



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

GABRIELLE TAVARES DE CARVALHO

COMPARAÇÃO DE DADOS DE xCO₂ ESTIMADOS PELO SATÉLITE OCO-2
COM DADOS MEDIDOS POR NAVIOS SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO
TROPICAL E POR ESTAÇÕES TERRESTRES

FORTALEZA

2021

GABRIELLE TAVARES DE CARVALHO

COMPARAÇÃO DE DADOS DE xCO₂ ESTIMADOS PELO SATÉLITE OCO-2 COM
DADOS MEDIDOS POR NAVIOS SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL E
POR ESTAÇÕES TERRESTRES

Monografia apresentada ao Curso do curso de Ciências Ambientais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C323c Carvalho, Gabrielle Tavares de.
Comparação de dados de xCO₂ estimados pelo satélite OCO-2 com dados medidos por navios sobre o Oceano Atlântico Tropical e por estações terrestres / Gabrielle Tavares de Carvalho. – 2021.
66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Ciências Ambientais, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira.

Coorientação: Profa. Dra. Nathalie Lefèvre.

1. Satélite OCO-2. 2. Oceano Atlântico Tropical. 3. xCO₂. 4. Dióxido de Carbono Atmosférico. I. Título.
CDD 333.7

GABRIELLE TAVARES DE CARVALHO

VALIDAÇÃO DE DADOS DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) ESTIMADOS PELO
SATÉLITE ORBITING CARBON OBSERVATORY - 2 (OCO-2) SOBRE O OCEANO
ATLÂNTICO TROPICAL

Monografia apresentada ao Curso
do curso de Ciências Ambientais
do Instituto de Ciências do Mar da
Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Ciências Ambientais.

Aprovada em __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Nathalie Lefèvre (Coorientadora)
Laboratoire d'Océanographie et du Climat: Expérimentations et Approches Numériques
(LOCEAN)

Prof. Dr. Luiz Carlos Cotoviez Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha mãe Maria

Tavares.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me permitido chegar até aqui, e a todos os meus amigos espirituais que me auxiliaram nessa caminhada.

Aos meus pais, Maria e Miguel que sempre me incentivaram mas, principalmente a minha mãe que sempre cuidou de mim, que se sacrificou para que eu estivesse bem, minha amiga de todas as horas. Minha eterna gratidão pela paciência.

Ao meu estimado professor Dr. Antônio Geraldo por ter aceitado ser meu orientador, por todos os seus ensinamentos, por sempre ter me incentivado a não desistir e a continuar tentando, e ter facilitado e me direcionado ao caminho que estou hoje.

Ao meu admirável professor Marcus Vinícius por todas as lições tanto acadêmicas como pessoais.

A minha querida professora Juliana, pela oportunidade que me deu.

Ao meu querido professor Moro, pela sua maravilhosa forma de ensinar.

A maravilhosa colaboração da minha coorientadora Dra. Nathalie Lefèvre.

A colaboração neste trabalho dos professores Dr. Luiz Carlos Cotovicz Junior e ao M.e Pedro Silveira Calixto.

As minhas amigas Virgínia, Yasmin, Karol, Ana Paula e Luzanira pelo carinho. Aos meus colegas, Matheus e Vladimir.

As minhas amigas de estudo e trabalho Mariana e Samila.

Aos laboratórios EOLLab, LEDs e o LAMAP.

Aos porteiros e aos funcionários de serviços gerais do LABOMAR.

A toda a Universidade Federal do Ceará, principalmente ao Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR).

A toda a minha família, principalmente minha irmã Michelle e meus sobrinhos Sofya, Monyelle e Elias.

Aos meus avós Francisco Luiz, Francisca Tavares e o João Miguel Ribeiro.

As minhas tias Antônia, Francisca e Maria Socorro.

Em especial a minha prima Vera Lúcia.

E a minha amiga de infância Maria Carolina, que esteve comigo nos momentos que mais precisei e que hoje se encontra no céu.

Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; se não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito. (Chico Xavier).

RESUMO

Desde o século XVIII com o início das atividades da Revolução Industrial, vem ocorrendo o aumento da liberação para atmosfera do principal impulsionador das mudanças climáticas produzido pelo homem, o gás carbônico, devido ao crescimento populacional. A comparação de dados de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico estimados pelo satélite Orbiting Carbon Observatory - 2 (OCO-2) com dados medidos por navios sobre o Oceano Atlântico tropical e por estações terrestres, contribui com as pesquisas e tomadas de decisões sobre o efeito das mudanças climáticas através de estimativas do aumento de CO₂. O objetivo central do trabalho é verificar e comparar as estimativas pelo satélite utilizando dados de observações *in situ* próximas do Oceano Atlântico Tropical por meio das análises estatísticas e observacionais. O estudo mostrou que a maior parte das comparações coincidiu com os dias dos picos de concentração. E apesar de algumas discordâncias, o OCO-2 apresentou-se como um eficiente instrumento de mensuração de xCO₂ sobre o Oceano Atlântico Tropical, o que permite a colaboração com os estudos para entender cada vez mais esse aumento, e assim intensificar a busca em reverter a atual situação da atmosfera do planeta, influenciada pelos impactos antrópicos.

Palavras-chave: Satélite OCO-2. Oceano Atlântico Tropical. xCO₂. Dióxido de Carbono Atmosférico.

ABSTRACT

Since the 18th century, with the beginning of the Industrial Revolution, there has been an increase in the emission into the atmosphere of carbon dioxide, the main driver of climate change, mainly due to population growth. The comparison of atmospheric carbon dioxide (CO₂) data estimated by the Orbiting Carbon Observatory - 2 (OCO-2) with data measured by ships over the tropical Atlantic Ocean and by land stations contributes to research and decision-making on the effect of climate change through estimates of the increase in CO₂. The main goal of the study is to verify and compare the satellite estimates using data from in situ observations near the Tropical Atlantic Ocean through statistical and observational analyses. The results showed that most of the comparisons coincided with the days of peak concentrations. Although some differences in the data, the OCO-2 presented itself as an efficient tool for measuring xCO₂ over the tropical Atlantic Ocean, which allows collaboration with studies to understand better this increase and thus intensify the search to reverse the current situation of the planet's atmosphere, influenced by anthropic impacts.

Key words: OCO-2 Satellite. Tropical Atlantic Ocean. xCO₂. Atmospheric Carbon Dioxide.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Representação da perturbação do Ciclo global do carbono	19
Figura 2	– Curva de Keeling mostra as variações na concentração de dióxido de carbono (CO ₂) na atmosfera da Terra de uma estação de pesquisa no Observatório Mauna Loa, Havai	20
Figura 3	– Representação artística do Observatório de Carbono Orbital-2 (OCO-2) da NASA	23
Figura 4	– Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e ventos alísios.....	28
Figura 5	– Mapa de localização do Oceano Atlântico Tropical	29
Figura 6	– Ilustração dos navios MN Colibri (a), Can San Lorenzo (b), Monte Olivia (c), Rio Blanco (d) e o Santa Cruz (e).....	31
Figura 7	– Mapa de localização das estações e das rotas dos navios	32
Figura 8	– Ilustração dos pontos de passagens do satélite OCO-2 e das medições das estações sobre o oceano Atlântico Tropical de dezembro de 2019	34
Figura 9	– Ilustração dos pontos de medição do satélite OCO-2 e da rota França-Brasil (a) e a fração molar de dióxido de carbono atmosférico (b) medidos sobre o oceano Atlântico Tropical no dia 08 de maio de 2019....	48
Figura 10	– Ilustração dos pontos de medição do satélite OCO-2 e da rota França-Brasil (a) e a fração molar de dióxido de carbono atmosférico (b) medidos sobre o oceano Atlântico Tropical no dia 08 de maio de 2019....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Série temporal dos dados mensais da estação Farol de Mãe Luiza com o OCO-2	38
Gráfico 2	– Comparação sazonal da estação Farol de Mãe Luiza com o OCO-2	39
Gráfico 3	– Série temporal dos dados diários da estação Farol de Mãe Luiza com o OCO-2	40
Gráfico 4	– Série temporal dos dados mensais da estação Gobabeb com o OCO-2 ..	41
Gráfico 5	– Comparação sazonal da estação Goabeb com o OCO-2.....	42
Gráfico 6	– Série temporal dos dados diários da estação Gobabeb com o OCO-2 ..	43
Gráfico 7	– Série temporal dos dados mensais da estação Ilha de Ascensão com o OCO-2	44
Gráfico 8	– Série temporal dos dados mensais da estação Ilha de Ascensão com o OCO-2.....	44
Gráfico 9	– Série temporal dos dados diários da estação Ilha de Ascensão com o OCO-2.....	45
Gráfico 10	– Série temporal dos dados diários da rota França-Brasil com o OCO-2...	47
Gráfico 11	– Série temporal dos dados mensais da estação rota França - Guiana Francesa com o OCO-2	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Médias anuais de fração molar de CO ₂ da NOAA/ESRL e a Scripps Institution of Oceanography	21
Tabela 2	Estações utilizadas neste estudo.....	30
Tabela 3	Períodos utilizados para cada estação terrestre	33
Tabela 4	Dados diários utilizados para cada rota	35
Tabela 5	Tamanho das grades utilizadas para cada estação dos dados mensais	35
Tabela 6	Tamanho das grades utilizadas para cada estação e rota de navio dos dados diários	36
Tabela 7	Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados mensais da estação Farol de Mãe Luiza com o OCO-2	38
Tabela 8	Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados diários da estação Farol de Mãe Luiza com o OCO-2	40
Tabela 9	Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados mensais da estação Gobabeb com o OCO-2	41
Tabela 10	Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados diários da estação Gobabeb com o OCO-2	42
Tabela 11	Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados mensais da estação Ilha de Ascensão com o OCO-2.....	43
Tabela 12	Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados diários da estação Ilha de Ascensão com o OCO-2	45
Tabela 13	Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados diários da rota França-Brasil com o OCO-2	46
Tabela 14	Estatística básica, índices de erro com os dados diários, separado por ano da rota França- Brasil com o OCO-2	47
Tabela 15	Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados diários da rota França - Guiana Francesa com o OCO-2	48
Tabela 16	Estatística básica, índices de erro com os dados diários, separado por ano da rota França- Guiana francesa com o OCO-2	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACOS	Atmosphere CO ₂ Observations from Space
CH ₄	Metano
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CO ₂	Dióxido de carbono
ECMWF	European Center for Medium Range Weather Forecast-Interim
ENVISAT	Environmental Satellite
ESA	European Space Agency
ESRL	Earth System Research Laboratory
FFCO ₂	Emissões de combustíveis fósseis
GAW	Global Atmospheric Watch
GD	Guiné Dome
GEE	Gases de Efeito Estufa
GOSAT	Satélite de Observação de Gases de Efeito Estufa
H ₂ O	Água
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JPL	Jet Propulsion Laboratory
N ₂ O	Óxido nitroso
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
MAE	Erro Médio Absoluto
ME	Erro médio
MSNM	Metro acima do nível do mar
O ₃	Ozônio
OCO	Orbiting Carbon Observatory
OCO-2	Orbiting Carbon Observatory -2
PDT	Horário de verão do Pacífico
PgC	Pentagramas de carbono
PPM	Partes Por Milhão
RMSE	Raiz Quadrada do Erro-Médio
SCIAMACHY	Cartografia Atmosférica
	Thermal and Near Infrared Sensor for Carbon Observation- Fourier
TANSO-FTS	Transform Spectrometer

TCCON	Total Carbon Column Observing Network
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
WMO	Organização Meteorológica Mundial
WRF-Chem	Weather Chem and Forecasting-Chem
XCO ₂	Fração molar de ar seco de CO ₂
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.1.	Objetivos específicos	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	Carbono	17
3.2	Aumento da emissão de CO ₂	19
3.3	Medição de dióxido de carbono	21
3.4	Observação por sensoriamento remoto	21
3.5	Satélite Orbiting Carbon Observatory (OCO)	22
3.6	Satélite Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2)	22
3.7	Uso dos dados do satélite Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) para estimativas de dióxido de carbono (CO ₂)	24
3.8	Validação dos dados obtidos por satélites com medições “ <i>in situ</i> ”	26
3.9	Validação de xCO ₂ estimado pelo OCO-2.....	26
4	ÁREA DE ESTUDO E DADOS	27
4.1	Área de estudo.....	27
4.2	Dados	29
4.2.1	Aquisição de dados do satélite OCO-2.....	29
4.2.2	Aquisição de dados <i>in situ</i>	30
5	METODOLOGIA	35
5.1	Tratamento de dados	35
5.2	Cálculos estatísticos	36
6	RESULTADOS	37
7	DISCUSSÃO	50
8	CONCLUSÃO	53
9	REFERENCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Desde o século XVIII com o início das atividades da Revolução Industrial, vem ocorrendo alterações no balanço entre os processos físicos, químicos e biológicos do planeta Terra, como o aumento das concentrações de alguns gases na atmosfera, tal como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e outros. Essas alterações são provocadas principalmente pelo crescimento populacional que traz consigo a extração e o uso de combustíveis fósseis, a queima da biomassa, a produção de cimento, usos do solo (QUÉRÉ et al., 2018), e os processos de desmatamento florestal para a expansão urbana e para atividades madeireiras, que liberam para atmosfera o principal impulsionador das mudanças climáticas produzido pelo homem, o gás carbônico (BRASSEUR et al., 2003).

Essas alterações na composição da atmosfera vêm provocando preocupações desde o momento que foi identificado a sua associação com as mudanças climáticas impulsionadas pelas atividades antrópicas (CEOS, 2018). E desde então, tomadores de decisão mundial vem trabalhando para reverter a situação atual do planeta, como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) criada em 1994 com o objetivo de estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera. Passando a agir por meio de conferências e realização de acordos entre países para reduzir as emissões de GEEs e limitar o aumento das temperaturas médias globais (CEOS, 2018).

Sabendo do desafio e da importância do estudo do monitoramento sobre os GEEs, algumas agências espaciais iniciaram uma série de experimentos, projetados para gerar estimativas a partir do espaço das concentrações de gases como o CO_2 utilizando observações de alta resolução espectral da luz solar refletida. E entre essas agências está a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA) com o projeto da missão espacial do Observatório de Carbono Orbital 2 (OCO-2 ORBITING CARBON OBSERVATORY - 2 em Inglês), lançado em 2014 (CEOS, 2018). Esse projeto é o pioneiro da NASA em estimar a média da fração molar de ar seco de CO_2 da coluna atmosférica ($x\text{CO}_2$), com precisão, resolução e cobertura global necessária para conseguir realizar a caracterização de fluxos de fontes humanas e naturais, sumidouros (COLE et al., 2014 e 2017), e a complementação das medições *in situ* (BELL et al., 2020).

Para contribuir com as pesquisas e tomadas de decisões sobre o efeito das mudanças climáticas através de estimativas do aumento das frações molares de CO_2 , por meio da medição de $x\text{CO}_2$ na busca de reverter as suas consequências sobre o futuro do planeta, esse trabalho tem como objetivo validar as medições obtidas nas estimativas do satélite

OCO-2 das concentrações de CO₂ utilizando dados de observações *in situ* próximas do Oceano Atlântico Tropical. Onde a realização deste trabalho só foi possível devido ter estimativas feitas por navios, estações terrestres e o satélite OCO-2.

2 OBJETIVOS

A verificação das estimativas realizadas pelo satélite OCO-2 nas medições de CO₂ atmosférico, se faz importante devido ao papel deste gás no controle da temperatura do planeta, por ser um importante gás de efeito estufa.

2.1 Objetivo geral

Verificar a acurácia com que o satélite OCO-2 realiza estimativas de xCO₂ utilizando para essa finalidade dados “*in situ*”, coletados no Oceano Atlântico Tropical, por navios de oportunidades e estações terrestres.

2.2 Objetivos específicos

Comparar os dados de xCO₂ estimados pelo OCO-2 com os obtidos por medições in-situ no oceano Atlântico Tropical, por:

- a) 5 navios de oportunidades;
- b) 3 estações terrestres.

Criar um banco de dados de estimativas feitas pelo OCO-2.

Criar um banco de dados de estimativas feitas pelas estações e os navios.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Carbono

O carbono é um elemento essencial para a vida na Terra, no qual todos os seres bióticos e abióticos são compostos por ele (BOTKIN; KELLER, 1998). É o quarto elemento mais abundante do Universo e a maior parte de seu armazenamento na Terra se encontra nas rochas e o restante no oceano, atmosfera, plantas, solo e nos combustíveis fósseis. Este flui

entre reservatórios, em um processo chamado de ciclo do carbono (Figura 1), no qual qualquer alteração deste processo aumenta a sua concentração em alguns reservatórios e reduz em outros, afetando o seu equilíbrio, tendo consequências para o globo, como exemplo, o aumento da temperatura do planeta. Contudo, se o equilíbrio não for afetado, as condições ambientais se mantêm relativamente estáveis (RIEBEEK, 2011).

Por meio de uma sucessão de reações químicas e atividades tectônicas, que leva em torno de 100 a 200 milhões de anos para se mover entre as rochas, solo, oceano e a atmosfera, no chamado ciclo lento. Em média, o carbono passa por esse ciclo anualmente de forma natural de 10^{13} a 10^{14} gramas e através das emissões antrópicas com aproximadamente 10^{15} gramas. Já no ciclo rápido, o tempo do percurso é medido ao longo da vida, onde o movimento ocorre em grande parte através de formas de vida na terra ou na biosfera, passando anualmente cerca de 1.000 a 100.00 milhões de toneladas métricas (RIEBEEK, 2011).

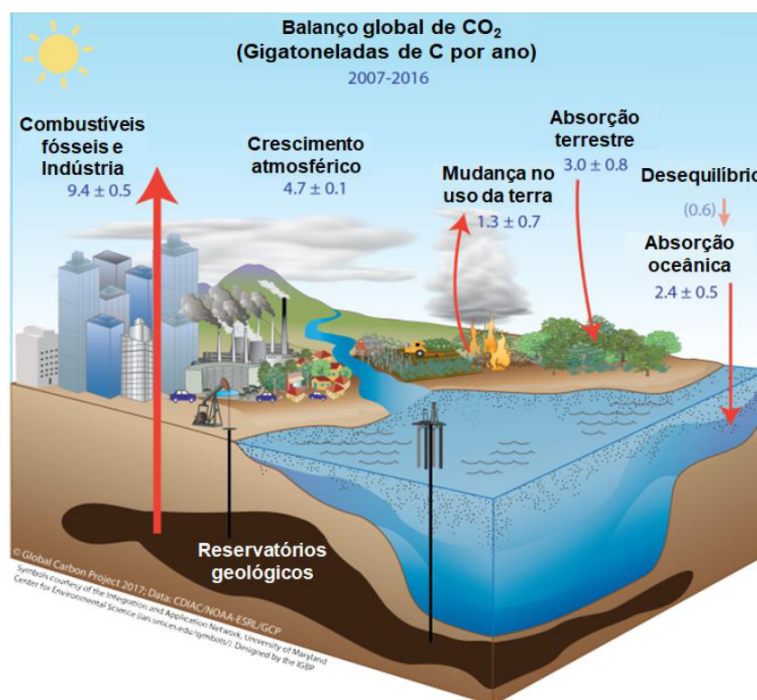
Ele possui diversas formas, como o carbono, o monóxido de carbono e dióxido de carbono, sendo este último a forma mais abundante e que desempenha um papel especial no ciclo do carbono (CRISP et al., 2014). Podem ser encontradas em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso, apresentando-se na atmosfera terrestre como CO_2 e CH_4 (BOTKIN; KELLER, 1998).

A atmosfera é a camada de ar que envolve o planeta Terra, possui um papel fundamental para a sobrevivência dos seres vivos por manter as condições ideais necessárias na superfície, protegendo-a de influências externas e ainda age como um escudo protetor contra a radiação eletromagnética advinda do espaço (MARTINS et al., 2003). Os principais gases constituintes da atmosfera são o vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) e ozônio (O_3). Além disso, existem gases produzidos pelo homem, como os halocarbonos (IPCC, 2013).

A presença do CO_2 na atmosfera é importante para o controle da temperatura do planeta fazendo com que fique em média com 15°C , devido ser um gás de efeito estufa (GEEs), junto com outros gases como o CH_4 e os halocarbonetos (OLIVEIRA et al., 2009). Esses gases absorvem uma ampla faixa de energia, incluindo a energia infravermelha (o calor) emitida pela Terra, e depois é reemitida para todas as direções; mas algumas retornam para a superfície do planeta aquecendo-a. Neste processo o CO_2 contribui com aproximadamente 20%, o vapor d'água 50%, as nuvens com 25% e o restante por partículas pequenas, aerossóis e outros gases menores (RIEBEEK, 2011).

Ainda no processo de equilíbrio do CO₂ atmosférico, existem os sumidouros, reservatórios que trabalham como absorvedores, sendo os principais: os oceanos, as plantas e os solos. Porém, ainda não se sabe como ocorrem as distribuições geográficas dessas captações e a variação da qualidade delas ao longo do tempo (COLE et al., 2014).

Figura 1 - Representação da perturbação do Ciclo global do carbono.



Fonte: adaptado de Quéré et al. (2017).

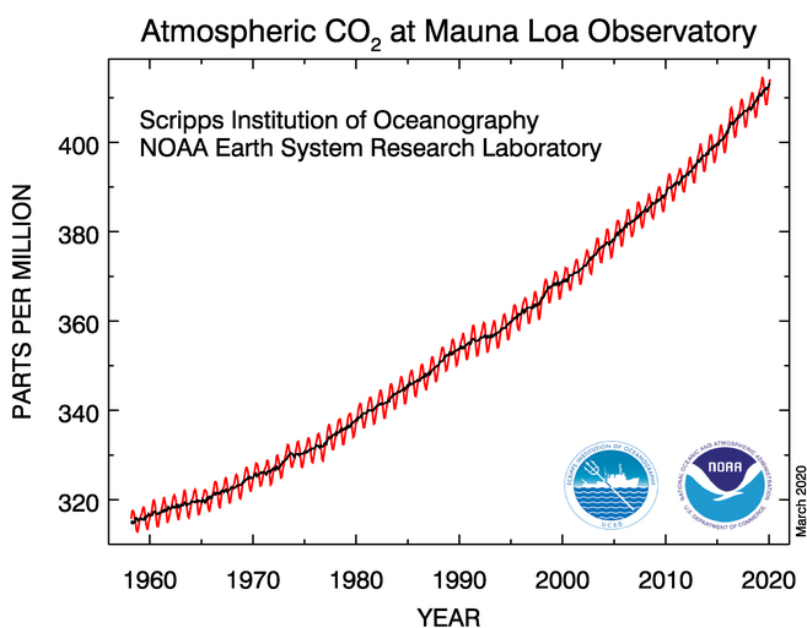
3.2 Aumento da emissão de CO₂

Anteriormente à era industrial, a concentração de CO₂ permaneceu abaixo de 280 partes por milhão (ppm) por vários milhares de anos. Havia um equilíbrio entre a liberação e a entrada realizada pelo oceano e a atmosfera. Atualmente o oceano capta mais do que libera para a atmosfera (RIEBEEK, 2011) e já absorveu cerca de um terço do CO₂ das emissões pela queima de combustíveis fósseis desde a Revolução Industrial, e mais de 90% do calor extra da Terra (ABRAM, 2019). O crescimento dos níveis de emissão CO₂ vem causando um consequente aumento da temperatura na Terra devido ao agravamento do efeito estufa (OLIVEIRA et al., 2009).

Essa mudança nas concentrações de CO₂ ao longo da vida na Terra foi comprovada com um estudo que vem sendo realizado desde 1958 no Observatório Mauna Loa, no Havaí. As medições, foram apresentadas pela Curva de Keeling, gráfico que mostra mudanças sazonais e anuais das concentrações e o acúmulo de CO₂ na atmosfera (figura 2). A curva foi elaborada por Charles David Keeling, e é considerada o registro instrumental mais antigo, e confiável nas camadas médias da troposfera (RAFFERTY, 2019).

Com a exatidão, precisão e continuidade dos estudos, Keeling forneceu ao mundo a ligação que há entre as mudanças climáticas globais à emissão do gás CO₂, o impulsionador do efeito estufa através da combustão de combustíveis fósseis.

Figura 2 - Curva de Keeling mostra as variações na concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera da Terra de uma estação de pesquisa no Observatório Mauna Loa, Havaí.



Fonte: NOAA (2020).

As concentrações estão aumentando continuamente ao longo dos anos, acelerando à medida que a parcela das emissões das atividades antrópicas se desenvolvem rapidamente (CEOS, 2018).

Tabela 1: Médias anuais de fração molar de CO₂ da NOAA/ESRL e a Scripps Institution of Oceanography.

Ano	Média de CO ₂
2014	398.65
2015	400.83
2016	404.24
2017	406.55
2018	408.52
2019	411.43

Fonte: adaptado da NOAA/ESRL e a Scripps Institution of Oceanography (2020).

3.3 Medição de dióxido de carbono

As medições no modo *in situ* são realizadas de forma direta, com proximidade ao ponto de medição que podem ser sobre a superfície do oceano ou por uma rede terrestre, ou seja, baseadas no solo (COLE et al., 2014). As realizadas no solo são precisas e sistemáticas. Existem aproximadamente 145 estações de superfície coordenadas pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) do programa Global Atmospheric Watch (GAW) (WMO, 2017). Porém, elas deixam a desejar em relação à resolução e ao alcance espacial necessário para realizar a identificação e/ou quantificação das fontes ou dos sumidouros naturais de CO₂ (Bergamaschi et al., 2018). Além disso, a rede de estações não abrange as regiões árticas e boreais no oceano (CEOS, 2018).

Assim, foi reconhecido na Declaração de Nova Délhi em 2016, com a participação de chefes de mais de 60 agências espaciais e relacionadas do mundo, o papel das medições “*ex situ*”, ou seja, baseadas no espaço. A vantagem deste modo está em poder produzir medições frequentes de alta resolução e com maior abrangência espacial, tornando-se capaz de cobrir as áreas inacessíveis geograficamente, e as politicamente, devido aos custos em relação às estações terrestres (CEOS, 2018).

3.4 Observação por sensoriamento remoto

A nova era de monitoramento de CO₂ a partir do espaço utiliza sensores acoplados aos satélites em órbita, no qual complementam as amostragens espaciais e a resolução dos dados. Obtidos a partir das transmissões de espectros de alta resolução da luz

solar refletida ou por radiação térmica emitida pela superfície e atmosfera da Terra, de modo que transmitem informações sobre a estrutura térmica e a composição da atmosfera. Esses espectros são registrados e analisados com algoritmos de recuperação de sensoriamento remoto para produzir informações sobre a distribuição de CO₂ (CEOS, 2018).

Algumas agências espaciais possuem projetos de recuperação das estimativas espaciais da concentração de CO₂, a partir de observações de alta resolução espectral da luz solar refletida. Como o espectrômetro de absorção digital de imagens por satélite da Agência Espacial Européia (ESA) (ENVISAT) para Cartografia Atmosférica (SCIAMACHY), o Satélite de Observação de Gases de Efeito Estufa (GOSAT) japonês observa o sensor térmico e infravermelho próximo para o espectrômetro de transformação de Fourier por observação de carbono (TANSO-FTS) e a missão da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA) com o Observatório de Carbono Orbitante -2 (OCO-2). Os dados desses projetos são de distribuição livre e aberta (CEOS, 2018).

3.5 Satélite Orbiting Carbon Observatory (OCO)

Motivada em entender o que as mudanças no ciclo do carbono podem provocar futuramente, a NASA, agência do Governo Federal dos Estados Unidos responsável por pesquisas e desenvolvimentos de tecnologias e programas de exploração espacial, criada em 29 de julho de 1958 (Dick, Steven J., 2009), enviou para o espaço da base Aérea de Vandenberg, Califórnia, em 24 de fevereiro de 2009 a espaçonave Orbiting Carbon Observatory (OCO). Porém, o seu envio não teve êxito, devido uma falha no veículo de lançamento no momento da ascensão em órbita. Desta forma, a equipe do projeto do Jet Propulsion Laboratory (JPL), centro de pesquisa e desenvolvimento administrado para a NASA pela Caltech, reiniciou os estudos (YUEN et al., 2014).

3.6 Satélite Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2)

No dia 2 de julho de 2014 às 2:56 a.m. PDT (horário de verão do Pacífico), a NASA lançou a sua segunda espaçonave o OCO-2 da Base Aérea de Vandenberg, na Califórnia. Esse projeto pioneiro pretendia realizar medições globais no espaço, estimar a média da coluna atmosférica de fração molar de ar seco de CO₂, XCO₂, com a precisão, resolução e cobertura global necessária para realizar a caracterização de fluxos de fontes humanas e naturais, e sumidouros em escalas regionais ≥ 1000 km mensalmente (COLE et al.,

2014 e 2017). Também é capaz de quantificar a variabilidade dos ciclos sazonais anuais, e realizar a complementação das medições *in situ* (BELL et al., 2020), resultando em uma ferramenta de estudo para entender os processos que controlam o acúmulo do gás, do presente e do futuro (CRISP et al., 2004 e PLATNICK, 2014).

Figura 3 - Representação artística do Observatório de Carbono Orbital-2 (OCO-2) da NASA.



Fonte: NASA / JPL-Caltech (2017).

Voando a uma altitude de 705 quilômetros, o OCO-2 completa uma órbita terrestre quase polar síncrona com o sol a cada 98,8 minutos. A faixa de órbita se repete a cada 16 dias sendo quase norte-sul (60°N e 60°S), cruzando o equador às 13:00 horas (Hora Local Média). Voando junto com a constelação A-Train, formada por satélites observadores da Terra há 702 Km de três agências, a NASA, no Centre National d'Études Spatiales (Centro Nacional de Estudos Espaciais - CNES) e a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA), facilitaram a calibração e validação dos dados (CRISP et al., 2014 e COLE et al., 2014).

O OCO-2 realiza aproximadamente um milhão de medições todos os dias (CRISP et al., 2014 e COLE et al., 2014), ao longo de uma faixa de 10,3 km (CEOS, 2018) em oito pegadas, sendo que uma única pegada é de 1,25 por 3 km (Eldering et al., 2017). Desse total, 100.000 são adequadas para análises de XCO₂ em coluna completa, devido não possuírem interferências das nuvens (BELL et al., 2020). O OCO-2 carrega e aponta um único instrumento, um sensor passivo (Eldering et al., 2017), com três espectrômetros de grade. E possui a resolução espacial de 1,29 km x 2,25 km e a resolução temporal de 16 dias (COLE et al., 2014).

As estimativas são realizadas por meio da medição da intensidade da luz solar refletida pela presença dos gases na coluna atmosférica captada pelo satélite, e derivadas com uma proporção entre as medições do oxigênio molecular (O_2) e o CO_2 (COLE et al., 2014). Por isso, cada espectrômetro concentra-se em uma dada faixa estreita de cores para observar os dois gases, que absorvem a luz solar refletida quando vistos no infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Assim, a banda A 0,765 μm utilizada para observar o O_2 , é necessária para as estimativas da coluna de ar seco, pressão superficial, distribuição vertical e as profundidades ópticas totais da presença de nuvens e aerossóis (CEOS, 2016). E para o CO_2 a 1,61 μm e 2,06 μm com uma resolução espectral de ~ 0.042 , ~ 0.076 e ~ 0.097 nm, respectivamente, definidos como a largura total da resposta espectral do instrumento. Mede com alta resolução espectral, por meio de 1.016 canais espectrais em cada uma das três bandas (Eldering et al., 2017). Os modos de observação usados são: nadir, brilho e o alvo, possibilitando a monitoração com precisão da distribuição geográfica das fontes e sumidouros em escala regional (CRISP et al., 2004; 2017, WU et al., 2018).

O OCO-2 possui um grande número de medições de alta resolução, o que proporciona uma distribuição espacial em âmbito global, que combinadas com dados da rede terrestre, fornecem informações necessárias para entender cada vez mais os processos que regulam o CO_2 atmosférico e o seu papel no ciclo do carbono. Dessa forma, se torna possível realizar melhores previsões futuras do aumento das concentrações e o seu impacto sobre o clima do planeta (CEOS, 2018).

Ademais, contribui para decisões políticas sobre as mudanças climáticas, e para as futuras missões de satélites de monitoramento deste gás. E ao concluir a sua missão nominal de 2 anos em órbita em outubro de 2016 iniciou a partir desta data uma missão estendida de 3 anos (CEOS, 2018).

3.7 Uso dos dados do satélite Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) para estimativas de dióxido de carbono (CO_2)

A partir das observações realizadas pelo satélite OCO-2, tornou-se possível realizar várias pesquisas importantes no ramo da ciência que utilizam as medições de CO_2 para validar diversos estudos, principalmente sobre aumento das concentrações na atmosfera. O estudo de Chatterjee, A. *et al.*, (2017) confirmou que entre os anos de 2015 e 2016 o Oceano Pacífico Tropical exerceu um papel importante em relação às respostas das concentrações de CO_2 atmosférico ao El Niño do mesmo período. Onde ao analisarem as

tendências ocorridas nas séries temporais, perceberam os momentos de redução e depois um aumento dessas concentrações sobre o Oceano Pacífico Tropical durante este intervalo de tempo. Concluiu-se então que as medições de CO₂ utilizando satélites, como o OCO-2, “permitem observar e monitorar a sequência temporal das mudanças induzidas pelo El Niño nas concentrações de CO₂” e finaliza que o “OCO-2 faz uma contribuição valiosa ao fornecer cobertura global e detalhes espaciais de superfície fina”.

Conforme Laskar et al. (2018) tratou de comparar os dados recuperados do OCO-2 com informações em nível de superfície junto às informações regionais e globais do CarbonTracker, sendo este um sistema de assimilação de dados construído pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA) e, do Laboratório de Pesquisa do Sistema Terrestre (ESRL) para realizar estimativas de trocas de CO₂ na superfície terrestre. Ambos utilizaram análises de velocidade e direção do vento do European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF)-Interim, no Pacífico Ocidental. E revelaram que tanto Taiwan como regiões circunvizinhas são afetadas pelas emissões de CO₂ oriundos da China Oriental durante o inverno, e do sudeste da Ásia durante a primavera.

Segundo os estudos de Hakkarainen, Ialongo e Tamminen (2016) sobre as emissões antrópicas de CO₂, a partir da combustão de combustíveis fósseis, no qual usaram dados de NO₂ do satélite AURA, observações diretas de CO₂ do OCO-2 e inventários de emissões, identificaram as áreas dessas emissões. Os dados dos dois gases foram combinados por meio de uma análise de cluster. O que tornou possível identificar que as principais áreas das emissões antrópicas são a Europa, os Estados Unidos e a China.

No entanto, no trabalho de Labzovskii, Jeong e Parazoo (2019) procuraram entender a adaptação do uso de sensoriamento remoto para capturar as emissões de CO₂ para monitorar as emissões de combustíveis fósseis (FFCO₂) das cidades, de setembro de 2014 a setembro de 2018 do OCO-2 para coletar anomalias urbanas das emissões de grandes cidades, combinado a gradientes urbano-rural e filtragens estatísticas. Baseado nos modelos antigos de estimativas de FFCO₂ urbano, como estatísticas de energia e dados de inventário, definiram o “OCO-2 como a principal ferramenta de observação para entender como o sensoriamento remoto moderno é adequado para capturar o aprimoramento urbano de CO₂ e monitorar as emissões de FFCO₂ das cidades”. O que tornou possível o fornecimento de um conjunto de dados adequados para aplicações em escala urbana.

Também Zheng, Nassar e Baxter (2019) testaram a viabilidade de estimar as emissões de CO₂ de usinas elétricas manuseando dados de xCO₂ do OCO-2 com simulações

do Weather Chem and Forecasting-Chem (WRF-Chem), sendo este um modelo de transporte químico de alta resolução. Nesse caso, usaram um tratamento de máxima verossimilhança para estimar as emissões das usinas diretamente dos dados do satélite sem informações anteriores.

3.8 Validação dos dados obtidos por satélites com medições “*in situ*”

A validação dos dados obtidos por observações de sensoriamento remoto em relação aos dados *in situ* assegura que as mensurações atenderam aos requisitos que foram exigidos durante o projeto para a missão ser bem sucedida. No caso do OCO-2, os requisitos pautaram em uma precisão de 0,3% (1 ppm) (Eldering et al., 2017), de segundo plano de 400 ppm em séries de acima de 100 sondagens sem nuvens (COLE et al., 2014).

Como exemplo, o trabalho do WU et al., (2018) validou o produto XCO₂ medido pelo satélite OCO-2 de setembro de 2014 a julho de 2016 baseado nos dados obtidos em terra pela Rede de Observação da Coluna de Carbono Total (TCCON). Utilizando o algoritmo RemoTeC, aplicaram as observações no modo nadir, glint e target obtidas sobre a terra e oceano, no qual foi definido tanto a abordagem de filtragem dos dados e correção de viés como uma função da posição da faixa comparando com os do TCCON. Introduziram uma correção de viés linear para observações em função da qualidade do ajuste espectral. Ao comparar o XCO₂ recuperado do OCO-2 com os dados do TCCON foi possível perceber que as observações sobre a terra variam de estação para estação, onde em altas latitudes os vieses são maiores, e que no oceano não varia. E perceberam que quando o satélite está no modo target a comparação com medições *in situ* é melhor, devido o satélite mirar diretamente para o local onde está localizado a estação no qual os dados estão sendo comparados e isso proporciona uma melhor localização e, evita alguns vieses causados por variações locais.

3.9 Validação de xCO₂ estimado pelo OCO-2

Verificar a acurácia das estimativas da média da coluna atmosférica de fração molar de ar seco de CO₂ (xCO₂) realizadas pelo OCO-2 é importante para as pesquisas e monitoramento do ciclo do carbono do planeta, devido essa medida ser utilizada para compreender os fluxos superficiais de CO₂, e por serem derivados de gradientes espaciais e temporais necessitam serem estimados com alta precisão (CEOS, 2018).

Mesmo as maiores fontes e sumidouros produzem pequenas alterações no xCO₂, como em grandes cidades ou usinas de energia, podem produzir variações de mistura atmosférica de CO₂ acima de 10% dentro da camada limite planetária (40 ppm). No entanto, essas variações decaem rapidamente com a altitude e a distância horizontal da fonte, de modo que apenas as maiores fontes produzem variações de xCO₂ superiores a 0,25% (1 ppm) na escala de uma pegada de satélite. Já para grandes escalas como absorção pelas florestas, produzem menores taxas de mistura dos gases dentro da camada limite, e interagem com os sistemas climáticos do meio, produzindo maiores (~2%) variações na distribuição de xCO₂ (CEOS, 2018).

Para a recuperação desse produto o OCO-2 utiliza o algoritmo Atmosphere CO₂ Observations from Space (em português Observações de CO₂ atmosférico do espaço - ACOS) (O&APOS et al., 2012).

O satélite mede o xCO₂ com alta precisão, resolução e cobertura global necessária para realizar a caracterização de fluxos de fontes humanas e naturais, e sumidouros mensalmente (COLE et al., 2014 e 2017, Eldering et al., 2017), mas possui vieses que a equipe OCO-2 tentou caracterizar e remover (WUNCH et al., 2017). Para validar as medições, usamos os dados de estações terrestres, com o método descrito a seguir.

4 ÁREA DE ESTUDO E DADOS

4.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende o Oceano Atlântico mais especificamente na região Tropical (30°N-30°S). Localizada entre os Trópicos de Capricórnio e Câncer. Nesta região ocorrem intensas atividades atmosféricas, como a de convecção, no qual é influenciada pelas mudanças da temperatura da superfície do mar. Próximo a linha do equador é uma região de baixa pressão, onde ocorre a convergência dos ventos alísios advindo dos hemisférios norte e sul (CARVALHO, 2011), que impulsionam o ar quente e o úmido da superfície do oceano a subir para os níveis mais elevados da atmosfera, influenciando no processo de formação de nuvens, e assim passa a contribuir com a precipitação na própria região onde ocorre a convecção (FERREIRA; MELLO, 2005). No nordeste e sudeste do oceano o sistema desses ventos é separado pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Os movimentos desta zona permanecem sobre as águas de superfície mais quentes (SOARES et al., 2009). Geralmente migra sazonalmente de agosto a outubro de sua posição mais ao norte a 14° N,

para posições mais ao sul de fevereiro a abril (FERREIRA; MELLO, 2005) quando ocorrem as chuvas no NE do Brasil estando em média a 5°S, podendo alcançar 10°S (CHANG et al., 2000).

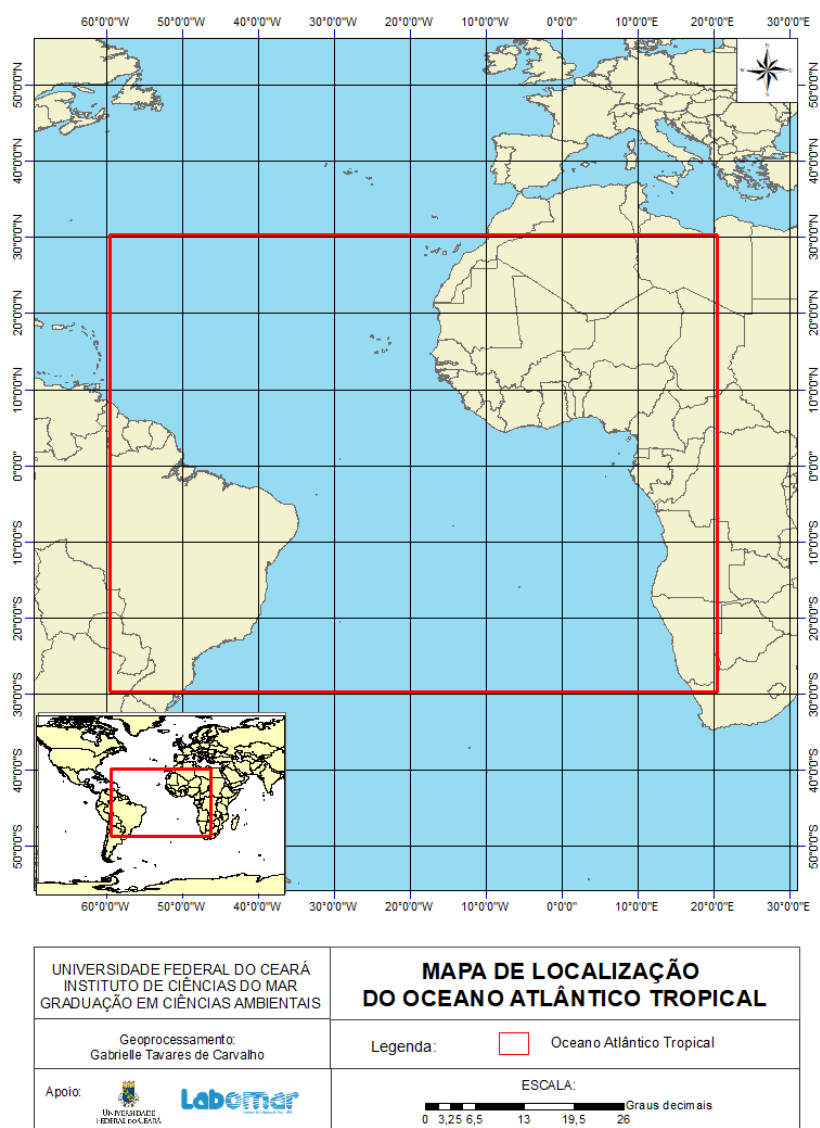
Figura 4 - Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e ventos alísios.



Fonte: PENA (2008).

Essa área é caracterizada como uma fonte de CO₂ para a atmosfera devido à ressurgência equatorial que ocorre, trazendo do fundo do oceano águas ricas em CO₂ para a superfície. E depois são transportadas para oeste pela Corrente Equatorial Sul (SEC) (LEFÉVRE, et al., 2010).

Figura 5 - Mapa de localização do Oceano Atlântico Tropical.



Fonte: elaborado pela autora (2020).

4.2 Dados

4.2.1 Aquisição de dados do satélite OCO-2

A aquisição dos dados foi realizada da produção do projeto OCO-2 no Laboratório de Propulsão a Jato, California Institute of Technology, e obtidos do arquivo de dados OCO-2 mantido na NASA Goddard Earth Science Information and Information Center, da versão 10 de Nível 2 com correção de polarização de XCO₂ e outros campos selecionados

de recuperação de física completa agregada em arquivos diários, com processamento retrospectivo (OCO-2, 2020). Foram utilizados dados dos três modos de visualização: o nadir, glint e target, obtidas sobre a superfície terrestre e oceânica. Do período entre novembro de 2014 a 31 de dezembro de 2019 sobre a área de estudo.

4.2.2 Aquisição de dados *in-situ*

Os dados *in-situ* utilizados para validação das estimativas do OCO-2 foram adquiridos das amostras do ObsPack CO2 GLOBALVIEWplus v6.0 do programa Carbon Cycle Greenhouse Gases (CCGG) no Earth Systems Research Lab (ESRL) em Boulder, Colorado, no qual fazem amostragem de ar em mais de 100 locais espalhados pelo mundo (Schuldt et al., 2020). Para as amostras são utilizados frascos de vidro, onde são preenchidos com ar ambiente para o monitoramento dos gases de efeito estufa da atmosfera (Schuldt et al., 2020).

Para esse trabalho foram utilizadas três estações terrestres que se encontram próximas ao oceano Atlântico Tropical entre 30°N e 30°S. Onde foram realizadas comparações com dados diários e mensais, do período entre novembro de 2014 até dezembro de 2019.

Tabela 2 - Estações utilizadas neste estudo.

Estação	Localização	Parâmetro	Elevação
Farol Mãe Luiza	5,79°S - 35,18°O (Natal - Brasil)	xCO2 (fração molar de CO2 em ar seco)	50 msnm
Gobabeb	23,58°S -15,03°L (Namíbia - África)	xCO2 (fração molar de CO2 em ar seco)	456 msnm
Ilha de Ascensão	7,96°S - 14,4°O (oceano Atlântico Sul - Reino Unido)	xCO2 (fração molar de CO2 em ar seco)	85 msnm

Fonte: adaptado do Schuldt et al. (2020).

E também foram utilizados dados adquiridos de cinco navios mercantes que realizaram as medições durante as viagens, onde foram separados por rotas. Tendo a rota da França a Guiana Francesa com o navio MN Colibri e a rota da França ao Brasil com os navios Monte Olivia, Rio Blanco, Santa Cruz e o Cap San Lorenzo do período de novembro de 2014 a dezembro de 2019.

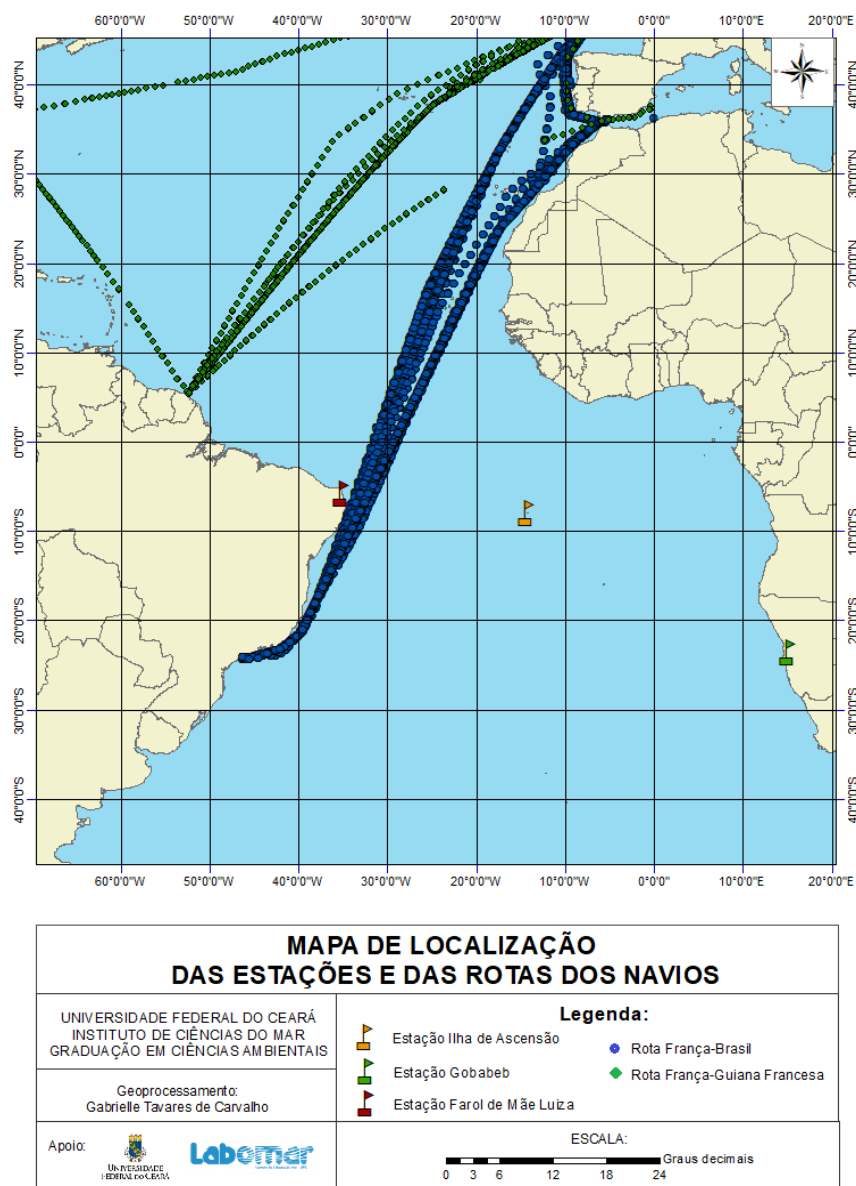
Figura 6 - Ilustração dos navios MN Colibri (a), Can San Lorenzo (b), Monte Olivia (c), Rio Blanco (d) e o Santa Cruz (e).



Fonte: VesselFinder (2020 e 2019).

Tanto as estações terrestres como os navios possuem as suas coletas georreferenciadas, o que facilita na execução dos objetivos propostos para este trabalho.

Figura 7 - Mapa de localização das estações e das rotas dos navios utilizados.



Fonte: elaborado pela autora (2020).

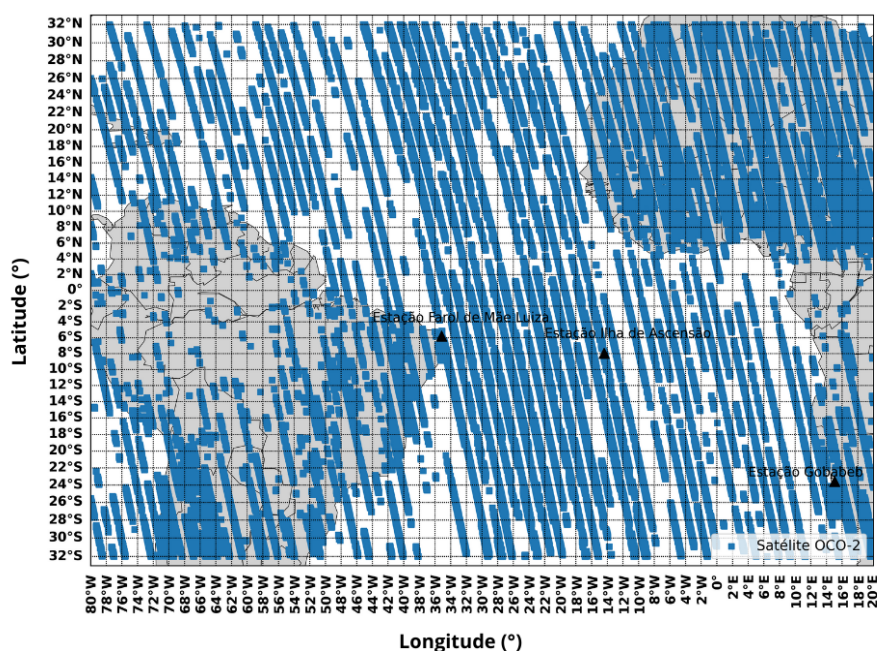
Na aquisição dos dados mensais das estações descobriu-se que havia ausência de medições em alguns meses, sendo a do Farol de Mãe Luiza a que possui a maior quantidade de meses com ausência de coletas. E no OCO-2 falta somente o mês de agosto de 2017, pois estava sob calibração em órbita nesse período (LABZOVSKII; JEONG; PARAZOO, 2019).

Tabela 3 - Períodos utilizados para cada estação terrestre.

Estação	Período mensal	Período diário
Farol de Mãe Luiza	nov. - dez. de 2014	
	jan., fev., jul., dez. de 2015	
	mar., maio, jul., agost., set., out., nov. de 2016	29/07/2015; 09/03/2016; 25/01/2017; 24/08/2018;
	jan., fev., mar., out., nov., dez. de 2017	15/01/2019; 14/05/2019; 30/05/2019
	jan., jun., set., out., nov., dez. de 2018	
Gobabeb	jan., mar., abril, jul., agost., set., out., nov., dez. de 2019	
	nov. - dez. de 2014	
	jan., fev., mar., abril, agost., set., out., nov., dez. de 2015	
	jan., mar., maio., jun., jul., agost., set., out., nov., dez. de 2016	02/01/2015; 16/01/2015; 14/08/2015; 01/09/2016; 05/01/2017; 13/04/2017; 23/11/2017; 14/02/2019; 26/09/2019
	jan., mar., abril, maio, jul., set., out., nov., dez. de 2017	
Ilha de Ascensão	jan., fev., mar., maio, agost., set., out., nov., dez. de 2018	
	jan., mar., abril., maio, agost., set., nov., dez. de 2019	
	dez. de 2014	
	fev., abril., agost., set., out., nov., dez. de 2015	08/02/2015; 15/04/2015; 06/09/2015; 25/11/2015; 27/12/2015;
	jan., fev., mar., maio, agost, set., out., dez. de 2016	16/03/2016; 17/04/2016; 15/02/2017; 19/03/2017; 29/10/2017; 29/08/2018; 19/12/2018; 20/01/2019; 10/04/2019;12/05/2019; 20/11/2019; 22/12/2019
fev., mar., abril., out., nov. de 2017		
jan., fev., mar., abril, maio, agost., set., out., nov., dez. de 2018		
jan., fev., abril, maio, agost., nov., dez. de 2019		

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Figura 8 - Ilustração dos pontos de passagens do satélite OCO-2 e das medições das estações sobre o oceano Atlântico Tropical em dezembro de 2019.



Fonte: elaborado pela autora (2021).

No processo de localização dos dias em que as passagens do satélite estiveram próximas aos pontos das coletas *in situ*, a quantidade de dados possíveis de serem trabalhados reduziram. Devido às estações não realizarem medições diariamente, a média mensal da quantidade realizada para o Farol de Mãe Luiza, Gobabeb e a Ilha de Ascensão é de 3, 4 e 7 dias respectivamente.

E para os navios a dificuldade é maior pois realizam as coletas em movimento, sendo necessário localizar os dias em que o satélite e o navio passaram sobre uma mesma localização. O satélite tem uma resolução temporal de 16 dias, ou seja, ele tem um intervalo de 16 dias para passar sobre uma mesma localização, e além disso, em alguns dias ele passa por calibração ou tem alguns imprevistos nas medições como os que estão relatados no documento Problemas de Dados conhecidos OCO, disponível no site GES DISC da NASA (acesso em: <https://disc.gsfc.nasa.gov/>) sobre alguns dos motivos das ausências de dados diários do OCO-2.

Tabela 4 - Dados diários utilizados para cada rota de navio.

Rota	Período
França - Guiana Francesa	16/03/2015; 13/11/2015; 29/08/2016; 24/10/2016; 03/09/2019
França - Brasil	05/03/2015; 09/03/2015; 08/04/2015; 14/01/2016; 19/09/2016; 12/10/2016; 08/03/2017; 30/03/2017; 27/04/2017; 20/07/2017; 08/05/2019

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Ao encontrar as coordenadas dos pontos mais próximos de medições entre o satélite e as coletas *in situ* e ter realizado a média dos dados do OCO-2 por pixel, foi possível realizar os cálculos estatísticos.

5 METODOLOGIA

5.1 Tratamento de dados

Os dados extraídos utilizando a ferramenta Python, foram apenas das informações necessárias para a validação, como as coordenadas (latitude e longitude), os dados recuperados da média da coluna atmosférica de fração molar de ar seco de CO₂ (xCO₂) do satélite OCO-2 e a fração molar de CO₂ em ar seco da atmosfera (xCO₂) das estações terrestres e dos navios, obtidos de cada ponto de medição.

Em seguida, foi realizada uma média mensal dos dados diários do satélite, por pixels de 0,03° x 0,03°, para analisar com as médias mensais das estações terrestres. Logo depois tratou-se de gerar uma média dos pontos de medições do satélite que foram encontrando em células de grade específica para cada estação, tendo também como ponto central a localização da própria medição *in situ*.

Tabela 5 - Tamanho das grades utilizadas para cada estação dos dados mensais.

Estação	Grade
Farol de Mãe Luiza	0.55° x 0.55°
Gobabeb	0.45° x 0.45°
Ilha de Ascensão	0.5° x 0.5°

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Posteriormente, para as análises diárias foram extraídos somente os dias que se encontravam com distância máxima de 0.65° entre as passagens do satélite das medições *in situ*, separados por dias e armazenados. Logo depois tratou-se de gerar uma média dos pontos de medições do satélite que foram encontrando em células de grade específica para cada estação e rota de navio, tendo como ponto central a localização da medição *in situ*.

Tabela 6 - Tamanho das grades utilizadas para cada estação e rota de navio dos dados diários.

Estação	Grade	Rota	Grade
Farol de Mãe Luiza	$0.65^\circ \times 0.65^\circ$	Guiana - Francesa	$0.3^\circ \times 0.3^\circ$
Gobabeb	$0.497^\circ \times 0.497^\circ$	França - Brasil	$0.24^\circ \times 0.24^\circ$
Ilha de Ascensão	$0.43^\circ \times 0.43^\circ$		

Fonte: elaborado pela autora (2020).

Além da separação por dados diários e mensais, também foi realizada uma agregação dos dados por média sazonal para posterior comparação. No qual o período das estações do ano foram definidos por meses, sendo o verão representado pelos meses de janeiro a março, o outono de abril a junho, o inverno de julho a setembro, e a primavera de outubro a dezembro.

5.2 Cálculos estatísticos

Logo após a obtenção das médias por pixel, passou a ser possível a execução dos cálculos estatísticos, com os índices de erros. Onde, iniciou com cálculo do erro, que é a diferença (e_t) entre o valor de xCO_2 observado (Z_{te}), que no caso foram das rotas dos navios e das estações, no ponto t do espaço bidimensional e o previsto (Z_{to}), sendo este último o satélite, no mesmo ponto no espaço e no tempo (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011), expressado por :

$$e_t = Z_{te} - Z_{to} \quad (1)$$

E após a diferença foi calculado o Erro Médio (EM) (EM em Inglês), que mede a tendência da superestimação ou subestimação em relação ao observado, tendo n como o número de dados (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011), definido como:

$$EM = \frac{\sum_{t=1}^n e_t}{n} \quad (2)$$

Em seguida, com o Erro Absoluto Médio (EAM) (MAE em Inglês), que mede a diferença média dos valores esperados em relação aos valores observados, elaborado no EM. Tendo o zero como valor ideal. Desse modo, o erro médio tende a ser baixo devido a compensação dos erros negativos com os positivos (MENTZER E BIENSTOCK, 1998), definido como:

$$EAM = \frac{\sum_{t=1}^n |e_t|}{n} \quad (3)$$

Posteriormente, foi calculada a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE em Inglês), sendo este uma medida da média da diferença entre os valores previstos e os observados ao quadrado, seus valores são sempre positivos e a qualidade dos valores medidos se baseiam em quanto mais próximo de zero os valores se encontrarem (SANTOS et al., 2014), definido como :

$$RMSE = \left[\sum_{t=1}^n (e_t)^2 / n \right]^{1/2} \quad (4)$$

Seguidamente, tratou-se a validação de forma separada por pares, constituídos pelo satélite e cada uma das rotas e estações, por meio de estatísticas básicas de mínima, máxima, média e desvio padrão (σ) e correlação através de regressão linear (R).

6 RESULTADOS

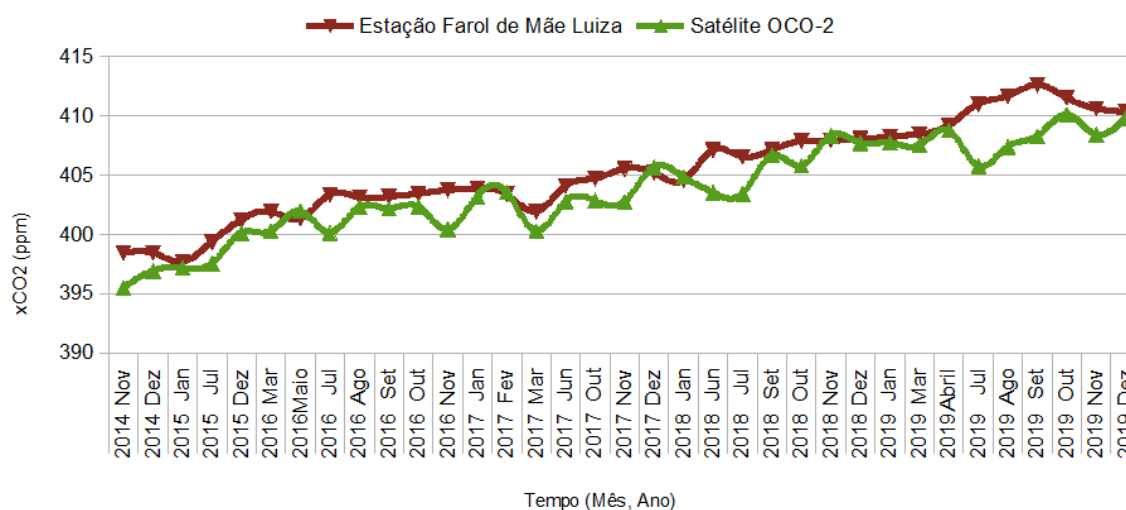
Na comparação entre os dados mensais do OCO-2 com a estação farol de Mãe Luiza, o satélite apresentou um aumento de xCO₂ sobre a estação ao longo do período estudado de 14,32 ppm, e para o farol foi de 11,90 ppm. O mês com menor fração molar observado pelo OCO-2 foi em novembro de 2014 com 395,47 ppm, já para o Farol foi em janeiro de 2015 com 397,69 ppm. E em relação ao da máxima, o OCO-2 teve outubro de 2019 com 410,08 ppm e na estação, setembro de 2019 com 412,58 ppm. A média entre os dois teve 1,55 ppm de diferença. E o desvio padrão do satélite foi de 4,02 e a estação de 3,89. O ME com 1,55 ppm, representando a média dos erros entre a estação e o OCO-2, e a precisão do MAE foi de 1,67 ppm, e o RMSE com 2,16 ppm, entre os 35 dados analisados.

Tabela 7 - Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados mensais da estação Farol de Mãe Luiza com o OCO-2.

Estatística	Farol de Mãe Luiza	OCO-2	ME	MAE	RMSE	R
Mínimo	397,69	395,47				
Máximo	412,58	410,08				
Média	405,32	403,77	1,55	1,67	2,16	0,93
σ	4,02	3,89				
Nº	35	35				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

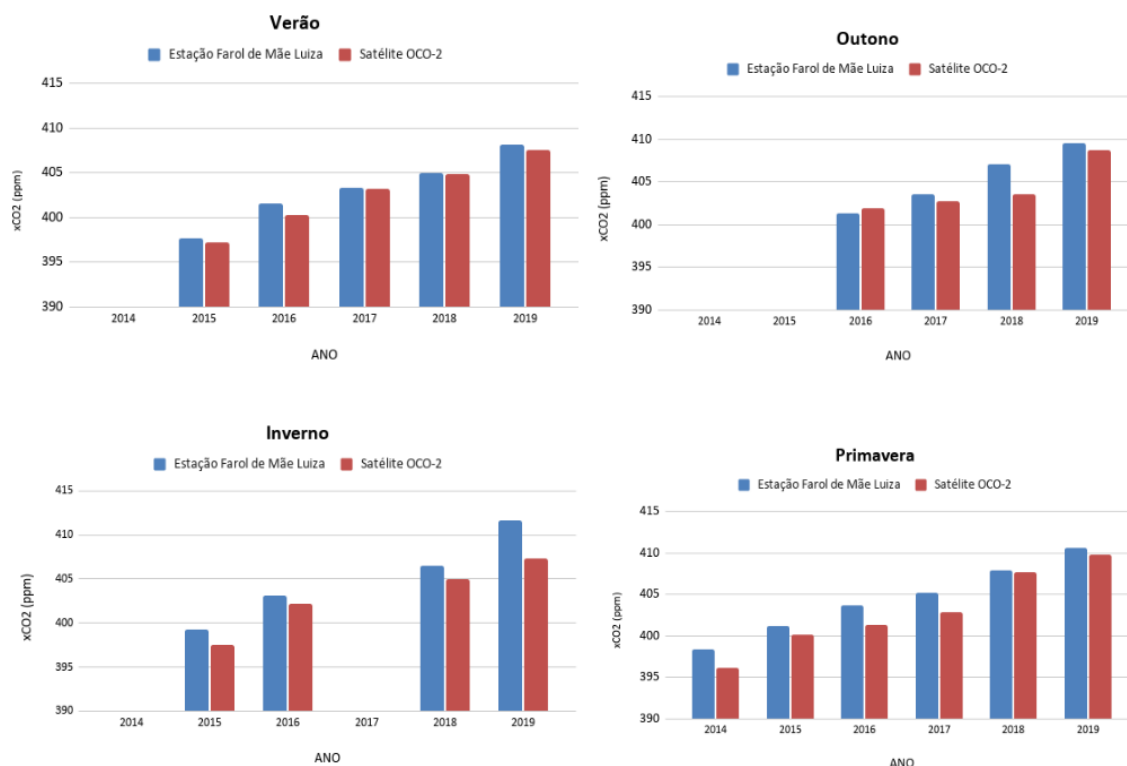
Gráfico 1 - Série temporal dos dados mensais da estação Farol de Mãe Luiza com o OCO-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na comparação sazonal é possível notar que, independente das estações do ano, ocorreu um aumento de xCO₂. Tanto o satélite como o farol apresentaram o outono como sendo a estação onde houveram o menor aumento de CO₂, sendo de 6,79 e 8,24 respectivamente, de 2016 a 2019. E como sendo de maior destaque, a primavera teve para o satélite um acréscimo de 13,59 ppm, de 2014 a 2019. Já o farol foi o inverno com 12,31 ppm na análise de 2015 a 2019, mesmo sem a observação de 2017.

Gráfico 2 - Comparação sazonal da estação Farol de Mãe Luiza com o OCO-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na comparação com os dados diários, os dias de mínima coincidiram no dia 29 de julho de 2015, mas com uma diferença de 5,18 ppm entre o OCO-2 com 394,75 ppm e a estação com 399,93 ppm. E para a máxima os dias também foram os mesmos, sendo no dia 14 de maio de 2019, tendo uma diferença de 7,97 ppm entre os dois. A média teve uma diferença de 3,49 ppm entre eles. E o desvio padrão do satélite foi de 4,72 e a estação de 5,23. Os erros obtiveram valores maiores, sendo o ME com 3,49, a precisão do MAE foi de 3,49% e o RMSE com 4,55, entre os 7 dados analisados.

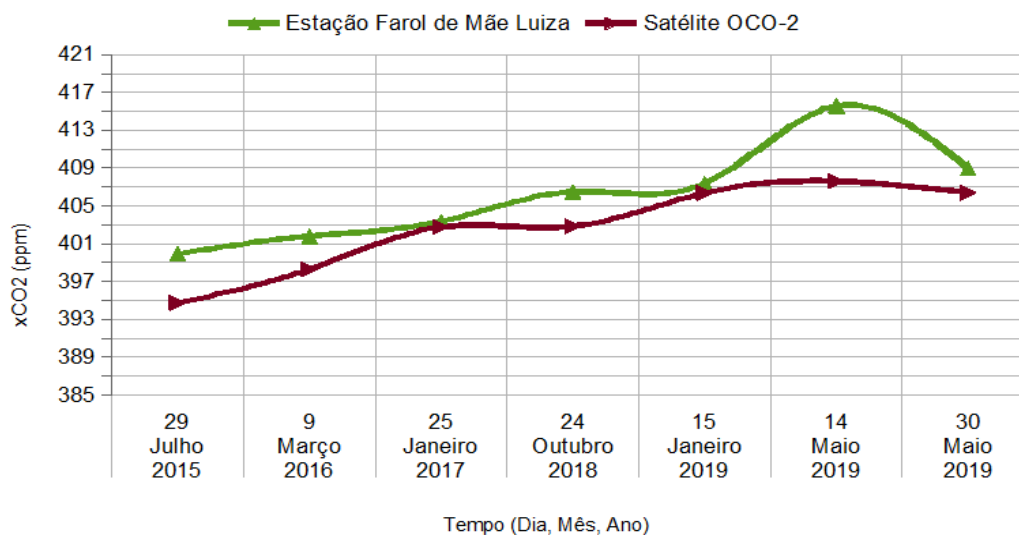
Infer-se que os resultados mensais e diários diferentes nas concentrações das estações Farol de Mãe Luiza e OCO-2 apresentados pelos erros podem estar sendo influenciados por contaminação de ar das atividades antrópicas nas coletas da estação, pela sua localização na área urbana na cidade de Natal, como foi observado no trabalho de Borges (2018).

Tabela 8 - Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados diários da estação Farol de Mãe Luiza com o OCO-2.

Estatística	Farol de Mãe Luiza	OCO-2	ME	MAE	RMSE	R
Mínimo	399,93	394,75				
Máximo	415,59	407,62				
Média	406,21	402,72	3,49	3,49	4,55	0,88
σ	5,23z	4,72				
Nº	7	7				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 3 - Série temporal dos dados diários da estação Farol de Mãe Luiza com o OCO-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na comparação mensal dos dados do OCO-2 com os da estação Gobabeb, os dois mostram que o aumento de xCO₂ sobre essa área ao longo do período estudado foi de cerca de 12 ppm. O mês com concentração mínima observado pelo OCO-2 foi março de 2015 com 394,66 ppm, já a estação apresentou sendo em fevereiro de 2015 com 396,39 ppm. E em relação a máxima, o OCO-2 registrou em novembro de 2019 410,14 ppm e na estação, setembro de 2019 com 410,91 ppm. A média entre os dois teve 0,57 ppm de diferença. E o desvio padrão do satélite foi de 3,98 e a estação de 4,19. O ME com 0,57 ppm, representando a média dos erros entre os dois, e a precisão do MAE foi de 1,04 ppm, e o RMSE com 1,27 ppm, entre os 47 dados analisados. Apesar dos períodos de máxima e mínima terem sido

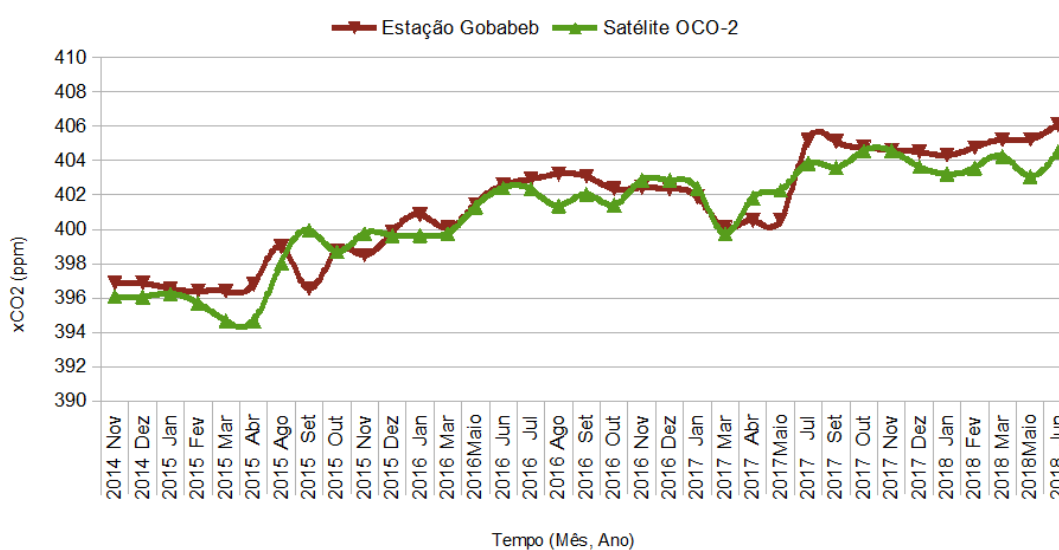
diferentes os erros na precisão da análise se apresentaram como sendo baixos, e isso é possível observar no gráfico abaixo (Gráfico 15) da fração molar de dióxido de carbono atmosférico medidos.

Tabela 9 - Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados mensais da estação Gobabeb com o OCO-2.

Estatística	Gobabeb	OCO-2	ME	MAE	RMSE	R
Mínimo	396,39	394,66				
Máximo	410,91	410,14				
Média	403,14	402,57	0,57	1,04	1,27	0,96
σ	4,19	3,98				
N	47	47				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

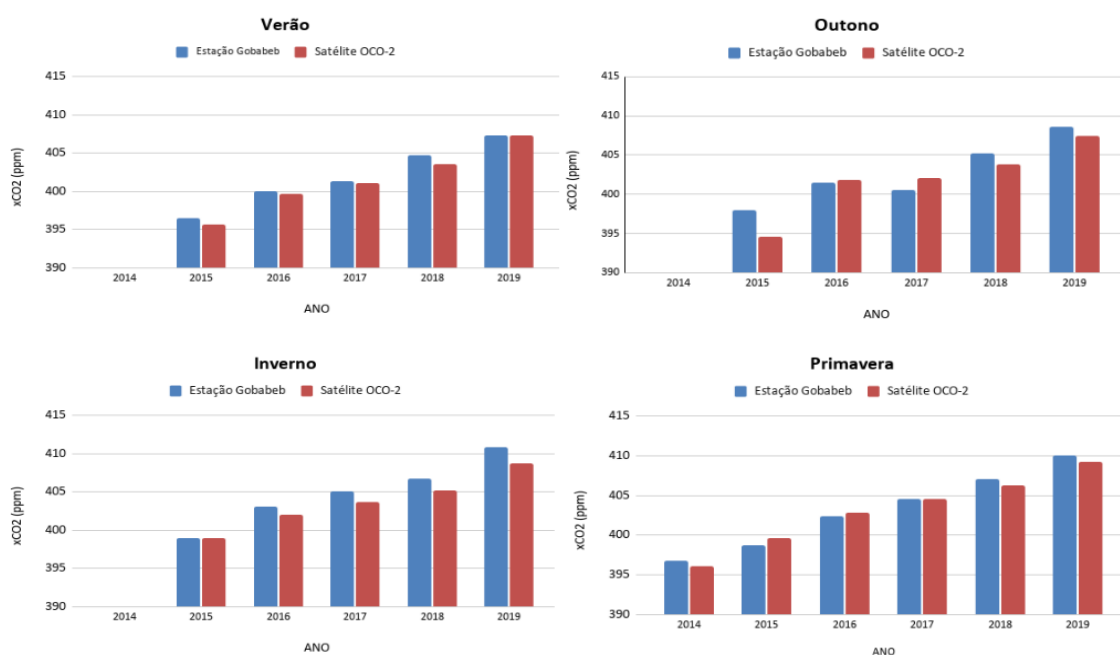
Gráfico 4 - Série temporal dos dados mensais da estação Gobabeb com o OCO-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na comparação sazonal observa-se que, independente das estações do ano, ocorreu um aumento de $x\text{CO}_2$. Gobabeb apresentou o outono como sendo a estação onde houve o menor aumento de CO_2 , com 10,57, e o satélite sendo no inverno com um aumento de 10 ppm, de 2015 a 2019. E a estação de maior concentração foi a mesma para os dois, sendo a primavera com o valor de 13 ppm observado de 2014 a 2019.

Gráfico 5 - Comparação sazonal da estação Goabeb com o OCO-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

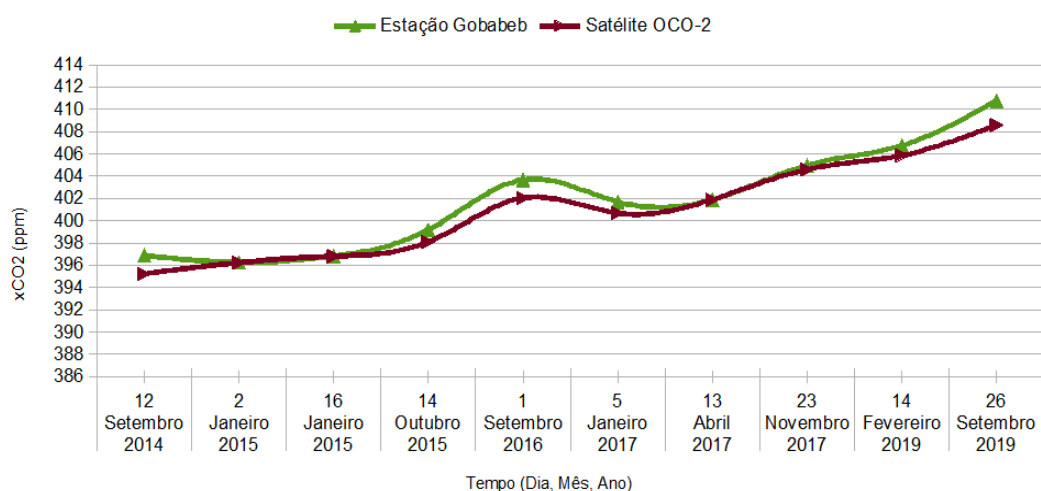
Na comparação com os dados diários, os dias de mínima foram os mesmos para os dois, sendo o dia 2 de janeiro de 2015 com uma diferença de apenas 0,04 ppm. Também concordaram na máxima, onde os dois apresentaram o dia 26 de setembro de 2019, tendo uma diferença de 2,2 ppm entre os dois. E a diferença na média foi de 0,89 ppm. O desvio padrão do satélite foi de 4,77 e a estação de 4,45. Os erros obtiveram valores menores que os mensais, sendo o ME com 0,72 ppm, a precisão do MAE foi de 0,72 ppm e o RMSE com 1,08 ppm, entre os 10 dias estudados.

Tabela 10 - Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados diários da estação Gobabeb com o OCO-2.

Estatística	Gobabeb	OCO-2	ME	MAE	RMSE	R
Mínimo	396,26	396,22				
Máximo	410,78	408,58				
Média	401,88	400,99	0,72	0,72	1,08	0,99
σ	4,77	4,45				
N°	10	10				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 6 - Série temporal dos dados diários da estação Gobabeb com o OCO-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

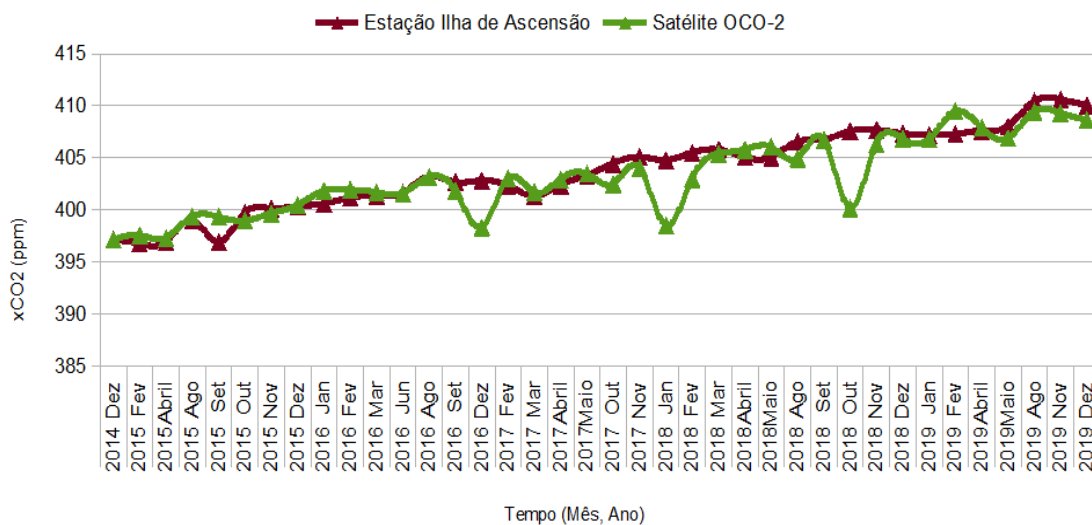
Na comparação dos dados mensais do OCO-2 com a estação da Ilha de Ascensão, eles mostraram que o aumento de xCO_2 sobre essa área foi de 11 e 12 ppm, respectivamente. O mês com concentração mínima observado pelo OCO-2 foi em outubro de 2016 com 390,43 ppm, sendo que na estação foi fevereiro de 2015 com 396,78 ppm. Em relação a máxima, o OCO-2 teve em fevereiro de 2019 com 409,47 ppm, e na estação em novembro de 2019 com 410,63 ppm. A diferença da média entre os dois foi de 0,91 ppm. O desvio padrão do satélite foi de 4,13 e a estação de 3,18. O ME com 0,90 ppm, a precisão do MAE foi de 1,53 ppm, e o RMSE com 2,86 ppm, entre os 39 dados analisados. Essa comparação apresentou-se diferenciada das demais, além dos picos de mínima e máxima terem sido em meses mais distantes que as outras, o OCO-2 obteve três picos de baixas concentrações de xCO_2 sobre a Ilha, na qual não foram observadas pelas coletas *in situ*, é ilustrado no gráfico a seguir.

Tabela 11 - Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados mensais da estação Ilha de Ascensão com o OCO-2.

Estatística	Ilha de Ascensão	OCO-2	ME	MAE	RMSE	R
Mínimo	396,78	390,43				
Máximo	410,63	409,47				
Média	403,74	402,83	0,90	1,53	2,86	0,87
σ	3,81	4,13				
Nº	39	39				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

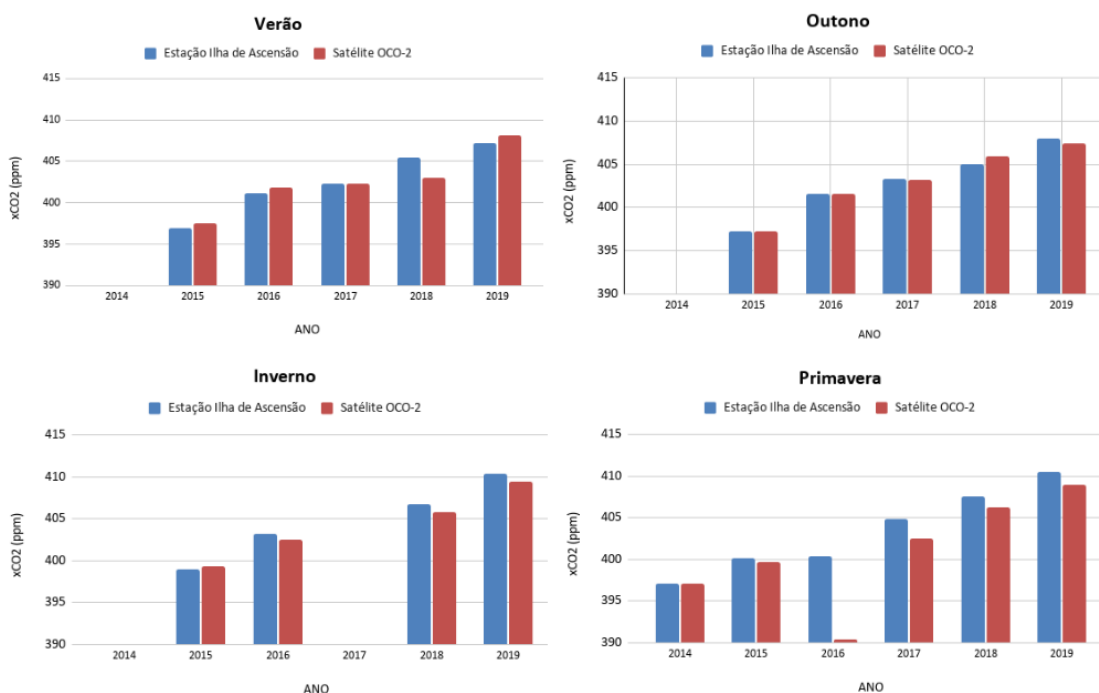
Gráfico 7 - Série temporal dos dados mensais da estação Ilha de Ascensão com o OCO-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na análise sazonal, a Ilha tem o verão como sendo a estação onde houve o menor aumento de CO₂, sendo de 10,35 ppm, já pelo satélite, foi o outono com um aumento de 10,10 ppm, de 2015 a 2019. A primavera foi a de maior concentração para os dois, mas com aumentos diferentes de 13,41 ppm para a ilha e 11,84 ppm para o OCO-2, observado de 2014 a 2019.

Gráfico 8 - Série temporal dos dados mensais da estação Ilha de Ascensão com o OCO-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

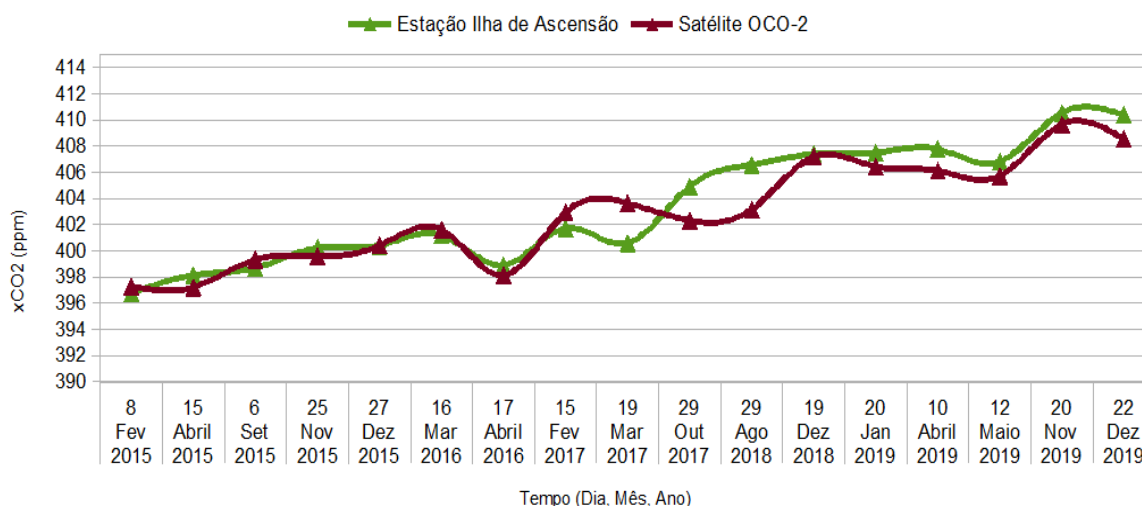
Na diária, o dia 02 de fevereiro de 2015 foi o de menor valor de xCO₂ para a Ilha com 396,75 ppm, e para o satélite foi o dia 15 de abril de 2015 com 397,21 ppm. O pico de concentração foi semelhante para os dois, sendo no dia 20 de novembro de 2019, tendo uma diferença de 0,87 ppm. E a diferença na média foi de 0,54 ppm. O desvio padrão do satélite foi de 3,92 e a estação de 4,50. Os erros obtiveram valores menores que o mensal, sendo o ME com -0,54 ppm, a precisão do MAE foi de 1,23 ppm e o RMSE com 1,60 ppm, entre os 17 dias trabalhados, que podem ser observados na tabela e no gráfico abaixo.

Tabela 12 - Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados diários da estação Ilha de Ascensão com o OCO-2.

Estatística	Ilha de Ascensão	OCO-2	ME	MAE	RMSE	R
Mínimo	396,75	397,21				
Máximo	410,52	409,65				
Média	403,44	402,90	-0,54	1,23	1,60	0,95
σ	4,50	3,92				
Nº	17	17				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 9 - Série temporal dos dados diários da estação Ilha de Ascensão com o OCO-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A rota França-Brasil e o OCO-2 mostraram que o aumento de xCO₂ sobre a área dessa rota foi de 15,14 e 16,39 ppm nessa ordem. Tanto no dia do pico de máxima e no vale

da mínima os dois obtiveram respostas semelhantes, sendo 8 de maio de 2019 com uma desigualdade de 1,06 ppm e no dia 9 de março de 2015 com uma diferença de 0,24 ppm respectivamente. Tendo média variando em 1,2 ppm, e o desvio padrão do satélite foi de 4,24 e a rota de 4,67. O ME com 1,16 ppm, a precisão do MAE foi de 2,30 ppm, e o RMSE com 2,82 ppm, entre os 58 dados estudados.

Tabela 13 - Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados diários da rota França-Brasil com o OCO-2.

Estatística	Rota França-Brasil	OCO-2	ME	MAE	RMSE	R
Mínimo	397,80	397,56				
Máximo	413,94	415				
Média	402,52	401,32	1,16	2,30	2,82	0,86
σ	4,24	4,67				
Nº	58	58				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na comparação anual não foi possível utilizar os dados de 2014 e 2018, devido a ausência de dias que os pontos de medição dos navios não se encontravam próximos à passagem do satélite.

Em 2015 os dias de máxima e mínima foram similares para os dois, correspondendo a 8 de maio com a diferença de 1,06 ppm, e a 9 de março de 2015 com 0,24 ppm nesta ordem, e a média com uma variação de 2,51 ppm. O desvio padrão do satélite foi de 0,50 e a rota de 1,67. O ME e o MAE foram de 2,50 ppm, e o RMSE com 2,99 ppm, entre os 24 dados estudados.

Porém, em 2016 os resultados foram desiguais, a mínima para a rota foi no dia 19 de setembro com 399,82 ppm, já para o satélite foi no dia 14 de janeiro com 399,55 ppm, sendo que a estação apontou este dia como o da máxima com 403,96 ppm, e o satélite apresentou o dia 12 de outubro com 401,36 ppm como a máxima do ano. O desvio padrão do satélite foi de 0,90 e a rota de 1,62. O ME com 0,49 ppm, o MAE foi de 1,85 ppm, e o RMSE com 2,40 ppm, de acordo com os 14 dados utilizados.

No ano de 2017, o dia 27 de abril coincidiu com o dia do pico com uma desigualdade de 1,45 ppm, porém a mínima para a rota foi em 30 de março com 398,77 ppm e em 20 de julho com 399,68 ppm para o satélite. O desvio padrão do satélite foi de 3,18 e a

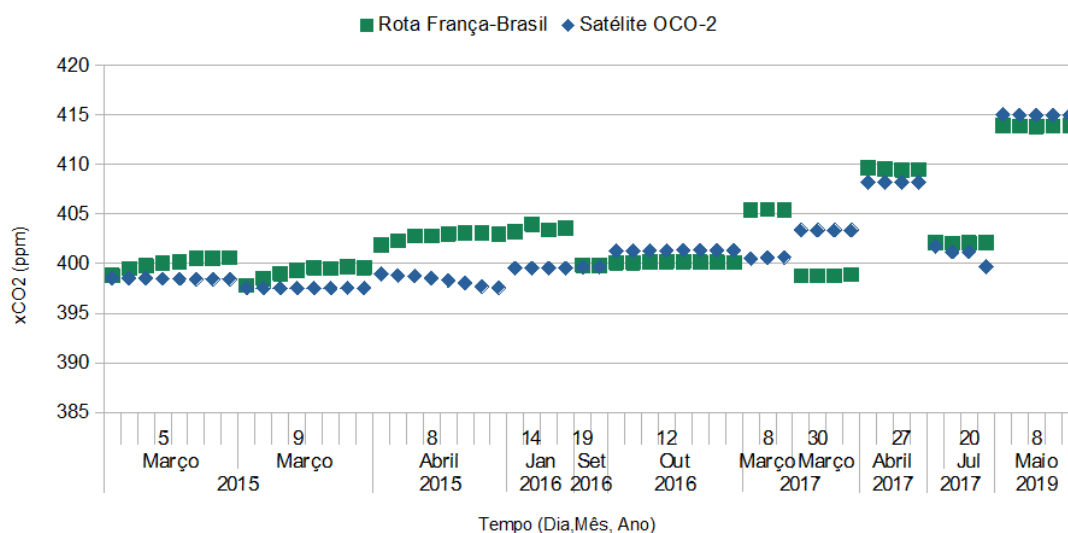
rota de 4,23. O ME foi de 0,40 ppm, o MAE com 2,85 ppm, e o RMSE com 3,47 ppm, entre os 15 dados.

Tabela 14 - Estatística básica, índices de erro com os dados diários, separado por ano da rota França- Brasil com o OCO-2.

Ano	Nº	Rota França -Brasil				OCO-2				ME	MAE	RMSE
		Mínima	Máxima	Média	σ	Mínima	Máxima	Média	σ			
2015	24	397,8	403,10	400,63	1,67	397,55	398,98	398,12	0,50	2,50	2,50	2,99
2016	14	399,82	403,96	401,07	1,62	399,55	401,36	400,58	0,90	0,49	1,85	2,40
2017	15	398,77	409,65	403,86	4,23	399,68	408,19	403,46	3,18	0,40	2,85	3,47
2019	5	413,93	413,94	413,88	0,05	414,94	414,99	414,97	0,02	-1,09	1,09	1,22

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

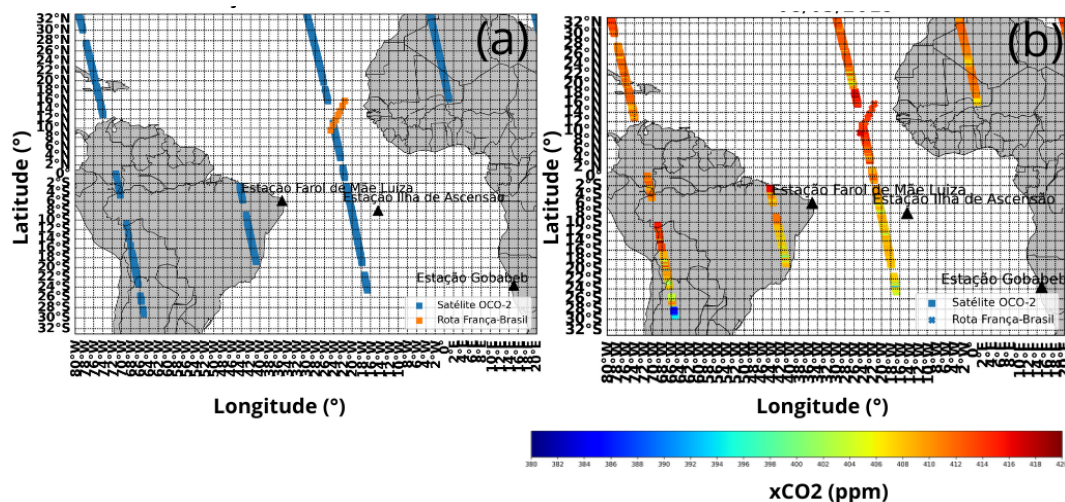
Gráfico 10 - Série temporal dos dados diários da rota França-Brasil com o OCO-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No entanto, 2019 contou com um dia estudado, mas com observações em 5 pontos durante a rota do navio, então nessa etapa a análise foi sobre as coordenadas. Em relação a máxima foi a mesma localização para os dois, tendo uma disparidade de 1,06 ppm em 10,62° Leste e 24,20° Sul, e a mínima foi de uma distância de 0,02° de latitude por 0,01° de longitude. A média neste dia para o satélite foi de 414,97 ppm e para a rota foi de 413. O desvio padrão do satélite foi de 0,05 e a rota de 0,02. O ME e o MAE foram 1,09 ppm, e o RMSE com 1,22 ppm. É possível observar as altas concentrações medidas nesse dia na imagem abaixo (Figura 10).

Figura 9 - Ilustração dos pontos de medição do satélite OCO-2 e da rota França- Brasil (a) e a fração molar de dióxido de carbono atmosférico (b) medidos sobre o oceano Atlântico Tropical no dia 08 de maio de 2019.



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Ao comparar a rota França - Guiana Francesa com o OCO-2, o satélite registrou um aumento de 6,4 ppm de xCO₂ e a rota de 5,5 ppm. O pico da máxima entre eles foi parecida, com uma diferença de 0,74 ppm no dia 3 de setembro de 2019, já a mínima foi em 24 de outubro de 2016 com 398,12 ppm para o observatório e em 29 de agosto de 2016 com 398,02 para os navios. A média dos dois foi de aproximadamente 400 ppm. E o desvio padrão do satélite foi de 2,5 e a rota de 2,7. O ME com -0,72 ppm, o MAE foi de 0,84 ppm, e o RMSE com 1,15 ppm, entre os 32 dados.

Tabela 15 - Estatística básica, índices de erro e correlação com os dados diários da rota França - Guiana Francesa com o OCO-2.

Estatística	França-Guiana Francesa	OCO-2	ME	MAE	RMSE	R
Mínimo	398,02	398,12				
Máximo	405,88	406,62				
Média	400,02	400,28	-0,72	0,84	1,15	0,67
σ	2,7	2,5				
Nº	32	32				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na comparação anual não foi possível utilizar os dados de 2014, 2017 e 2018, devido a ausência de dias que os pontos de medição dos navios não se encontravam próximos da passagem do satélite.

Em 2015, os dias de máxima foram similares para os dois, representado pelo 16 de março com a diferença de 0,06 ppm, mas para as coletas dos navios nesse mesmo dia teve a menor concentração observado do ano, no entanto o satélite destaca o 13 de novembro com 398,67, e a média com uma variação de 0,4 ppm. O desvio padrão do satélite foi de 0,84 e a rota de 2,50. O ME foi de 0,61 ppm, o MAE com 0,73 ppm, e o RMSE com 1,06 ppm, entre os 16 dados estudados.

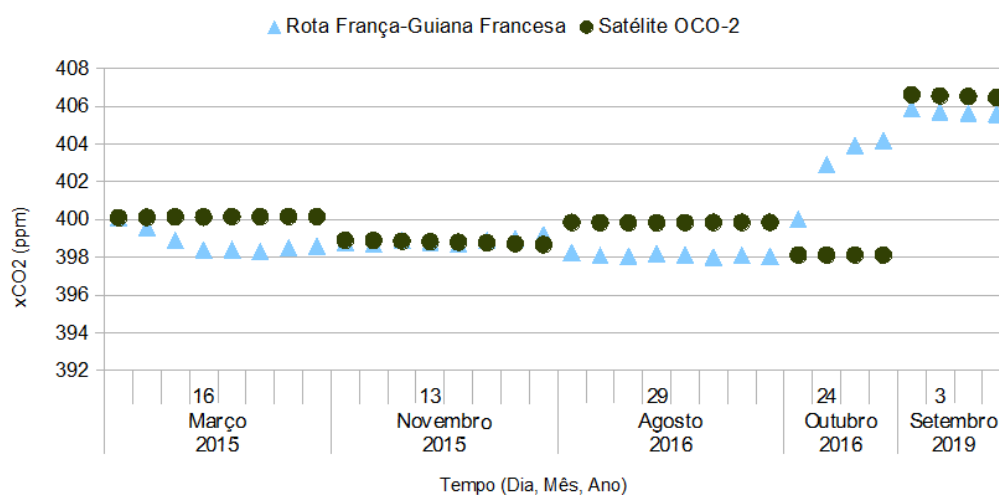
Contudo, em 2016 as respostas foram diferentes, a mínima para a rota foi no dia 29 de agosto com 398,02 ppm, já para o satélite nesse mesmo dia o xCo2 alcançou a máxima com 399,85 ppm. E a máxima para a rota foi em 24 de outubro, sendo que para esse dia foi a mínima observada pelo satélite com 398,12 ppm. O desvio padrão do satélite foi de 0,69 e a rota de 0,46. O ME com 0,49 ppm, o MAE foi de 1,85 ppm, e o RMSE com 2,40 ppm, entre os 12 dados utilizados.

Tabela 16 - Estatística básica, índices de erro com os dados diários, separado por ano da rota França- Guiana francesa com o OCO-2.

Ano	Nº	Rota França - Guiana Francesa				OCO-2				ME	MAE	RMSE
		Mínima	Máxima	Média	σ	Mínima	Máxima	Média	σ			
2015	16	398,30	400,10	398,86	0,46	398,67	400,16	399,47	0,69	-0,61	0,73	1,06
2016	12	398,02	404,20	399,67	2,50	398,12	399,85	399,27	0,84	-0,51	0,68	1,03
2019	4	405,59	405,88	405,71	0,12	406,46	406,62	406,54	0,06	-1,77	1,77	2,04

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

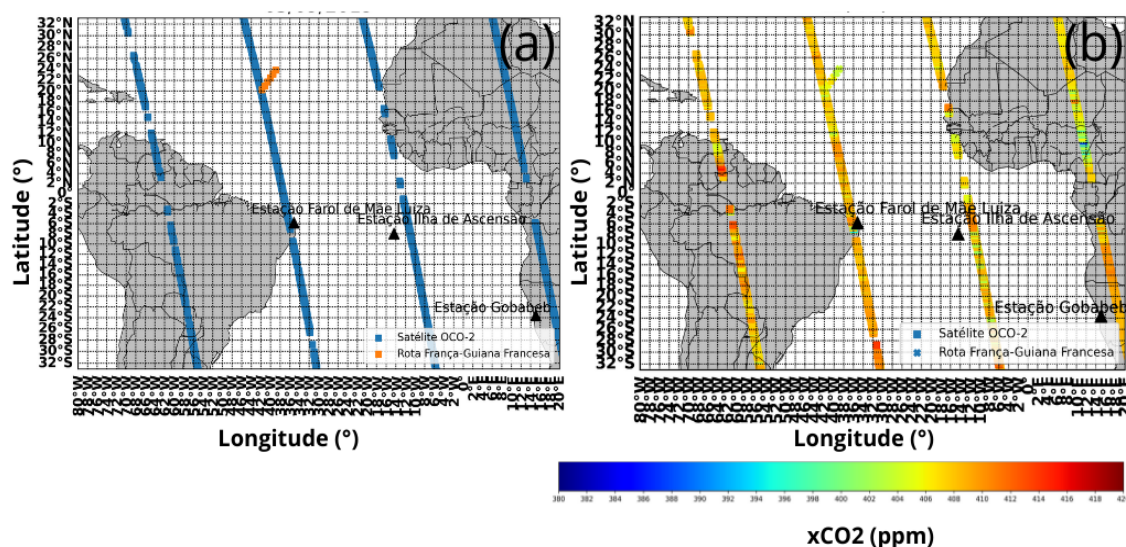
Gráfico 11 - Série temporal dos dados mensais da estação rota França - Guiana Francesa com o OCO-2.



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Apesar disso, em 2019 só contabilizou-se um dia trabalhado, mas que contém 4 medições, onde aqui também foram consideradas as localizações. E tanto o local da maior concentração de $x\text{CO}_2$ observada quanto a menor foi semelhante para os dois, sendo com uma diferença de 0,74 ppm e de 0,87 ppm respectivamente. A distância entre as duas áreas foi de 1,11 km. A média neste dia para o satélite foi de 406,54 ppm e para a rota foi de 405,71 ppm. O desvio padrão do satélite foi 0,06 e a rota foi de 0,12. O ME e o MAE foram 1,77 ppm, e o RMSE com 2,04 ppm. É possível observar as altas concentrações medidas nesse dia no gráfico 18 e na figura 11.

Figura 10 - Ilustração dos pontos de medição do satélite OCO-2 e da rota França-Guiana Francesa (a) e a fração molar de dióxido de carbono atmosférico (b) medidos sobre o oceano Atlântico Tropical no dia 03 de setembro de 2019.



Fonte: elaborado pela autora (2021).

7. DISCUSSÃO

Ao observar as análises sazonais foi possível notar que o satélite foi similar no período de estação de menor aumento de $x\text{CO}_2$ com apenas o Farol de Mãe Luiza, referente ao outono, e ele também destaca-se sobre a Ilha de Ascensão, porém o resultado da ilha foi como sendo o verão o de menor aumento. O Gobabeb também confirma o outono mas, sobre este último, o OCO-2 já resultou como sendo o inverno. Nas três análises, o observatório destacou a primavera pertencendo a máxima, semelhante ao Gobabeb e a Ilha de Ascensão, apenas Farol mostrou o inverno.

Na comparação mensal com cada estação terrestre, o OCO-2 apontou meses diferentes tanto em relação aos picos de máximas como das mínimas para todas as estações, sendo que o Gobabeb e a Ilha demonstraram o mesmo período de mínima em relação a fevereiro de 2015, e o Gobabeb junto com o Farol apontaram a máxima encontrada em setembro de 2019. E o maior erro do RMSE entre as estimativas feitas foi sobre a ilha com 2,86 ppm, que ficou perceptível nos três picos negativos apontados pelo satélite, mas que não foram observados pela estação. E o menor erro do RMSE de 1,27 ppm foi sobre o Gobabeb.

Já na análise diária com as estações, o satélite coincidiu somente com os dias de mínima do Farol e do Gobabeb, e os de máxima ele correspondeu aos mesmos dias destacados pelas estações. Tendo o maior RMSE de 4,55 ppm em relação ao Farol, levando em conta que a estação sofre com influências das atividades antrópicas por estar localizada em um centro urbano. E o menor RMSE de 1,08 ppm também foi sobre o Gobabeb.

A partir da regressão linear foi possível obter que houve uma correlação significativa entre a maioria dos dados comparados. Chegando a um valor de R de 0,99 para com a estação Gobabeb. E apenas para com a rota da Guiana - Francesa o R não foi representativo devido ter sido de 0,67.

Na pesquisa geral com as rotas dos navios, os dias que o satélite apresentou como sendo os de maior concentração durante o período estudado corresponderam aos mesmos observados pelos navios. E o de mínima coincidiu apenas com a rota da França ao Brasil, e mesmo assim a relação entre os dois obteve o maior RMSE de 2,82 ppm. E o menor foi com a rota da França a Guiana Francesa com 1,15 ppm.

É possível observar no estudo anual, que em relação às coletas dos navios, o satélite coincidiu com metade das análises, tendo os maiores erros do RMSE em torno de 2,5 ppm. E os menores erros foram com a rota da França à Guiana Francesa com aproximadamente 1,37 ppm.

Ao relacionar os resultados de MAE desta pesquisa que variaram de 0,6 a 3,4 ppm e as RMSE que foram de 1,03 a 4,5 ppm, a realizada por WUNCH et al., (2017) com os dados do TCCON em escalas globais, que obtiveram MAE menores que 0,4 ppm e RMSE menores que 1,5 ppm, é possível ver que ocorreu uma certa aproximação dos erros.

E ao relacionar todos os índices de erros deste trabalho, no qual variaram de 0,4 a 4,55 ppm com os erros aleatórios dos quais no geral os instrumentos de medições no mundo todo têm produzido que são de 0,1 e 0,3% (0,4 a 1,2 ppm) e os dos sistemáticos entre 0,25 e 0,5% (1 a 2 ppm) (Wunch et al. 2017), é possível destacar a eficiência do OCO-2 ao ter se

aproximado desses erros padrões. Como para com o Gobabeb, no qual o satélite apresentou resultados satisfatórios em relação aos índices de erros, variaram de 0,57 a 1,27 ppm, englobando a análise mensal e a diária.

Algumas das diferenças apresentadas entre as análises podem ser explicadas por fatores como, contaminação dos dados, devido a estação se encontrar em centro urbanos, como foi confirmado pela estação do Farol de Mãe Luiza e também nas coletas feitas nos navios, onde geralmente isso ocorre pelos gases do próprio navio. O fato do próprio satélite possuir potencial de sofrer influências devido a presença de nuvens e aerossóis, por ele depender da luz solar refletida, acaba não conseguindo distinguir entre os fótons dos dispersores de fótons refletidos pela superfície do planeta, como é constatado em O'Dell e colaboradores (2018). No qual o sinalizador de qualidade não elimina todas as medições afetadas pelas nuvens, como visto no trabalho do BELL et al. (2020), onde em alguns momentos o OCO-2 apresentou melhorias de xCO_2 e em outros exibiu picos, que não foram apontados pelos outros instrumentos utilizados no estudo. E ao visualizar imagens visíveis do MODIS, observaram que o OCO-2 tinha sido afetado pelo deslocamento de uma nuvem alta. E também pelo satélite realizar uma média da coluna atmosférica, e as medidas *in situ* serem apenas próximas à superfície, o que pode influenciar devido à variabilidade natural vertical da fração molar de CO_2 em ppm, no qual os valores começam elevados na superfície e diminuem com a altitude (O'DELL et al., 2012). E isso é intensificado nos estudos apresentado no trabalho do BELL et al., de 2020, que observou que há diferenças mesmo em realizar comparações entre médias da coluna inteira atmosférica com médias de coluna parcial.

Nota-se, porém, a importância da investigação das medições do OCO-2 sobre a Ilha de Ascensão, para tentar entender o que poderia estar ocasionando as variações encontradas.

Devido a aproximação nas comparações das coletas da rota França ao Brasil, o OCO-2 se apresentou viável para pesquisas que utilizam essa rota para os estudos de CO_2 , com erros em torno de 2 ppm.

Em todas as comparações individuais, foi possível observar o aumento da fração molar de dióxido de carbono atmosférico (xCO_2) da região próxima e sobre o oceano atlântico tropical durante o período estudado de novembro de 2014 a dezembro de 2019, variando de 11 a 16 ppm, com base nas análises realizadas. Observou-se também esse aumento em todas as análises sazonais independente das estações do ano.

8. CONCLUSÃO

Esse trabalho só foi possível de ser realizado devido ao banco de dados das estimativas de $x\text{CO}_2$ que o OCO-2 vem produzindo, e pelo o banco de dados das medidas *in situ* realizadas pelas estações terrestres e os navios.

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise de como o satélite vem apresentando as estimativas do dióxido de carbono atmosférico em comparação a medições *in situ*, a análise com os dois tipos de medições *in situ*, sendo um sobre a superfície terrestre próximo ao oceano e outro no próprio oceano Atlântico Tropical, que é a área de interesse do estudo, aumentou a apuração dos resultados. Além disso, também permitiu uma pesquisa de observação do aumento do CO_2 que vem ocorrendo sobre esses dois ambientes, na área trabalhada.

Na comparação com os dados diários, o satélite apresentou melhor correlação do que os dados mensais, no qual coincidiu na maior parte das comparações com os dias dos picos de $x\text{CO}_2$.

Apesar de algumas discordâncias, o OCO-2 mostrou-se ser um eficiente instrumento de mensuração de $x\text{CO}_2$ sobre o oceano atlântico tropical, e estações em terra adjacentes ao oceano, devido a ele ter conseguido acompanhar o aumento do $x\text{CO}_2$ ao longo dos anos, como é observado pelas estações e as rotas. Nesse sentido, a verificação da acurácia das estimativas realizadas pelo satélite OCO-2, permite a colaboração com os estudos para entender cada vez mais esse aumento e assim intensificar a busca em reverter a atual situação da atmosfera do planeta, influenciada pelas atividades humanas.

8 . REFERÊNCIAS

ABRAM, N.; GATTUSO J.-P., PRAKASH ABRAM, Nerilie; GATTUSO, Jean-Pierre; PRAKASH, Anjal; CHENG, Lijing; GARSCHAGEN, Matthias; KUDEL, Raphael Martin; CHIDICHIMO, María Paz; GRUBER, Nicolas; RICE, Jake; CRATE, Susan. RELATÓRIO ESPECIAL: RELATÓRIO ESPECIAL SOBRE O OCEANO E A CRIOSFERA EM UM CLIMA EM MUDANÇA: enquadramento e contexto do relatório. Ipcc - Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas, 2019. 60 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srocc/>. Acesso em: 15 maio 2019.

BAKKER, Dorothee C. E.; PFEIL, Benjamin; LANDA, Camilla S.; METZL, Nicolas; O&APOS;BRIEN, Kevin M.; OLSEN, Are; SMITH, Karl; COSCA, Cathy; HARASAWA, Sumiko; JONES, Stephen D.. A multi-decade record of high-quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth System Science Data*, [s.l.], v. 8, n. 2, p. 383-413, 15 set. 2016. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/essd-8-383-2016>.

BELL, Emily; O'DELL, Christopher W.; DAVIS, Kenneth J.; CAMPBELL, Joel; BROWELL, Edward; DENNING, A. Scott; DOBLER, Jeremy; ERXLEBEN, Wayne; FAN, Tai-fang; KOOI, Susan. Evaluation of OCO-2 X Variability at Local and Synoptic Scales using Lidar and In Situ Observations from the ACT-America Campaigns. **Journal Of Geophysical Research: Atmospheres**, [s.l.], v. 125, n. 10, p. 1-31, 18 maio 2020. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2019jd031400>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JD031400>. Acesso em: 16 julho 2020.

BERGAMASCHI, P.; DANILA, A.; WEISS, R. F.; CIAIS, P.; THOMPSON, R. L.; BRUNNER, D.; LEVIN, I.; MEIJER, Y.; CHEVALLIER, F.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; BOVENSMANN, H.; CRISP, D.; BASU, S.; DLUGOKENCKY, E.; ENGELN, R.; GERBIG, C.; GÜNTHER, D.; HAMMER, S.; HENNE, S.; HOUWELING, S.; KARSTENS, U.; KORT, E.; MAIONE, M.; MANNING, A. J.; MILLER, J.; MONTZKA, S.; PANDEY, S.; PETERS, W.; PEYLIN, P.; PINTY, B.; RAMONET, M.; REIMANN, S.; RÖCKMANN, T.; SCHMIDT, M. STROGIES,; SUSSAMS, J.; TARASOVA, O.; AARDENNE, J.; VERMEULEN, A. T.; VOGEL, F.: Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories, EUR 29276 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-88938-7, doi:10.2760/759928, JRC111789, 2018.

BORGES, Viviane Francisca. **CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NA COSTA NORTE/NORDESTE DO BRASIL**. 2018. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2018.

BOTKIN, Daniel B.; KELLER, Edward A.. **Environmental Science: Earth As a Living Planet**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1998. 649 p.

BOURLÈS, Bernard; LUMPKIN, Rick; MCPHADEN, Michael J.; HERNANDEZ, Fabrice; NOBRE, Paulo; CAMPOS, Edmo; YU, Lisan; PLANTON, Serge; BUSALACCHI, Antonio; MOURA, Antonio D.. **THE PIRATA PROGRAM**. **Bulletin Of The American**

Meteorological Society, [s.l.], v. 89, n. 8, p.1111-1126, ago. 2008. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/2008bams2462.1>.

BOUTIN, J.; MERLIVAT, L.. New in situ estimates of carbon biological production rates in the Southern Ocean from CARIOCA drifter measurements. *Geophysical Research Letters*, [s.l.], v. 36, n. 13, p.1-6, 15 jul. 2009. American Geophysical Union (AGU). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2009gl038307>>. Acesso em: 1 jun. 2019.

BRASSEUR, GUY P., PRINN, RONALD G., PSZENNY, ALEXANDER AP. **Atmospheric Chemistry in a Changing World: An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research**. Berlin Heidelberg: Springer-verlag, 2003. 300 p.

CARVALHO, Miguel Angelo Vargas de. **VARIABILIDADE DA LARGURA E INTENSIDADE DA ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL ATLÂNTICA: ASPECTOS OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM**. 2011. 137 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Inpe, São José dos Campos, 2011.

CEOS, A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space. The Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) Response to the Group on Earth Observations (GEO) Carbon Strategy. Data de emissão: 8 Outubro 2018.

CHANG, Ping; SARAVANAN, R.; JI, Link; HEGERL, G. C.. The Effect of Local Sea Surface Temperatures on Atmospheric Circulation over the Tropical Atlantic Sector. **Journal Of Climate**, [S.L.], v. 13, n. 13, p. 2195-2216, jul. 2000. American Meteorological Society. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)0132.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2000)0132.0.co;2).

CHATTERJEE A., Gierach MM, Sutton AJ, Feely RA, Crisp D., Eldering A., Gunson MR, O'Dell CW, Stephens BB, Schimel DS. Influence of El Nino on atmospheric CO₂ over tropical Pacific Ocean: Findings from NASA's OCO-2 mission, *Science* 13 out 2017, Vol. 358, Issue 6360, eaam5776 DOI: 10.1126/science.aam5776.

COLLISCHONN, B., ALLASIA, D., COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. Estimativas de precipitação por sensoriamento remoto passivo: desempenho do satélite TRMM na bacia do alto Paraguai até Descalvados. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 1. (GEOPANTANAL), 2006, Campo Grande. Anais. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária; São José dos Campos: INPE, 2006. p. 47-56. CD-ROM. ISBN 85-17-00029-3. Disponível em: . Acesso em: 20 jun. 2019.

COLE, Steve; BUIS, Alan; BENESKI, Barron; RYE, Jessica; DILLER, George. Orbiting Carbon Observatory 2 Launch Press Kit. NASA, 2014. Disponível em: <https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/oco2-launch-press-kit.pdf>. Acessos em: 28 jan. 2019.

CONNOR, Brian J.; BOESCH, Hartmut; TOON, Geoffrey; SEN, Bhaswar; MILLER, Charles; CRISP, David. Orbiting Carbon Observatory: inverse method and prospective error analysis. **Journal Of Geophysical Research: Atmospheres**, [S.L.], v. 113, n. 5, p. 1-14, 6 mar. 2008. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2006jd008336>.

COSTA, Leonardo Vieira Bruto da. Fluxo de CO₂ na interface oceano-atmosfera na borda oeste do Atlântico Tropical sob influência da Pluma do Rio Amazonas. 2017. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Oceanografia, Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

CRISP, D.; ATLAS, R.M.; BREON, F.-M.; BROWN, L.R.; BURROWS, J.P.; CIAIS, P.; CONNOR, B.J.; DONEY, S.C.; FUNG, I.Y.; JACOB, D.J. The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission. **Advances In Space Research**, [S.L.], v. 34, n. 4, p. 700-709, jan. 2004. Elsevier BV. <httpdx://.doi.org/10.1016/j.asr.2003.08.062>.

CRISP, D.; FISHER, B. M.; O&APOS;DELL, C.; FRANKENBERG, C.; BASILIO, R.; BÖSCH, H.; BROWN, L. R.; CASTANO, R.; CONNOR, B.; DEUTSCHER, N. M.. The ACOS CO₂ retrieval algorithm – Part II: global xco₂ data characterization. **Atmospheric Measurement Techniques**, [s.l.], v. 5, n. 4, p. 687-707, 2 abr. 2012. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-5-687-2012>.

CRISP, David; POLLOCK, Harold R.; ROSENBERG, Robert; CHAPSKY, Lars; LEE, Richard A. M.; OYAFUSO, Fabiano A.; FRANKENBERG, Christian; O'DELL, Christopher W.; BRUEGGE, Carol J.; DORAN, Gary B.. The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products. **Atmospheric Measurement Techniques**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 59-81, 5 jan. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-10-59-2017>.

DICK, Steven J., ed. NASA 50th Anniversary Proceedings. Primeiros 50 anos da NASA: Perspectivas Históricas. (NASA SP-2010-4704) Fora de catálogo. Disponível em: <<https://www.history.nasa.gov/SP-4704.pdf>>.

Earth Observation Portal. OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2). Disponível em: <<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/oco-2>>. Acesso em 20 abril 2019.

ELDERING, Annmarie et al. The Orbiting Carbon Observatory-2: first 18 months of science data products. *Atmospheric Measurement Techniques*, [s.l.], v. 10, n. 2, p.549-563, 15 fev. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-10-549-2017>.

ESCOLA, Equipe Brasil. "Oceano Atlântico"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/oceano-atlantico.htm>. Acesso em 03 de abril de 2020.

FERREIRA, Antonio Geraldo; MELLO, Namir Giovanni da Silva. PRINCIPAIS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES SOBRE A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL E A INFLUÊNCIA DOS OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO NO CLIMA DA REGIÃO. *Revista Brasileira de Climatologia*, [s.l.], v. 1, n. 1, p.15-28, 31 dez. 2005. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>.

IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

IPCC, 2013: *Mudança Climática 2013: A Base da Ciência Física. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex e P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, EUA, 1535 pp.

HAKKARAINEN, J.; IALONGO, I.; TAMMINEN, J.. Direct space-based observations of anthropogenic CO₂ emission areas from OCO-2. ***Geophysical Research Letters***, [s.l.], v. 43, n. 21, p.11400-11406, 1 nov. 2016. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2016gl070885>.

HALLAK, Ricardo; PEREIRA FILHO, Augusto José. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de

dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 591-608, dez. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862011000400009>.

HARRIS, Daniel C.; Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO₂ Measurements†. **Analytical Chemistry**, [s.l.], v. 82, n. 19, p.7865-7870, out. 2010. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ac1001492>.

HEINZE, C.; MEYER, S.; GORIS, N.; ANDERSON, L.; STEINFELDT, R.; CHANG, N.; QUÉRÉ, C. L.; BAKKER, D. C. E.. The ocean carbon sink – impacts, vulnerabilities and challenges. **Earth System Dynamics**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 327-358, 9 jun. 2015. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/esd-6-327-2015>.

HEUVEN, Steven; HOPPEMA, Mario (2018). Medições em andamento na superfície de pCO₂, temperatura, salinidade e outras variáveis coletadas durante os cruzeiros R / V Polarstern em 2017 (Acesso NCEI 0170287). [06AQ20170205, 06AQ20170321, 06AQ20170524, 06AQ20170723, 06AQ20170822, 06AQ20170912]. Centros Nacionais de Informação Ambiental da NOAA. Conjunto de dados. <https://doi.org/10.7289/v5zg6qjr>. Acesso em: 1 out. 2020.

HEUVEN, Steven; HOPPEMA, Mario (2017). Pressão parcial (ou fugacidade) de dióxido de carbono e outras variáveis coletadas de observações em andamento na superfície usando analisador de gás de dióxido de carbono (CO₂), balanceador de câmara de chuva para medição autônoma de dióxido de carbono (CO₂) e outros instrumentos do POLARSTERN no Oceano Atlântico Norte, Sul Oceano Atlântico e outros de 2016-02-20 a 2016-05-08 (Acesso NCEI 0160572). [06AQ20160220, 06AQ20160412]. Centros Nacionais de Informação Ambiental da NOAA. Conjunto de dados. https://doi.org/10.3334/cdiac/otg.oa_vos_polarstern_2016. Acesso em: 1 out. 2020.

HEUVEN, Steven; HOPPEMA, Mario; JONES, Elizabeth M. (2017). Pressão parcial (ou fugacidade) de dióxido de carbono e outras variáveis coletadas de observações em andamento na superfície usando analisador de gás de dióxido de carbono (CO₂) e outros instrumentos do POLARSTERN no Oceano Ártico, Mar de Barents e outros de 19/05/2015 a 12/12/2015 (Acesso NCEI 0160491). [06AQ20150519, 06AQ20150629, 06AQ201510818, 06AQ20151030,]. Centros Nacionais de Informação Ambiental da NOAA. Conjunto de dados. https://doi.org/10.3334/cdiac/otg.oa_vos_polarstern_2015. Acesso em: 1 out. 2020.

HEUVEN, Steven; HOPPEMA, Mario; JONES, Elizabeth M. (2017). Pressão parcial (ou fugacidade) de dióxido de carbono e outras variáveis coletadas de observações em andamento na superfície usando analisador de gás de dióxido de carbono (CO₂) e outros instrumentos do POLARSTERN no Mar Adriático, Mar Egeu e outros de 09/03/2014 a 01/01/2015 31 (Acesso NCEI 0160489). [06AQ20140309, 06AQ20140608, 06AQ20140707, 06AQ20140805, 06AQ21026, 06AQ20141203]. Centros Nacionais de Informação Ambiental da NOAA. Conjunto de dados. https://doi.org/10.3334/cdiac/otg.oa_vos_polarstern_2014. Acesso em: 1 out. 2020.

HURRELL, J. W.; VISBECK M.; BUSALACCHI A.; CLARKE R. A.; DELWORTH T. L.; DICKSON R. R.; JOHNS W. E.; KOLTERMANN K. P.; KUSHNIR Y.; MARSHALL D.; MAURITZEN C.; MCCARTNEY M. S.; PIOLA A.; REASON C.; REVERDIN G.; SCHOTT F.; SUTTON R.; WAINER I.; WRIGHT D. “Atlantic Climate Variability and Predictability: A CLIVAR Perspective”. *Journal of Climate*, vol. 19, nº 20, outubro de 2006, p. 5100–21. DOI.org (Crossref), doi:10.1175/JCLI3902.1.

KEPPEL-ALEKS G.; WENBERG P. O.; SCHNEIDER T. Sources of Variations in Total Column Carbon Dioxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 11, nº 8, abril de 2011, p. 3581–93. DOI.org (Crossref), doi:10.5194/acp-11-3581-2011.

KIEL, Matthäus; O'DELL, Christopher W.; FISHER, Brendan; ELDERING, Annmarie; NASSAR, Ray; MACDONALD, Cameron G.; WENBERG, Paul O. How bias correction goes wrong: measurement of xco₂ affected by erroneous surface pressure estimates. *Atmospheric Measurement Techniques*, [s.l.], v. 12, n. 4, p. 2241-2259, 12 abr. 2019. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-12-2241-2019>.

LABZOVSKII, Lev D.; JEONG, Su-jong; PARAZOO, Nicholas C.. Working towards confident spaceborne monitoring of carbon emissions from cities using Orbiting Carbon Observatory-2. *Remote Sensing Of Environment*, [s.l.], v. 233, p.1-12, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.111359>.

Lançada a versão 2020 da SOCAT. Atlas de CO₂ da Superfície do Oceano (SOCAT), 2020. Disponível em: <<https://www.socat.info/>>. Acesso em: 10, agosto de 2020.

LASKAR, Amzad H. et al. Distribution of CO₂ in Western Pacific, Studied Using Isotope Data Made in Taiwan, OCO-2 Satellite Retrievals, and CarbonTracker Products. *Earth And*

Space Science, [s.l.], v. 5, n. 11, p.827-842, nov. 2018. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2018ea000415>.

LASKAR, Amzad H. et al. Distribution of CO₂ in Western Pacific, Studied Using Isotope Data Made in Taiwan, OCO-2 Satellite Retrievals, and CarbonTracker Products. Earth And Space Science, [s.l.], v. 5, n. 11, p.827-842, nov. 2018. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2018ea000415>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018EA000415>>. Acesso em: 24 jun. 2019.

LEFÉVRE, Nathalie; DIVERRÉS, Denis; GALLOIS, Francis. Origin of CO₂ undersaturation in the western tropical Atlantic. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, [S.L.], v. 62, n. 5, p. 595-607, 1 jan. 2010. Informa UK Limited. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00475.x>>.

LEIVAS, Janice Freitas; RIBEIRO, Gustavo Guterres; SOUZA; Monique Brasil de; FILHO, João Rocha (2009). Análise comparativa entre os dados de precipitação estimados via satélite TRMM e dados observados de superfície em Manaus. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Natal, 2009. Anais. Natal: Inpe, 2009. p. 1611 - 1616.

LUDMILA B. CAMPAROTTO et al. Validação de dados termopluiométricos obtidos via sensoriamento remoto para o Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 17, n. 6, p.665-671, 05 abr. 2013.

MANDRAKE, L.; FRANKENBERG, C.; O'DELL, CW; OSTERMAN, G.; WENNBERG, P.; WUNCH, D.. Seleção de sondagem semi-autônoma para OCO-2, Atmos. Meas. Tech., 6, 2851-2864, doi: 10.5194 / amt-6-2851-2013, 2013.

MARANI, Luciano; GATTI, Luciana V.; MILLER, John B.; DOMINGUES, Lucas G.; CORREIA, Caio C. S.; GLOOR, Manuel; PETERS, Wouter; BASSO, Luana S.; CRISPIM, Stephane P.; NEVES, Raiane A. L.. Estimation Methods of Greenhouse Gases Fluxes and The Human Influence in the CO₂ Removal Capability of the Amazon Forest. Revista Virtual de Química, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 1129-1144, 2020. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20200091>>. Acesso em: 11 dez. 2020.

MARCOS químicos históricos nacionais da sociedade química americana. A curva de Keeling. Chemistry for Life, 2015. Disponível em:

<<https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/keeling-curve.html#top>>. Acesso em: 28 março 2020.

MARTINS, Claudia Rocha, Pedro Afonso de Paula Pereira, Wilson Araújo Lopes e Jailson B. de Andrade. Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: a importância na química da atmosfera. PubliSBQ, 2003.

Mentzer, John T., et al. "Benchmarking de gerenciamento de previsão de vendas." *Business Horizons* , vol. 42, nº 3, maio-junho de 1999, p. 48+. *Gale Academic OneFile* . Acesso em: 12 fev. 2021.

MILLER, Scot M.; MICHALAK, Anna M.; YADAV, Vineet; TADIĆ, Jovan M.. Characterizing biospheric carbon balance using CO₂ observations from the OCO-2 satellite. **Atmospheric Chemistry And Physics**, [s.l.], v. 18, n. 9, p. 6785-6799, 16 maio 2018. Copernicus GmbH. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5194/acp-18-6785-2018>>. Acesso em: 24 jun. 2019.

NASA, Jet Propulsion Laboratory (2016). OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2). Disponível em: <<https://ocov2.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em 30 maio 2019.

NASSAR, Ray; HILL, Timothy G.; MCLINDEN, Chris A.; WUNCH, Debra; JONES, Dylan B. A.; CRISP, David. Quantifying CO₂ Emissions From Individual Power Plants From Space. **Geophysical Research Letters**, [s.l.], v. 44, n. 19, p. 10045-10053, 13 out. 2017. American Geophysical Union (AGU). Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1002/2017gl074702>>.

NATIONAL Ocean Service; National Oceanic and Atmospheric Administration; US Department of Commerce USA.gov. NOAA Celebrates 200 years, 2007. Life of an Air Flask. Disponível em: <https://celebrating200years.noaa.gov/magazine/life_air_flask/welcome.html#intro>. Acesso em: 10 set. 2020.

OCO-2 Science Team/Michael Gunson, Annmarie Eldering (2020). OCO-2 Level 2 bias-corrected XCO₂ and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, Retrospective processing V10r, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Disponível em:<[10.5067/E4E140XDMPO2](https://doi.org/10.5067/E4E140XDMPO2)>. Acesso em: 20 out. 2020.

O'DELL, C. W.; CONNOR, B.; BÖSCH, H.; O'BRIEN, D.; FRANKENBERG, C.; CASTANO, R.; CHRISTI, M.; ELDERING, D.; FISHER, B.; GUNSON, M.. The ACOS CO₂

retrieval algorithm – Part 1: description and validation against synthetic observations.

Atmospheric Measurement Techniques, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 99-121, 11 jan. 2012. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-5-99-2012>.

O'DELL, Christopher W.; ELDERING, Annmarie; WENNBERG, Paul O.; CRISP, David; GUNSON, Michael R.; FISHER, Brendan; FRANKENBERG, Christian; KIEL, Matthäus; LINDQVIST, Hannakaisa; MANDRAKE, Lukas. Improved retrievals of carbon dioxide from Orbiting Carbon Observatory-2 with the version 8 ACOS algorithm. **Atmospheric Measurement Techniques**, [s.l.], v. 11, n. 12, p. 6539-6576, 11 dez. 2018. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-11-6539-2018>.

OLIVEIRA, Gilvan Sampaio de; SILVA, Neilton Fidelis da; HENRIQUES, Rachel. **MUDANÇAS CLIMÁTICAS ENSINOS FUNDAMENTAL E MÉDIO**. 13. ed. Brasília: Mec, Seb; Mct; Aeb, 2009. 348 p. (COLEÇÃO EXPLORANDO O ENSINO).

PENA, Rodolfo F. Alves. Ventos alísios. *Brasil Escola*. 2008. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/ventos-alisios.htm>. Acesso em 15 de dezembro de 2020.

PLATNICK, Steve. The Earth Observer. 2014. Disponível em: <<https://eosps.nasa.gov/earthobserver/jul-aug-2014>>. Acesso em: 11 abril 2019.

PLATNICK, Steve. The Earth Observer. 2015. Disponível em: <<https://eosps.nasa.gov/earthobserver/jan-feb-2015>>. Acesso em: 11 abril 2019.

QUÉRÉ, Corinne Le; RAUPACH, Michael R.; CANADELL, Josep G.; MARLAND, Gregg; BOPP, Laurent; CIAIS, Philippe; CONWAY, Thomas J.; DONEY, Scott C.; FEELY, Richard A.; FOSTER, Pru. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. **Nature Geoscience**, [S.L.], v. 2, n. 12, p. 831-836, 17 nov. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo689>.

QUÉRÉ, Corinne Le; ANDREW, Robbie M.; FRIEDLINGSTEIN, Pierre; SITCH, Stephen; PONGRATZ, Julia; MANNING, Andrew C.; KORSBAKKEN, Jan Ivar; PETERS, Glen P.; CANADELL, Josep G.; JACKSON, Robert B.. Global Carbon Budget 2017. **Earth System Science Data**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 405-448, 12 mar. 2018. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>.

RAFFERTY, John P.. Curva de Keeling. **Encyclopædia Britannica**, 2019. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/Keeling-Curve>>. Acesso em: 29 março 2020.

RIEBEEK, H. The Carbon Cycle. NASA Earth Observatory, 16 jun. 2011. Disponível em: <<https://www.earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>>. Acesso em: 15 maio 2019.

RIEBEEK, Holli. The Carbon Cycle. 2011. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page1.php>>. Acesso em: 16 jun. 2011.

SANTOS, Wesley de Oliveira; SILVA, Ketson Bruno da; COELHO, Daniela da Costa Leite; SILVA, Karen Mariany Pereira; ESPÍNOLA SOBRINHO, José; SILVA, Paulo Cesar Moura da; BATISTA, Rafael Oliveira. Variabilidade espacial e temporal das precipitações para a Microrregião de Pau dos Ferros-RN. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 7, n.03, p. 434-441, 2014. Bimensal.

SCHOUTEN, Mathijs W.; MATANO, Ricardo P.; STRUB, Ted P.. A description of the seasonal cycle of the equatorial Atlantic from altimeter data. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, [S.L.], v. 52, n. 3, p. 477-493, abril. 2003. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2004.10.007>>.

SCHULDT, K.; MUND, J.; LUIJKX, I. T.; JACOBSON, A. R.; AALTO, T.; ABSHIRE, J. B.; AIKIN, K.; ANDREWS, A.; AOKI, S.; APADULA, F.; BAIER, B.; BAKWIN, P.; BARTYZEL, J.; BENTZ, G.; BERGAMASCHI, P.; BEYERSDORF, A.; BIERMANN, T.; BIRAUD, S. C.; BOWLING, D.; BRAILSFORD, G.; CHEN, G.; CHEN, H.; CHMURA, L.; CLARK, S.; CLIMADAT, S.; COLOMB, A.; COMMANE, R.; CONIL, S.; COX, A.; CRISTOFANELLI, P.; CUEVAS, E.; CURCOLL, R.; DAUBE, B.; DAVIS, K.; MAZIÈRE, M. D.; WEKKER, S. D.; COLETTA, J. D.; DELMOTTE, M.; DIGANGI, J. P.; DLUGOKENCKY, E.; ELKINS, J. W.; EMMENEGGER, L.; FISCHER, M. L.; FORSTER, G.; FRUMAU, A.; GALKOWSKI, M.; GATTI, L. V.; GHEUSI, F.; GLOOR, E.; GOMEZ-TRUEBA, V.; GOTO, D.; GRIFFIS, T.; HAMMER, S.; HANSON, C.; HASZPRA, L.; HATAKKA, J.; HELIASZ, M.; HENSEN, A.; HERMANSSEN, O.; HINTSA, E.; HOLST, J.; JAFFE, D.; JOUBERT, W.; KARION, A.; KAWA, S. R.; KEELING, R.; KERONEN, P.; KOLARI, P.; KOMINKOVA, K.; KORT, E.; KRUMMEL, P.; KUBISTIN, D.; LABUSCHAGNE, C.; LANGENFELDS, R.; LAURENT, O.; LAURILA, T.; LAUVAUX, T.; LAW, B.; LEE, J.; LEHNER, I.; LEUENBERGER, M.; LEVIN, I.; LEVULA, J.; LIN, J.; LINDAUER, M.; LOH, Z.; LOPEZ, M.; MACHIDA, T.; MAMMARELLA, I.; MANCA, G.; MANNING, A.; MANNING, A.; MAREK, M. V.; MARTIN, M. Y.; MATSUEDA, H.; MCKAIN, K.; MEIJER, H.; MEINHARDT, F.; MERCHANT, L.; MIHALOPOULOS, N.;

MILES, N.; MILLER, J. B.; MILLER, C. E.; MITCHELL, L.; MONTZKA, S.; MOORE, F.; MORGAN, E.; MORGUI, JOSEP-ANTON; MORIMOTO, S.; MUNGER, B.; MYHRE, C.L.; MÖLDER, M.; MÜLLER-WILLIAMS, J.; NECKI, J.; NEWMAN, S.; NICHOL, S.; NIWA, O'DOHERTY, S.; PAPLAWSKY, B.; PEISCHL, J.; PELTOLA, O.; PICHON, J. M.; PIPER, S.; PLASS-DUELMER, C.; RAMONET, M.; RAMOS, R.; REYES-SANCHEZ, E.; RICHARDSON, S.; RIRIS, H.; RIVAS, P. P.; RYERSON, T.; SAITO, K.; SARGENT, M.; SAWA, Y.; SAY, D.; SCHEEREN, B.; SCHMIDT, M.; SCHUMACHER, M.; SHA, M. K.; SHEPSON, P.; SHOOK, M.; SLOOP, C. D.; SMITH, P.; STEINBACHER, M.; STEPHENS, B.; SWEENEY, C.; TANS, P.; THONING, K.; TORN, M.; TRISOLINO, P.; TURNBULL, J.; TØRSETH, K.; VERMEULEN, A.; VINER, B.; VITKOVA, G.; WALKER, S.; WEYRAUCH, D.; WOFSY, S.; WORTHY, D.; YOUNG, D.; ZIMNOCH, M.; DINTHER, D. V.; BULK P. (2020): Multi-laboratory compilation of atmospheric carbon dioxide data for the period 1957-2019; obspack_co2_1_GLOBALVIEWplus_v6.0_2020-09-11; NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Laboratory. <http://doi.org/10.25925/20200903>.

SOARES, J.; OLIVEIRA, A. P.; SKIELKA, U. T.; SERVAIN, J. (2009). O ar In: O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos da Estação Científica ed.Brasília, DF : SECIRM, p. 37-44.

TANS, Pieter; KEELING, Ralph (Ed.). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide: Annual Mean Growth Rate for Mauna Loa, Hawaii. 2019. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gr.html>>. Acesso em: 05 jun. 2016.

TANS, Pieter; ZHAO, Conglong; KITZIS, Duane. **The WMO Mole Fraction Scales for CO₂ and other greenhouse gases, and uncertainty of the atmospheric measurements**. Jena (germany): Global Monitoring Laboratory Earth System Research Laboratories, 2009. 6 p. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccl/co2report.html>. Acesso em: 27 maio 2020.

WATSON, Andrew J.; SCHUSTER, Ute; SHUTLER, Jamie D.; HOLDING, Thomas; ASHTON, Ian G. C.; LANDSCHÜTZER, Peter; WOOLF, David K.; GODDIJN-MURPHY, Lonneke. Revised estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory. **Nature Communications**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 1-6, 4 set. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-18203-3>.

WU, L., Hasekamp, O., Hu, H., Landgraf, J., Butz, A., aan de Brugh, J., Aben, I., Pollard, D. F., Griffith, D. W. T., Feist, D. G., Koshelev, D., Hase, F., Toon, G. C., Ohyama, H., Morino, I.,

Notholt, J., Shiomi, K., Iraci, L., Schneider, M., de Mazière, M., Sussmann, R., Kivi, R., WARNEKE, T.; GOO, T.-Y.; TÉ, Y. Carbon dioxide retrieval from OCO-2 satellite observations using the RemoTeC algorithm and validation with TCCON measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 3111-3130, <https://doi.org/10.5194/amt-11-3111-2018>, 2018.

WU, Lianghai; HASEKAMP, Otto; HU, Haili; LANDGRAF, Jochen; BUTZ, Andre; BRUGH, Joost Aan de; ABEN, Ilse; POLLARD, Dave F.; GRIFFITH, David W. T.; FEIST, Dietrich G.. Carbon dioxide retrieval from OCO-2 satellite observations using the RemoTeC algorithm and validation with TCCON measurements. **Atmospheric Measurement Techniques**, [s.l.], v. 11, n. 5, p. 3111-3130, 30 maio 2018. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-11-3111-2018>.

WUNCH, Debra; WENNERBERG, Paul O.; OSTERMAN, Gregory; FISHER, Brendan; NAYLOR, Bret; ROEHL, Coleen M.; O'DELL, Christopher; MANDRAKE, Lukas; VIATTE, Camille; KIEL, Matthäus; GRIFFITH, D. WT.; DEUTSCHER, N. M.; VELAZCO, V. A.; NOTHOLT J.; WARNEKE, T.; PETRI, C.F; MAZIERE, M.; SHA, MAHESH K.; SUSSMANN, R.; RETTINGER, M.; POLLARD, D.; ROBINSON, J.; MORINO, I.; UCHINO O.; HASE F.; BLUMENSTOCK, T.; FEIST, D. G.; ARNOLD, S. G.; STRONG, K.; MENDONCA, J.; KIVI, R.; HEIKKINEN, P.; IRACI, L.; PODOLSKE, J.; HILLYARD, P. W.; KAWAKAMI, S.; DUBEY, M. K.; PARKER, H. A.; SEPULVEDA, E.; GARCÍA, O. E.; TE, YAO; JESECK, PASCAL; GUNSON, M.R.; CRISP, D.; ELDERING, A. Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO₂ measurements with TCCON. **Atmospheric Measurement Techniques**, [s.l.], v. 10, n. 6, p. 2209-2238, 13 jun. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-10-2209-2017>.

YOKOTA, T.; YOSHIDA, Y.; EGUCHI, Nawo; OTA, Y.; TANAKA, T.; WATANABE, H.; MAKSYUTOV, Shamil. (2009). Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results. *SOLA*. 5. 160-163. 10.2151/sola.2009-041.

YUEN, Karen; HANSON, Heather; CRISP, Crisp. Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2). *Watching the Earth Breathe. Observing CO₂ from Space*. NASA, 2014. Disponível em: <https://eospsso.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/publications/OCO-2MissionBrochure_final_508_0.pdf> Acesso: 18 maio 2019.

ZHENG, Tao; NASSAR, Ray; BAXTER, Martin. Estimating power plant CO₂ emission using OCO-2 XCO₂ and high resolution WRF-Chem simulations. **Environmental Research**

Letters, [s.l.], v. 14, n. 8, p.1-12, 22 jul. 2019. IOP Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab25ae>.