **2002**. doi:10.1175/1520-0485(2002)032<1058.
- ⁹⁸ CALLEDE, J.; COCHONNEAU, G.; ALVES, F. V.; GUYOT, J.-L.; GUIMARÃES, V. S.; OLIVEIRA, E. Revue des sciences de l'eau. **Journal of Water Science**, v.23, n.3, p.247-273, **2010**. doi:10.7202/044688ar.
- ⁹⁹ EOM, J.; SEO, K-W; RYU, D., Estimation of Amazon River discharge based on EOF analysis of GRACE gravity data, **Remote Sensing of Environment**, v.191, p.55–66, **2017**. doi:10.1016/j.rse.2017.01.011.
- ¹⁰⁰ NIKIEMA, O.; DEVENON, J.-L.; BAKLOUTI, M., Numerical modeling of the Amazon River plume. **Continental Shelf Research**, v.27, p.873–899, **2007**. doi:10.1016/j.csr.2006.12.004.
- ¹⁰¹ NAKANO, T.; KUNIYOSHI, S.; FUKUDA, M., Temporal variation in methane emission from tundra wetlands in a permafrost area, northeastern Siberia. **Atmospheric Environment**, v.34, p.1205–1213, **2000**. doi:10.1016/S1352-2310(99)00373-8.
- ¹⁰² SCHUUR, E.A.G.; MCGUIRE, A.D.; SCHADEL, C.; GROSSE, G.; HARDEN, J.W.; HAYES, D.J.; HUGELIUS, G.; KOVEN, C.D.; KUHR, P.; LAWRENCE, D.M.; NATALI, S.M.; OLEFELDT, D.; ROMANOVSKY, V.E.; SCHAEFER, K.; TURETSKY, M.R.; TREAT, C.C.; VONK, J.E., Climate change and the permafrost carbon feedback. **Nature Review**, v.520, p.171–179, **2015**. doi:10.1038/nature14338.
- ¹⁰³ WMO/GAW. World Meteorological Organization - Global Atmosphere Watch - World Data Centre for Greenhouse Gases. **WMO WDCGG Data Summary**, n.39. Japan Meteorological Agency in co-operation with WMO, **2015**. Disponível em: <<https://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/products/publication.html>>. Acesso em: 24 jan. 2018.
- ¹⁰⁴ ODUM, E. P., **Ecologia**, 1ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.
- ¹⁰⁵ EKAU, W.; KNOPPERS, B., An introduction to the pelagic system of the Northeast and East Brazilian shelf, **Archive of Fishery and Marine Research**, v.47(2/3), p.5–24. **1999**.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.**