



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Oceanografia

Thiago Veloso Franklin

**Balço de CO₂ no Atlântico Equatorial Oeste:
efeitos biológicos e de temperatura**

Rio de Janeiro

2022

Thiago Veloso Franklin

Balço de CO₂ no Atlântico Equatorial Oeste: efeitos biológicos e de temperatura

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Acidificação dos oceanos.

Orientadora: Prof.^a Dra. Letícia Cotrim da Cunha

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

F831 Franklin, Thiago Veloso.
Balço de CO₂ no Atlântico Equatorial Oeste: Efeitos Biológicos e de
Temperatura / Thiago Veloso Franklin. – 2022.
53 f.: il.

Orientadora: Leticia Cotrim da Cunha.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Oceanografia.

1. Meio ambiente – Teses. 2. Efeitos biológicos - temperatura - Teses.
3. Atlântico Equatorial Oeste – Teses. 4. Estudo de séries temporais -
Teses. I. Cunha, Leticia Cotrim da. II. Universidade do Estado do Rio de
Janeiro. Faculdade de Oceanografia. III. Título.

CDU 551.588

Bibliotecária responsável: Priscila Freitas Araujo / CRB-7: 6390

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta
dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Thiago Veloso Franklin

Balanço de CO₂ no Atlântico Equatorial Oeste: efeitos biológicos e de temperatura

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Acidificação dos oceanos.

Aprovada em 22 de fevereiro de 2022.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Letícia Cotrim da Cunha

Faculdade de Oceanografia - UERJ

Banca Examinadora:

Prof. Dr.^a. Luana Queiroz Pinho

Faculdade de Oceanografia - UERJ

Prof. Dr. Humberto Marotta Ribeiro

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr.^a. Gleyci Aparecida Oliveira Moser

Faculdade de Oceanografia - UERJ (suplente)

Prof. Dr. Rodrigo Kerr Duarte Pereira

Universidade Federal do Rio Grande (suplente)

Rio de Janeiro

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que sempre incentivou e encorajou minha jornada em todos os processos, dando suporte para que eu conseguisse caminhar até aqui.

À minha orientadora Leticia, que confiou a oportunidade de desenvolver esse trabalho e se mostrando sempre presente para direcionar aos melhores resultados.

Aos meus amigos que acompanharam todas as etapas desse projeto e sempre me fizeram acreditar, mesmo quando eu era o único a duvidar.

A meus colegas de laboratório, pelas trocas que tivemos ao longo desse período, mesmo que limitadas pela situação atual, foram muito importantes para o desenvolvimento do projeto.

Ao Capes pelo auxílio com a bolsa de estudos.

E ao PPGOCN, por todos os ensinamentos ao longo dessa etapa e a oportunidade de continuar trilhando minha jornada acadêmica, agora no doutorado.

RESUMO

FRANKLIN, Thiago Veloso. *Balanço de CO₂ no Atlântico Equatorial Oeste: efeitos biológicos e de temperatura*. 2022. 53 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A região do Atlântico Tropical Oeste apresenta uma complexa dinâmica de CO₂, tornando a área um importante foco de estudo para as variações temporais e sazonais do gás. Este estudo buscou avaliar os efeitos biológicos (pCO_{2 bio}) e de temperatura (pCO_{2 temp}) sobre a pressão parcial de CO₂ (pCO₂) ao longo de uma série temporal dentre os anos de 1991 e 2019. A partir dos dados SOCAT de pCO₂ de águas oceânicas superficiais foram normalizados os dados observados para chegar na parcela de pCO₂ regida pelos efeitos biológicos e de temperatura. A presença das águas oriundas da pluma do Rio Amazonas na região favorece a atividade biológica, se tornando peça fundamental na dinâmica de CO₂ local. Os setores com influência da pluma apresentaram maior relação entre a pCO_{2 bio} e a pCO₂ observada, enquanto a pCO_{2 temp} não apresentou diferença entre os setores e apresentou maiores similaridades com a pCO₂ observada nos setores não influenciados pela pluma. A pCO₂ apresenta um crescimento anual de 2,440 µatm a⁻¹.

Palavras-chave: pCO₂; pluma do Rio Amazonas; SOCAT; série temporal.

ABSTRACT

FRANKLIN, Thiago Veloso. *CO₂ Balance in the Western Equatorial Atlantic: biological and temperature effects*. 2022. 53 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

The western tropical Atlantic region exhibits complex CO₂ dynamics, making the area an important focus of study for temporal and seasonal variations of the gas. This study sought to assess biological (pCO₂ bio) and temperature (pCO₂ temp) effects on CO₂ partial pressure (pCO₂) over a time series between the years 1991 and 2019. From SOCAT data of pCO₂ from surface ocean waters, the observed data were normalized to arrive at the portion of pCO₂ governed by biological and temperature effects. The presence of the waters coming from the Amazon River plume in the region favors the biological activity, becoming a fundamental part in the local CO₂ dynamics. The sectors influenced by the plume showed a higher relationship between the bio pCO₂ and the observed pCO₂, while the temp pCO₂ showed no difference among the sectors and showed greater similarities with the pCO₂ observed in the sectors not influenced by the plume. The pCO₂ presents an annual growth of 2.440 μatm a⁻¹.

Keywords: pCO₂; Amazon River plume; SOCAT; time series.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Reações envolvendo CO_2 e íons carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^{-1}) na água do mar.....	14
Figura 2 –	Fluxo de CO_2 entre diferentes compartimentos e sua média de transferência em GtC/ano.....	15
Figura 3 –	Curva de Keeling. Médias mensais de concentração de CO_2 atmosférico.....	16
Figura 4 –	Posição média da ZCIT em janeiro e em julho.....	19
Figura 5 –	Média mensal de vazão e transporte da pluma do Amazonas e da CNB (Corrente Norte do Brasil)	20
Figura 6 –	Médias de salinidade da pluma amazônica sobre o Atlântico.....	20
Figura 7 –	Esquema de circulação oceânica, demarcando as correntes superficiais e subsuperficiais do Atlântico Tropical.....	23
Figura 8 –	Mapa de setorização e distribuição dos dados na região de estudo.....	24
Figura 9 –	Mapa de superfície, a partir dos dados SOCAT.....	27
Figura 10 –	Boxplot dos valores de pCO_2 , $\text{pCO}_2_{\text{bio}}$ e $\text{pCO}_2_{\text{temp}}$ para a região do ATO.....	28
Figura 11 –	Série temporal dos dados de pCO_2 , $\text{pCO}_2_{\text{temp}}$ e $\text{pCO}_2_{\text{bio}}$ para a região do ATO.....	29
Figura 12 –	Série temporal dos dados de pCO_2 , $\text{pCO}_2_{\text{temp}}$ e $\text{pCO}_2_{\text{bio}}$ para o período de máximo e mínimo transporte da pluma do Rio Amazonas..	30
Figura 13 –	Boxplot dos valores de pCO_2 , $\text{pCO}_2_{\text{bio}}$ e $\text{pCO}_2_{\text{temp}}$ para o setor PA.....	31
Figura 14 –	Série temporal dos dados de pCO_2 , $\text{pCO}_2_{\text{temp}}$ e $\text{pCO}_2_{\text{bio}}$ para o setor PA.....	32
Figura 15 –	Boxplot dos valores de pCO_2 , $\text{pCO}_2_{\text{bio}}$ e $\text{pCO}_2_{\text{temp}}$ para o setor CNE...	33
Figura 16 –	Série temporal dos dados de pCO_2 , $\text{pCO}_2_{\text{temp}}$ e $\text{pCO}_2_{\text{bio}}$ para o setor CNE.....	34
Figura 17 –	Boxplot dos valores de pCO_2 , $\text{pCO}_2_{\text{bio}}$ e $\text{pCO}_2_{\text{temp}}$ para o setor CCNE.	35
Figura 18 –	Série temporal dos dados de pCO_2 , $\text{pCO}_2_{\text{temp}}$ e $\text{pCO}_2_{\text{bio}}$ para o setor CCNE.....	36
Figura 19 –	Boxplot dos valores de pCO_2 , $\text{pCO}_2_{\text{bio}}$ e $\text{pCO}_2_{\text{temp}}$ para o setor CSE....	37

Figura 20 – Série temporal dos dados de $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ e $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ para o setor CSE.....	38
Figura 21 – Gráficos de tendência para os valores de T e B para a região do ATO.	39
Figura 22 – Gráficos de tendência para os valores de T e B para cada setor.....	40
Figura 23 – Série temporal de $f\text{CO}_2$	42
Figura 24 – Variação sazonal dos efeitos biológicos e de temperatura da $p\text{CO}_2$	44
Figura 25 – Mapa superficial de $\Delta p\text{CO}_2$	45
Figura 26 – Gráfico de tendência da variação temporal do $\Delta p\text{CO}_2$	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- p-valor de Anderson-Darling.....	28
Tabela 2 - Estatística de tendência dos dados de pCO ₂ no tempo para a região do ATO.....	29
Tabela 3- Estatística de tendência dos dados de pCO ₂ , pCO _{2 temp} e pCO _{2 bio} para a região do ato nos períodos de máximo e mínimo transporte da pluma do Rio Amazonas.....	30
Tabela 4- Estatística de tendência dos dados de pCO ₂ no tempo para o setor PA	32
Tabela 5- Estatística de tendência dos dados de pCO ₂ no tempo para o setor CNE.....	33
Tabela 6 - Estatística de tendência dos dados de pCO ₂ no tempo para o setor CCNE.....	35
Tabela 7- Estatística de tendência dos dados de pCO ₂ no tempo para o setor CSE	37
Tabela 8- Estatística de tendência dos valores de T e B no tempo para a região do ATO.....	39
Tabela 9- Estatística de tendência dos dados de T e B para a região do ATO	40
Tabela 10 - t-valor da relação de T comparando a diferença significativa entre cada setor. ...	41
Tabela 11- t-valor da relação de B comparando a diferença significativa entre cada setor.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATO	Atlântico Tropical Oeste
B	Variação sazonal dos efeitos biológicos
CB	Corrente do Brasil
CCNE	Contracorrente Norte Equatorial
CNB	Corrente Norte do Brasil
CNE	Corrente Norte Equatorial
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₃ ⁻²	Carbonato
CO ₃ ⁺²	Íons carbonato
CSE	Corrente Sul Equatorial
fCO ₂	Fugacidade de CO ₂
H ₂ CO ₃	Ácido carbônico
HCO ⁻³	Íons bicarbonato
pCO ₂	Pressão parcial de CO ₂
pCO _{2 bio}	Parcela dos efeitos biológicos sobre a pCO ₂
pCO _{2 temp}	Parcela dos efeitos de temperatura sobre a pCO ₂
pCO _{2 med}	Pressão parcial de CO ₂ média
pCO _{2 obs}	Pressão parcial de CO ₂ observada
SCNB	Subcorrente Norte do Brasil
SOCAT	Surface Ocean Carbon Atlas
SOOP	Ships of Opportunity
T	Variação sazonal dos efeitos de temperatura
xCO ₂	Fração molar de CO ₂
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ΔpCO ₂	Diferença entre a pCO ₂ atmosférica e a pCO ₂ oceânica

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1 OBJETIVOS	13
1.1 Geral.....	13
1.2 Específicos	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Dióxido de carbono (CO ₂).....	14
2.2 Pressão parcial de CO ₂ (pCO ₂)	16
2.3 Fugacidade do CO ₂ (fCO ₂)	17
2.4 Efeitos biológicos	17
2.5 Efeitos de temperatura.....	17
2.6 Zona de convergência intertropical (ZCIT).....	18
2.7 Pluma do Rio Amazonas	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 Área de estudo.....	22
3.2 Dados SOCAT.....	24
3.3 Cálculo dos parâmetros	25
3.4 Tratamento Estatístico	26
4 RESULTADOS	27
5 DISCUSSÃO	42
CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	50

INTRODUÇÃO

O aumento das emissões de CO₂ antropogênicas para a atmosfera vem causando cada vez mais preocupação e chamando sempre a atenção da comunidade científica para melhor compreender e estimar sua dinâmica e projeções para o futuro (ALLEN et al., 2009; SABINE et al., 2004). Por apresentarem uma extensa área de contato na superfície da Terra, os oceanos e a atmosfera estão constantemente trocando gases, entre esses o CO₂. Conseqüentemente, com o aumento da concentração atmosférica deste gás, temos um aumento das concentrações do gás também nos oceanos, na forma dissolvida (TAKAHASHI; SUTHERLAND, 2017).

Ao entrar em contato com a água, o CO₂ reage formando ácido carbônico, que, por conseguinte libera íons H⁺ na água, reduzindo o pH e a disponibilidade de íons carbonato (CO₃⁺²) e gerando o efeito conhecido como acidificação dos oceanos (RÍOS et al., 2015), uma das grandes preocupações atuais quando se fala dos efeitos do CO₂ em Oceanografia (LEFÈVRE et al., 2016). Além de mudanças na química da água, como vemos com o pH, esse aumento na concentração de carbono também tem influência na biota marinha, em especial em organismos formadores de carapaças de carbonato de cálcio (BAKKER et al., 2016; RÍOS et al., 2015; TAKAHASHI; SUTHERLAND, 2017)

As trocas entre o oceano e a atmosfera se dão de forma desigual, ou seja, em algumas regiões os oceanos atuam como um sumidouro para o CO₂ atmosférico, porém em outras o oceano emite CO₂ para a atmosfera. A região tropical no oceano é comumente classificada como uma fonte de CO₂ para a atmosfera, já que a sua temperatura elevada e a presença de grande área de ressurgência na região equatorial fazem com que as águas apresentem maiores concentrações do gás em relação à atmosfera, permitindo a troca (ANDRIÉ et al., 1986; LANDSCHÜTZER et al., 2014). Porém, quando olhamos a porção oeste do Atlântico Tropical, nós temos um importante fator que influencia na dinâmica do CO₂: a pluma do rio Amazonas. As águas oriundas do rio apresentam uma grande carga de nutrientes, que, quando desaguam nas águas oligotróficas do oceano, tendem a favorecer a produção primária, consumindo boa parte do CO₂ presente na água, fazendo com que a área influenciada pela pluma apresente capacidade de absorver o CO₂ atmosférico (COOLEY et al., 2007; LEFÈVRE; DIVERRÉS; GALLOIS, 2010; MAYORGA et al., 2005). A complexa circulação de correntes superficiais auxilia na dispersão das águas da pluma do rio para as águas oceânicas, alterando a salinidade e a solubilidade do CO₂ ao longo da região (BRUTO et al., 2017; GRUBER et al., 2009).

A circulação superficial é regida principalmente pela presença de quatro correntes principais, sendo essas a Corrente Norte Equatorial (CNE), Contracorrente Norte Equatorial (CCNE), Corrente Sul Equatorial (CSE) e a Corrente Norte do Brasil (CNB). A CNB segue margeando a norte da costa brasileira e recebe diretamente a influência do rio Amazonas ao cruzar a área de desembocadura, e por fim temos a CCNE seguindo em sentido leste, entre a CNE e CSE (STRAMMA; SCHOTT, 1999). Durante o período de verão boreal, quando temos a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) mais a norte, a CNB apresenta uma retroflexão que alimenta a CCNE, estendendo a área de alcance das águas da pluma (URBANO; DE ALMEIDA; NOBRE, 2008).

A influência de uma das principais fontes de água doce para águas oceânicas é um fator que altera a dinâmica do CO₂ na região, uma vez que esse muda as características físico-químicas na área de mistura por onde a pluma se estende, já que a queda na salinidade aumenta a solubilidade deste gás na superfície do oceano (COOLEY et al., 2007; IBÁÑHEZ; ARAUJO; LEFÈVRE, 2016; LEFÈVRE; DIVERRÉS; GALLOIS, 2010; MAYORGA et al., 2005; TERNON et al., 2000). Dessa forma, compreender os efeitos biológicos e de temperatura na região, pode ser uma chave para entender a dinâmica do CO₂ e identificar até onde o aporte de nutrientes e o aumento da produção primária influenciam as mudanças nas concentrações de CO₂ e onde os efeitos físicos têm maior influência. Regiões subtropicais costumam apresentar uma predominância dos efeitos de temperatura, enquanto parte da região subártica, especialmente no Norte do Pacífico, apresentam um balanço mais complexo com predomínio dos efeitos biológicos sobre o CO₂ (TAKAHASHI et al., 2002). Porém pouco ainda se sabe a respeito da dinâmica para a região tropical, em especial a região de estudo desse trabalho, que conta com um aporte de nutrientes que pode alterar a dinâmica na região.

1 OBJETIVOS

1.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os efeitos e influências de processos biológicos e de temperatura sobre a pressão parcial de CO₂ (pCO₂) nas águas superficiais da região equatorial oeste do oceano Atlântico.

1.2 Específicos

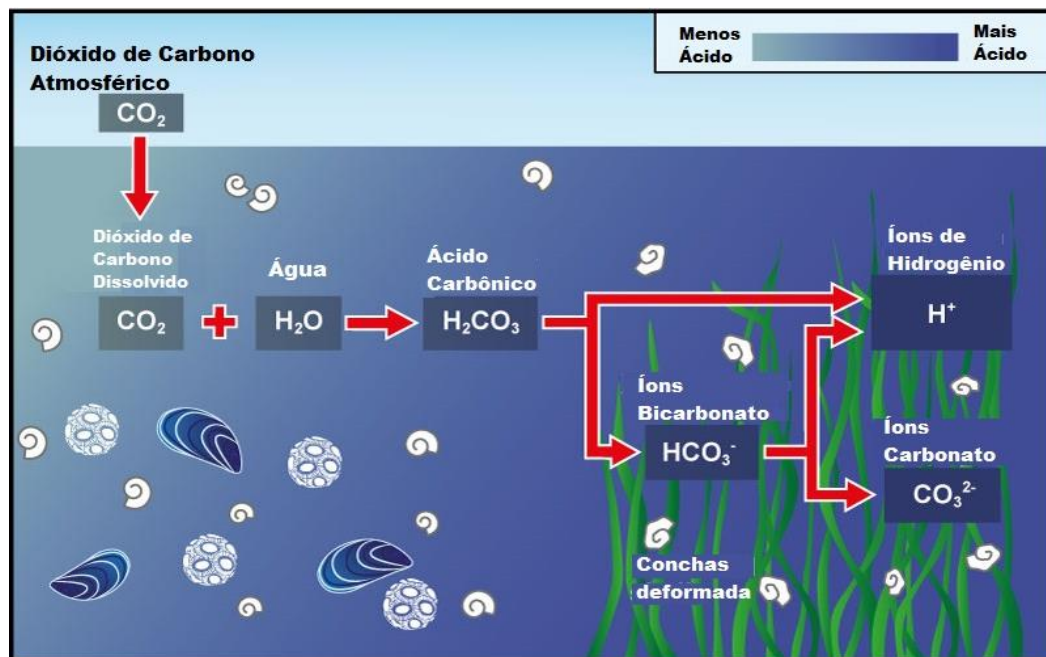
- Estimar a sazonalidade dos efeitos biológicos e de temperatura sobre a pCO₂ na superfície do oceano na região do Atlântico Equatorial Oeste.
- Avaliar uma série temporal entre os anos de 1991 e 2019 e observar a tendência desses efeitos sobre a pCO₂ na superfície do oceano nos últimos trinta anos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais compostos do ciclo do carbono global, estando presente em diversos compartimentos (atmosfera, oceano, solo e biota) e estando em constantemente fluxo entre eles (MARTINS et al. 2003). As trocas do CO₂ entre o oceano e a atmosfera se dão do meio mais concentrado para o de menor concentração, buscando o equilíbrio. Quando injetado no mar, o CO₂ reage com a água gerando ácido carbônico (H₂CO₃), que por sua vez se dissocia nas formas bicarbonato (HCO₃⁻) e carbonato (CO₃²⁻) liberando íons H⁺ na água (Figura 1).

Figura 1: Reações envolvendo CO₂ e íons carbonato (CO₃²⁻) e bicarbonato (HCO₃⁻) na água do mar, indicando seu impacto no pH e em organismos formadores de conchas carbonáticas



Fonte: PLM, 2003.

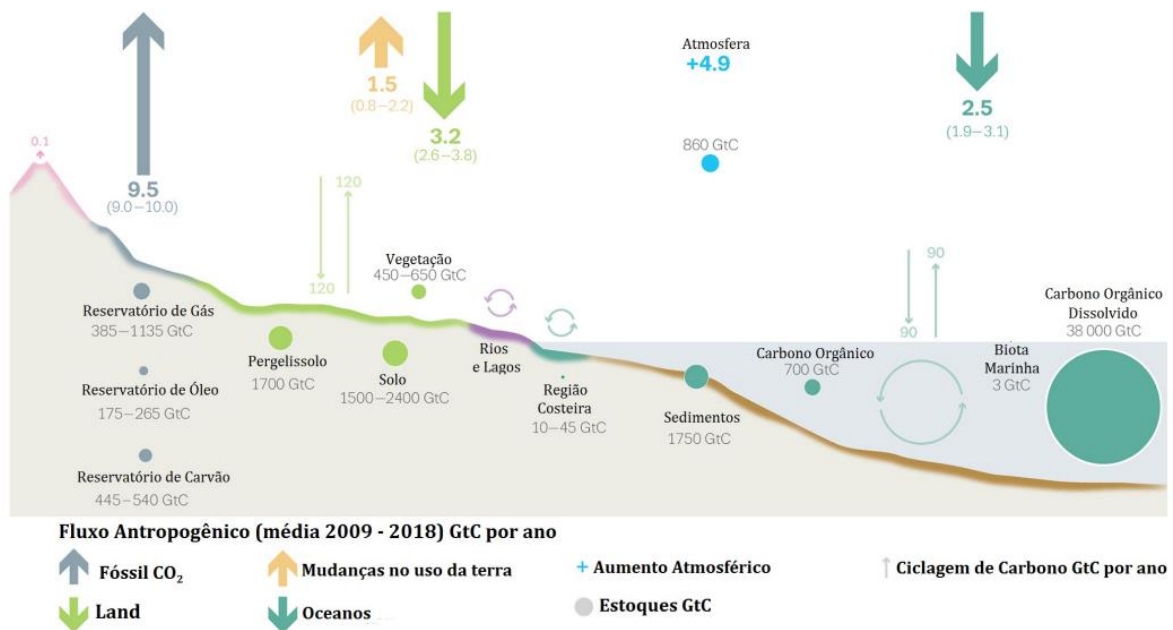
O carbono apresenta “sub-ciclos” com diferentes escalas de tempo e regidos por processos distintos. Entre eles o ciclo biológico, que acontece diariamente, no qual o CO₂ é incorporado pelos organismos fotossintetizantes e emitido através da respiração (DUCKLOW; STEINBERG; BUESSELER, 2001; HONJO et al., 2014). Apresentando uma

escala de tempo intermediária temos a bomba físico-química, que incorpora o CO₂ em regiões polares, as águas frias que favorecem a solubilidade do gás e a densidade dessas águas resulta numa subducção delas, injetando esse CO₂ em águas profundas, onde pode levar até centenas de anos para ciclagem (AÍMOLA; ALBUQUERQUE, 2016; TURNER; OVERLAND; WALSH, 2007). Por fim, o ciclo geológico ocorre numa escala de milhões de anos, aprisionando a maior parte do carbono do planeta em forma de combustível fóssil em rochas sedimentares (VALERO et al., 2016). Com a extração desse combustível armazenado na litosfera para a geração de energia, foi sendo retirado esse carbono de uma escala geológica e o reintroduzindo em uma escala diária, esse chamamos de CO₂ antropogênico, visto que sem a ação do homem ele não se encontraria no sistema.

Desde o início da Era Industrial, no final do século XVIII, as taxas de emissão desse carbono em forma de CO₂ para a atmosfera vem aumentando as concentrações do gás no ar, as concentrações de CO₂ atmosférico variaram de 277, em 1750, para 412,45 em 2020 (FRIEDLINGSTEN et al., 2021).

Figura 2: Fluxo de CO₂ entre diferentes compartimentos e sua média de transferência em GtC/ano.

Ciclo do Carbono

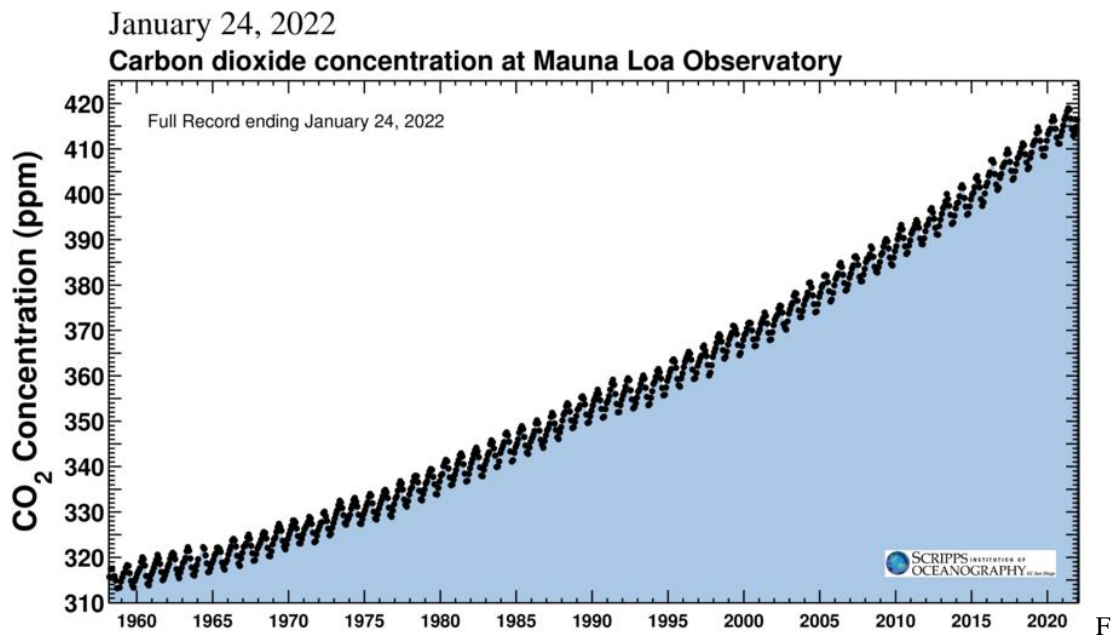


Fonte: FRIEDLINGSTEIN et al , 2019. Adaptada pelo autor, 2022.

Pales & Keeling (1965) realizaram, em 1958, no Observatório de Mauna Loa–Hawaii o primeiro registro do crescimento da concentração CO₂ na atmosfera. Ao longo dos anos as medições contínuas de CO₂ alimentam a chamada Curva de Keeling (Figura 3), onde vemos a

variação sazonal das concentrações do CO₂ atmosférico e a sua tendência positiva ao longo dos anos. Os oceanos apresentam a capacidade de captura de 30% do CO₂ atmosférico, e cerca de 50% permanece acumulado na atmosfera (LE QUÉRÉ et al, 2016). Dois processos atuam controlando as concentrações do gás na água, sendo essas as responsáveis pelo aprisionamento do mesmo, o biológico, onde os organismos assimilam CO₂ para geração de biomassa durante o processo de fotossíntese e com sua morte decantam e sedimentam no fundo do oceano, e o físico, pelo qual o CO₂, incorporado a uma massa d'água pelo efeito de solubilidade, controlado principalmente pela temperatura, em região de subsidência, afunda e é aprisionado na mesma, seguindo pela circulação termohalina até uma região de ressurgência (ROY-BARMAN; JEANDEL, 2016).

Figura 3: Curva de Keeling. Médias mensais de concentração de CO₂ atmosférico.



Fonte: UCSANDIEGO, 2022.

2.2 Pressão parcial de CO₂ (pCO₂)

Uma das formas de indicar as concentrações de CO₂, a pressão parcial representa a pressão exercida pela fração molar do gás no meio (WEISS, 1996). Uma maneira de se medir a pCO₂ é através de sistemas automáticos a bordo de navios que realizam leitura contínua da fração molar de CO₂, tanto na água quanto na atmosfera, podendo assim estipular a pCO₂ a

partir da relação entre a fração molar e a pressão (equação 1), onde $p(\text{ar})$ representa a pressão atmosférica e $p(\text{H}_2\text{O})$ a pressão parcial do vapor d'água. Como um componente do sistema carbonato, a $p\text{CO}_2$ apresenta relação com os demais parâmetros, podendo ser calculada indiretamente a partir de valores de AT e DIC (BONOU et al., 2016).

$$p\text{CO}_2 = x\text{CO}_2 * (p(\text{ar}) - p(\text{H}_2\text{O})) \quad (1)$$

2.3 Fugacidade do CO_2 ($f\text{CO}_2$)

Outra das formas de se indicar as concentrações de CO_2 , a fugacidade é uma correção, realizada por alguns autores, nos valores de fração molar de CO_2 . Essa correção é proposta pelo fato de o CO_2 não se comportar como um gás ideal segundo a Lei de Henry. Bonou (2016) diz que a $f\text{CO}_2$ é cerca de 3 a 4% menor que a $p\text{CO}_2$, e a relação entre esses pode ser dada pela seguinte equação (2) (TAKAHASHI, T., SUTHERLAND, S & KOZYR, A, 2012).

$$p\text{CO}_2 = f\text{CO}_2 * (1,00436 - 4,66910 \cdot 10^{-5} \text{SST}) \quad (2)$$

2.4 Efeitos biológicos

Os efeitos biológicos são os processos e etapas dentro do ciclo do carbono que são regidos por atividade biológica, entre eles temos a produção de biomassa pelo processo de fotossíntese, a respiração, a absorção de CO_2 para formação de carapaça ou outras estruturas calcárias (TAKAHASHI et al., 2002).

2.5 Efeitos de temperatura

São tidos como efeitos de temperatura os processos nos quais a temperatura influencia dentro do ciclo do carbono e nas suas trocas entre sistemas, a solubilidade do gás na água é dada em função da temperatura da água (Equação 3), onde teremos maior solubilidade em águas frias e mais volatilidade em águas quentes (TURNER; OVERLAND; WALSH, 2007;

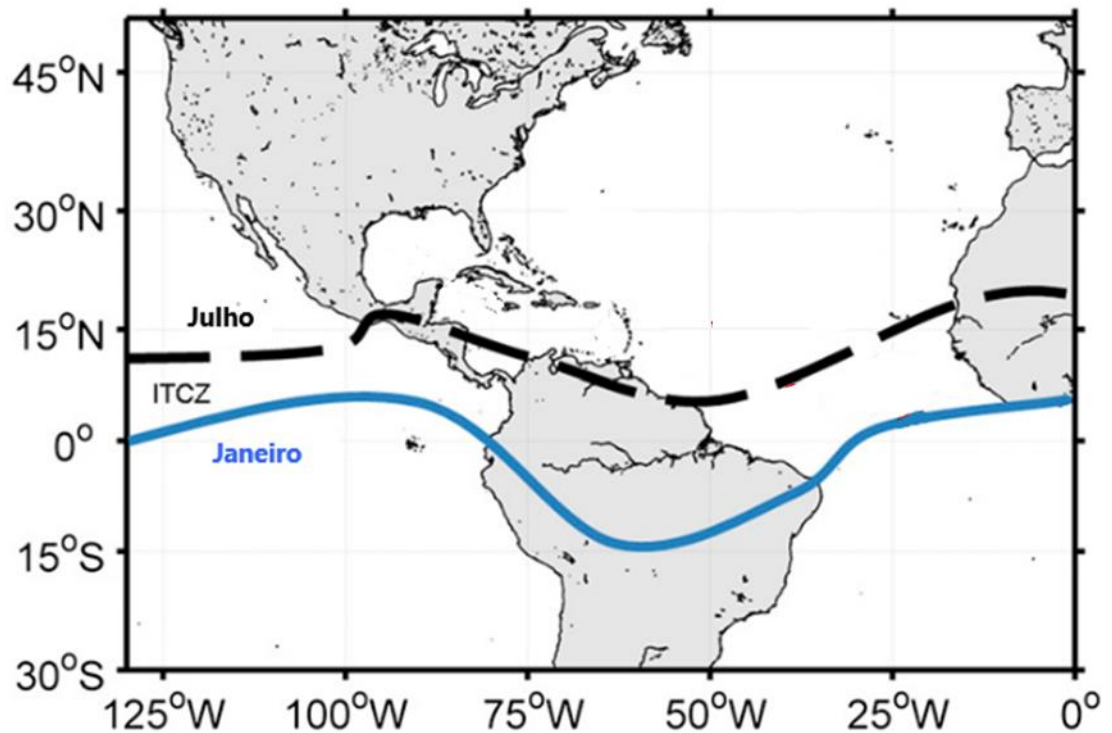
WEISS, 1974). Dessa forma a incidência solar na região, as trocas de temperatura na coluna d'água e com a atmosfera, são fatores importantes e responsáveis pelo nosso efeito de temperatura sobre o CO₂ (TAKAHASHI et al., 2002).

$$S_{CO_2} = 58,0931 + 90,5069 (100/T) + 22,2940 \cdot \ln (T/100) + S [0,027766 - 0,025888(T/100) + 0,0050578(T/100)^2] \quad (3)$$

2.6 Zona de convergência intertropical (ZCIT)

Composta pela convergência dos ventos alísios de nordeste com os ventos alísios de sudeste, a ZCIT se caracteriza como uma faixa de baixa pressão e alta instabilidade, com precipitação (VAREJÃO-SILVA, 2005; GBKPO, 2015). A ZCIT apresenta variação sazonal em seu posicionamento, indo de 5S a 15N. Essa variação será forçada pela transferência de calor entre a superfície e a atmosfera e a intensidade dos ventos, como no HN temos uma maior porção continental, sua tendência é atuar majoritariamente sobre o mesmo (VAREJÃO-SILVA, 2006; HOUNSOU-GBO et al., 2015; XIE; SAITO, 2001). A posição da ZCIT tende a modificar a temperatura e salinidade superficial do mar (TSM e SSM), visto o aporte de água doce gerado pela sua precipitação, apresentando um aumento no gradiente de anomalias de TSM (HOUNSOU-GBO et al., 2015).

Figura 4: Posição média da ZCIT em janeiro (linha cheia azul - verão austral) e em julho (linha tracejada preta - inverno austral).

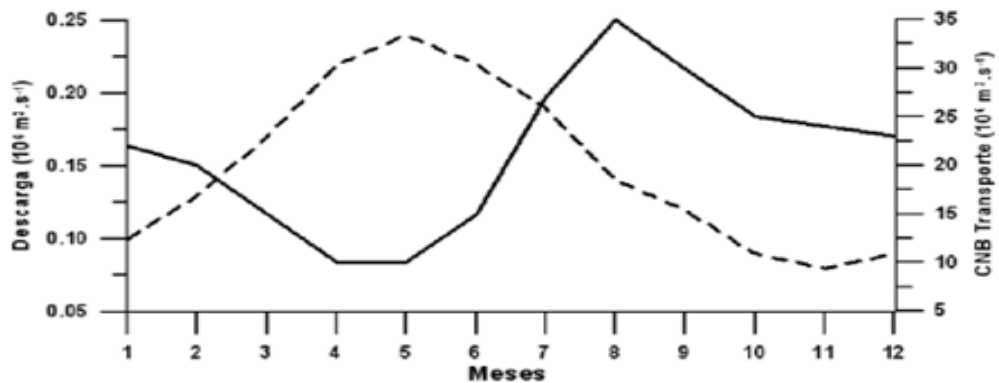


Fonte: TAYLOR et al., 2012.

2.7 Pluma do Rio Amazonas

Com a maior bacia hidrográfica do mundo, o Rio Amazonas desagua diretamente no Atlântico com uma vazão média de 0,2 Sv de água doce, correspondendo a cerca de 18% da descarga global de água doce nos oceanos (NITTROUER e DE MASTER, 1986; OLTMAN, 1968; MÜLLER-KARGER et al., 1988). Sua vazão varia entre 0,08 e 0,24Sv, com seu mínimo em novembro e máximo em maio (SILVA et al., 2009), influenciando áreas entre 50km e 300km de distância de sua foz (SILVA; ARAÚJO; BOURLÈS, 2010)(Figura 5).

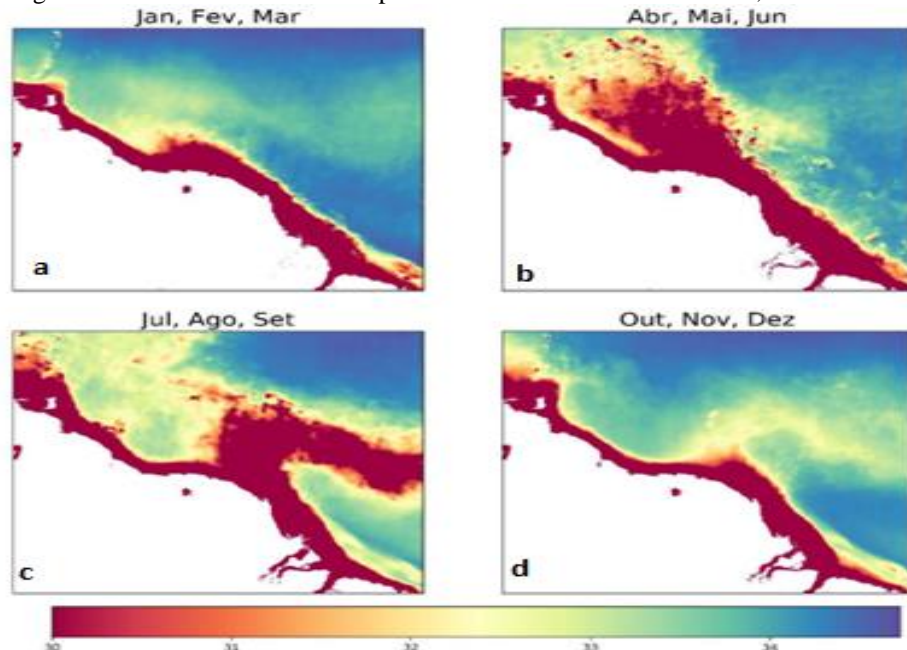
Figura 5: Média mensal de vazão e transporte da pluma do Amazonas e da CNB (Corrente Norte do Brasil). Tracejado – Descarga; Reta – Transporte.



Fonte: SILVA et al., 2009.

A pluma é transportada para noroeste pelo sistema CNB/SCNB (Subcorrente Norte do Brasil), transportando em torno de 35Sv de água em direção ao Equador (BOURLES et al., 1999; SILVA et al., 2009; STRAMMA; SCHOTT, 1999). Ao desaguar no Atlântico, modifica as características biogeoquímicas locais, alterando a temperatura, a salinidade, injetando no oceano grande quantidade de nutrientes, estimulando a produção primária na região, consumindo rapidamente o CO₂ e tornando a região um importante sumidouro para o CO₂ atmosférico (MAYORGA et al., 2005; BRUTO et al., 2017) (Figura 8).

Figura 6: Médias de salinidade da pluma amazônica sobre o Atlântico,



Nota: a) Inverno Boreal; b) Outono Boreal, vazão máxima; c) Inverno Boreal, retroflexão da CNB, pluma alcançando a CCNE; d) Primavera Boreal, vazão mínima.

Fonte: OLIVEIRA, 2018.

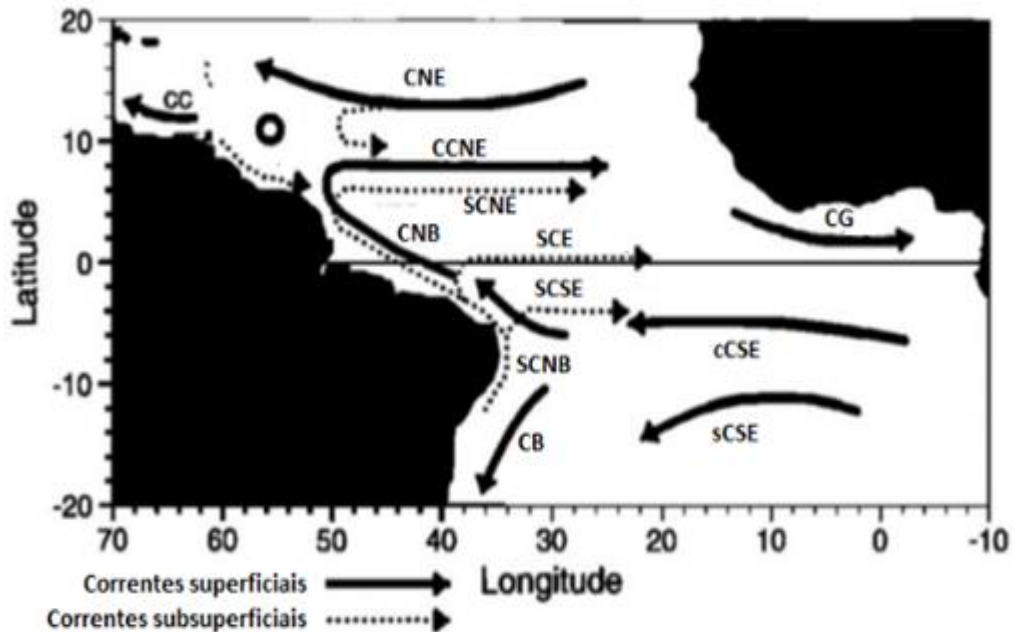
Outra forçante que atua sobre o transporte da pluma é o regime dos ventos alísios na região. Variando sazonalmente, esses ventos apresentam predominância de nordeste entre os meses de dezembro e maio, quando apresentam maior intensidade (COSTA et al. 2009). Nos demais meses, junho a novembro, temos a presença de ventos de sudeste com menor intensidade (NITTROUER; DEMASTER, 1996). Silva et al., 2007 mostra essa dinâmica do regime de ventos e compara o mesmo com a posição da ZCIT, visto que essa é formada a partir do encontro desses ventos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

Apresentando um complexo sistema de circulação, o Atlântico tropical dispõe da presença de diversas correntes superficiais e subsuperficiais. Entre as principais temos a Corrente Norte Equatorial (CNE) na faixa de 10N e a Corrente Sul Equatorial (CSE), ambas com deslocamento para oeste. Além dessas, temos a presença da Contracorrente Norte (CCNE), com deslocamento para leste. A CSE apresenta três diferentes ramos, o ramo norte (CSEn) o ramo central (CSEc) e o ramo sul (CSEs), se estendendo de 2°N, com a CSEn, até 20°S com a CSEs (MOLINARI, 1982; STRAMMA; SCHOTT, 1999). Ao chegar no continente americano a CSEs sofre uma bifurcação alimentando a Corrente do Brasil (CB) que margeia o Brasil para sul e a Corrente Norte do Brasil (CNB) que flui ao longo da margem continental para norte. Em relação às subcorrentes, estas fluem em subsuperfície a profundidades a partir de 200m e apresentam interações com as correntes superficiais. Dentre essas, temos a Subcorrente Norte do Brasil (SCNB), que segue com mesmo sentido da CNB, e, junto da mesma, alimenta a Subcorrentes Norte Equatorial (SCNE), a Subcorrente Equatorial (SCE) e a Subcorrente Sul Equatorial (SCSE) (Figura 7).

Figura 7: Esquema de circulação oceânica

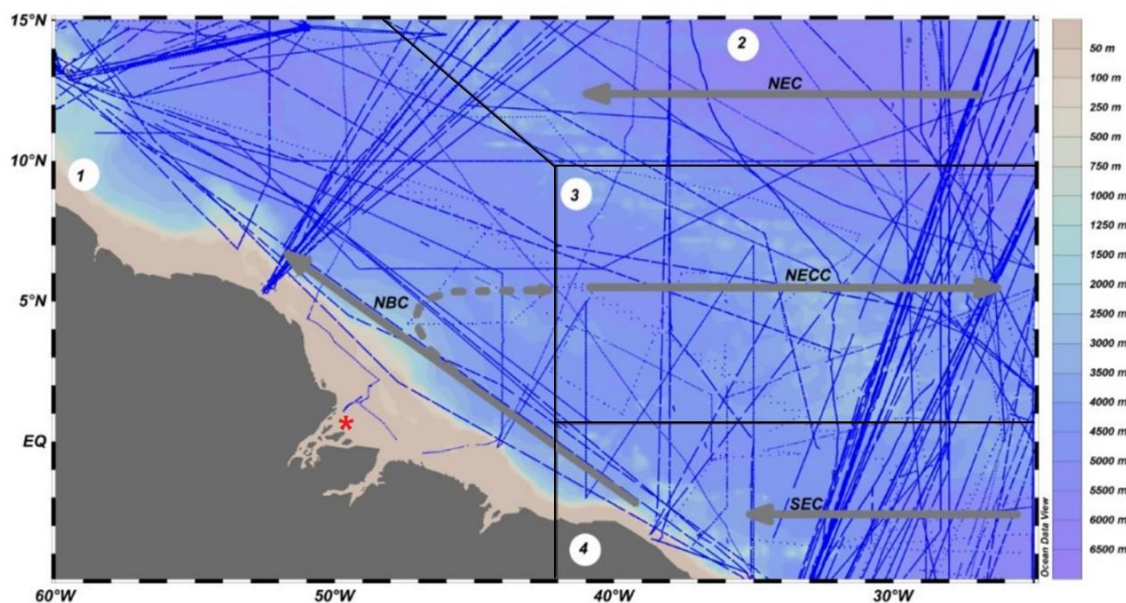


Nota: Demarcando as correntes superficiais e subsuperficiais do Atlântico Tropical. Corrente Norte Equatorial (CNE), Contracorrente Norte Equatorial (CCNE), Corrente Sul Equatorial (CSE), Corrente do Brasil (CB), Corrente Norte do Brasil (CNB), Subcorrente Norte do Brasil (SCNB), Subcorrentes Norte Equatorial (SCNE), a Subcorrente Equatorial (SCE) e a Subcorrente Sul Equatorial (SCSE).

Fonte: BOURLÈS et al., 1999. Adaptado pelo autor, 2022.

A região de estudo, o Atlântico tropical oeste, foi previamente setorizada por Bonou (2016) em quatro áreas, definidas pelas características de circulação da região. O primeiro setor foi denominado Pluma do Amazonas (PA), por receber influência direta do desague do rio, e os demais nomeados pelas correntes que as regem, sendo esses os setores Corrente Norte Equatorial (CNE), Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) e Corrente Sul Equatorial (CSE) (Figura 8). Dessa forma nós temos uma água tipicamente tropical entrando na nossa região pelos setores CSE e CNE, e ao chegar no setor PA através da CNB entra em contato com as águas oriundas do Rio Amazonas e leva essas águas até o setor CCNE por meio da retroflexão da CNB.

Figura 8: Mapa de setorização e distribuição dos dados na região de estudo.



Nota: 1 - Pluma do Amazonas; 2 - Corrente Norte Equatorial; 3 - Contracorrente Norte Equatorial; 4 - Corrente Sul Equatorial; pontos azuis – estações amostrais; * Desembocadura do Rio Amazonas.

Fonte: O autor, 2022.

3.2 Dados SOCAT

A partir de dados de $p\text{CO}_2$ disponíveis na plataforma SOCAT (Surface Ocean CO_2 Atlas), o presente estudo se desenvolve com uma análise de série temporal com o intervalo de 30 anos (1990-2019). Os dados foram obtidos na versão SOCATv2020 disponibilizada na página da plataforma SOCAT (<https://www.socat.info/index.php/data-access/>) (BAKKER et al., 2016). Os dados foram baixados no formato .odv, que já é o formato próprio para leitura dentro do programa Ocean Data View (ODV) (SCHLITZER, 2021), onde grande parte das análises deste trabalho são executadas.

Os dados “SOCAT” são um compilado de medidas in situ realizadas por diferentes navios e boias oceanográficas. A aquisição de dados se dá por equipamentos de medição contínua instalados tanto em navios de pesquisa durante comissões oceanográficas quanto em SOOPs (Ships of Opportunity), ao longo de suas trajetórias. Em ambos os casos, os sistemas de medição bombeiam águas da superfície, que passam através do equipamento que determina a fração molar de CO_2 . O sensor em infravermelho realiza a leitura da fração molar de CO_2 ($x\text{CO}_2$) no ar em equilíbrio com a água do mar que foi bombeada para um compartimento do

equipamento, sendo eventualmente descartada para o sistema interno do navio (DICKSON; SABINE; CHRISTIAN, 2007). Dentre os dados disponíveis utilizados estão temperatura, salinidade e $f\text{CO}_2$, que para realização desse trabalho foi convertido para $p\text{CO}_2$.

3.3 Cálculo dos parâmetros

Para investigar os efeitos biológicos ($p\text{CO}_2_{\text{bio}}$) e de temperatura ($p\text{CO}_2_{\text{temp}}$) sobre a $p\text{CO}_2$ na região serão aplicadas as equações propostas por Takahashi et al. (2002), onde a partir dos valores de temperatura e $p\text{CO}_2$ é estimado quais efeitos predominam na dinâmica da região. Os efeitos biológicos se dão pela equação 4, onde a partir dos dados observados de temperatura (T_{obs}) temos a estimativa da média anual (T_{med}) e com isso os valores de $p\text{CO}_2$ observados ($p\text{CO}_2_{\text{obs}}$) são normalizados para uma temperatura em comum, assim as variações entre o novo valor calculado e o observado seria oriundo dos efeitos biológicos na região.

$$p\text{CO}_2_{\text{bio}} = p\text{CO}_2_{\text{obs}} * \exp[0,0423(T_{\text{med}} - T_{\text{obs}})] \quad (4)$$

Para verificar os efeitos de temperatura, calculados pela equação 5, na qual temos uma inversão na diferença das temperaturas média e observada dentro da segunda parcela da equação, e agora a utilizamos da média anual de $p\text{CO}_2$, no lugar do valor observado.

$$p\text{CO}_2_{\text{temp}} = p\text{CO}_2_{\text{med}} * \exp[0,0423(T_{\text{obs}} - T_{\text{med}})] \quad (5)$$

Estabelecidos os valores de $p\text{CO}_2$ das parcelas biológicas e de temperatura, é calculada a variação desses ao longo de cada ano, onde T é a variação da $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ (Equação 6) e B da $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ (Equação 7). Dessa forma, marcamos a variação sazonal de cada efeito.

$$T = p\text{CO}_2_{\text{temp max}} - p\text{CO}_2_{\text{temp min}} \quad (6)$$

$$B = p\text{CO}_2_{\text{bio max}} - p\text{CO}_2_{\text{bio min}} \quad (7)$$

Então é tirada a razão e a diferença entre eles, para avaliar qual efeito apresenta maior dominância no sistema. Quando a razão $T/B > 1$, ou a diferença $T-B > 0$, nós teremos os efeitos de temperatura excedendo os efeitos biológicos, e quando $T/B < 1$, ou $T-B < 0$, os efeitos biológicos estarão excedendo os efeitos de temperatura. Nos casos onde $T/B = 1$ ou $T-B = 0$, os efeitos tendem a se cancelar.

3.4 Tratamento Estatístico

Para avaliar a normalidade dos dados foi utilizado o teste de Anderson-Darlin, esse teste se aplica a bases de dados grandes e a partir de seu p-valor é possível avaliar se a distribuição dos dados é normal ou não normal (MIOT, 2017). Se p-valor $< 0,05$ o teste indica uma distribuição não normal, assim sendo tomada uma estatística não paramétrica, para p-valor $> 0,05$ o teste indica uma distribuição normal, dessa forma se torna necessária a utilização de uma estatística paramétrica.

Para determinar a variação dos parâmetros da pCO_2 ao longo do tempo foi feita uma regressão linear, onde a inclinação da reta (slope) apresenta a variação anual dos parâmetros, o r^2 indica o coeficiente de determinação da regressão e o p-valor, quando menor que 0,05, indica se a regressão é estatisticamente significativa.

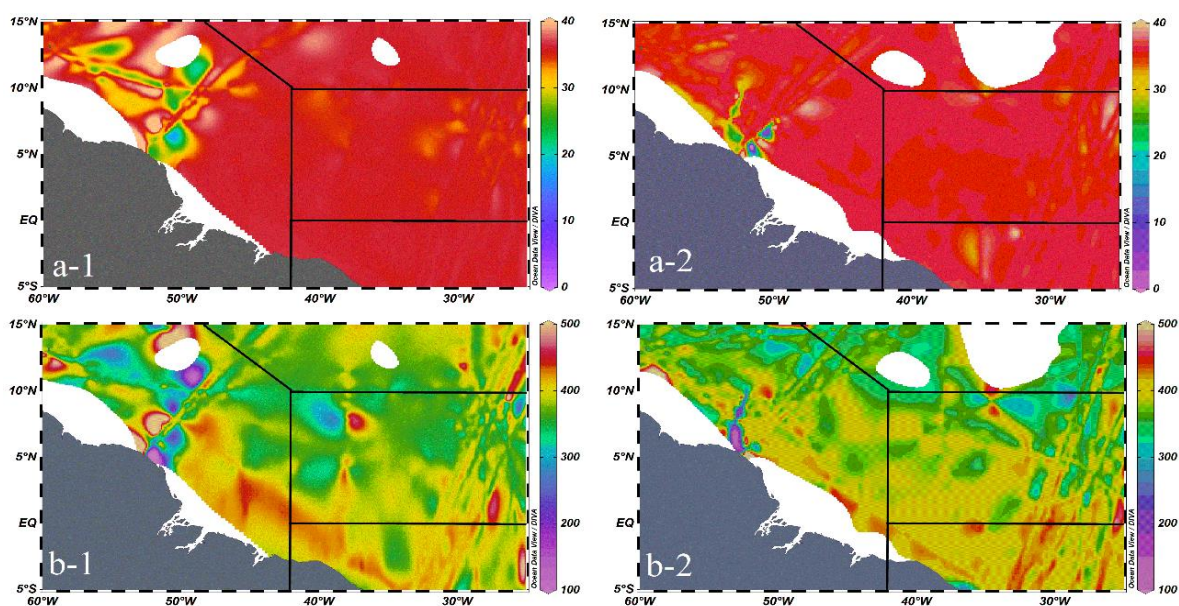
Foi utilizado o teste estatístico test-t para comparar a diferença entre as tendências de pCO_2 nos períodos de máximo e mínimo transporte da pluma do Rio Amazonas.

O valor t indica a diferença em relação entre os slopes, quanto mais próximo a zero menor a probabilidade de uma diferença significativa entre os slopes.

4 RESULTADOS

A área de estudo apresenta grande variação de salinidade e de $p\text{CO}_2$, principalmente quando consideramos os setores PA e CCNE, como demonstrado na figura 9. Esses setores se mostram diretamente ou parcialmente influenciados pela pluma do Rio Amazonas, sendo o PA sob influência constante, e o CCNE sob influência parcial, tendo maior efeito durante os meses de maio e outubro, onde temos o período de maior transporte da pluma, resultante da retroflexão da CNB que leva essas águas para nosso setor CCNE. Os demais setores apresentaram menos variação, tendo salinidade sempre acima de 34.

Figura 9: Mapa de superfície, a partir dos dados SOCAT



Nota: a) Salinidade 1-maxímo período de transporte da pluma, 2-mínimo período de transporte da pluma; b) $p\text{CO}_2$ 1-maxímo período de transporte da pluma (maio – outubro), 2-mínimo período de transporte da pluma (novembro – abril).

Fonte: o autor, 2022.

O teste de Anderson-Darling indica que os dados apresentam uma distribuição não normal, com p-valor menor que 0,05 (Tabela 1). Dessa forma uma análise não paramétrica se adequa melhor aos nossos dados, e por tal foi tomado o uso da mediana como tendência central. Os valores de $p\text{CO}_2$ variam entre $123,27\mu\text{atm}$ e $499,02\mu\text{atm}$, com mediana de $381,82\mu\text{atm}$, a parcela biológica dessa $p\text{CO}_2$ ($p\text{CO}_{2\text{ bio}}$) apresenta variação entre $113,59\mu\text{atm}$ e

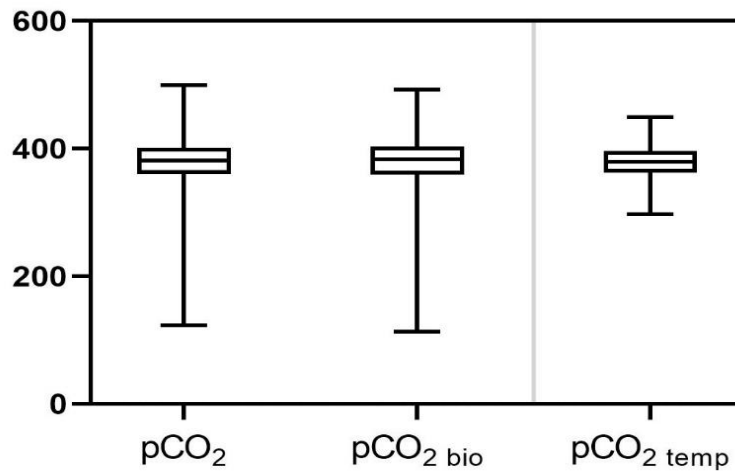
492,57 μ atm com mediana de 383,11 μ atm e os valores da parcela do efeito de temperatura ($p\text{CO}_2_{\text{temp}}$) varia entre 297,83 μ atm e 449,56 μ atm com mediana de 379,39 μ atm (Figura 10).

Tabela 1: p-valor de Anderson-Darling

Variável	p-valor
$p\text{CO}_2$	$< 2,2 \text{ e}^{-16}$
$p\text{CO}_2_{\text{bio}}$	$< 2,2 \text{ e}^{-16}$
$p\text{CO}_2_{\text{temp}}$	$< 2,2 \text{ e}^{-16}$

Fonte: O autor, 2022

Figura 10: Boxplot dos valores de $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ e $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ para a região do ato.



Nota: Limites indicam valores de máximo e mínimo para cada parâmetro; linha central - mediana; limites do box - quartis de 25% e de 75%.

Fonte: O autor, 2022.

A $p\text{CO}_2$ apresentou tendência de aumento de 2,440 μ atm a^{-1} , enquanto nossa parcela de temperatura apresentou um crescimento igual ao $p\text{CO}_2$ total (Figura 11), a parcela biológica apresentou uma tendência maior, com aumento de 2,456 μ atm a^{-1} (Tabela 2). Observando os gráficos de distribuição dos dados é possível notar que os valores extremos de $p\text{CO}_2$ apresentam similaridade com a distribuição da $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$, indicando uma relação importante

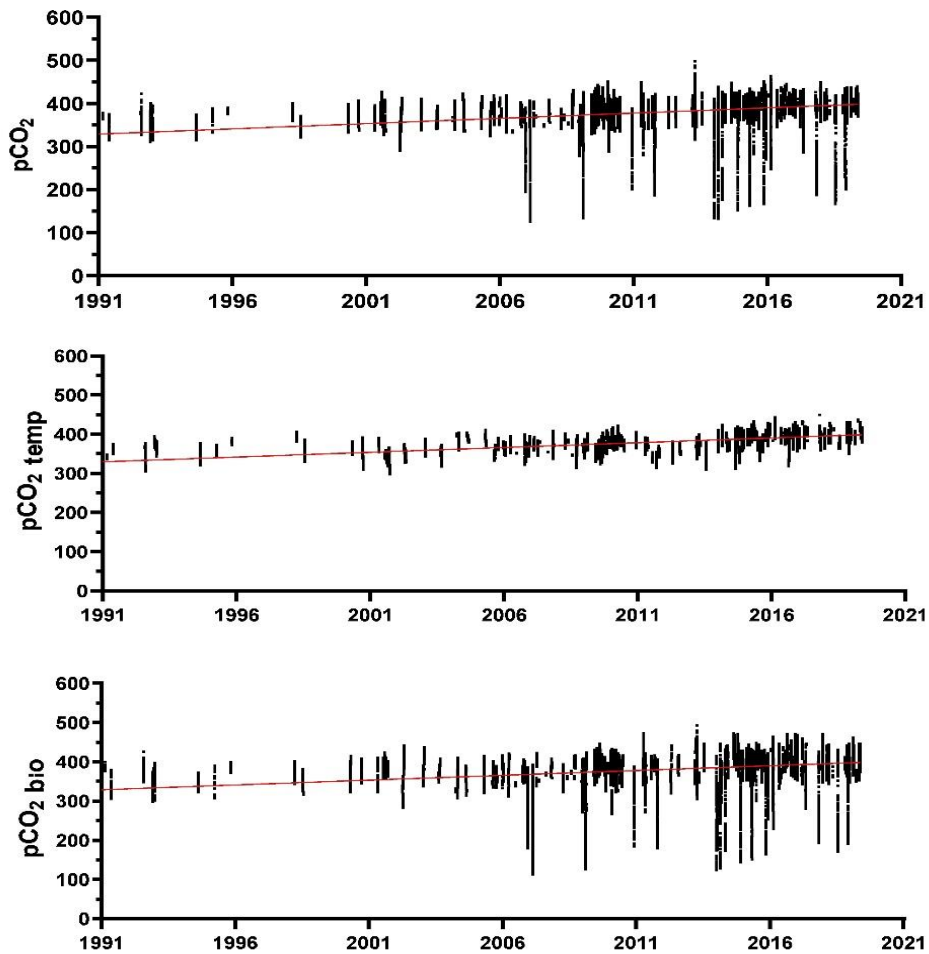
entre a atividade biológica com a $p\text{CO}_2$ na região. Quando nos voltamos para a distribuição dos dados de $p\text{CO}_2$ temp, vemos que a mesma já apresenta uma menor amplitude nos seus valores.

Tabela 2: Estatística de tendência dos dados de $p\text{CO}_2$ no tempo para a região do ATO

	R²	p-valor	Slope
$p\text{CO}_2$	0,1587	<0,0001	2,440
$p\text{CO}_2$ bio	0,1333	<0,0001	2,456
$p\text{CO}_2$ temp	0,3596	<0,0001	2,440

Fonte: O autor, 2022

Figura 11: Série temporal dos dados de $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_2$ temp e $p\text{CO}_2$ bio para a região do ATO.



Nota: Linha vermelha – tendência linear dos dados.

Fonte: O autor, 2022.

No intuito de observar a influência da pluma do Rio Amazonas na região se dividiu os dados de $p\text{CO}_2$ em dois períodos (Figura 12), marcados pela dispersão da pluma, sendo assim um período com maior e outro com menor transporte da mesma. Nos períodos de máximo transporte a tendência da $p\text{CO}_2$ e da $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ se mostraram maiores que no período de mínimo transporte, enquanto a $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ apresentou um aumento maior no período de mínimo transporte da pluma (Tabela 3).

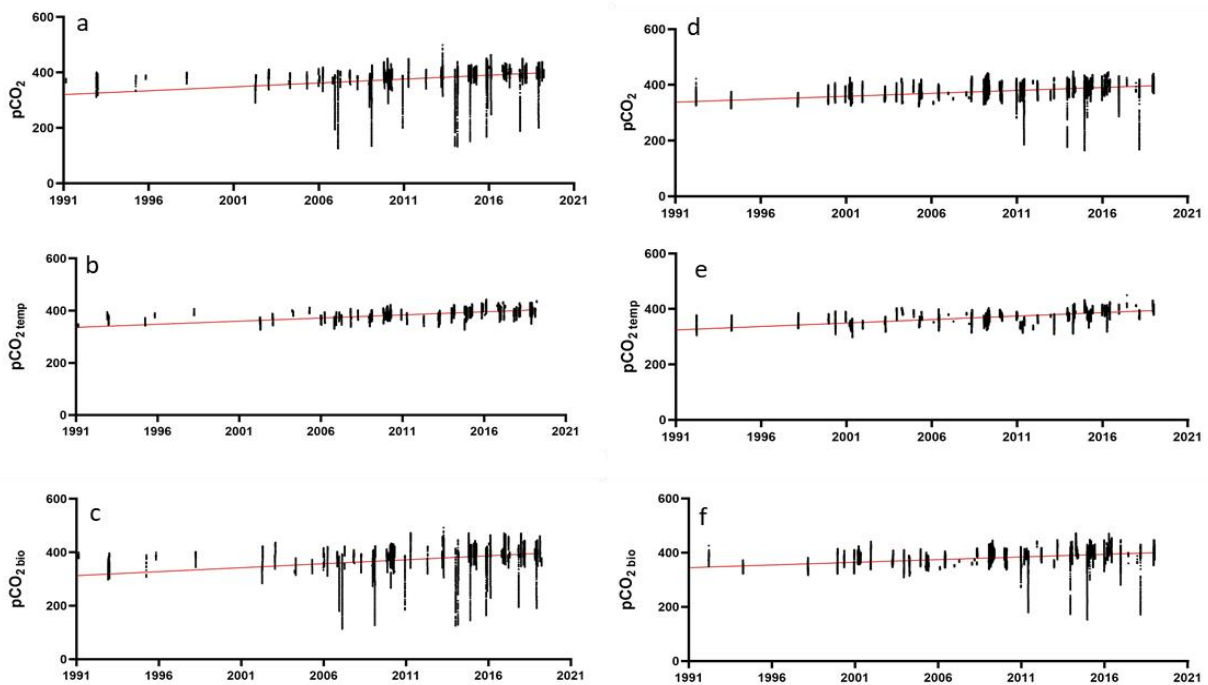
Tabela 3: Estatística de tendência dos dados de $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ e $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$

	Máximo transporte			Mínimo transporte		
	R^2	p-valor	Slope	R^2	p-valor	Slope
$p\text{CO}_2$	0,2009	<0,0001	2,801	0,1237	<0,0001	2,109
$p\text{CO}_2_{\text{bio}}$	0,1720	<0,0001	2,966	0,1029	<0,0001	1,975
$p\text{CO}_2_{\text{temp}}$	0,4009	<0,0001	2,387	0,3642	<0,0001	2,507

Nota: Para a região do ATO nos períodos de máximo e mínimo transporte da pluma do Rio Amazonas,

Fonte: O autor, 2022.

Figura 12: Série temporal dos dados de $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ e $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$



Nota: Para o período de máximo e mínimo transporte da pluma do Rio Amazonas: a-c) distribuição dos dados no período de máximo transporte; d-f) distribuição dos dados no período de mínimo transporte da pluma.

Linha vermelha - tendência linear dos dados.

Fonte: O autor, 2022.

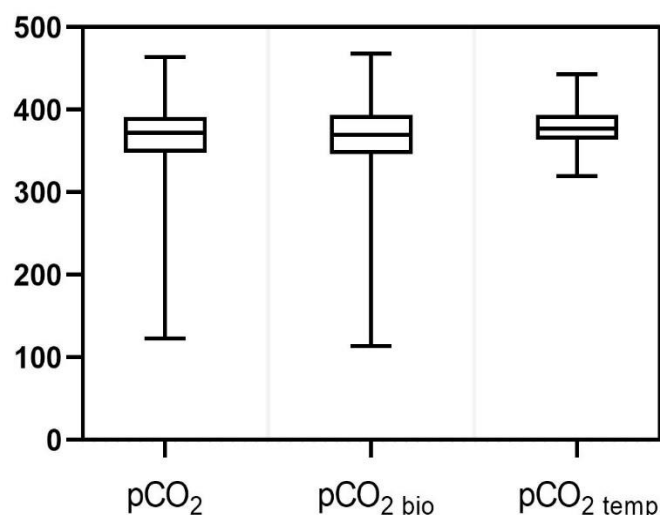
Comparando os slopes entre os períodos de máximo e mínimo transporte nós obtivemos um t-valor de 27,889 para a $p\text{CO}_2$, de 8,689 para a $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ e de 36,1732 para a $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$. Indicando uma menor diferença entre as tendências nos efeitos de temperatura sobre a $p\text{CO}_2$ na região.

No intuito de avaliar como a dinâmica da $p\text{CO}_2$ e dos efeitos biológicos e de temperatura nos diferentes setores foram separados e analisadas para cada setor individualmente:

Setor pluma do Amazonas:

O setor PA apresentou uma distribuição de dados similar ao visto pra região do ATO como um todo, com $p\text{CO}_2$ variando de 123,27 μatm e 463,89 μatm . A $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ apresentou distribuição similar a $p\text{CO}_2$ variando entre 113,59 μatm e 467,98 μatm . A $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ apresentou uma menor amplitude, variando entre 319,68 μatm e 443,29 μatm .

Figura 13: Boxplot dos valores de $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ e $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$



Nota: para o setor PA. limites indicam valores de máximo e mínimo para cada parametro; linha central - mediana; limites do box - quartis de 25% e de 75%.

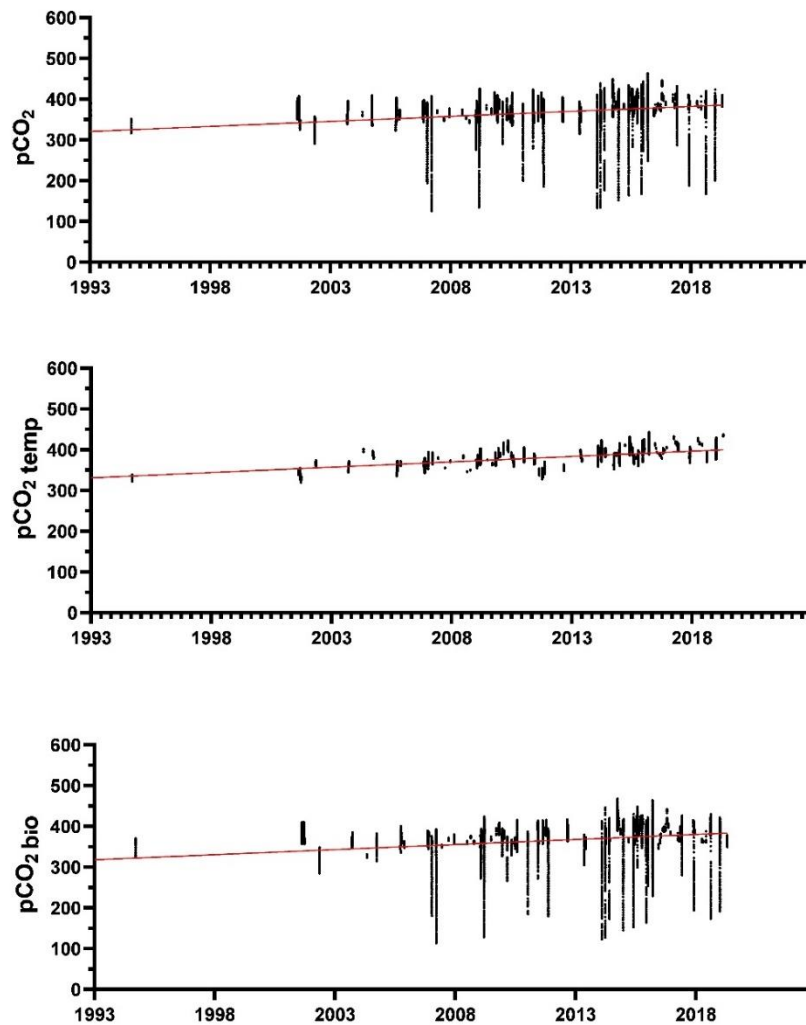
Fonte: O autor, 2022.

Analisando a distribuição e a tendencia para esse setor vemos que, apesar de a $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ apresentar distribuição e slope similares a $p\text{CO}_2$ (Figura 14), a $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ é quem apresenta maior inclinação, apresentando um crescimento de 2,623 $\mu\text{atm a}^{-1}$ (Tabela 4).

Tabela 4: Estatística de tendência dos dados de pCO₂ no tempo para o setor PA

	R²	p-valor	Slope
pCO ₂	0,0910	<0,0001	2,458
pCO ₂ bio	0,0810	<0,0001	2,487
pCO ₂ temp	0,3761	<0,0001	2,623

Fonte: O autor, 2022.

Figura 14: Série temporal dos dados de pCO₂, pCO₂ temp e pCO₂ bio

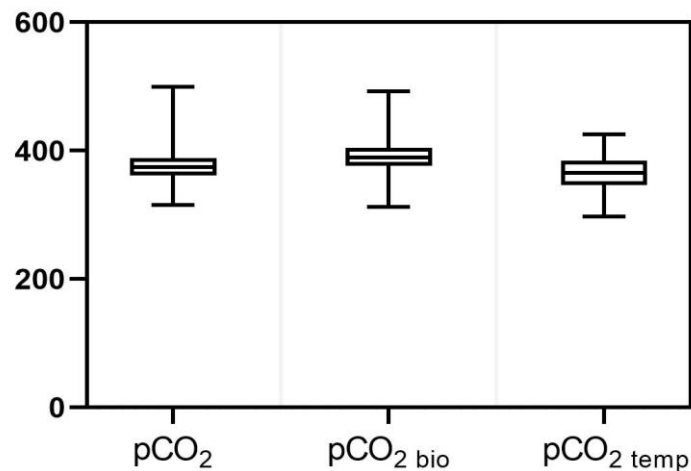
Nota: para o setor PA. Linha vermelha – tendência linear dos dados.

Fonte: O autor, 2022.

Setor corrente Norte Equatorial:

O setor CNE apresentou um intervalo de $p\text{CO}_2$ entre $315,08\mu\text{atm}$ e $499,02\mu\text{atm}$, com mediana de $374,74\mu\text{atm}$. A $p\text{CO}_2$ bio variando entre $312,97\mu\text{atm}$ e $492,39\mu\text{atm}$, com mediana de $389,48\mu\text{atm}$. E a $p\text{CO}_2$ temp variando entre $297,83\mu\text{atm}$ e $425,11\mu\text{atm}$, com mediana de $365,48\mu\text{atm}$ (Figura 15).

Figura 15: Boxplot dos valores de $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_2$ bio e $p\text{CO}_2$ temp para o setor CNE.



Nota: limites indicam valores de máximo e mínimo para cada parâmetro; linha central - mediana; limites do box - quartis de 25% e de 75%.

Fonte: O autor, 2022

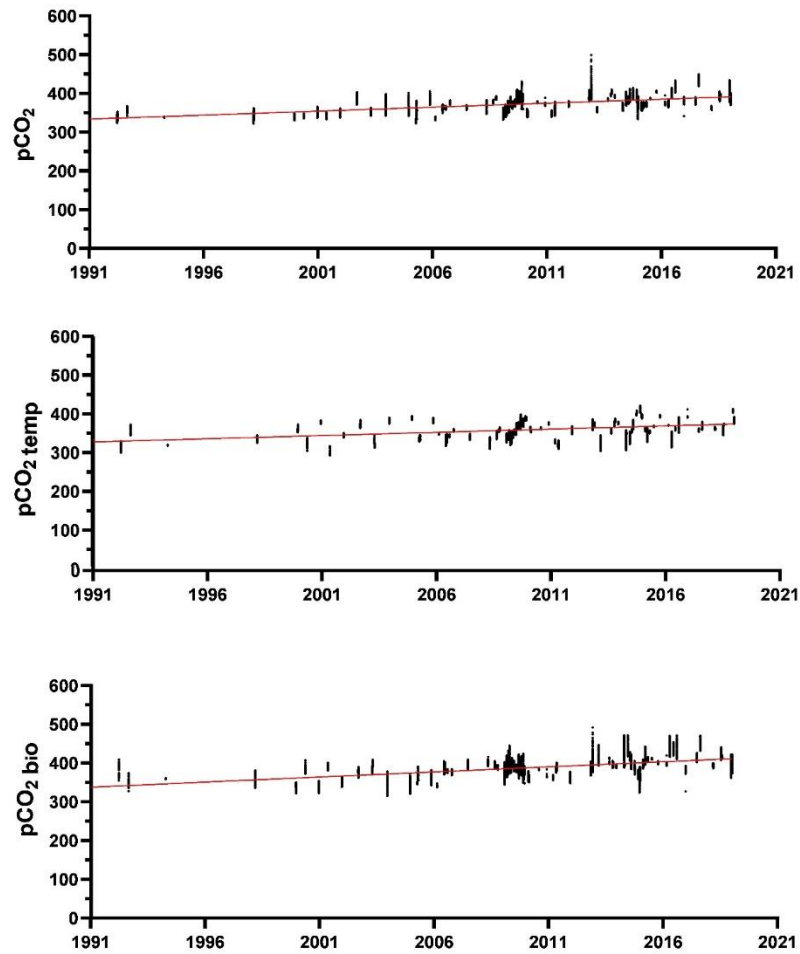
O setor CNE foi o único a apresentar uma tendência maior para a parcela biológica da $p\text{CO}_2$ que para a de temperatura, apresentando um crescimento de $2,624\mu\text{atm a}^{-1}$ (Tabela 5) valor próximo a tendência da $p\text{CO}_2$. Enquanto a $p\text{CO}_2$ temp apresentou crescimento de $1,658\mu\text{atm a}^{-1}$.

Tabela 5: Estatística de tendência dos dados de $p\text{CO}_2$ no tempo para o setor CNE

	R²	p-valor	Slope
$p\text{CO}_2$	0,2877	<0,0001	2,055
$p\text{CO}_2$ bio	0,3164	<0,0001	2,624
$p\text{CO}_2$ temp	0,1346	<0,0001	1,658

Fonte: O autor, 2022

Figura 16: Série temporal dos dados de $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ e $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ para o setor CNE. Linha vermelha



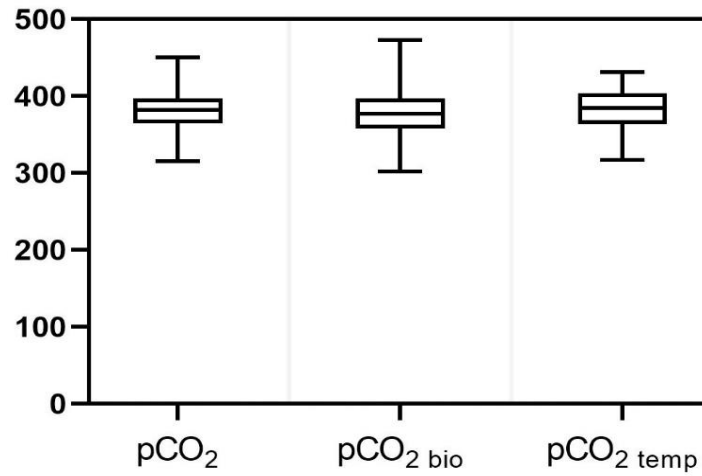
Nota: Tendência linear dos dados.

Fonte: O autor, 2022

Setor contracorrente Norte Equatorial:

O setor CCNE apresentou um intervalo de $p\text{CO}_2$ entre $315,66\mu\text{atm}$ e $450,80\mu\text{atm}$, com mediana de $381,81\mu\text{atm}$. A $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ variando entre $301,75\mu\text{atm}$ e $472,61\mu\text{atm}$, com mediana de $376,86\mu\text{atm}$. E a $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ variando entre $317,15\mu\text{atm}$ e $430,84\mu\text{atm}$, com mediana de $384,80\mu\text{atm}$ (Figura 17).

Figura 17: Boxplot dos valores de pCO₂, pCO₂ bio e pCO₂ temp para o setor CCNE



Nota.: Limites indicam valores de máximo e mínimo para cada parâmetro; linha central - mediana; limites do box - quartis de 25% e de 75%.

Fonte: O autor, 2022.

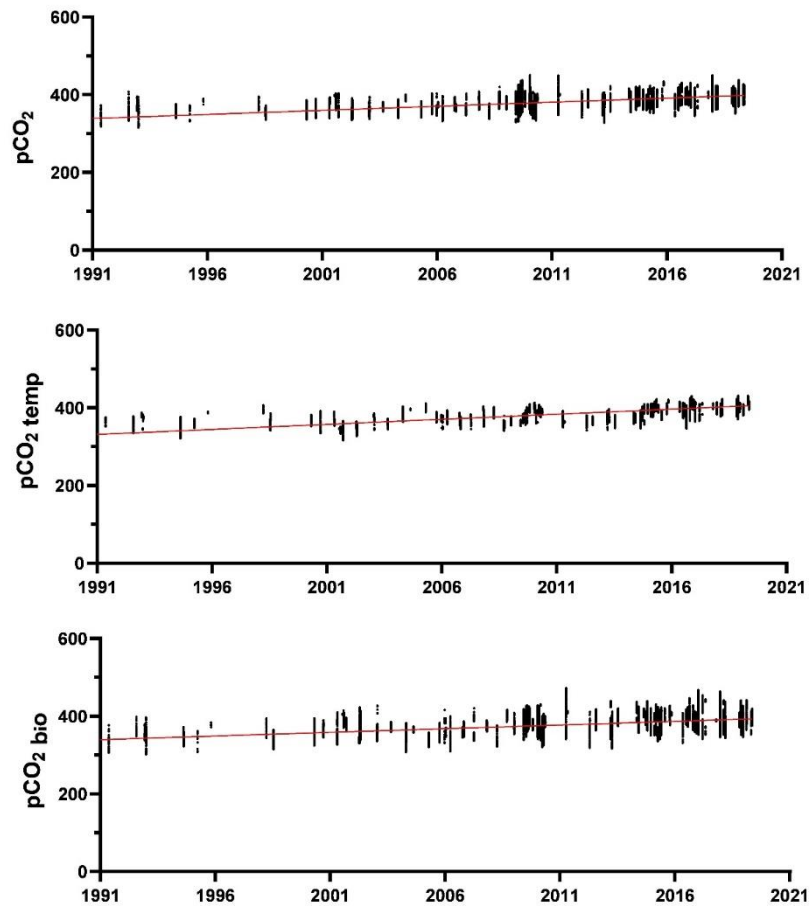
O setor CCNE apresentou maior similaridade entre a pCO₂ observada e a pCO₂ bio, porém a pCO₂ temp apresentou uma tendência mais elevada, apresentando um aumento de 2,606 μatm a⁻¹.

Tabela 6: Estatística de tendência dos dados de pCO₂ no tempo para o setor CCNE

	R²	p-valor	Slope
pCO ₂	0,3597	<0,0001	2,103
pCO ₂ bio	0,2160	<0,0001	1,882
pCO ₂ temp	0,5351	<0,0001	2,606

Fonte: O autor, 2022.

Figura 18: Série temporal dos dados de $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ e $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ para o setor CCNE.



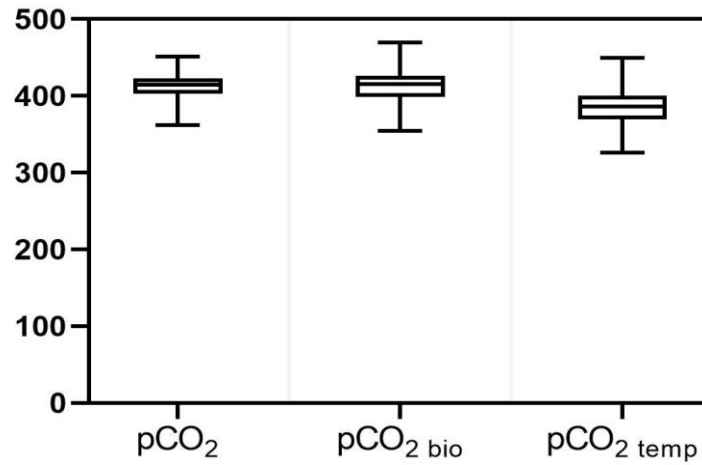
Nota: Linha vermelha – tendência linear dos dados.

Fonte: O autor, 2022

Setor corrente Sul Equatorial:

O setor CSE apresentou um intervalo de $p\text{CO}_2$ entre $362,40\mu\text{atm}$ e $451,10\mu\text{atm}$, com mediana de $414,86\mu\text{atm}$. A $p\text{CO}_2_{\text{bio}}$ variando entre $354,57\mu\text{atm}$ e $469,74\mu\text{atm}$, com mediana de $415,16\mu\text{atm}$. E a $p\text{CO}_2_{\text{temp}}$ variando entre $325,90\mu\text{atm}$ e $449,57\mu\text{atm}$, com mediana de $386,51\mu\text{atm}$ (Figura 19).

Figura 19: Boxplot dos valores de pCO₂, pCO₂ bio e pCO₂ temp para o setor CSE.



Nota: limites indicam valores de máximo e mínimo para cada parâmetro;

linha central - mediana; limites do box - quartis de 25% e de 75%.

Fonte: O autor, 2022.

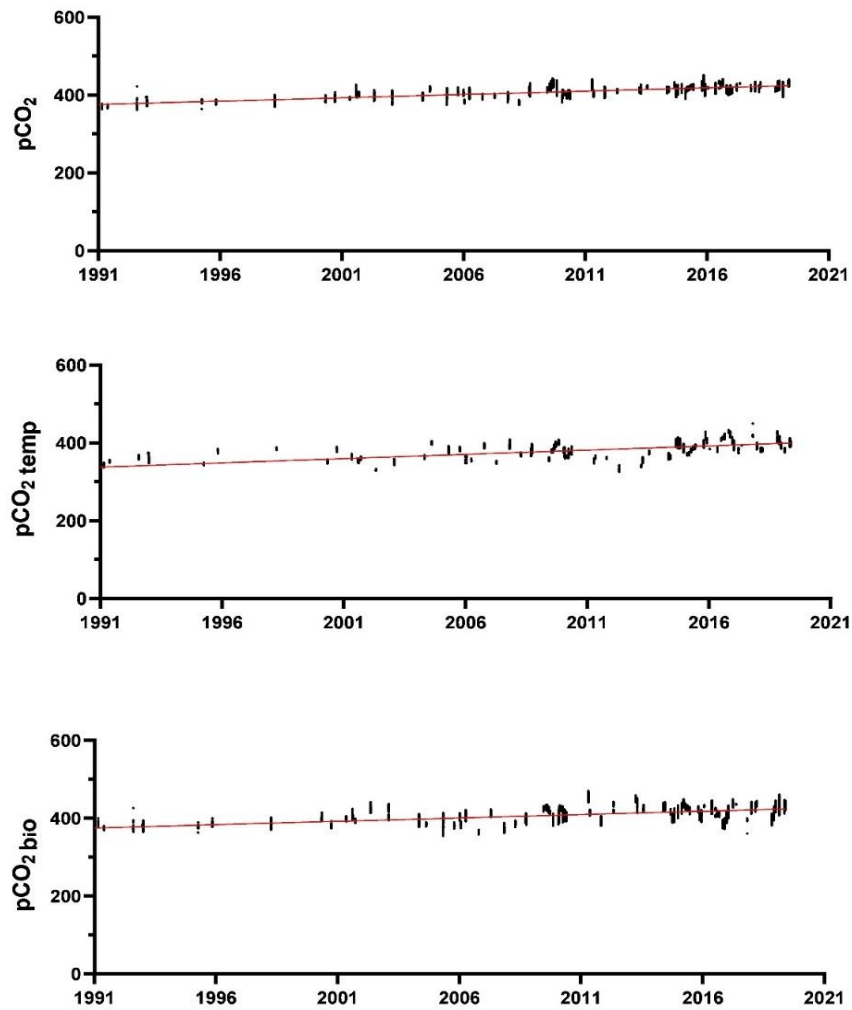
Apresentando menor distribuição dos dados entre todos os setores, o setor CSE apresenta similaridade entre as tendências da pCO₂ e pCO₂ bio, porém a tendência da pCO₂ temp foi que apresentou maior inclinação.

Tabela 7: Estatística de tendência dos dados de pCO₂ no tempo para o setor CSE

	R²	p-valor	Slope
pCO ₂	0,4444	<0,0001	1,715
pCO ₂ bio	0,2310	<0,0001	1,730
pCO ₂ temp	0,3237	<0,0001	2,181

Fonte: O autor, 2022.

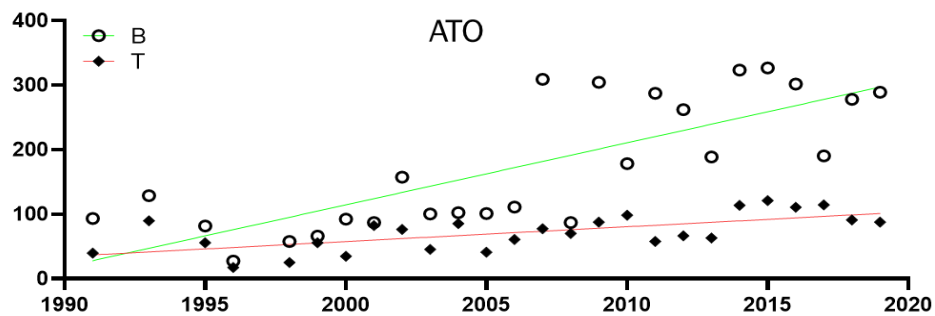
Figura 20: Série temporal dos dados de $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_{2\text{ temp}}$ e $p\text{CO}_{2\text{ bio}}$ para o setor CSE. Linha vermelha – tendência linear dos dados.



Fonte: O autor, 2022

Avaliando a variação sazonal dos efeitos biológicos e de temperatura, B e T, observamos que B apresenta maior influência na $p\text{CO}_2$ das águas superficiais na região do ATO, tendo sido maior que T em todos os anos de estudo (Figura 21; Tabela 8).

Figura 21: Gráficos de tendência para os valores de T e B para a região do ATO. Linha verde – tendência do fator biológico (B); linha vermelha – tendência do fator de temperatura (T).



Fonte: O autor, 2022.

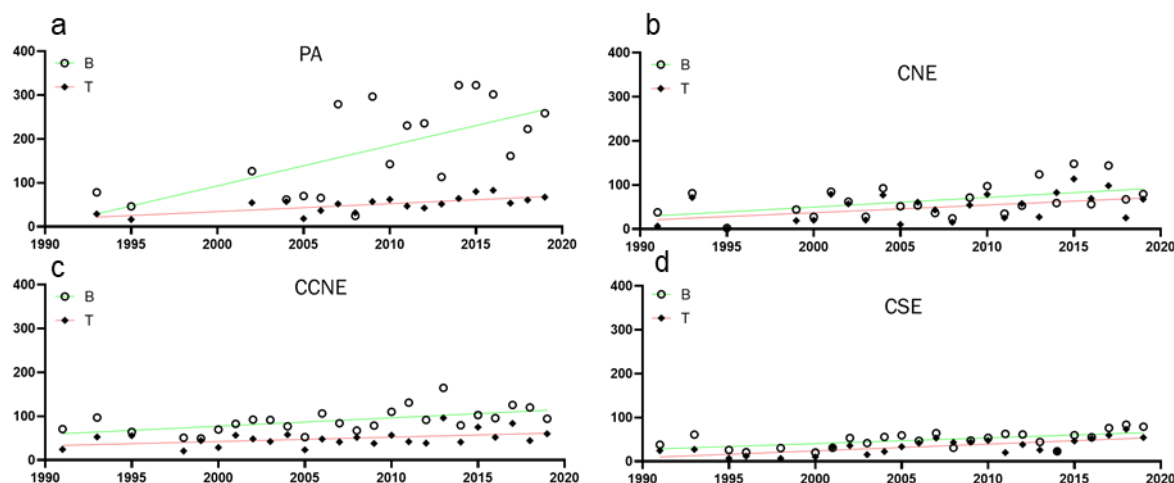
Tabela 8: Estatística de tendência dos valores de T e B no tempo para a região do ATO

	R²	p-valor	Slope
B	0,6097	<0,0001	9,616
T	0,4325	<0,0001	2,293

Fonte: O autor, 2022

Quando observamos cada setor separadamente é possível ver que os efeitos biológicos apresentam maior variação no setor PA (Figura 22-a), seguido dos setores CNE e CCNE, enquanto o setor CSE apresentou menores variações em B. As variações em T se apresentaram maiores no setor CNE (Figura 22-b), seguidos dos setores CCNE e PA e com menores variações o setor CSE. De um aspecto geral B se mostrou predominante a T em todos setores, com T se sobrepujando no ano de 2008 no setor PA, nos anos de 2006, 2007, 2012, 2014 e 2016 no setor CNE e em 2001, 2008 e 2014 no setor CSE.

Figura 22: Gráficos de tendência para os valores de T e B para cada setor.



Nota: a) setor Pluma do Amazonas; b) setor Corrente Norte Equatorial; c) setor Contracorrente Norte Equatorial; d) setor Corrente Sul Equatorial. Linha verde – tendência do fator biológico (B); linha vermelha – tendência do fator de temperatura (T).

Fonte: O autor, 2022.

Analisando a tendência pra cada setor é possível notar que apenas o setor CSE apresenta uma tendência maior em T que em B (Tabela 9), indicando uma possível sobreposição dos efeitos de temperatura sobre os biológicos ao longo dos anos. Comparando os slopes de T e B temos os setores CNE e CSE com menor diferença significativa, enquanto os setores PA e CCNE apresentaram maior diferença entre os slopes de T e B.

Tabela 9: Estatística de tendência dos dados de T e B para a região do ATO

	T			B			t-valor
	R ²	p-valor	Slope	R ²	p-valor	Slope	
PA	0,5025	0,0007	1,795	0,4091	0,0032	9,162	2,7236
CNE	0,1943	0,0311	1,746	0,2214	0,0203	2,181	0,3765
CCNE	0,2022	0,0241	0,9925	0,3194	0,0032	1,908	1,2869
CSE	0,5045	<0,0001	1,547	0,3484	0,0019	1,316	0,4685

Fonte: O autor, 2022.

Comparando os slopes da tendência entre cada setor para os parâmetros T e B, observamos que T apresenta menor diferença entre os setores em relação a B. Comparando os slopes de B, eles apresentam maior diferença entre os setores, mostrando que os efeitos

biológicos apresentam maior variação dentre nossos setores, como já visto nos gráficos de tendência. O setor PA foi o que apresentou menor diferença significativa quando comparado a região do ATO como um todo, enquanto a região CNE apresentou menor diferença quando comparamos T.

Tabela 10: t-valor da relação de T comparando a diferença significativa entre cada setor.

T	ATO	PA	CNE	CCNE	CSE
ATO	-	0.72	0.59	1.92	1.19
PA	0.72	-	0.06	1.34	0.46
CNE	0.59	0.06	-	0.87	0.24
CCNE	1.92	1.34	0.87	-	1.06
CSE	1.19	0.46	0.24	1.06	-

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 10: t-valor da relação de B comparando a diferença significativa entre cada setor.

B	ATO	PA	CNE	CCNE	CSE
ATO	-	0.14	4.60	4.14	5.14
PA	0.14	-	2.48	2.65	2.91
CNE	4.60	2.48	-	0.26	0.91
CCNE	4.14	2.65	0.26	-	0.85
CSE	5.14	2.91	0.91	0.85	-

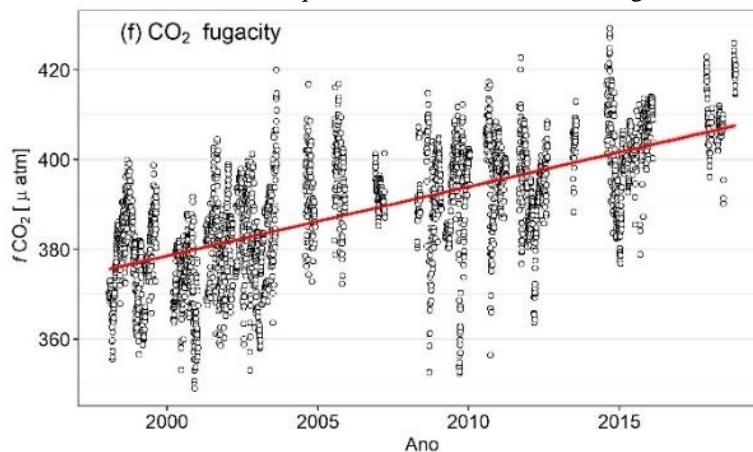
Fonte: O autor, 2022.

5 DISCUSSÃO

A atividade da pluma auxilia na atividade biológica nas águas de superfície (BRUTO et al., 2017), e entre nossos diferentes setores aquele que apresentou maior amplitude nos efeitos biológicos foi o setor PA, que recebe diretamente a influência da pluma do Rio Amazonas. Além de maior amplitude nos dados de $p\text{CO}_2$ bio, o setor PA apresenta maior diferença entre os limites da $p\text{CO}_2$ e da $p\text{CO}_2$ temp, indicando que nesse setor os efeitos biológicos se mostram mais relevantes na dinâmica do CO_2 local. Os demais setores apresentaram menor diferença entre os efeitos biológicos e os de temperatura, indicando que com uma menor influência da pluma, menor são os efeitos biológicos sobre a $p\text{CO}_2$.

Comparando com Musetti (2021), que realizou estudo em um ponto fixo localizado a 8°N e 38°W , dentro do setor CCNE, podemos observar que a distribuição dos dados está em acordo com o presente trabalho, com $f\text{CO}_2$ variando entre $349,05 - 429,142 \mu\text{atm}$, e com mediana de $389,108 \mu\text{atm}$, se mostrando dentro dos limites encontrados no presente trabalho. Analisando as tendências dos dados, Musetti (2021) encontrou um aumento de $1,539 \mu\text{atm a}^{-1}$ de $f\text{CO}_2$, enquanto nós estimamos um aumento de $2,103 \mu\text{atm a}^{-1}$ de $p\text{CO}_2$ para o setor. A diferença entre as tendências pode se dar em parte pela diferença dos parâmetros, visto q existe uma pequena correção a ser feita entre $p\text{CO}_2$ e $f\text{CO}_2$, mas também pelo número amostral, onde temos no presente trabalho uma área maior tanto espacialmente quanto temporalmente.

Figura 23: Série temporal de $f\text{CO}_2$. A reta vermelha indica a tendência linear dos dados quando ela é estatisticamente significativa



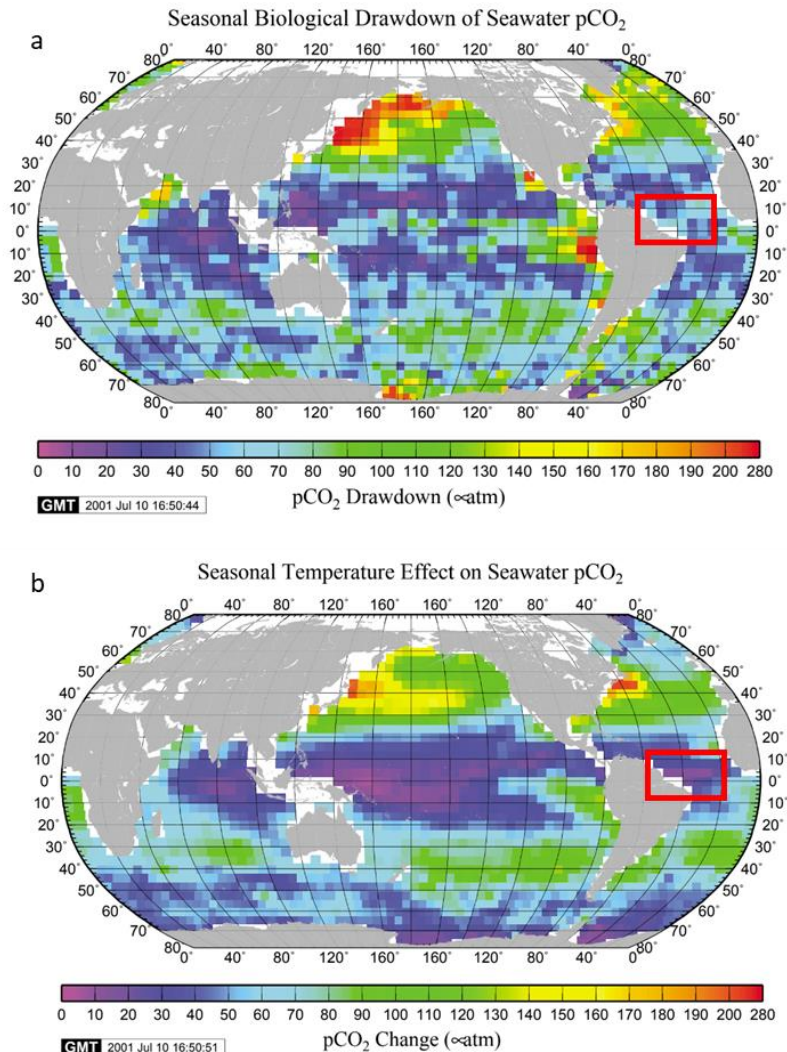
Fonte: MUNETTI, 2021.

Regiões subárticas e temperadas, apresentam sazonalidades demarcadas, apresentando maior influência biológica sobre a $p\text{CO}_2$ durante o verão (ITO; FOLLOWS, 2013). Durante esse período os fatores que favorecem a atividade fitoplanctônica são mais marcantes, com aporte de luz e nutriente ampliando a produção primária. Comparando com a nossa seção, não temos uma diferenciação clara quanto a verão - inverno, porém quando olhamos o período de máximo transporte da pluma, observamos um padrão similar ao verão observado por Ito & Follows (2013), com os nutrientes contidos na pluma reduzindo a limitação da produção primária. Quando comparamos os períodos de máximo e mínimo transporte da pluma, vemos que durante o máximo transporte a tendência da $p\text{CO}_2^{\text{bio}}$ se mostra maior que no mínimo transporte, reforçando que a pluma é um dos principais fatores para estimular a atividade biológica sobre a dinâmica de CO_2 na região. Enquanto isso os efeitos de temperatura apresentaram menor diferença entre os dois períodos, por se tratar de uma região tropical, não temos uma sazonalidade climática demarcada, com estações características de verão/outono/inverno/primavera, tendo assim pouca variação na incidência solar e na temperatura local.

Takahashi (2002) mostrou um panorama de como os fatores T e B se apresentavam globalmente, quando focamos na região do ATO, vemos que T apresentava valores menores que B, coincidindo com os resultados encontrados no nosso trabalho. OS valores de B encontrados por Takahashi se encontram entre 20 e 80 μatm aproximadamente, o que é a mesma faixa onde encontramos nossos valores até o ano de 2001. Observando atentamente a região ATO dentro é possível notar um gradiente longitudinal, tanto nos valores de B quanto de T, quando comparada com a setorização utilizada nesse trabalho vemos que essa bate com a divisão dos setores CNE, CCNE e CSE, com os valores em B na CCNE sendo maiores que os dois adjacentes, enquanto os valores de T apresentam um padrão inverso.

Takahashi (2002) apresenta valores para T e B similares aos encontrados no presente trabalho até o ano de 2001 (Figura 24), porém nossos dados mais recentes apresentam valores em B muito mais elevados, indicando que nossos efeitos biológicos sobre a $p\text{CO}_2$ vem crescendo. Regiões com efeitos biológicos elevados foram associadas a regiões de ressurgência intensa (TAKAHASHI et al., 2002), onde temos um aporte de nutrientes e CO_2 elevado. Nossa região apesar de não apresentar uma ressurgência de tal intensidade ainda conta com um grande aporte de nutrientes oriundos das águas do Rio Amazonas, uma possível intensificação desse aporte poderia assim vir a ser responsável pelo aumento dos efeitos biológicos na região.

Figura 24: Variação sazonal dos efeitos biológicos e de temperatura da pCO₂



Nota: a) variação anual dos efeitos biológicos (μatm); b) variação anual dos efeitos de temperatura (μatm). quadrado vermelho marca a região do presente estudo.

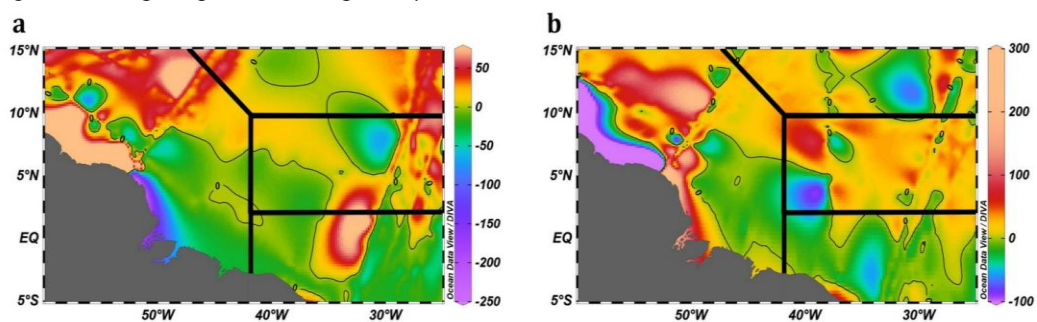
Fonte: TAKAHASHI, 2002.

Os efeitos biológicos na superfície estão principalmente associados a atividade fitoplanctônica na região, uma vez que essa está diretamente ligada a dispersão da pluma, então uma possível intensificação nos efeitos da pluma pode vir a ser um fator importante pra entender essa dinâmica. A população ao redor das margens do Rio Amazonas apresentou um crescimento de 300% entre 1970 e 2010, e apenas cerca de 21,1% das cidades na região apresentavam conexão com sistema de esgoto (COSTA; ROSA, 2017). Outro setor na região que apresentou grande crescimento foi o agrícola, com a utilização de cultivos duplos a demanda de fertilizantes nitrogenados cresceu em 78% (JANKOWSKI et al., 2018), onde parte desses nutrientes tende a serem lavados pela ação das chuvas e acabam sendo

despejados diretamente no rio. O despejo dos efluentes não tratados e a chegada dos fertilizantes agrícolas tendem a um input excedente de nutrientes e o aumento desses pode ser um importante fator quando observamos o crescimento da ação biológica sobre a $p\text{CO}_2$ na região do ATO.

Palevsky e Quay (2017) mostram que na região Norte do Pacífico, os efeitos de temperatura se mostram importantes para as variações sazonais da $p\text{CO}_2$, porém os efeitos biológicos junto aos processos físicos sobre o $p\text{CO}_2$ na região impulsionam a absorção de CO_2 atmosférico. Comparando com a diferença do $p\text{CO}_2$ ($\Delta p\text{CO}_2$) na interface oceano-atmosfera de Franklin (2020) na região vemos que os setores influenciados pela pluma apresentam predominância de um positivo, indicando uma $p\text{CO}_2$ maior na atmosfera que na superfície da água, assim apresentando potencial sumidouro para a região. Os setores PA e CCNE apresentaram maiores valores de B, e assim como visto por Palevsky e Quay (2017), temos os efeitos biológicos associados a absorção do CO_2 atmosférico. Quando olhamos o setor CSE, que apresentou menores valores em B, observamos um padrão de emissão de CO_2 para a atmosfera. O setor CNE apesar de teoricamente não apresentar influência da pluma, mostrou valores de B similares ao setor CCNE, comparando com Franklin (2020) vemos que o setor também apresentou um potencial sumidouro, porém em menor escala que os diretamente influenciados pela pluma.

Figura 25: Mapa superficial de $\Delta p\text{CO}_2$ μatm

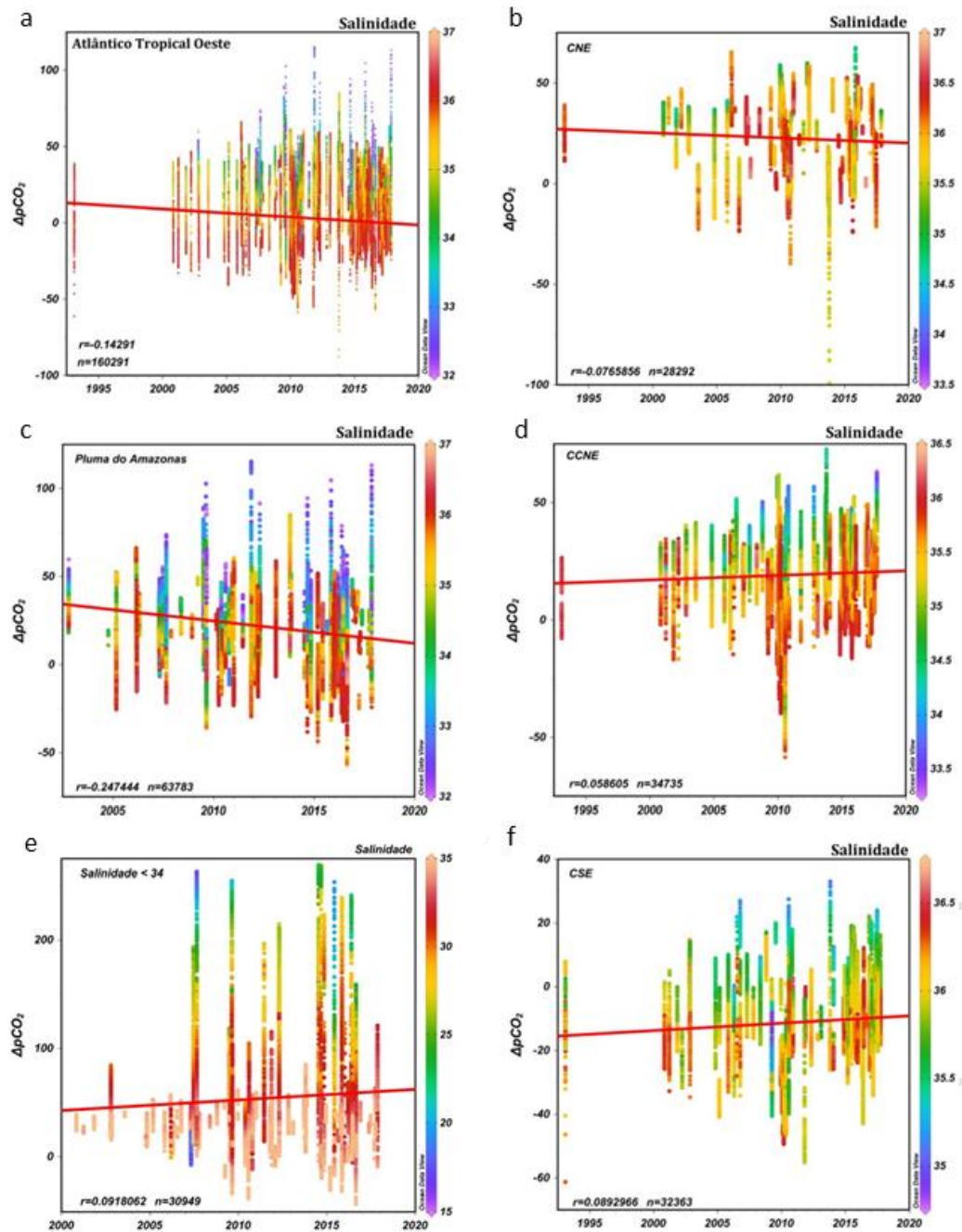


Nota: a) Período chuvoso (Dezembro-Maio); b) Período de seca (Junho-Novembro).
Fonte: FRANKLIN, 2020.

Comparando a tendência dos nossos fatores biológicos e de temperatura para cada setor com as tendências da $\Delta p\text{CO}_2$, para os mesmos, observamos que mesmo com um aumento da parcela biológica elevado, tanto para a região ATO como um todo como para o setor PA,

apresentam é observada uma tendência de $\Delta p\text{CO}_2$ negativa, indicando uma possível redução no potencial sumidouro.. Quando comparamos a tendencia do $\Delta p\text{CO}_2$ com a tendencia das variações anuais dos efeitos, T e B, vemos que por mais que a variação dos efeitos biológicos aumente a tendencia a reta da $\Delta p\text{CO}_2$ apresenta um sentido inverso. Comparando o setor PA vemos que ele apresenta o maior aumento em B, porém quando comparado com os valores de $\Delta p\text{CO}_2$ eles apresentam uma tendencia negativa, indicando uma redução da capacidade sumidouro da região. Isso indica que por mais que a dinâmica biológica favoreça o potencial sumidouro, ela sozinha não é capaz de refrear o aumento da concentração de CO_2 na atmosfera. Porém se observarmos a extensão da pluma independente da setorização, marcada aqui por salinidade inferior a 34, observamos que além de apresentar um padrão de absorver CO_2 da atmosfera, a tendência da $\Delta p\text{CO}_2$ é positiva, indicando um aumento dessa diferença mostrando a pluma com um potencial sumidouro para o CO_2 antropogênico (FRANKLIN, 2020). Uma vez que a influência da pluma é a principal fonte de nutrientes, ela apresenta maior atividade biológica, dessa forma conseguimos ver claramente a mesma relação observada por Palevsky para o Pacífico Norte, com a atividade biológica aumentando o potencial sumidouro das águas superficiais.

Figura 26: Gráfico de tendência da variação temporal do ΔpCO_2



Nota: a) Atlântico Tropical Oeste; b) CNE; c) Pluma do Amazonas; d) CCNE; e) Salinidade < 34; f) CSE. Linha vermelha – tendência linear dos dados.

Fonte: FRANKLIN, 2020.

CONCLUSÃO

A $p\text{CO}_2$ medida na região apresentou uma relação similar maior com a parcela referente aos efeitos biológicos que com os efeitos de temperatura. Os efeitos de temperatura apresentaram uma distribuição similar ao longo de toda região, enquanto os efeitos biológicos apresentaram maior variação. O principal fator influenciando os efeitos biológicos sob a $p\text{CO}_2$ foi a dispersão da pluma do Rio Amazonas, no setor PA onde temos o desague direto da pluma foram observados os valores mais extremos de $p\text{CO}_2$ indicando que os fatores biológicos da $p\text{CO}_2$ estão diretamente atrelados aos efeitos da pluma sobre a atividade fitoplanctônica.

A sazonalidade na região se mostrou diretamente ligada a dispersão da pluma, apresentando maior variação dentro dos efeitos biológicos, uma vez que os fatores responsáveis pelos efeitos de temperatura não apresentam grande variação na região esses efeitos apresentaram menor variação sazonal.

Avaliando a serie temporal dos nossos fatores de $p\text{CO}_2$ possível observar que os efeitos biológicos além de apresentem maior relação com os valores medidos e maior variação sazonal, apresentam uma tendencia maior que os efeitos de temperatura na região do ATO, porém quando olhamos nossos setores apenas o setor CNE não apresenta uma tendência maior para os efeitos de temperatura que para os biológicos. Com isso podemos considerar que, por mais que os efeitos biológicos apresentem um potencial de tornar as águas superficiais da região em um potencial sumidouro, a tendência da região pode apresentar um refreio dessa característica.

Dessa forma concluímos que por mais que a região apresente uma dinâmica complexa quanto a $p\text{CO}_2$, o estudo de serie temporal apresenta uma importante compreensão da evolução dos parâmetros e fatores que a controlam. Porém, para uma maior clareza de

evolução desses efeitos em relação ao potencial sumidouro da pluma, são necessários estudos do regime de fluxos regionais.

REFERÊNCIAS

AÍMOLA, L.; ALBUQUERQUE, M. [NOTA DE PESQUISA] A INFLUÊNCIA DO MODO ANULAR SUL SOBRE O CICLO DO CARBONO NO OCEANO SUL: UMA BREVE REVISÃO DO CONHECIMENTO ATUAL (THE INFLUENCE MODE OF VOID SOUTH ON CARBON CYCLE IN THE OCEAN SOUTH A BRIEF CURRENT KNOWLEDGE REVIEW). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, 2016.

ALLEN, M. R. et al. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. **Nature**, v. 458, n. 7242, 2009.

ANDRIÉ, C. et al. CO₂ fluxes in the tropical Atlantic during FOCAL cruises . **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. C10, 1986.

BAKKER, D. C. E. et al. **A multi-decade record of high-quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT)** Earth System Science Data Copernicus GmbH, , 15 set. 2016.

BOURLES, B. et al. Upper layer currents in the western tropical North Atlantic (1989-1991). **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C1, 1999.

BRUTO, L. et al. Variability of CO₂ fugacity at the western edge of the tropical Atlantic Ocean from the 8°N to 38°W PIRATA buoy. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 78, 2017.

COOLEY, S. R. et al. Seasonal variations in the Amazon plume-related atmospheric carbon sink. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 21, n. 3, 2007.

COSTA, Alex, et al., 2009. “Observações Hidrológicas e Resultados de Modelagem No Espalhamento Sazonal e Espacial Da Pluma de Água Amazônica.” *Acta Amazonica*39(2):361–69.

COSTA, S. M. F. DA; ROSA, N. C. O processo de urbanização na Amazônia e suas peculiaridades: uma análise do delta do rio Amazonas. **Revista Políticas Públicas & Cidades - 2359-1552**, v. 5, n. 2, p. 81–105, 27 out. 2017.

DICKSON, A. G.; SABINE, C. L.; CHRISTIAN, J. R. Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. **PICES Special Publication 3**, v. 3, n. 8, 2007.

DUCKLOW, H. W.; STEINBERG, D. K.; BUESSELER, K. O. Upper ocean carbon export and the biological pump. **Oceanography**, v. 14, n. SPL.ISS. 4, 2001.

FRANKLIN, T. *Série Histórica de Pressão Parcial de CO₂ na Superfície do Oceano Atlântico Tropical Oeste*. 2020. 46p. Monografia (Bacharelado em Oceanografia), Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2020

Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., et al. (2021). Global carbon budget 2021. *Earth Syst. Sci.* doi: 10.5194/essd-2021-386

GBEKPO A. H.; Dinâmica do Atlântico tropical e seus impactos sobre o clima a longo da costa do Nordeste do Brasil / Gbekpo Aubains Hounsou-gbo.-Recife: O Autor,2015.146 folhas.

GRUBER, N. et al. Oceanic sources, sinks, and transport of atmospheric CO₂. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 23, n. 1, 2009.

HONJO, S. et al. **The role of the biological pump in the global carbon cycle understanding an imperative for ocean science** *Oceanography*, 2014.

HOUNSOU-GBO, G. A. et al. Tropical Atlantic contributions to strong rainfall variability along the northeast Brazilian coast. **Advances in Meteorology**, v. 2015, 2015.

IBÁÑHEZ, J. S. P.; ARAUJO, M.; LEFÈVRE, N. The overlooked tropical oceanic CO₂ sink. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 8, 2016.

ITO, T.; FOLLOWS, M. J. Air-sea disequilibrium of carbon dioxide enhances the biological carbon sequestration in the Southern Ocean. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 27, n. 4, 2013.

JANKOWSKI, K. J. et al. Deep soils modify environmental consequences of increased nitrogen fertilizer use in intensifying Amazon agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 2018.

LANDSCHÜTZER, P. et al. Recent variability of the global ocean carbon sink. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 28, n. 9, 2014.

LEFÈVRE, N.; DIVERRÉS, D.; GALLOIS, F. Origin of CO₂ undersaturation in the western tropical Atlantic. **Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 62, n. 5, 2010.

MAYORGA, E. et al. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. **Nature**, v. 436, n. 7050, 2005.

MIOT, H. A. **Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais** *Jornal Vascular Brasileiro*, 2017.

MOLINARI, R. L. Observations of eastward currents in the tropical South Atlantic Ocean: 1978–1980. *Journal of Geophysical Research*, v. 87, n. C12, 1982.

MÜLLER-KARGER, F.E.; MCCLAIN, C.R.; RICHARDSON, P. 1988. The dispersal of Amazon's water. *Nature*, 333: 56-59.

NITTROUER, C. A.; DEMASTER, D. J. The Amazon shelf setting: Tropical, energetic, and influenced by a large river. *Continental Shelf Research*, v. 16, n. 5–6, p. 553–573, 1 jan. 1996.

OLTMAN, R.E. 1968. Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon river. U S Geol Surv, Circ. 552. 16pp

RÍOS, A. F. et al. Decadal acidification in the water masses of the Atlantic Ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 112, n. 32, 2015.

SABINE, C. L. et al. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, v. 305, n. 5682, 2004.

SILVA, A. C. DA et al. Observações hidrológicas e resultados de modelagem no espalhamento sazonal e espacial da pluma de água Amazônica. *Acta Amazonica*, v. 39, n. 2, 2009.

SILVA, A. C. DA; ARAÚJO, M.; BOURLÈS, B. Seasonal variability of the Amazon river plume during Revizee program. *Tropical Oceanography*, v. 38, n. 1, 2010.

STRAMMA, L.; SCHOTT, F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 46, n. 1–2, 1999.

TAKAHASHI, T. et al. Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 49, n. 9–10, 2002.

TAKAHASHI, T.; SUTHERLAND, S. C. GLOBAL OCEAN SURFACE WATER PARTIAL PRESSURE OF CO₂ DATABASE: MEASUREMENTS PERFORMED DURING 1957–2016 (Version 2016). *NOAA/NCEI/OCADS*, v. 4, n. Version 2016, 2017.

TERNON, J. F. et al. A seasonal tropical sink for atmospheric CO₂ in the Atlantic ocean: The role of the Amazon River discharge. **Marine Chemistry**, v. 68, n. 3, 2000.

TURNER, J.; OVERLAND, J. E.; WALSH, J. E. An Arctic and Antarctic perspective on recent climate change. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 3, 2007.

URBANO, D. F.; DE ALMEIDA, R. A. F.; NOBRE, P. Equatorial undercurrent and North equatorial countercurrent at 38°W: A new perspective from direct velocity data. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 113, n. 4, 2008.

VALERO, L. et al. Long-period astronomically-forced terrestrial carbon sinks. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 444, 2016.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. 2005. Prestasi KecekapanPengurusan Kewangan Dan AgihanZakat: Perbandingan Antara Majlis Agama Islam Negeri Di Malaysia. Vol. 51.

VAREJÃO-SILVA, M. A. 2006. "Meteorologia e Climatologia (Versão Digital 2)." 2:203–15

WEISS, R. F. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. **Marine Chemistry**, v. 2, n. 3, 1974.

XIE, S. P.; SAITO, K. Formation and variability of a northerly ITCZ in a hybrid coupled AGCM: Continental forcing and oceanic-atmospheric feedback. **Journal of Climate**, v. 14, n. 6, 2001.