

BLANKA PIEKAS SCHLICHTA

**Dipolo Subtropical do Atlântico Sul e Capturas de *Sardinella Brasiliensis*
no Contexto de Aquecimento da Superfície do Oceano Atlântico Sul entre 1970 e 2019**

São Paulo

2023

BLANKA PIEKAS SCHLICHTA

**Dipolo Subtropical do Atlântico Sul e Capturas de *Sardinella Brasiliensis*
no Contexto de Aquecimento da Superfície do Oceano Atlântico Sul entre 1970 e 2019**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Física.

Orientadora: Prof. Dr. Ilana Wainer

São Paulo

2023

SCHLICHTA, Blanka Piekas. **Dipolo Subtropical do Atlântico Sul e Capturas de *Sardinella Brasiliensis* no Contexto de Aquecimento da Superfície do Oceano Atlântico Sul entre 1970 a 2019.**

Dissertação (Mestrado) apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Física.

Aprovado em: ___/___/_____.

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

AGRADECIMENTOS

À Profª Drª Ilana, por sua sensibilidade, sabedoria e solicitude ao longo de todo do processo.

Aos meus familiares e à minha noiva, que me apoiam sempre.

A todos os colaboradores do IO-USP, por todos os ensinamentos e disponibilidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Nãõ há nada fixo, nem nada permanente”

Coen Rõshi

RESUMO

A partir de dados reconstruídos de temperatura da superfície do mar do oceano Atlântico Sul e de capturas de *S. brasiliensis*, levando em consideração o contexto de intensificação do aquecimento global, com ênfase na superfície do Oceano Atlântico Sul e na maior frequência de fases negativas do Dipolo Subtropical do Atlântico Sul observadas nas últimas décadas (MORIOKA *et al.*, 2011), diagnosticou-se o comportamento não linear das séries temporais de capturas de *S. brasiliensis* entre 1970 e 2019, assim como suas relações com padrões de distribuição de anomalias de temperatura da superfície do mar média para dezembro e janeiro no Oceano Atlântico Sul. O centro da pesquisa se desenvolveu com base em três diferentes períodos: *ESTADO 1* (1970 – 1985); *TRANSIÇÃO* (1986 – 1988); e *ESTADO 2* (1989 – 2019). Foram encontrados indícios de que a formação de Dipolo Subtropical do Atlântico Sul, principalmente em fase positiva, não é favorável para o sucesso no recrutamento da *S. brasiliensis*, uma vez que esta configuração dominou os padrões de anomalias de temperatura da superfície do mar associados às mínimas capturas da espécie no ESTADO 2. Por fim, evidencia-se que o aumento da temperatura da superfície do mar média do Oceano Atlântico Sul para dezembro e janeiro, relacionado ao aquecimento global acelerado das últimas décadas e suas consequências (como a maior frequência de formação de Dipolo Subtropical do Atlântico Sul) se mostrou um fator relevante para o comportamento não linear da série temporal de capturas de *S. brasiliensis*.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Aquecimento global. Oceano Atlântico Sul. Dipolo Subtropical do Atlântico Sul. Pescarias. *Sardinella brasiliensis*. Capturas mínimas. Comportamento não linear. Histerese. Ponto de inflexão.

ABSTRACT

Based on reconstructed South Atlantic Ocean sea surface temperature data and reconstructed *S. brasiliensis* catches data, and taking into account the context of increasing global warming, with emphasis on the South Atlantic Ocean surface and the higher frequency of South Atlantic Subtropical Dipole negative phases observed in recent decades (MORIOKA *et al.*, 2011), the non-linear behavior *S. brasiliensis* catches time series between 1970 and 2019, as well as their relationships with South Atlantic Ocean sea surface temperature anomalies distribution patterns for December and January average was diagnosed. The research center was developed based on three distinct periods: STATE 1 (1970 – 1985); TRANSITION (1986 – 1988); and STATE 2 (1989 – 2019). Indications were found that the South Atlantic Subtropical Dipole formation, mainly in the positive phase, is not favorable for the *S. brasiliensis* recruitment successful, since this configuration dominates the sea surface temperature anomalies patterns associated with the Minimum catches of the species in STATE 2. Finally, the present study showed that the December and January average South Atlantic Ocean Sea surface temperature increase, related to the last decades accelerated global warming and its consequences (as the highest frequency of South Atlantic Subtropical Dipole occurrence) may be a relevant factor for the non-linear behavior *S. brasiliensis* catches time series.

Keywords: Climate change. Global warming. South Atlantic Ocean. South Atlantic Subtropical Dipole. Fisheries. *Sardinella brasiliensis*. Minimal catches. Non-linear behavior. Hysteresis. Inflection point.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACAS: Água Central do Atlântico Sul

ACC: Análise de Correlação Cruzada

ANOM: Anomalia

ARLS: Análise de Regressão Linear Simples

ASAS: Alta Subtropical do Atlântico Sul

ASAS: Alta Subtropical do Atlântico Sul

ATSM: Anomalia de Temperatura da Superfície do Mar

ATSM_{ens}: Anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico Sul para o conjunto dados

CAP: Capturas de *S. brasiliensis*

CAPlag2: Série de captura com correção do adiantamento de dois encontrado em relação à série de ATSM_{ens} OAS DJ

CAPlag2max: Composto de anos de máximas capturas de *S. brasiliensis* com correção do adiantamento de dois encontrado em relação à série de ATSM_{ens} OAS DJ

CAPlag2min: Composto de anos de mínimas capturas de *S. brasiliensis* com correção do adiantamento de dois

encontrado em relação à série de ATSM_{ens} OAS DJ

CAPmax: Composto de anos de máximas capturas de *S. brasiliensis*

CAPmin: Composto de anos de mínimas capturas de *S. brasiliensis*

CB: Corrente do Brasil

CBM: Confluência Brasil-Malvinas

CCF: *Cross Correlation Function*

CLM: Climatologia

DEZ: Dezsmbros

DJ: Média aritmética dos valores encontrados para os janeiros dos anos de referência e dos dezsmbros dos anos anteriores ao ano de referência

DSAS: Dipolo Subtropical do Atlântico Sul

E1: Estado I; equivale ao período entre 1970 e 1985

E2: Estado II; equivale ao período entre 1986 e 1988

FAO: Organização para a Alimentação e Agricultura das Nações Unidas

FR: Frequência Relativa (em %)

GSGT: Giro Subtropical Geostrófico

IDSAS: Índice do Dipolo Subtropical do Atlântico Sul

IPCC: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

JAN: Janeiro

MA: Média Aritmética

MAX: Máximos

MIN: Mínimos

MQO: Método dos Mínimos Quadrados Ordinários

MRL: Modelo de Regressão Linear

NE: Nordeste

OAS: Oceano Atlântico Sul

OG: Oceano Global

PCSE: Plataforma Continental Sudeste do Brasil

R²: Estatística R-quadrado ou Coeficiente de Determinação

R^{2adj}: Coeficiente de Determinação Ajustado

SO: Sudoeste

SO: Sudoeste

SCC: Sistema da Corrente Califórnia

ST: Série Temporal

STD: Desvio Padrão

STD_{res}: Erro Padrão Residual

TR: Transição; equivale ao período entre 1989 e 2019.

TSM: Temperatura da Superfície do Mar

ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Contextualização e Motivação de Pesquisa	12
1.2 Peixes Forrageiros e Ambiente Epipelágico	19
1.4 <i>Sardinella Brasiliensis</i>	19
1.5 Área de Estudo.....	21
1.5.1 Oceano Atlântico Sul	21
2. MATERIAIS E MÉTODOS	26
2.1 Dados de Temperatura da Superfície do Mar.....	28
2.1.2 Resolução Espacial	29
2.3 Análises Oceano Atlântico Sul – 1970 a 2019.....	29
2.4 Capturas de <i>Sardinella Brasiliensis</i> e Temperatura da Superfície do Mar.....	33
2.4.1 Dados de Capturas de <i>Sardinella Brasiliensis</i>	33
2.4.2 Correlação entre Capturas de <i>Sardinella Brasiliensis</i> e Temperatura da Superfície do Mar	33
2.4.3 Divisão dos Estados de Equilíbrio.....	40
2.4.4 Seleção dos Anos de Captura Máxima e Mínima.....	43
2.4.5 Padrões de ATSM Médios para Anos de Mínimas e Máximas Capturas	45
2.4.6 DSAS e <i>Sardinella Brasiliensis</i>	45
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.1 Oceano Atlântico Sul vs Oceano Global – 1880 a 2019	46
3.2 Temperatura da Superfície do Mar – Oceano Atlântico Sul – 1970 a 2019	47
3.2.1 Série da Climatologia Mensal	47
3.2.2 Série Temporal de Anomalias	48
3.2.3 Padrões Oceânicos	50
3.2.4 Dipolo Subtropical do Atlântico Sul.....	53

3.3	<i>Capturas de Sardinella Brasiliensis e Temperatura da Superfície do Mar</i>	56
3.3.1	Séries Temporais.....	56
3.3.2	Análises estatísticas	56
3.3.3	<i>Capturas com Datas Ajustadas: CAPlag2</i>	58
3.3.4	Padrões Médios: Estado 1, Transição e Estado 2	65
3.3.4	Diferenças entre E2 e E1	67
3.3.5	ESTADO 1 – Diferenças entre Compostos de Capturas Máximas/Mínimas e Média Período e Diferenças entre os Compostos de Máximas e Mínimas	71
3.3.6	ESTADO 2 – Diferenças entre Compostos Capturas Máximas/Mínimas e Média Período e Diferenças entre os Compostos de Máximas e Mínimas	73
3.3.7	Dipolo Subtropical do Atlântico Sul e Capturas de <i>Sardinella Brasiliensis</i>	75
3.3.8	Comportamento de Histerese da População de <i>Sardinella Brasiliensis</i> Diante da Aceleração do Aquecimento do Oceano Atlântico Sul na Década de 1980	78
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5.	REFERÊNCIAS	84

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Motivação de Pesquisa

Segundo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, IPCC (2021), nos últimos 170 anos (1850-2020) a Terra já superou o maior aquecimento identificado nos últimos 100.000 anos. Nesse contexto, destaca-se o maior aquecimento nas últimas quatro décadas, onde cada uma delas foi sucessivamente mais quente desde 1850. A contar de 1980, o oceano global tem aquecido numa velocidade sem precedentes por séculos a milênios, representando cerca de 90% do aumento no estoque global de energia, sendo a influência humana o principal motor desse aquecimento desde 1970 (IPCC, 2021).

A temperatura da superfície do mar (TSM) média global aumentou cerca de 1.5°C desde o início do século 20 (BUCHHOLZ, 2023; Figura 1). Com base no registro histórico, os aumentos na TSM ocorreram em dois períodos principais: entre 1910 e 1940 e meados de 1970 até o presente. É importante destacar que, embora a maior parte dos oceanos do mundo tenha sofrido um aumento de temperatura, tal aumento não é uniforme, variando regionalmente – como exemplo desse processo podemos citar os oceanos tropicais e as correntes de contorno oeste dos oceanos, que tem aquecido mais rapidamente do que a média global (IPCC, 2021). Esse aumento pode gerar inúmeras consequências físicas e biogeoquímicas para o ambiente marinho, em diferentes escalas espaciais e temporais, as quais podem ou não estar correlacionadas, o que gera um grande desafio para sua investigação. Exemplos de tais consequências são: a queda dos níveis de oxigênio e diminuição do pH da água do mar; a intensificação dos contrastes de salinidade, da estratificação na parte superior do oceano, da frequência de ondas de calor marinhas¹ e de determinadas fases de modos de variabilidade; além das alterações nos processos de ressurgência costeira, recrutamento e distribuição geográfica de organismos marinhos (COCHRANE *et al.*, 2009; GIGLIOTTI *et al.*, 2020; MORIOKA *et al.*, 2011; SILVA, 2020; IPCC, 2021).

¹Do inglês, *marine heatwaves*.

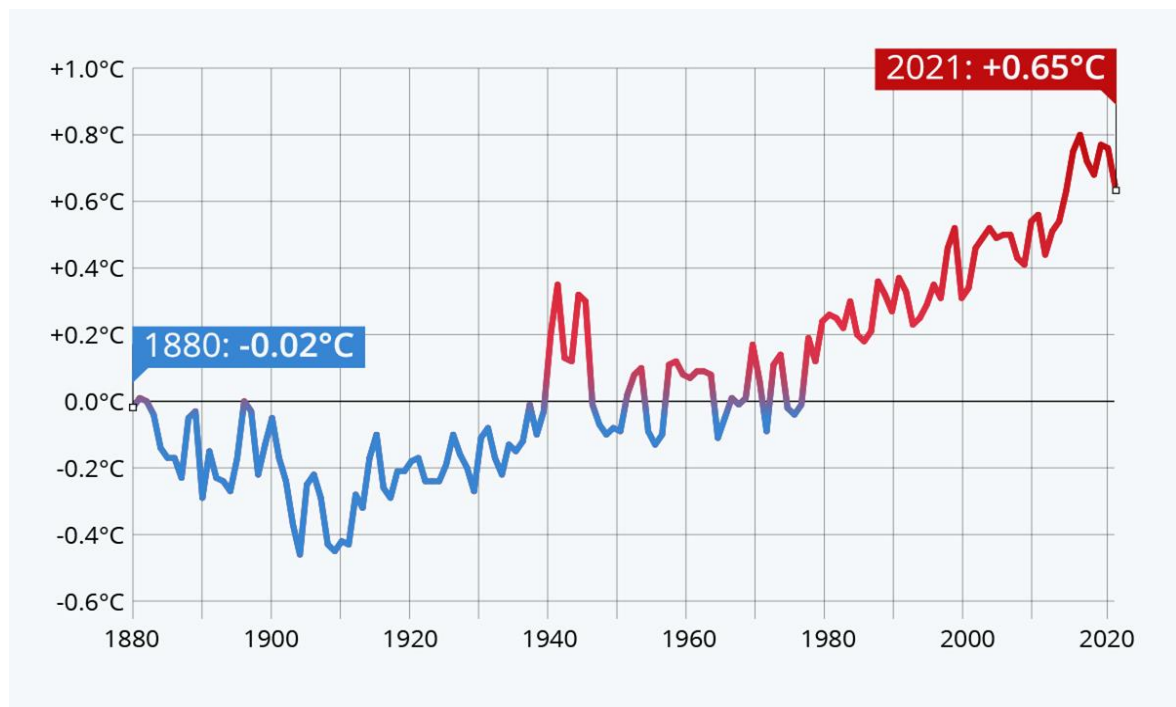


Figura 1: Série temporal de anomalia de temperatura da superfície do mar média global, 1880-2021. Fonte: BUCHHOLZ, 2023. (Dados: NOAA/NCEI).

O modo de variabilidade acoplado, Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (DSAS), corresponde ao modo de variabilidade da TSM dominante no Oceano Atlântico Sul (OAS) e sua anomalia de temperatura da superfície do mar (ATSM) mostra um padrão dipolo² orientado na direção nordeste-sudoeste (Morioka *et al.*, 2011). Ele é modulado por mudanças na posição e intensidade do Alta Subtropical do Atlântico Sul (WAINER *et al.*, 2014) e, segundo Morioka *et al.* (2011), existem evidências de um aumento na frequência de fases negativas desse modo nas últimas décadas³, o que pode estar associado a intensificação do aquecimento global.

Com essa perspectiva, Silva (2020) observou que os padrões de ventos relacionados com eventos de negativos do DSAS agem dificultando os eventos de ressurgência costeira na costa brasileira, uma vez que reduzem o Transporte de Ekman no sentido *off shore*. A

² Segundo Morioka *et al.* (2011), o polo positivo da fase positiva do DSAS se desenvolve devido ao aquecimento da camada de mistura pela contribuição da radiação climatológica de ondas curtas, que é intensificado quando a camada de mistura é mais fina do que o normal. A anomalia de profundidade da camada de mistura sobre o polo positivo é devido à redução de fluxo de calor latente associada com a migração para o sul e fortalecimento da ASAS (fase negativa do DSAS, observa-se o processo inverso).

³ O Oceano Atlântico Sul aqueceu a uma taxa de 0.06°C por década, de 1950 a 2014 (p-valor ~ 0.00; IPCC, 2014).

ressurgência é considerada fundamental para os processos biológicos, pois o movimento ascendente da água traz nutrientes para regiões próximas à superfície, propiciando um ambiente favorável para a produtividade biológica (HUTCHINGS *et al.*, 1995). Da mesma forma, Dias (1995) salientou que a penetração ou o recuo da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) pode influenciar, de forma decisiva, a sobrevivência de larvas de peixes planctônicas em regiões costeiras do Brasil. Contudo, o aumento da estratificação vertical⁴ e, logo da estabilidade da coluna de água nos oceanos, gerado pela redução da densidade da água devido ao aquecimento do clima, pode afetar a sazonalidade da ressurgência e reduzir a disponibilidade de nutrientes para a zona eufótica e, portanto, as produções primária e secundária (COCHRANE *et al.*, 2009). Tendo em vista que os ecossistemas de ressurgência costeira estão entre os mais produtivos do mundo, XIU *et al.*, 2018 usaram um modelo de alta resolução para examinar a resposta da dinâmica de nutrientes e do plâncton às futuras mudanças climáticas no Sistema da Corrente Califórnia (SCC). Estes autores identificaram uma maior estratificação da parte superior do oceano, tanto no SCC, quanto no oceano aberto, devido ao aquecimento da superfície do mar e consequente deslocamento das isotermas em direção ao fundo, o que dificulta os processos de ressurgência. Paralelamente, identificaram um aumento da intensidade de ressurgência costeira associada a ventos paralelos à costa mais fortes.

Dentro deste contexto, Franco *et al.* (2020) afirmaram que o padrão de dados de captura de pescarias ao redor do mundo em declínio, acompanhado da alta porcentagem de estoques pesqueiros em níveis biologicamente insustentáveis, sugere um cenário de preocupação, que pode estar associado, não só ao processo pesqueiro em si, mas também às flutuações ambientais. Com olhar semelhante, levando em consideração o aumento significativo das temperaturas da superfície do mar do OAS desde 1980, Araújo *et al.* (2018) examinaram as mudanças temporais na abundância da ictiofauna que habita as águas rasas do Atlântico Sul e sua associação com mudanças do clima, em uma área de transição entre as regiões tropicais e subtropicais no sudeste do Brasil, e observaram mudanças na abundância relativa de 57 espécies da ictiofauna do Atlântico Sudoeste para o período de 1980 a 2010. Paralelamente, através de uma análise sobre os impactos das mudanças do clima sobre pescarias ao redor do mundo, FAO (2018) abordou a tendência geral de redução nas capturas das principais espécies capturadas no OAS - ‘pescada argentina’ (*Merluccius hubbsi*), ‘corvina’ (*Micropogonias furnieri*), ‘merluza de

⁴ A estratificação do oceano é quantificada pela mudança de densidade com a profundidade, que, por sua vez, é determinada pela distribuição vertical de temperatura e salinidade, além da pressão (LI *et al.*, 2020).

cola' (*Macrurus magellanicus*) e 'sardinha brasileira' (*Sardinella brasiliensis*) - entre 2005 e 2015.

O comportamento não linear de variáveis ambientais ocorre em uma ampla gama de ecossistemas, podendo resultar na extrapolação de limites biofísicos (pontos de inflexão) e acarretar efeitos sociais e ecológicos dramáticos (MUTHUKRISHNAN *et al.*, 2022). Tais transições em larga escala, entre estados alternativos de ecossistemas, são conhecidas como mudanças de regime⁵ (DASKALOV *et al.*, 2007). De fato, globalmente, quase 30% de todas as pescarias estão em colapso ou sobre explorada⁶ e, em todos esses casos, pontos de inflexão significativos, em nível de estoque ou ecossistema, foram ultrapassados, forçando a mudança para estados alternativos, o que dificulta a recuperação ou restauração dos estoques aos níveis anteriores (OCEAN TIPPING POINTS, 2023).

Por esse ponto de vista, Saygu *et al.* (2023), investigaram as mudanças de regime ecológico no Mar de Mármara entre 1986 e 2020, estabelecendo relações com as mudanças do clima. Para isso, propuseram a classificação do ecossistema em três regimes: *i*) um regime de estado inicial, sob o controle descendente de peixes pelágicos médios predadores e exploração pesqueira até meados da década de 1990; *ii*) um regime transitório entre meados da década de 1990 e meados 2010, a partir da reestruturação dos ecossistemas; e *iii*) um regime tardio de estado alternativo com impactos predominantes das alterações climáticas desde meados da década de 2010 até 2020. Durante o regime tardio, Saygu *et al.*, observaram que a maioria das variáveis bióticas, principalmente a biomassa dos peixes, e as variáveis climáticas não retornaram ao seu estado inicial. Desta forma, identificaram tais mudanças no ecossistema Mar de Mármara como uma mudança de regime não linear.

Analisando os gráficos de séries temporais de capturas dos principais alvos pesqueiros e dos principais setores e técnicas pesqueiras do OAS, entre 1950 e 2019 (Figura 2 e Figura 3), ressalta-se o fato de que recursos de diferentes táxons⁷ e diferentes grupos funcionais⁸, e que são capturados com diferentes estratégias de captura⁹ e por setores de pesca com capacidades

⁵ Do inglês, *regime shifts*.

⁶ Exemplos: bacalhau na Nova Inglaterra; recifes de coral do Caribe; e pesca no Mar Negro (OCEAN TIPPING POINTS, 2022).

⁷ Exemplos de acordo com a Figura 2A: *Sardinella brasiliensis*, *Ariidae*, *Micropogonias furnieri*, *Xiphopenaeus kroyeri*, *Umbrina canosai*, *Clupeidae*, *Sciaenidae*, *Macrodon ancylodon*, *Batoidea* e outros.

⁸ Exemplos de acordo com a Figura 2B: demersais grandes (>=90cm), médios (30-89cm) e pequenos (<30cm); pelágicos grandes, médios e pequenos; raias e tubarões grandes; bento-pelágicos médios; camarões; e outros.

⁹ Exemplos de acordo com a Figura 3B: rede de arrasto; cerco; emalhe; espinhel; e outros.

produtivas distintas¹⁰, apresentam um padrão comum em suas séries temporais. Tal padrão pode ser descrito, de forma resumida, por uma tendência positiva nos valores de captura de 1970¹¹ a 1987, passando por uma queda abrupta (período de transição) entre 1988 e 1990, e atingindo um novo patamar a partir de 1991 até 2019, não retornando ao estado médio anterior até o final do período analisado. Nesse contexto, surge a principal pergunta levantada na presente dissertação: ***o aumento de TSM do OAS, relacionado ao aquecimento global acelerado das últimas décadas e suas consequências (como a maior frequência de formação de DSAS), poderia ser um fator relevante para o comportamento não linear da série temporal desses recursos marinhos?*** A busca por evidências que ajudem a elucidar esta pergunta inicial começou com a escolha da espécie para elaboração de um estudo de caso. Tal escolha foi baseada em alguns princípios, que serão abordados no próximo tópico.

¹⁰ Artesanal e industrial (Figura 3A).

¹¹ Embora as séries temporais de capturas iniciem em 1950 (Figura 2 e Figura 3), nota-se que os dados anteriores a 1970 são considerados menos confiáveis (faixa alaranjada), e por isso, não foram incluídos nas análises.

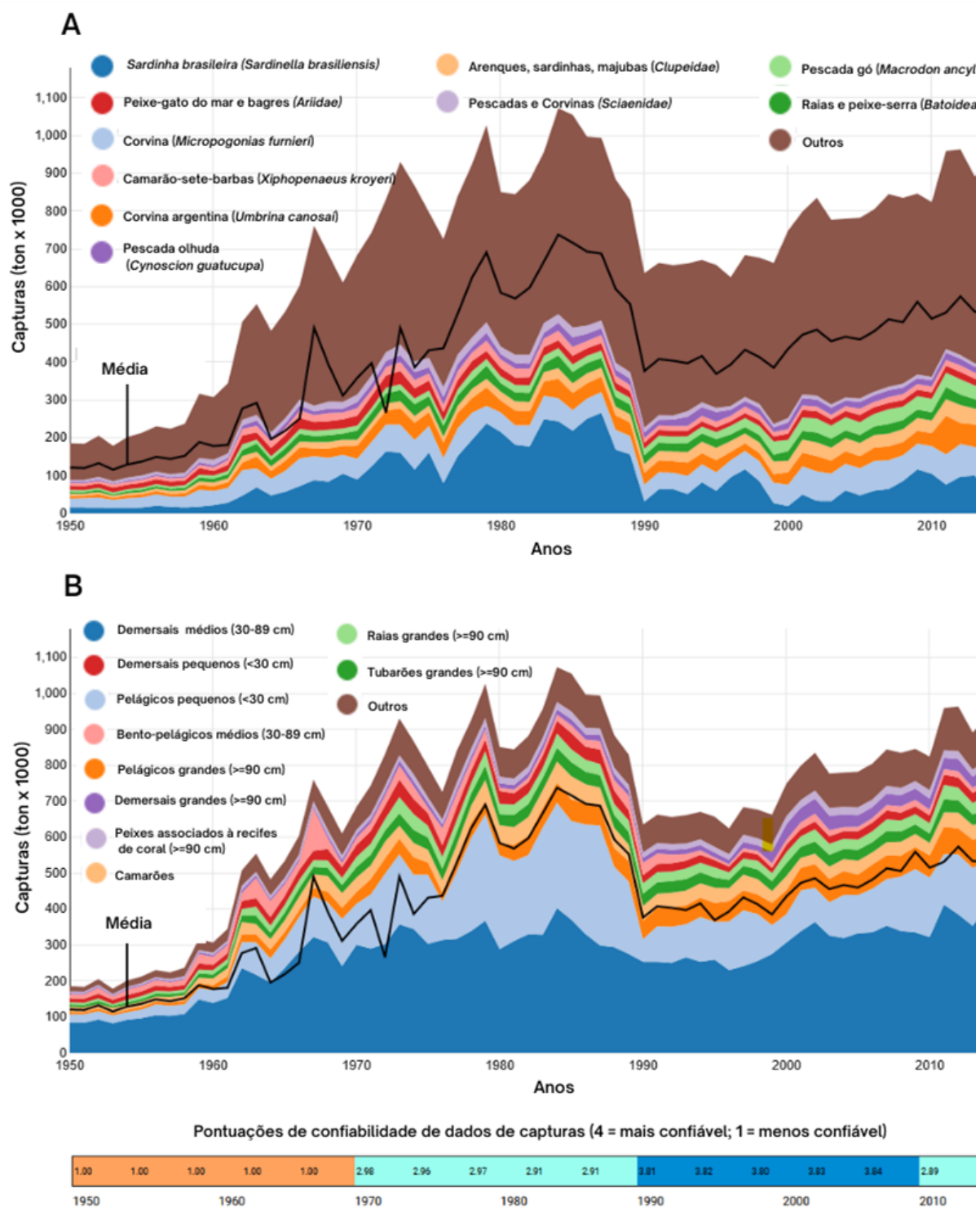


Figura 2: Séries temporais de captura dos principais **táxons** (A) e **grupos funcionais** (B) alvos pesqueiros no Oceano Atlântico Sul. Adaptado de SEA AROUND US (2022).

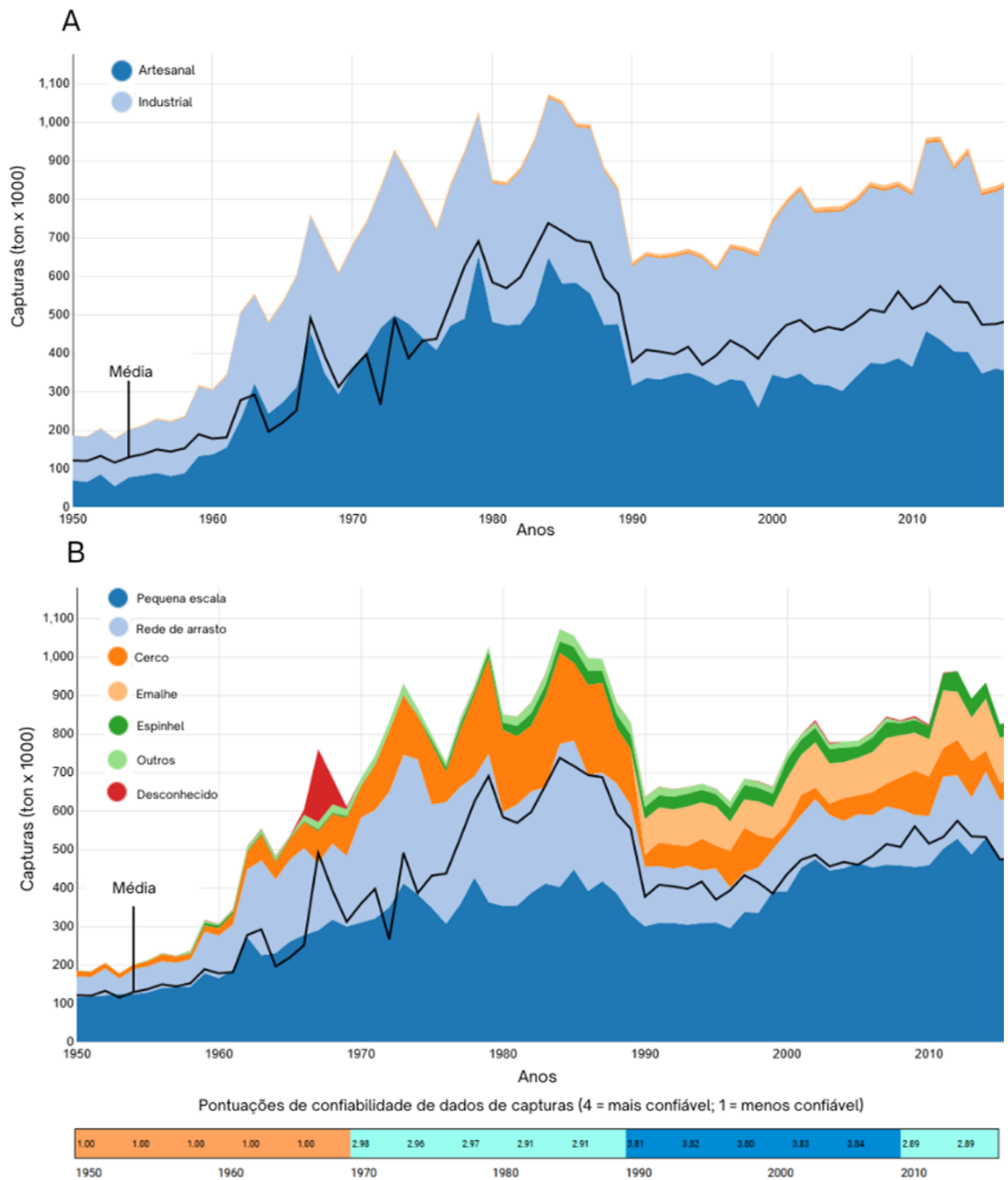


Figura 3: Séries temporais de captura dos principais **setores pesqueiros (A)** e as principais **técnicas pesqueiras (B)** utilizadas no Oceano Atlântico Sul. Adaptado de SEA AROUND US, 2022.

1.2 Peixes Forrageiros e Ambiente Epipelágico

A conservação dos ecossistemas no século XXI está centrada na negociação de compensações entre as diversas necessidades humanas e as necessidades das outras espécies, as quais, juntas, constituem ecossistemas acoplados humanos-naturais. Peixes forrageiros marinhos, como sardinhas, anchovas e arenques, são umnexo para tais trocas porque são nós centrais nas redes alimentares marinhas e, também, alvos da pesca (SHELTON, 2014). Segundo Perez *et al.* (2015), espécies forrageiras são aquelas que se alimentam de organismos do plâncton (fito ou zooplâncton) e, portanto, posicionam-se próximos da base da cadeia trófica do ambiente pelagial marinho. Isso faz com que, em sua maioria, sustentem grandes populações¹² e, conseqüentemente, grandes pescarias, além de servirem de alimento para muitos predadores de nível superior, incluindo outros peixes, aves marinhas e mamíferos marinhos.

Além disso, uma vez que as comunidades de peixes de espécies pelágicas habitam as camadas superiores da coluna de água, espera-se que estas sejam mais rapidamente afetadas, seja positiva ou negativamente, pelas mudanças nos ecossistemas marinhos correlacionadas ao aumento de temperatura global observado nas últimas décadas em diferentes escalas espaciais e temporais (MATSUURA, 1988; CERGOLE, 1995; MATSUURA, 1996; FRANCIS *et al.*, 1998; ROSSI-WONGTSCHOWSKI *et al.*, 2002; SUNYÉ, 1999 em PINAYA, 2008; COCHRANE *et al.*, 2009; IPCC, 2021). Moltó *et al.* (2021) ressaltou que os efeitos das mudanças climáticas globais afetam de forma mensurável a zona pelágica dos sistemas marinhos, seja diretamente ou por meio de interações tróficas. Os impactos documentados incluem: aumentos na temperatura da superfície do mar (TSM) e na frequência e intensidade das ondas de calor marinhas; mudanças nas camadas de mistura de e na circulação de massas de água; e alterações na produtividade primária.

1.4 *Sardinella Brasiliensis*

A espécie usada nesta pesquisa como estudo de caso, a sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*), é um pequeno clupeídeo pelágico distribuído entre 22°S e 29°S da borda ocidental do Atlântico Sul (PERIN *et al.*, 2014), contudo existem evidências sobre a adaptação/migração do seu habitat para latitudes mais altas (GIGLIOTTI, 2010), tendo sido encontrados evidências de exemplares até a costa do Rio Grande do Sul (BR). A *S. brasiliensis* se posiciona próximo à

¹² Suas grandes populações são resultado da reprodução em grande número, crescimento rápido e ciclo de vida relativamente curto.

base da cadeia trófica do ambiente pelagial marinho, e assim, junto com manjubas e anchoitas, sustenta grandes populações de predadores de nível superior e, conseqüentemente, grandes pescarias – sendo capturadas principalmente pelas frotas de cerco (traineiras) (PERIN *et al.*, 2014; PEREZ *et al.*, 2015).

A pesca da sardinha apresenta alta taxa de variabilidade interanual no seu estoque, sendo experimentada uma diminuição na abundância do seu estoque a partir da década de 80 (Figura 3), onde registrou capturas máximas de cerca de 200 mil toneladas anuais (máxima de 266.02t em 1987). Contudo, desde então a produção tem oscilado entre 50 e 70 mil toneladas anuais, o que representa de 10 a 15% da produção da pesca marinha do Brasil (PEREZ *et al.*, 2015) e, apesar da quantidade/qualidade dos estudos sobre a espécie, ainda é difícil se distinguir os impactos da pesca, dos impactos das variações ambientais sobre o estoque (tanto em escalas regionais, quanto globais; FAO, 2021). Nesse sentido, existem indicações de que, além da sobrepesca, outros fatores contribuem para a variação no recrutamento e disponibilidade da sardinha, dentre eles estão alguns fenômenos oceanográficos e climáticos em diferentes escalas espaço-temporais (PINAYA, 2008).

Jablonsky & Legey (2004) quantificaram os efeitos ambientais sobre o recrutamento da *S. brasiliensis* de 1977 a 1993 e identificaram a existência de janelas ambientais ótimas para o seu recrutamento: TSM (24.75 a 25.5°C); tensão de cisalhamento do vento sobre a superfície (0.035 a 0.045 N m⁻²); Transporte de Ekman (520 a 700 kg s⁻¹) e índice de turbulência (30 a 45 m³ s⁻³). Segundo eles, uma vez que sardinhas de um a dois anos de idade dominam as capturas comerciais, então o efeito de um recrutamento insuficiente nas capturas é quase imediato. Recrutamento este que provavelmente é influenciado por fatores ambientais - relacionados à meteorologia regional e oceânica, condições oceanográficas e, também, por uma redução na biomassa desovante devido à pesca. É interessante notar que esses fatores ambientais devem influenciar especialmente a época de desova (JABLONSKI & LEGEY, 2004), uma vez que o maior tempo de incorporação ao plâncton implica em um maior tempo de exposição individual às forçantes físicas, incluindo processos de difusão e advecção (ZWOLINSKI *et al.*, 2006 em MORAES, 2012).

Soares *et al.* (2011) estudou as características oceânicas e atmosféricas presentes no período de desova da *Sardinella brasiliensis* (meses de dezembro e janeiro), na Plataforma Continental Sudeste do Brasil (PCSE), com o intuito de investigar as causas dos extremos de captura (máximos e mínimos) observados entre 1970 e 2001. Para isto analisou variáveis

oceânicas – como temperatura da superfície do mar, tensão do vento à superfície do mar, transporte de Ekman e índice de mistura – e variáveis atmosféricas – como precipitação, radiação de onda longa emergente, ventos e altura geopotencial. Tendo em mãos as climatologias dessas variáveis para os 30 anos de dados, obteve as anomalias referentes aos anos anteriores aos máximos (positivos e negativos) de captura da espécie. Dentre seus resultados, identificou que um excesso de mistura e transporte na parte norte da PCSE, durante o período da desova, está associado a uma baixa captura no ano seguinte. Isto poderia estar relacionado à destruição de partículas de alimento e dispersão de ovos e larvas gerados pelo excesso de mistura e de transporte. Também identificou um sinal de maior atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e sistemas frontais sobre a PCSE, no período de desova, os quais foram associados aos extremos positivos de captura da sardinha.

1.5 Área de Estudo

A área de estudo desse trabalho está compreendida entre 10°S-50°S e 60°O-20°E, latitude e longitude respectivamente (Figura 4), correspondendo a mesma área definida para diferentes autores que investigaram questões relacionadas a TSM do Oceano Atlântico Sul (OAS) (MORIOKA *et al.*, 2011; LÜBBECKE *et al.*, 2014; BOUALI *et al.*, 2017), além de compreender a escala espacial de ocorrência da *Sardinella brasiliensis*, espécie alvo deste estudo, e também a do Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (DSAS), principal modo de variabilidade acoplado do OAS.

1.5.1 Oceano Atlântico Sul

- **Temperatura da Superfície do Mar**

Bouali *et al.* (2017) investigaram as características espaciais e temporais dos gradientes de temperatura da superfície do mar (TSM) no OAS usando dados de satélite para um período de 12 anos (2003–2014) (Figura 4) e observaram que a maioria das regiões frontalmente ativas do OAS apresenta gradientes térmicos com um ciclo sazonal e variam dependendo da natureza dos processos envolvidos na formação e evolução de frentes. Em regiões de ressurgência costeiras, onde as frentes térmicas são presentes ao longo do ano, os gradientes TSM tendem a atingir amplitudes máximas e mínimas durante o verão e inverno, respectivamente, enquanto em regiões onde as frentes térmicas resultam da interação de fluxos de grande escala, como na região da confluência Brasil-Malvinas, na zona de retroflexão das Agulhas e no encontro da

Frente do Atlântico Sul e a Frente Polar Antártica, observa-se um ciclo sazonal diferente e menos pronunciado, onde a atividade frontal máxima e mínima ocorre no final do outono/inverno e no verão, respectivamente (BOUALI *et al.*, 2017). Segundo os autores, exceto por diferenças de magnitude, ciclos sazonais semelhantes podem ser observados tanto no sistema de ressurgência da região do Cabo Frio, como na região de Benguela. Por fim, Bouali *et al.* (2017), destacaram que nenhuma variação anual significativa na distribuição espacial dos gradientes TSM entre 2003 e 2014 pode ser detectada, sendo a única tendência significativa identificada na região de ressurgência de Cabo Frio (Figura 4.a), onde a magnitude dos gradientes TSM aumentou 16% em 12 anos.

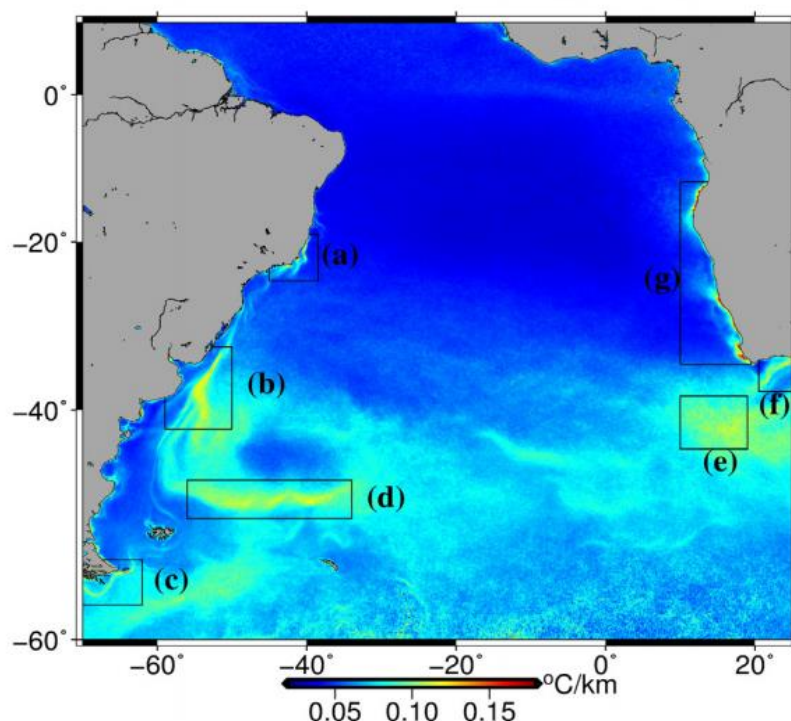


Figura 4: Mapa composto de 12 anos (2003–2014) da magnitude do gradiente TSM sobre o Oceano Atlântico Sul computados usando dados Terra e Aqua MODIS. Os retângulos correspondem a regiões com intensa atividade frontal. (a) Região de ressurgência do Cabo Frio; (b) Região de confluência Brasil-Malvinas; (c) Corrente do Cabo Horn; (d) O encontro da Frente Subantártica e da Frente polar Antártica; (e) Retroflexão das Agulhas; (f) Corrente de Agulhas (g) Sistemas de Ressurgência da Corrente de Benguela. Fonte: BOUALI *et al.* (2017)

- **Alta Subtropical do Atlântico Sul**

O Atlântico Sul apresenta um centro de alta pressão - Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) - localizado na parte central do oceano, o qual está associado a valores superiores a 1020 mbar, indicando a presença do giro subtropical (WAINER & TACHETTO, 2006) (Figura 5). A ASAS migra sazonalmente, sendo localizada mais ao sul no verão e mais ao norte no inverno (WAINER & TACHETTO, 2006). Essas variações interanuais em sua posição são

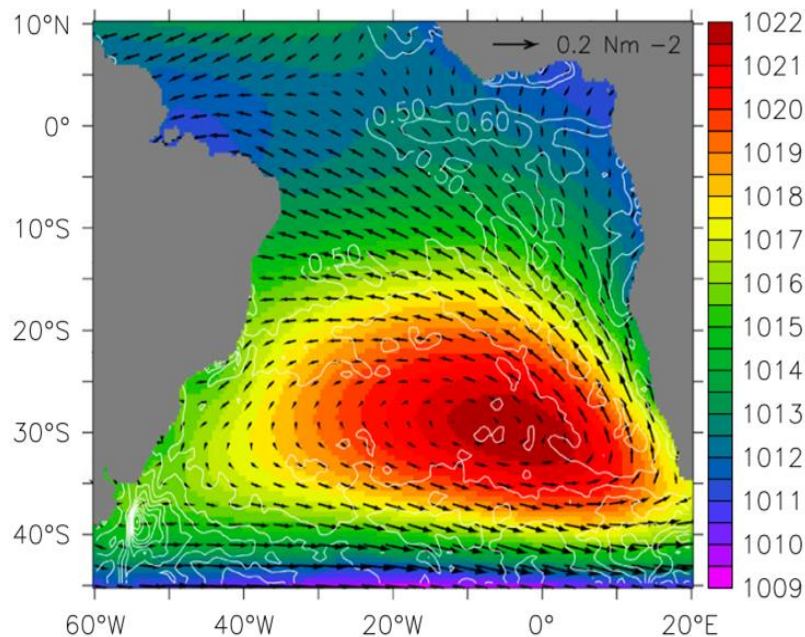


Figura 5: Visão geral do Oceano Atlântico Sul de 1980 a 2008. O sombreamento de cores mostra a pressão média ao nível do mar (hPa) (ERA-Interim). Os vetores pretos sobrepostos mostram o campo de tensão do vento médio (Nm^{-2}) (ERA-Interim). E os contornos brancos, o desvio padrão associado às anomalias de TSM interanuais ($^{\circ}\text{C}$) (SODA2.2.4). Fonte: LÜBBECKE *et al.* (2014)

refletidas em uma diminuição de intensidade na medida em que se aproxima do Equador (SUN *et al.*, 2017). Gomes & Freitas (2020) observaram uma grande oscilação na posição latitudinal da ASAS entre 1979 e 2015, com uma tendência de deslocamento em direção ao polo sul, chegando no seu máximo em 2010, em cerca de 32°S, acompanhada por sua intensificação resultante. Segundo os autores, tal intensificação estaria associada a uma tendência de enfraquecimento da Célula de Hadley devido ao aquecimento global das últimas décadas.

De acordo com Wainer & Tachetto (2006), variações de intensidade e posição da ASAS têm influência direta no clima da região costeira do Brasil, uma vez que afeta o sistema de ventos. No inverno, esse sistema de alta pressão é mais forte e mais próximo ao continente, devido menor temperatura da região continental em relação ao oceano. Assim, a ASAS pode atuar inibindo a entrada de frentes no continente durante o inverno. No verão, a formação de centros de baixa pressão sobre o continente e o posicionamento da ASAS mais ao leste da bacia oceânica potencializa os ventos, assim como as ressurgências associadas, ao longo da costa oeste africana (WAINER & TACHETTO, 2006).

- **Giro Subtropical do Atlântico Sul**

O Giro Subtropical do Atlântico Sul (Figura 6) é uma feição de circulação oceânica impulsionada pelo vento (MARCELLO *et al.*, 2018) que flui no sentido anti-horário sobre a superfície do OAS, transportando águas de altas latitudes em direção ao equador e águas equatoriais em direção a latitudes mais altas (DROUIN *et al.*, 2020), desempenhando um papel fundamental na modulação do sistema climático terrestre (MARCELLO *et al.*, 2018). A força do giro segue o aquecimento e resfriamento sazonal da superfície do mar e é amplamente influenciada pela variabilidade na altura máxima da superfície do mar. Em escalas de tempo sazonais, o giro é mais influenciado pelos sinais de aquecimento e resfriamento sazonais, que levam a uma expansão ou contração da coluna d'água, respectivamente (DROUIN *et al.*, 2020). Além disso, segundo Marcello *et al.* (2018), tal circulação no sentido anti-horário está acelerando e se deslocando para o sul, em direção ao polo – o que também foi destacado por Drouin *et al.* (2020), que observaram uma migração do giro nessa direção entre 1993 e 2018 – sendo essas mudanças, possivelmente relacionadas com uma intensificação do ramo que flui para o norte, da chamada circulação global termo-halina, feição de larga escala na qual o Giro Subtropical do Atlântico Sul é inserido (MARCELLO *et al.*, 2018).

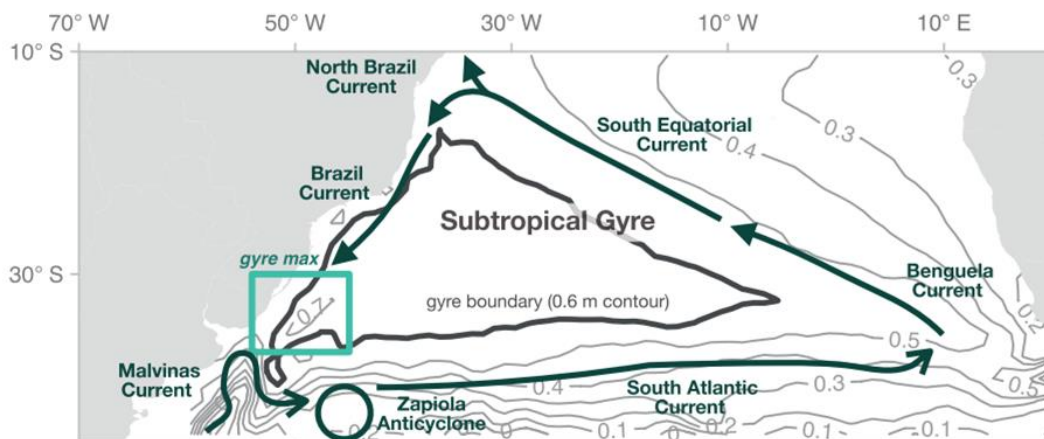


Figura 6: Visão geral da circulação subtropical do Atlântico Sul e esboço das características das correntes marítimas relevantes. Os contornos em cinza indicam a climatologia média da altura da superfície do mar (1993–2018) em metros da E.U. Copernicus Marine Service Information. A posição do giro subtropical geostrofico (GSGT) é mostrada pelo contorno de 0.6 m em cinza escuro e a área usada para calcular o GSGT máximo é destacada pela caixa azul-clara. Fonte: DROUIN *et al.* (2020)

1.6 Objetivos

Levando em consideração o contexto de intensificação do aquecimento global, com ênfase na superfície do Oceano Atlântico Sul e na maior frequência de fases negativas do DSAS observadas nas últimas décadas (MORIOKA *et al.*, 2011), assim como o comportamento não linear das séries temporais das principais pescarias do Atlântico Sul (dentre elas a *S. brasiliensis*) entre 1970 e 2019, propôs-se os seguintes objetivos:

- I. Descrever o comportamento anual da TSM do OAS ao longo de 1880 e 2019 e estabelecer comparações com o Oceano Global (OG), a fim de avaliar as alterações ocorridas de 1970 a 2019 (período de interesse do estudo) dentro da conjuntura de aquecimento global.
- II. Quantificar e descrever o aquecimento da superfície do mar, assim como as mudanças gerais de padrões médios oceânicos de ATSM do OAS para a média dos dezembros e janeiros (DJ)¹³ de cada ano que compõem o período investigado (1970 a 2019) e, também, de suas médias decadais. Além disso, investigar se houve aumento ou diminuição de ocorrências de determinada fase do DSAS para DJ ao longo de 1970 a 2019.
- III. Estimar a correlação entre as STs de Captura de *S. brasiliensis* (CAP) e $ATSM_{ens}$ OAS DJ, entre 1970 e 2019. Ao mesmo tempo, avaliar uma possível defasagem de tempo entre as séries, e se necessário, corrigi-la, com vistas à obtenção de resultados mais representativos da realidade.
- IV. Avaliar evidências do comportamento não linear da ST de CAP, assim como os padrões oceânicos de ATSM OAS DJ relacionados a cada estado de equilíbrio do sistema estudado, assim como com o período de transição entre um estado e outro.
- V. Investigar a existência de padrões oceânicos de $ATSM_{ens}$ OAS DJ relacionados ao período de máximas (MAX) e mínimas (MIN) capturas de *S. brasiliensis* no OAS.
- VI. Mensurar a disposição das Frequências Relativas (FR, %) de cada fase do DSAS (positiva e negativa) para cada Estado de Equilíbrio proposto (E1, TR e E2).
- VII. Quantificar e descrever a correlação entre as ocorrências das diferentes fases do DSAS com anos de MAX e MIN de capturas de *S. brasiliensis* no OAS entre 1970 e 2019.

¹³ Média dos dezembros e janeiros (DJ): corresponde à média aritmética dos valores encontrados para os janeiros dos anos de referência e dos dezembros dos anos anteriores ao ano de referência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo detalha os dados e a metodologia empregados neste estudo a fim de atingir os objetivos traçados no Capítulo I. Para isso foram estabelecidas as seguintes etapas:

- i. Obtenção das séries temporais (STs) de climatologias mensais (CLM) e anomalias de temperatura (ANOM) anuais. Caracterizando o intervalo médio de temperatura (através dos resultados das CLMs) e; identificando os máximos e mínimos de ATSM, assim como os períodos com tendências positivas e negativas nas séries (através dos resultados de ANOM).
- ii. Descrição do comportamento da TSM anual do Oceano Global (OG) desde 1880 até 2019, seguindo as mesmas etapas usadas para descrever o comportamento da TSM anual do OAS.
- iii. Estabelecimento de comparações gráficas sobre o comportamento da TSM anual do OAS e do OG desde 1880 até 2019, através dos resultados das diferenças entre as CLMs e ANOMs obtidas.
- iv. Obtenção da série temporal anomalia da superfície do mar média do conjunto dados¹⁴ ($ATSM_{ens}$) do OAS para DJ 1970 a 2019.
- v. Obtenção e descrição dos padrões médios oceânicos de $ATSM_{ens}$ DJ no OAS, de cada ano que compõem o período de 1970 a 2019 e, também, de suas médias decadais.
- vi. Obtenção da ST do Índice do Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (IDSAS), tanto para DEZ quanto para JAN (concatenando anos de DEZ e JAN subsequentes, em apenas um ano, o ano de referência), e seleção dos anos correspondente a cada fase do modo de variabilidade ($IDSAS \geq |STD|$).
- vii. Obtenção a Frequência Relativa (FR, %) de cada fase do DSAS para DJ em cada década de 1970 a 2019 e representação através de gráficos de barras.
- viii. Representação gráfica das STs.

¹⁴ A descrição dos dados utilizados pode ser conferida na Tabela 1.

- ix. Análise de Correlação Cruzada, a qual permite a identificação de possíveis atrasos e adiantamentos significativos entre STs.
- x. Correlação de Pearson, Gráficos de Dispersão e Análise de Regressão Linear Simples (auxílio no entendimento da existência e magnitude da correlação entre as STs de CAP e $ATSM_{ens}$ OAS DJ, entre 1970 e 2019).
- xi. Análise gráfica do comportamento geral das séries e identificação de qual o provável valor de $ATSM_{ens}$ OAS DJ que possa estar relacionado ao limiar crítico da ST de CAP.
- xii. Inspirando-se em Saygu *et al.* (2022), divisão das STs e, conseqüentemente das próximas análises e a obtenção dos padrões oceânicos médios de $ATSM_{ens}$ OAS DJ, em três períodos: Estado I ($E1$); Transição (TR); e Estado II ($E2$); Além dos padrões de $ATSM_{ens}$ OAS DJ de cada estado, obtenção padrões médios relativos às diferenças entre os estados.
- xiii. Obtenção padrões de $ATSM_{ens}$ OAS DJ relativos aos compostos MAXs e MINs [a identificação dos compostos foi feita através da metodologia adaptada de SOARES *et al.* (2011)], para os períodos $E1$, TR e $E2$; assim como a obtenção de padrões das diferenças de $ATSM_{ens}$: entre cada composto (MAX e MIN), em cada estado, e entre os estados.
- xiv. Subdivisão dos anos de cada fase do DSAS, anteriormente selecionados, por estado de equilíbrio ($E1$, TR e $E2$).
- xv. Obtenção de FR de cada fase do DSAS DJ, para $E1$ e $E2$, a partir de Gráficos de Barra para FR.
- xvi. Aplicação análise de Correlação de Pearson, Gráficos de Dispersão e Análise de Regressão Linear (para auxílio no entendimento da existência e magnitude da correlação entre os anos de CAPmax e CAPmin e DSAS positivos e negativos, em $E1$ e $E2$, entre 1970 e 2019).

2.1 Dados de Temperatura da Superfície do Mar

Foram utilizados dados de TSM de três diferentes fontes: COBE-SST2, NOAA ERSST.V5, ICOADS 2 Degree – Tabela 1), os quais constituem longas séries de dados reconstruídas a partir de interpolação de dados observacionais históricos e registros paleoclimáticos.

Ao considerarmos a média aritmética (MA) de um conjunto de dados (*ensemble mean*), esperamos atenuar a imprecisão associada aos mesmos. Nesse contexto, este trabalho priorizou o uso da MA dos dados de TSM descritos na Tabela 1 (TSM_{ens}) da região do Oceano Atlântico Sul (Figura 4), entre 1970 e 2019. Para análises complementares que englobam período (1880 – 2019) e domínio maiores (Oceano Global), como o Objetivo I (Pág. 25), lançou-se mão do uso dos dados de NOAA ERSST.V5 exclusivamente.

Tabela 1: Descrição dos dados reconstruídos de TSM usados no presente trabalho. Os dados foram fornecidos em forma de médias mensais por NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, USA, e têm acesso livre pelos endereços fornecidos abaixo.

Dados	Cobertura Tempo- ral	Cobertura Espacial	Resolução (LAT, LON)	Referência	Acesso
COBE-SST2	1850 a 2019	89.5N – 89.5S e 0.5E - 359.5E	1°x1°	HIRAHARA <i>et al.</i> (2014)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cobe2.html
NOAA ERSST.V5	1854 a 2022	88N – 88S e 0.0E – 358.0E	2°x2°	HUAG <i>et al.</i> (2017)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html
ICOADS 2 Degree	1800 até o presente próximo	89.0N – 89.0S e 1.0E - 359.0E	2°x2°	FREEMAN <i>et al.</i> (2017)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.coads.1deg.html

2.1.2 Resolução Espacial

Uma vez que os dados de ATSM descritos se apresentam em diferentes resoluções espaciais, a fim de padronizá-los em resolução de 1°x1° de latitude e longitude, respectivamente, foi aplicada a técnica de interpolação bilinear.

2.2 Análises Oceano Atlântico Sul vs Oceano Global – 1880 a 2019

A fim de atingir o objetivo número 1 desse estudo, foram utilizados os dados reconstruídos de TSM NOAA ERSST.V5, a partir dos quais foram obtidas as STs de climatologias mensais e anomalias anuais do OAS e do OG, assim como as diferenças entre tais séries. Os cálculos para cada análise correspondem aos descritos no próximo tópico, diferenciando-se apenas com relação ao período considerado.

2.3 Análises Oceano Atlântico Sul – 1970 a 2019

2.3.1 Climatologia Mensal e Temperatura Média

A ST de climatologia mensal (CLM) do OAS para o período de 1970 a 2019 foi obtida através da média aritmética de cada grupo de meses iguais que compõem o período total de dados analisados (Equação 1). Por exemplo, obtemos a média de ‘janeiro’ fazendo a média para todos os janeiros que compõem o período. O cálculo foi feito com base em cada dado (COBE, NOAA, ICOADS) e, também, para o conjunto de dados (TSM_{ens}) – Figura 12. Para a obtenção das séries também foi feita a média espacial de CLM para todo o domínio em estudo (10-50°S e 60W-20E, de latitude e longitude respectivamente). A Temperatura Média do OAS de 1970 a 2019 (T_{média}) foi obtida a partir da média dos doze valores de climatologia mensal obtidos.

$$T_{m\acute{e}dia} = \frac{CLM_{jan} + CLM_{fev} + CLM_{mar} + \dots + CLM_{dez}}{12}$$

12

(Eq.1)

2.3.2 Anomalias Mensais

O cálculo da ST de anomalias mensais de temperatura da superfície do mar (ATSM) se decorreu da diferença entre as séries originais e suas respectivas climatologias para todo o período analisado (Equação 2):

$$ATSM_m = ST_{tsm} - CLM_m$$

(Eq. 2)

Onde m se refere ao mês de interesse para o cálculo.

Para a obtenção das STs de anomalias, também foi feita a média espacial de ATSM obtidas para todo o domínio em estudo (10-50°S e 60W-20E, de latitude e longitude respectivamente). O cálculo foi feito com base em cada dado (COBE, NOAA, ICOADS) e, também, para o conjunto de dados (TSM_{ens}) – Tabela 1.

2.3.3 Escolha dos Meses Alvo de Estudo

Vale ressaltar que os meses de dezembro e janeiro (DEZ e JAN) foram selecionados com vistas a atender os demais objetivos desse estudo (Objetivos II a VII, Pág. 25), que levam em consideração características reprodutivas da *Sardinella brasiliensis* (período de pico desova, fase planctônica e sua maior susceptibilidade às intempéries ambientais¹⁵). Dessa forma, para as próximas análises, após a seleção dos meses de DEZ (mês anterior ao mês de referência e JAN (mês de referência), foi feita a média aritmética dos valores relativos a DEZ e JAN, a qual é mencionada ao longo do trabalho como **DJ**.

2.3.4 Padrões Oceânicos Médios

Os padrões médios oceânicos (tanto das climatologias, quanto das anomalias e das diferenças) foram obtidos através da média dos diferentes períodos, os quais variaram dependendo da análise proposta, podendo ser anuais, decadais ou para cada ‘estado de equilíbrio’ (descritos mais a diante, na página 40), sempre considerando a média DJ. Os padrões foram obtidos com base no conjunto de dados (TSM_{ens}) – Tabela 1 – e englobaram todo o domínio de estudo (Oceano Atlântico Sul; Figura 4).

2.3.5 Dipolo Subtropical do Atlântico Sul

A identificação dos padrões oceânicos relativos a cada fase do modo de variabilidade DSAS foi guiada pela caracterização (e formação) descrita por MORIOKA *et al.* (2011).

¹⁵ “A eclosão dos ovos de sardinha ocorre até 24 h após a fertilização, ao passo que os estágios larvais se estendem por até 45 dias. Nestes estágios a capacidade de locomoção das larvas é limitada por aparatos natatórios subdesenvolvidos, e pelo tamanho corporal reduzido, potencializando os efeitos de processos físicos difusivos e advectivos sobre os padrões de distribuição.” (MATSUURA, 1977; KURTZ, 2000; FUIMAN, 2002; SMITH, 1973 em SOARES, 2009) Com isso, nota-se que as larvas de sardinha demonstram susceptibilidade potencial a ação de processos hidrodinâmicos, e uma dependência relativa das condições tróficas locais (SOARES, 2009).

Segundo o autor, a fase positiva do DSAS é caracterizada por apresentar anomalias positivas no polo Sudoeste (SO) e anomalias negativas no polo Nordeste (NE) (Figura 7), sendo o contrário observado na fase negativa. A formação dos polos em cada fase estaria associada a interações oceano-atmosfera. Assim, para explicar a formação da fase positiva do modo, MORIOKA *et al.* (2011) enfatiza a importância da migração da ASAS para o sul, acompanhada da intensificação anômala da pressão ao nível do mar no polo SO, que ocasionam a intensificação dos ventos alísios no polo NE. Os ventos alísios, por sua vez, estão associados à redução do fluxo de calor latente para a atmosfera no polo NE. Com isso, a profundidade da camada de mistura no polo NE fica mais profunda, reduzindo a capacidade de aquecimento por radiação de onda curta e resultando em ATSMs negativas neste polo. O inverso ocorre para a formação da fase negativa.

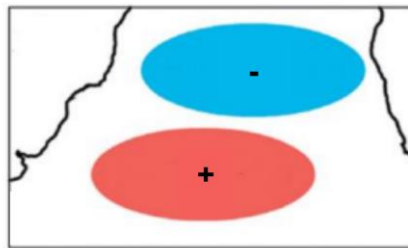


Figura 7: Esquema simplificado de DSAS em fase positiva. A cor vermelha refere-se ao polo de anomalias de TSM positivas; a cor azul refere-se ao polo de anomalias de TSM negativas. O contrário é observado para o DSAS em fase negativa.

- ***Índice Dipolo Subtropical do Atlântico Sul***

Segundo Souza & Reboita (2021), o IDSAS é definido pela diferença de ATSM média em dois centros de aquecimento e resfriamento intensos associados ao DSAS (Figura 8). Com isso, o IDSAS é computado através da diferença da média espacial das anomalias de temperatura da superfície do mar entre o polo SO e polo NE (MORIOKA *et al.*, 2011; SILVA, 2020). O referido índice foi representado em forma de série temporal anual de 1970 a 2019 para a média DJ.

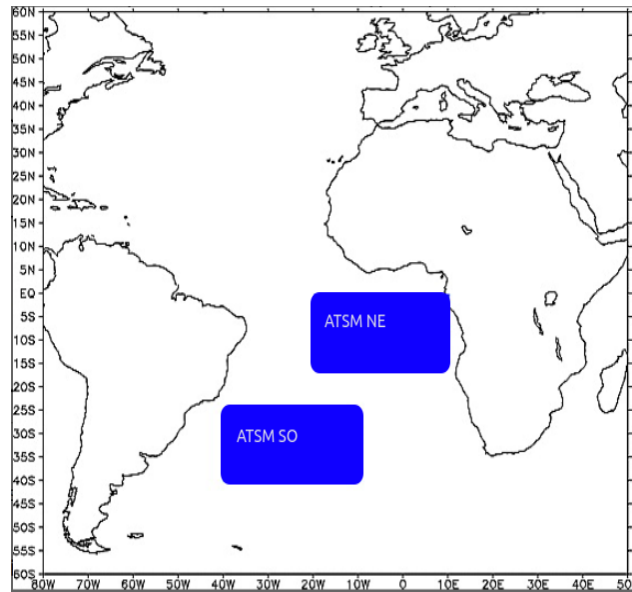


Figura 8: O esquema demonstra as regiões polos de resfriamento e aquecimento da superfície do oceano usadas para o cálculo do IDSAS. Os subscritos representam o polo Sudoeste e o polo Nordeste, SO (10°O–40°O, 25°S–40°S) e NE (20°O–10°L, 0°–15°S), respectivamente Adaptada de NMANCHI *et al.* (2011).

- **Compostos**

Após a obtenção das STs de IDSAS, seguindo a metodologia adaptada proposta por Morioka *et al.* (2011) e Souza & Reboita (2021), foram computados os anos cujos valores do IDSAS (média DJ) extrapolaram o valor de |STD| (Figura 16). Assim, considerou-se ‘ano de IDSAS positivo’ aquele que apresentou valor maior que +STD; e ‘ano de IDSAS negativo’ aquele que apresentou valor menor que -STD.

- **Frequência Relativa**

Tanto as décadas, quanto cada estado de equilíbrio estudado, foram avaliados em termos de Frequência Relativa de Ocorrência (FR, %): para cada fase do DSAS, considerando as ocorrências para média DJ. A FR foi calculada seguindo a seguinte regra:

$$[Década] \rightarrow Fr_{dec} = [Número\ de\ Ocorrências\ na\ Década] \div [Número\ Total\ de\ ocorrências]$$

(Eq. 3a)

$$[\text{Estado}] \rightarrow Fr_{En} = [\text{Número de Ocorrências no Estado}] \div [\text{Número Total de Ocorrências}]$$

Onde n indica o Estado de Equilíbrio¹⁶ de interesse.

(Eq. 3b)

2.4 Capturas de *Sardinella Brasiliensis* e Temperatura da Superfície do Mar

2.4.1 Dados de Capturas de *Sardinella Brasiliensis*

Dados anuais de captura de *Sardinella brasiliensis* no OAS para o período de 1970 a 2019 foram usados para dar continuidade às análises descritas neste capítulo. Estes dados foram disponibilizados gratuitamente pela plataforma *Sea Around Us*, na qual são apresentados em forma de reconstrução a partir da base de dados do *FishStat*, da Organização para a Alimentação e Agricultura das Nações Unidas (FAO). É interessante destacar que a escolha do período analisado neste estudo está pautada na disponibilidade desses dados na plataforma.

2.4.2 Correlação entre Capturas de *Sardinella Brasiliensis* e Temperatura da Superfície do Mar

Cabe ressaltar que a principal ferramenta usada para elaboração dos cálculos estatísticos descritos nesta etapa foi a linguagem de programação R, a qual é voltada para elaboração de análises estatísticas (MENDES, 2020).

- **Correlação Linear de Pearson - Séries de Capturas com Datas Originais**

Inicialmente, passamos a explorar a correlação entre as variáveis através do Diagrama de Dispersão (Figura 19), onde a variável preditora é representada pelo eixo X e a variável resposta pelo eixo Y. Este diagrama pode ser usado para visualizar a associação entre duas variáveis (SHIMAKURA, 2005), contudo, é necessário determinar um coeficiente de correlação para que possamos qualificar esta aproximação. Neste caso, optamos pelo Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (r). Segundo PEREIRA (2008), basicamente, calcula-se r quando duas variáveis são ditas numéricas e têm-se o interesse de saber o quanto da variabilidade de uma variável está correlacionada com a variabilidade da outra. Esse coeficiente (r) varia entre -1 e +1, cujos valores próximos de -1 indicam forte correlação linear

¹⁶ O detalhamento de cada Estado de Equilíbrio, assim como sua divisão, pode ser visitado na seção 2.4.3.

negativa, e de +1 forte correlação linear positiva. Por outro lado, valores próximos a zero expressam ausência de correlação. Nota-se que ele capta apenas relações lineares entre variáveis (para quaisquer outras relações, tal coeficiente não é indicado).

Para calcular o r entre as variáveis, utilizamos o teste de correlação, $cor.test(X,Y)$ ¹⁷, para o qual, para avaliarmos a significância do resultado, admitimos o seguinte teste de hipóteses:

H0 → “A correlação entre as variáveis é igual a zero” → $p\text{-valor} < 0.05$ → *rejeitar H0 e aceitar H1*

H1 → “A correlação entre as variáveis é diferente de zero”

Para classificação qualitativa do grau de correlação entre as variáveis, usamos a sugestão de CALLEGARI-JACQUES (2003) (Tabela 2):

Tabela 2: Avaliação qualitativa do grau de correlação entre duas variáveis. Adaptado de CALLEGARI-JACQUES (2003).

$ r $	Correlação
0	Nula
]0; 0.3[Fraca
[0.3; 0.6[Regular
[0.6; 0.9[Forte
[0.9; 1[Muito Forte
1	Perfeita

Uma vez admitida correlação fraca entre as séries, passamos a investigar possíveis defasagens de tempo entre elas, a fim de encontrar correlações mais expressivas e, finalmente, poder dar continuidade a investigação através da Análise de Regressão Linear Simples. Para isso, lançamos mão da técnica *Cross Correlation Function (CCF)*.

- ***Correlação Cruzada***

A análise *CCF* indica a significância da correlação entre séries x_t e y_{t+h} considerando diferentes defasagens de tempo entre elas. O atraso de uma série em relação a outra é

¹⁷ Teste executado no software estatístico R.

representado pelo termo *Lag* (em inglês), ou ainda pela letra *h*. Interpretamos a saída da *CCF* observando o sinal de *h* e a magnitude da Função de Autocorrelação (do inglês, *Autocorrelation Function, ACF*). Assim, sendo x_t preditor de y_{t+h} e o sinal de *h* negativo, inferimos que aquilo que acontecer em x_t , refletirá em y_{t+h} com atraso *h*, enquanto, se o sinal de *h* for positivo, inferimos que y_{t+h} está adiantado em relação a x_t em *h* passos de tempo. Essa interpretação está representada de forma resumida na Tabela 3. Ao mesmo tempo, a magnitude da *ACF*, representada pelas barras verticais dos gráficos “*ACF vs Lag*” (Figura 20), fornece a correlação entre as variáveis analisadas para cada *Lag*, sendo os valores significativos identificados graficamente pelas barras que ultrapassam as Bandas de Intervalo de Confiança, indicando uma significância de pelo menos 95% (linha tracejada azul, Figura 20). A certificação dos valores de *ACF* para cada *Lag* também pode ser feita através da consulta dos “valores de autocorrelação para os diferentes atrasos” (Figura 20).

Tabela 3: Esquema de apoio a interpretação do sinal de *h* (*Lag*) obtido a partir das análises *CCF*. Notar que x_t é preditora de y_{t+h} .

Sinal de <i>h</i>	Interpretação da Análise
Negativo	y_{t+h} está atrasado em relação a x_t
Positivo	y_{t+h} está adiantado em relação a x_t

- **Análise de Regressão Linear Simples**

A fim de investigar a existência (e magnitude) da correlação entre as STs de Captura de *S. brasiliensis* (CAP) e ATSM_{ens} OAS DJ, entre 1970 e 2019 (Objetivo III), demos continuidade à nossa investigação através da Análise de Regressão Linear Simples (ARLS). Segundo AMARAL, *et al.* (2009), ARLS é uma técnica estatística que permite estimar o comportamento médio de uma variável resposta em relação a uma variável preditora por meio da construção de uma equação, também chamada de Modelo de Regressão Linear (MRL). Para isso, foram seguidas as quatro etapas descritas a seguir:

(a) *Ajuste do Modelo Linear*

(b) *Esboço da Reta Ajustada ao Diagrama de Dispersão*

(c) Representatividade do Modelo Linear e Relação entre CAP_{lag2} e ATSM_{ens} :

- Erro Padrão dos Coeficientes de Regressão

- Testes-t Individuais
- Erro Padrão Residual e Intervalos de Confiança
- Coeficiente de Determinação Ajustado
- Teste F de Significância da Regressão

(d) Análise dos Resíduos

(a) Ajuste do Modelo Linear

Sejam as variáveis X (preditora) e Y (resposta), foi proposto um MRL de primeira ordem, dado pela equação:

$$Y = \alpha + \beta X + \epsilon \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

α : Representa o intercepto da reta, onde ela cruza o eixo Y , ou seja, valor de Y para o qual $X = 0$;
 β : Representa o efeito da variável preditora sobre a variável resposta, o qual reflete na inclinação da reta.
 ϵ : Variável aleatória que quantifica a falha do modelo em ajustar-se aos dados exatamente. Tal erro pode ser devido ao efeito, dentre outros, de variáveis não consideradas e de erros de medição (GUIMARÃES, 2008). Em outras palavras, ϵ é a diferença entre um valor observado e um valor fornecido pela equação.

Para ajustar um Modelo de Regressão Linear no R, ou seja, *obter os coeficientes que compõe a sua equação*, utilizamos a função $lm(Y \sim X)$. Assim, o modelo fica armazenado no *software*, que retorna os parâmetros α e β através do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO)¹⁸. Para isso podemos executar o código criado para se referir ao nosso modelo ou ainda usar a função *coefficients*. Na regressão linear simples os coeficientes representam os termos de interceptação (*intercept*) e inclinação (*slope*) da reta ajustada aos pontos (REGO, 2015). Como demonstrado pela Equação 4, a interceptação é essencialmente o valor esperado de Y quando X é igual a zero, enquanto a inclinação representa o efeito da variável preditora sobre a variável resposta.

(b) Esboço da Reta Ajustada ao Diagrama de Dispersão

A reta ajustada ao MRL minimiza as distâncias entre os valores estimados e os valores observados, nos possibilitando analisar de forma visual a qualidade do ajuste proposto. Assim foi proposta a representação gráfica da relação entre as variáveis Capturas de Sardinella brasiliensis e

¹⁸ Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO): método estatístico que ajusta a melhor equação possível os dados observados. Com base nos n pares de observações (y_1, x_1) , (y_2, x_2) , ..., (y_n, x_n) , o método de estimação por MQO consiste em escolher α e β de modo que a soma dos quadrados dos erros, ϵ_i ($i=1, \dots, n$), seja mínima (GUIMARÃES, 2008).

a $ATSM_{ens}$, através do Gráfico de dispersão com reta ajustada aos pontos e intervalo de 95% de confiança.

(c) Representatividade do Modelo Linear e da Relação entre CAPlag2 e $ATSM_{ens}$

Partindo do pressuposto de que um modelo é uma idealização da realidade (BOJORJE, 2017), a fim de investigar a representatividade do Modelo de Regressão Linear proposto frente a realidade estudada, sugerimos a verificação da qualidade do ajuste da regressão e da relação entre as variáveis seguindo diretrizes e exemplos fornecidos por AMARAL *et al.* (2009) e REGO (2015) e informações de saída da função *Summary()* do R.

- **Erro Padrão dos Coeficientes**

Segundo REGO (2015), o Erro Padrão dos Coeficientes (STD_{cf} ¹⁹) mede a quantidade média que as estimativas de cada coeficiente variam do valor médio real da nossa variável resposta. Idealmente, esperamos que o STD_{cf} seja menor que o valor em módulo da estimativa analisada. Assim, os STD_{cfs} significativamente menores que suas respectivas estimativas (Tabela 7) podem ser considerados indícios de relação entre as variáveis.

- **Valores-t dos Coeficientes e Valores-p Associados**

Através de uma analogia ao princípio da Razão Sinal-Ruído²⁰ (SNR) podemos interpretar um valor-t como uma indicação de quanto o sinal (estimativa de cada coeficiente) se destaca em relação ao ruído (STD_{cf}), ao passo que indica quantas unidades de erro padrão o coeficiente estimado está longe de zero. Assim, observamos que, quanto maior for a diferença entre as médias das duas amostras, maior será a força do sinal em relação às incertezas.

¹⁹ STD_{cf} , do inglês, Coefficient Standard Error.

²⁰ SNR, do inglês, Signal-to-noise ratio.

Os valores fornecidos pelos Testes-t também podem ser usados para avaliar hipóteses (MINITAB, 2009). Assim, tendo em mãos a Equação 2²¹, demarcamos o seguinte teste:

$$\text{Valor-t} = (\mu_2 - \mu_1) / \text{STD}_{cf} \text{ (Eq. 2)}$$

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \rightarrow \text{Valor-t} = 0$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \rightarrow \text{Valor-t} \neq 0$$

Onde:

H_0 : Hipótese nula

H_1 : Hipótese alternativa

$\mu_1 - \mu_2$: Diferença entre as médias dos grupos analisados

- **Erro Padrão Residual e Graus de Liberdade**

O Erro Padrão Residual (STD_{res} ²²), é uma medida de qualidade do Ajuste de Regressão Linear (REGO, 2015). Teoricamente, supõe-se que todo modelo linear contém um termo de erro ϵ . Devido à presença desse erro, não somos capazes de prever perfeitamente nossa variável resposta a partir da variável preditora. Em outras palavras, o STD_{res} é a quantidade média que Y irá desviar da linha de regressão verdadeira.

- **Coefficiente de Determinação Ajustado**

Segundo REGO (2015), a estatística R-quadrado ou Coeficiente de Determinação (R^2) fornece uma medida do quanto o modelo proposto se ajusta aos dados reais. Ele assume a forma de uma proporção de variância, podendo ser um bom indicador da relação linear entre X e Y.

R^2 varia entre 0 e 100%, sinalizando a porcentagem que a variância observada na variável resposta pode ser explicada pela variável preditora analisada. O Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2_{adj} ²³) se adapta ao número de variáveis consideradas no modelo (MENDES, 2020), levando em conta apenas as variáveis predictoras que, de fato, afetam a variável resposta.

²¹ De MINITAB (2009).

²² Do inglês, *Residual Standard Error*.

²³ R^2_{adj} , do inglês: *Adjusted Coefficient of Determination*.

- **Teste F de Significância da Regressão**

Para proceder o Teste F de Significância da Regressão verificamos o *p*-valor indicado na saída da função *summary* (REGO, 2015), sendo o *p*-valor associado a Estatística F^{24} menor que 0.05, podemos rejeitar H_0 e aceitar H_1 descritas a seguir:

- *H₀: Ajuste do modelo hipotético somente com o intercepto (α) = Ajuste MRL proposto no estudo*
- *H₁: Ajuste do modelo hipotético somente com intercepto é significativamente reduzido quando comparado ao MRL proposto no estudo.*

(d) Análise dos Resíduos

Os Resíduos representam essencialmente a diferença entre os valores reais de resposta observados e os valores de resposta previstos pelo modelo (MELO, 2019). Resumidamente, a análise dos resíduos consiste na conferência de três condições assumidas pelo MRL: a normalidade, a homoscedasticidade e independência dos resíduos

- **Normalidade**

Os resíduos gerados pelo ajuste da reta seguem distribuição normal. Para avaliar tal suposição, podemos construir o gráfico da “Probabilidade Normal dos Resíduos” segundo AMARAL et al. (2009) e estatística, a partir do Teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO, 1965).

Para aceitar a condição de normalidade através da análise do gráfico da “Probabilidade Normal dos Resíduos”, esperamos que não exista grande fuga dos pontos que representam a distribuição dos resíduos em relação à reta de distribuição normal teórica. Enquanto o teste de Shapiro-Wilk segue as seguintes hipóteses:

***H₀** → Os dados possuem distribuição normal. → Um $p < 0.05$ leva a rejeição da hipótese nula e aceite de H_1*

***H₁** → Os dados NÃO possuem distribuição normal*

Portanto, espera-se encontrar um valor de $p > 0.05$, a fim de obter distribuição normal para nossos dados.

²⁴ Do inglês, *F-statistic*.

- ***Homoscedasticidade***

A hipótese de homoscedasticidade (“variância constante”) dos resíduos é central para os modelos de regressão linear, ao passo que descreve uma situação em que o termo de erro entre as variáveis analisadas é o mesmo (ou muito semelhante) para todos os valores ajustados. Para essa avaliação usamos a análise gráfica (“Resíduos versus Valores Ajustados”), estimando a existência de uma distribuição simétrica entre os pontos relativamente ao valor central.

- ***Independência***

A última suposição do nosso modelo é: os erros são independentes entre si. Segundo RODRIGUES (2016), a dependência ou correlação entre os erros faz com que o método de MQO deixe de nos fornecer bons estimadores e que os intervalos de confiança e testes estatísticos aplicados deixem de ser apropriados. Nesse contexto, uma vez que a ordem da coleta dos dados é conhecida, podemos usar o gráfico de “Resíduos em Função do Tempo” para analisar a suposição de independência dos erros.

2.4.3 Divisão dos Estados de Equilíbrio

De maneira geral, o conceito de histerese pode ser resumido como: um sistema em estado de equilíbrio inicial que atravessa uma mudança irreversível e atinge um novo estado de equilíbrio, com um novo nível de energia, podendo se recuperar, porém não necessariamente ao estado inicial. Por tanto, a mudança é considerada irreversível e está associada a ocorrência de evento abrupto desestabilizador.

Os *tipping elements*, termo introduzido por Leton *et al.* (2008), possuem semelhanças ao comportamento de histerese, descrito acima, na medida em que trata de sistemas estáveis que, a partir de um limiar de temperatura, e/ou demais *feedbacks* associados às mudanças de temperatura, mudam para um novo estado de equilíbrio, o que, dependendo da escala de tempo observada, implica irreversibilidade. Sendo, neste caso, o aumento de temperatura e seus *feedbacks* uma analogia ao conceito de ‘evento abrupto’.

Desta forma, a fim de investigar evidências do comportamento não linear de CAP (Figura 2 e Figura 3) e tomando como inspiração as classificações de estado propostas por Saygu *et al.* (2022), o conceito de histerese, e o de *tipping elements* abordados por Leton *et al.* (2008), a série temporal de dados de capturas foi dividida em três períodos de acordo com os **diferentes estados médios observados na série** (Figura 9). Num primeiro momento,

destacamos o comportamento da série temporal de capturas de sardinhas no OAS ao longo de 1970 a 2019, a qual apresentou uma queda abrupta no final da década de 80 (1985 a 1988), não mais reestabelecendo os níveis anteriores registrados (fator de irreversibilidade). Num segundo momento, essa população de peixes alcança um ‘novo estado de equilíbrio’ diante da ocorrência de um ‘evento abrupto’: o aumento de temperatura global acelerado a partir da década de 80, que refletiu no aumento de temperatura do OAS DJ.

Para isso, foi considerado o resultado obtido através da análise de *CCF*, a qual demonstrou um atraso significativo de 2 anos da série de CAP em relação a série de *ATSM_{ens}* (Pág. 58), assim os intervalos de tempo foram redefinidos com a subtração de 2 passos de tempo de série original de capturas (*CAPlag2*):

- **Estado I (E1)** → 1970 a 1985 → **Média** das capturas para o período: 167459.9 toneladas.
- **Transição (TR)** → Anos de 1986 a 1988 → **Entre a queda abrupta das capturas: de** 168567.4 (1986) a 31915.7 toneladas (1988).
- **Estado II (E2)** → 1989 a 2019 → **Média** das capturas para o período: 66547.5 toneladas.

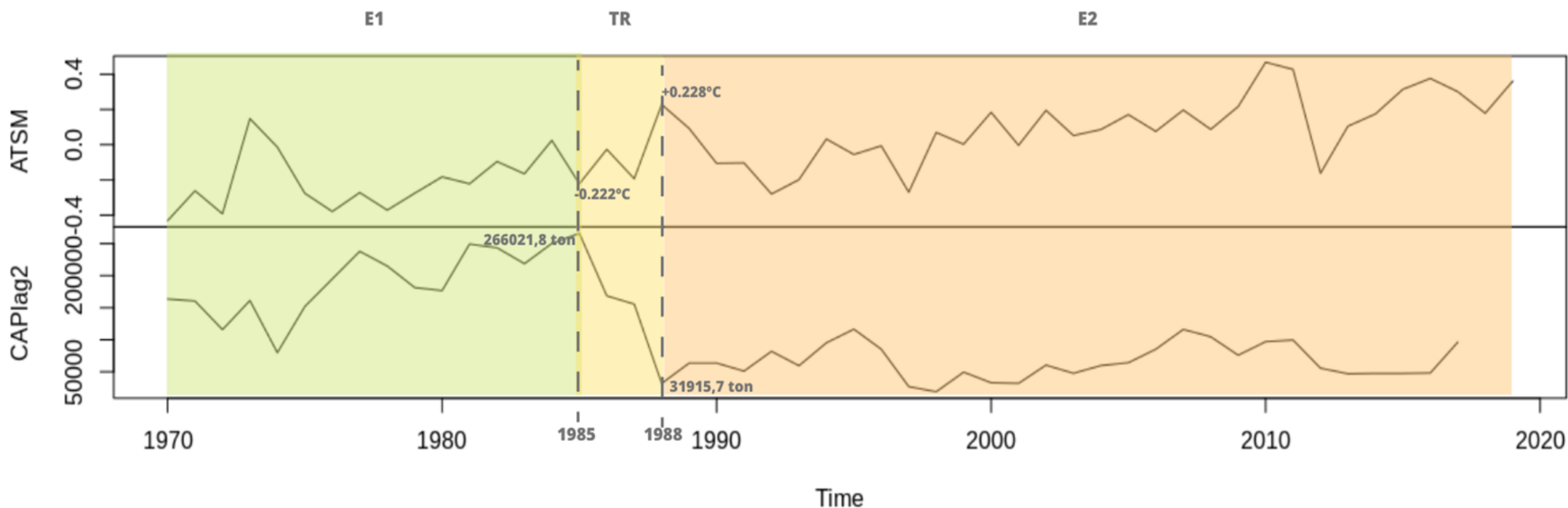


Figura 9: Gráfico superior: série temporal de anomalia de temperatura da superfície do mar mensal (DJ) para a região do Oceano Atlântico Sul, entre 1970 a 2019. Dados de $ATSM_{ens}$ (média do conjunto de dados COBE-SST2, NOAA ERSST.V5 e ICOADS 2 Degree) Gráfico inferior: média anual de capturas de *Sardinella brasiliensis* (em toneladas) no OAS para o período entre 1970 a 2019. Dados Sea Around Us. A cores de fundo representam os diferentes estados de equilíbrio do sistema estudado: Estado I (E1) - verde; Transição (TR) - amarelo; e Estado II (E2) - alaranjado.

2.4.4 Seleção dos Anos de Captura Máxima e Mínima

Para a montagem dos compostos de anos com captura máxima (CAPmax) e de anos com captura mínima (CAPmin), foi adotada a metodologia proposta por SOARES *et al.* (2011), a qual consiste em selecionar anos com valores que extrapolaram as linhas de 70% STD da série de capturas sem tendência (Figura 10). Em seguida foram reduzidas duas unidades de cada ano selecionado, de forma a obter o ajuste referido ao atraso das capturas em relação a ATSM, obtido pela análise de CCF anteriormente aborda, sendo os compostos renomeados para CAPlag2max e CAPlag2min, respectivamente. Os resultados desse processo estão descritos pela Tabela 4.

Tabela 4: Anos selecionados como máximos e mínimos de capturas, nos três estados investigados (E1, TR e E2). Onde: DEZ: dezembro do ano anterior ao ano de referência; JAN: janeiro do ano de referência; DJ: média dos meses de dezembro (ano anterior) e janeiro (ano de referência).

	CAPlag2max			CAPlag2min		
	ATSMensDEZ	ATSMensJAN	ATSMensDJ	ATSMensDEZ	ATSMensJAN	ATSMensDJ
ESTADO I 0.7*STD ₁ = 16459.99	1972; 1974 1975; 1976; 1980; 1983	1970; 1973; 1975; 1976; 1977; 1981; 1984	1970; 1973; 1975 1976; 1977; 1981; 1984	1971; 1973; 1978;1985	1972; 1974; 1979	1972; 1974; 1979
Transição (TR)				1985;1986	1986; 1987	1986; 1987
ESTADO II 0.7*STD ₂ = 29065.06	1988; 1991; 1993; 1994; 1998; 2001; 2005; 2006; 2009; 2016	1989; 1992; 1994; 1995; 1999; 2002; 2006; 2007; 2010; 2017	1989; 1992; 1994; 1995; 1999; 2002; 2006; 2007; 2010; 2017	1992; 1995; 1996; 1997; 1999; 2008; 2011	1993; 1996; 1997; 1998; 2000; 2008; 2012; 1989; 1992; 1994; 1995; 1999; 2002; 2006; 2007; 2010; 2017	1993; 1996; 1997; 1998; 2000; 2008; 2012

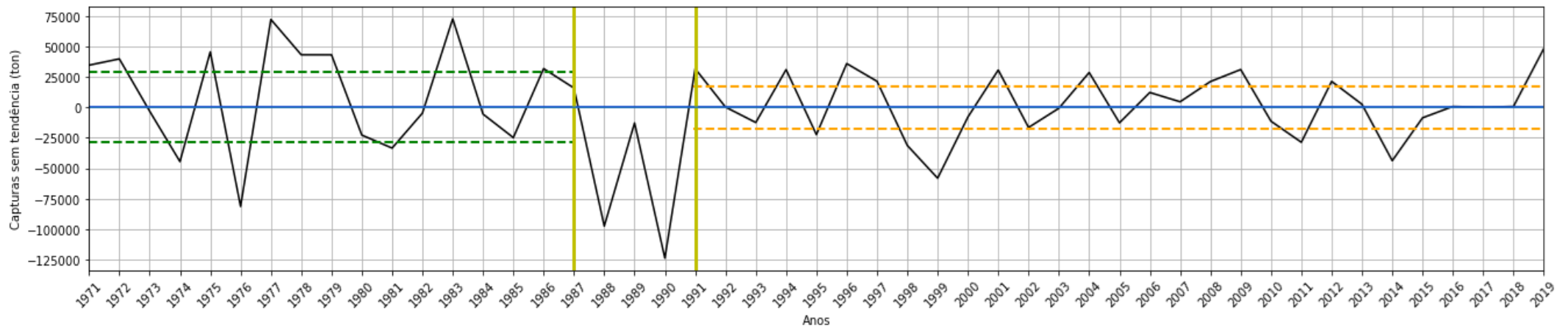


Figura 10: Série sem tendência de média anual de capturas de *Sardinella brasiliensis* no OAS para o período entre 1970 e 2019 s. Os dados apresentados foram disponibilizados pela plataforma Sea Around Us, sendo reconstruídos a partir base de dados *FishStat*, da FAO. A série foi dividida em três etapas, representando os estados E1, TR e E2, respectivamente. A linha tracejada verde indica o intervalo de 70% do STD obtido para o E1. A linha tracejada alaranjada indica o intervalo de 70% do STD obtido para o E2. As linhas contínuas em amarelo demarcam a separação dos referidos estados

2.4.5 Padrões de ATSM Médios para Anos de Mínimas e Máximas Capturas

Para a obtenção dos padrões de $ATSM_{ens}$ referentes a cada composto, foi efetuada a média aritmética de $ATSM_{ens}$ para os anos apontados como $CAPlag2max$ (E1 e E2) e como $CAPlag2min$ (E1, TR e E2), além da média aritmética DJ. Os resultados foram avaliados em termos das diferenças dos padrões de $ATSM_{ens}$ encontrados: **entre compostos de capturas máximas e mínimas, dentro de cada estado; e, também, entre os estados avaliados.**

2.4.6 DSAS e *Sardinella Brasiliensis*

- ***Coefficiente de Correlação Linear de Pearson***

A fim de investigar a correlação de cada fase do DSAS (DJ) com as capturas de sardinha no OAS ao longo de 1970 a 2019 (Objetivos VI e VII; Página 25), propusemos a análise do Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (r) (Pág. 333), obtido a partir do cruzamento de anos de ocorrência de cada fase do DSAS (variável preditora) com os anos de capturas máximas e mínimas (variável resposta), para cada estado de equilíbrio proposto (E1, TR, E2).

- ***Frequência Relativa***

Com o objetivo de comparar a frequência de ocorrência de cada fase do DSAS, nos diferentes estados de equilíbrio propostos (E1, TR, E2), foi construído Gráfico de Barras ilustrando a Distribuição Relativa de Frequência (%) (Pág. 32) para as ocorrências de DSAS (fases positivas e negativas).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção são apresentados e descritos os resultados obtidos a partir das análises e dados de $ATSM_{ens}$ (Página **Erro! Indicador não definido.**) e Captura de *Sardinella brasiliensis* (Página **Erro! Indicador não definido.**), especificados no capítulo anterior.

3.1 Oceano Atlântico Sul vs Oceano Global – 1880 a 2019

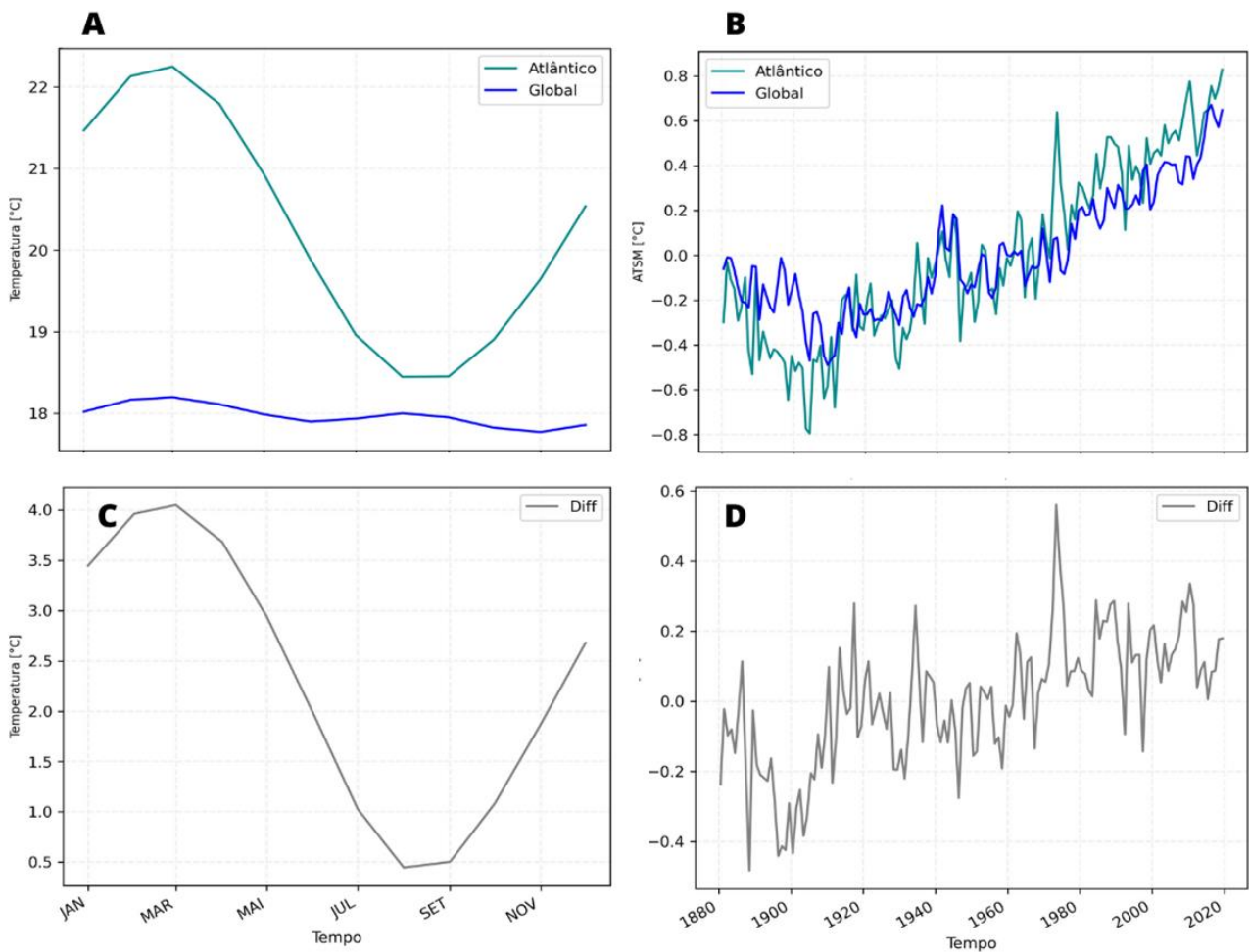


Figura 11: Séries temporais para o período entre 1880 e 2019. (A) Climatologias Oceano Global e Oceano Atlântico Sul (B) Anomalias Oceano Global e Oceano Atlântico Sul (C) Diferença entre as climatologias (D) Diferença entre as anomalias anuais. Dados: NOAA ERSST.V5.

Através da análise da Figura 11A, nota-se que a temperatura média Oceano Global (OG) de 1880 a 2019 variou de 18.2°C (verões) a 17.7°C (invernos). Ao mesmo tempo, observa-se que o OG tem apresentado um aumento geral da TSM ao longo século XX e XXI, apresentando uma tendência positiva da série temporal de anomalias da superfície do mar desde 1904

(0.79°C), até o último ano da ST, 2019, que apresenta a anomalia de temperatura mais alta, de 0.64°C.

Ainda segundo a análise da Figura 11A, destaca-se que a temperatura média Oceano Atlântico Sul (OAS) de 1880 a 2019 variou de 22.25°C (verões) a 18.45°C (invernos). Ao mesmo tempo, observamos que o OAS tem apresentado um aumento geral da TSM ao longo século XX e XXI, apresentando uma tendência positiva da série temporal de anomalias da superfície do mar desde 1909 (-0.49°C). O ano de 1973 se destaca na ST por apresentar a maior anomalia positiva de TSM de todo século XX, com 0.64°C acima da média. No século XXI, destacam-se os anos de 2010 e 2019, com 0.75°C e 0.83°C acima da média, respectivamente.

Analisando a Figura 11C, observa-se que o OAS apresenta amplitude sazonal de temperatura média muito mais expressiva quando comparado ao OG: a temperatura média do OAS nos meses de verão é de 3.8°C mais quente do que no inverno, enquanto no OG esta amplitude é de 0.43°C. Nesse sentido, destaca-se que o OAS possui verões de até 4°C mais quentes que o OG, e invernos 0.44°C mais frios.

A partir da análise das Figura 11B e Figura 11D, destaca-se que os anos em que OAS apresentou TSM superior ao OG, foram: 1886, 1910, 1913, 1914, 1917, 1918, 1920, 1922, 1934, 1935, 1938, 1939, 1948, 1949, entre 1953 e 1955, 1962, entre 1964 e 1991, entre 1993 e 1996, e de 1999 até o fim da série (2019). Desta forma, destaca-se que a frequência de anos em que a TSM do OAS foi superior a TSM do OG, aumentou ao longo do período amostrado, apresentando 100% de ocorrência a partir de 1999. A maior diferença entre as séries de ATSMs analisadas foi no ano de 1973, em que o OAS se apresentou 0.55°C mais quente que o OG.

3.2 Temperatura da Superfície do Mar – Oceano Atlântico Sul – 1970 a 2019

3.2.1 Série da Climatologia Mensal

Tomando como base os dados de TSM_{ens} dos dados (Tabela 1) descritos anteriormente, o OAS apresentou uma temperatura anual média de 20.94°C para o período de 1970 a 2019, com climatologia mensal atingindo valor máximo de 22.84°C, para MAR, e mínimo de 19.13°C, para AGO (Figura 12). A climatologia de dos meses de dezembro (DEZ) e janeiro (JAN) foi de, 21.21°C e 22.11°C, respectivamente. Desta forma, inferimos que a climatologia DJ para OAS equivale a 21.66°C.

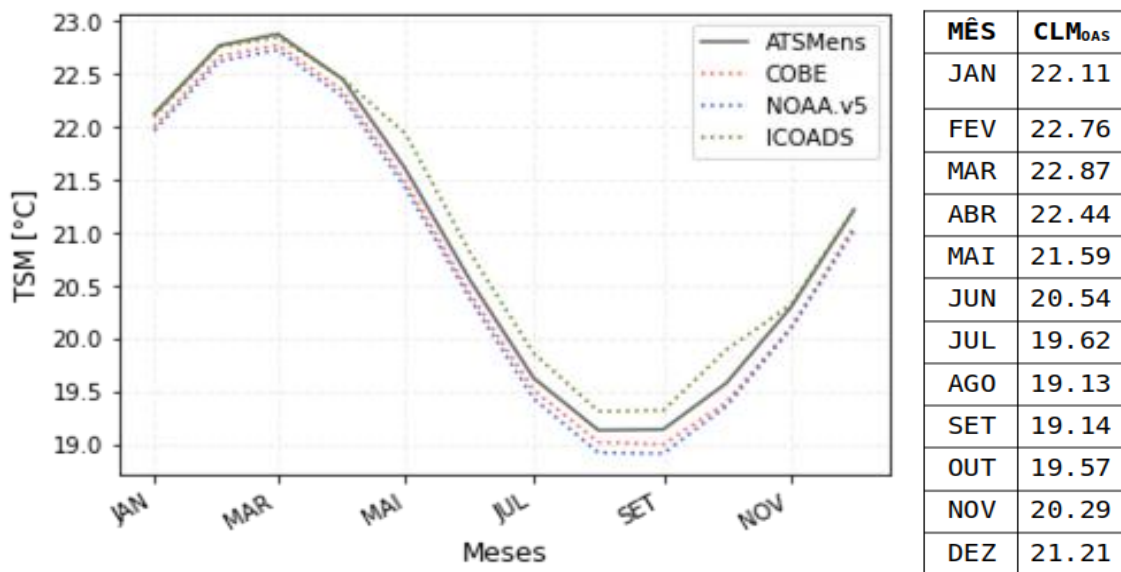


Figura 12: Séries Temporais de Climatologia Mensal de Temperatura da Superfície do Mar Anual para a região do Oceano Atlântico Sul, entre 1970 a 2019. A legenda de cores indica a fonte dos dados de TSM utilizados: COBE-SST2 (linha tracejada vermelha clara); NCEP/NCAR (linha tracejada verde); NOAA ERSST.V5 (linha tracejada azul); ICOADS 2 Degree (linha tracejada lilás); e média do conjunto de dados ($ATSM_{ens}$ linha contínua cinza escura).

3.2.2 Série Temporal de Anomalias

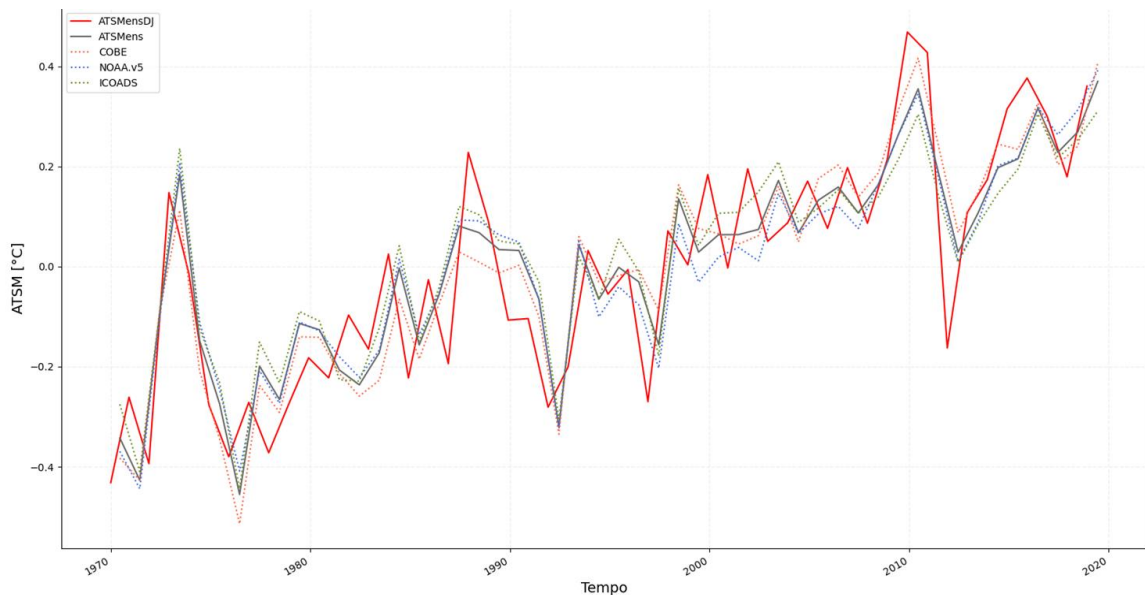


Figura 13: Séries Temporais de Anomalia de Temperatura da Superfície do Mar Anual e Mensal (DJ) para a região do Oceano Atlântico Sul, entre 1970 a 2019. A legenda de cores indica a fonte dos dados utilizados para a obtenção das ATSMs: COBE-SST2 (linha tracejada alaranjada); NOAA ERSST.V5 (linha tracejada azul); ICOADS 2 Degree (linha tracejada verde); média do conjunto de dados ($ATSM_{ens}$ anual linha contínua cinza escura); média do conjunto de dados ($ATSM_{ens}$ DJ linha contínua vermelha).

A análise dos dados de $ATSM_{ens}$ anuais referentes ao período de 1970 a 2019, Figura 13, linha cinza contínua, nos permite observar que na década de 70, houve a ocorrência de anomalia positiva anual apenas no ano de 1973, com $+0.184^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura anual média do OAS. Na sequência, o final da década de 80 e início da década de 90, apresentaram quatro anos consecutivos (1987, 1988, 1989 a 1990) de anomalias positivas, 0.080 , 0.067 , 0.034 e 0.032°C , respectivamente, os quais foram interrompidos pelo resfriamento do oceano, que apresentou anomalias negativas em 1991 (-0.065°C) e 1992 (-0.320°C). Em 1993, o oceano voltou a aquecer, apresentando novamente anomalia positiva (0.043°C). Entre 1994 e 1997, a ST demonstra novamente um período com anomalias negativas, que variaram de -0.156 a -0.001°C . No entanto, desde 1998 até o fim do período analisado, apenas anomalias positivas puderam ser observadas. Essas anomalias positivas variaram entre 0.028°C , em 2012, e 0.370°C , em 2019, ano que apresentou o maior valor de anomalia positiva em todo o período analisado.

A análise da série $ATSM_{ensDJ}$, nos permite observar que o OAS, entre 1970 e 1987, teve predominância de anos que apresentaram anomalias negativas e nulas (ou muito próximas a zero), com exceção do ano de 1973, que apresentou anomalia positiva de $+0.147^{\circ}\text{C}$. Na sequência, observamos o início do período de anomalias positivas e nulas (ou muito próximas a zero), com o ano de **1988 ($+0.22^{\circ}\text{C}$)**²⁵, até 2019, com máxima de $+0.47^{\circ}\text{C}$ (2010), sendo a única exceção o ano de 2012, que apresentou anomalia negativa de -0.16°C .

²⁵ 1988: o ano demarca o final do período de transição de E1 para E2.

3.2.3 Padrões Oceânicos

- **Climatologia**

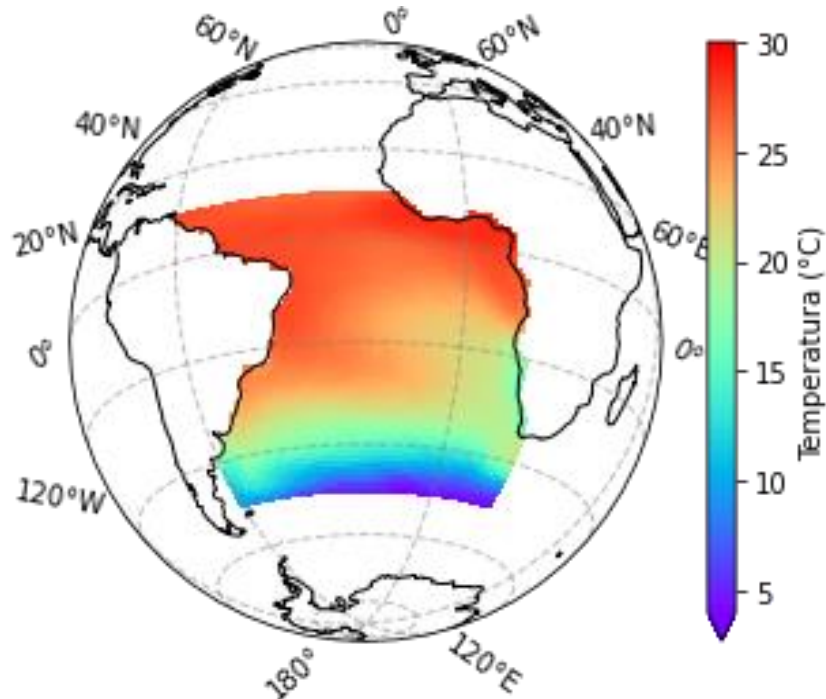


Figura 14: Padrão oceânico de climatologia de temperatura da superfície do mar do Oceano Atlântico Sul média do conjunto de dados (TSM_{ens} : COBE-SST2, NOAA ERSST.V5 e ICOADS 2 Degree), entre 1970 e 2019, média para os meses de janeiro e dezembro (DJ).

A Figura 14 representa a climatologia mensal DJ para todo o período de estudo (1970 a 2019), a qual foi usada para o cálculo dos padrões de anomalia apresentados nos demais tópicos deste capítulo. A análise do gráfico nos permite notar que a média de temperatura DJ do OAS varia em torno de 5°C ao sul e 30°C ao norte da bacia do Atlântico. Além disso, tal padrão de distribuição das anomalias de temperatura da superfície do mar, nos remete a aspectos associados a circulação de superfície em larga escala no OAS, representada pelo Giro Subtropical do Oceano Atlântico Sul, neste caso, evidenciando a existência de transporte de águas mais aquecidas do equador em direção aos polos (borda ocidental da bacia; representado pela CBR) e de águas mais frias em direção ao equador (borda oriental da bacia; representado pela CBE).

○ Anomalias Decadais

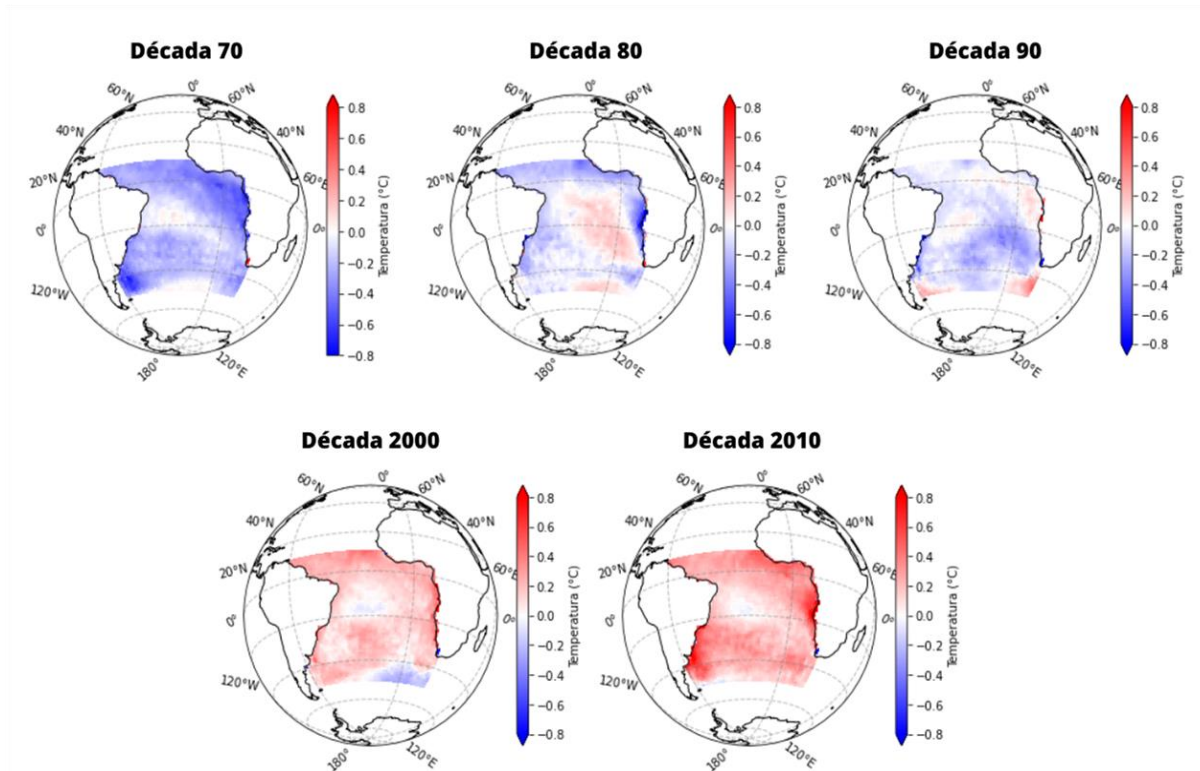


Figura 15: Padrões oceânicos de anomalia de temperatura da superfície do mar mensal (DJ) média do conjunto de dados ($ATSM_{ens}$: COBE-SST2, NOAA ERSST.V5 e ICOADS 2 Degree) para a região do Oceano Atlântico Sul para cada década do período entre 1970 e 2019.

De maneira geral, a análise da Figura 15 corrobora com os resultados demonstrados pela série temporal de $ATSM_{ens}$ DJ (Figura 13), onde o OAS passou por um período com predominância de anomalias negativas (1970 a 1987), e outro de anomalias positivas (1988 a 2019), com tendência positiva na série temporal, sendo possível notar aquecimento progressivo no decorrer das décadas ao longo de 1970 a 2019, além da alteração no padrão de distribuição espacial da média decadal de anomalias de temperaturas.

A partir da análise individual (por década) dos padrões da média decadal de anomalias de temperaturas de do período analisado (1970 a 2019) apresentado pela Figura 15, podemos destacar que:

- Na década de **1970**, o OAS apresentou predomínio de anomalias negativas de TSM ao logo do domínio, com mínimos na região de Confluência Brasil-Malvinas (CBM) e ao NE da bacia oceânica do OAS ($\sim -0.5^{\circ}\text{C}$). Anomalias próximas a zero e positivas, com máximos em torno de 0.1°C , puderam ser

percebidas na região no meridiano 30°O, entre 10 e 20°S, e ao sul de 45°S, entre 0 e 30°O.

- Tanto na década de **1970**, quanto na década de **1980**, podemos destacar a região de anomalias negativas pronunciadas (até -0.4°C), próximas à costa africana, entre as latitudes 17 e 32°S, a qual corresponde ao trecho apresentado por BOUALI *et al.* (2017) como Região de Sistemas de Ressurgência da Corrente de Banguela.
- Tanto na década de **1980**, quanto na década de **1990**, o OAS apresentou predomínio de anomalias negativas de TSM. No entanto, padrões distintos de distribuição de anomalias positivas e negativas puderam ser observados. Para a década de **1980**, destacamos a ocorrência de anomalias positivas de até aproximadamente $\sim +0.3^{\circ}\text{C}$ na região Cento-nordeste e Centro-leste da bacia oceânica. Enquanto, a mesma região para a década de **1990**, apresenta anomalias negativas de até aproximadamente -0.3°C. Nota-se que, para ambas as décadas a superfície do mar próxima a PCSE do Brasil apresentam anomalias de temperatura negativas de até aproximadamente -0.3°C.
- Na década de **1990**, passamos a observar anomalias positivas (até $\sim +0.4^{\circ}\text{C}$) na região ao sul da região de CBM (Região de fusão da Frente Subantártica e da Frente polar Antártica, segundo BOUALI *et al.* 2017), assim como na região de Retroflexão das Agulhas. O que pode estar associado ao maior avanço da Corrente do Brasil (CB) em direção às latitudes mais altas, decorrente da tendência positiva de aquecimento, tanto do OAS, como do Oceano Global (Figura 13), (assunto também abordado por MARCELLO *et al.* (2018) e DROUIN *et al.* (2020)).
- Na década de **2000**, o OAS apresentou predomínio de anomalias positivas de TSM ao longo do domínio, com máximos de até aproximadamente +0.4°C na região de CBM; na Região de fusão da Frente Subantártica e da Frente polar Antártica; e em toda a costa oeste africana, incluindo a região dos Sistemas de Ressurgência da Corrente de Banguela e de Retroflexão da Agulhas. Regiões com anomalias nulas e negativas se concentraram em alguns pontos próximos a Região de Ressurgência de Cabo Frio, além da região do meridiano 30°O, aproximadamente entre 10 e 20°S, e ao entorno do meridiano 0°, ao sul de 45°S.

- Especificamente na década de **2010**, o OAS apresentou apenas anomalias TSM próximas ou superiores a zero, com máximas de cerca de $+0.65^{\circ}\text{C}$. As regiões que apresentaram as maiores anomalias foram a Plataforma Continental Sul-Sudeste do Brasil e a região dos Sistemas de Ressurgência da Corrente de Banguela. Esse resultado contribui com a discussão sobre o aquecimento global e sua influência em sistemas de ressurgência costeiros. Tal aquecimento da superfície do mar pode ser relacionado à maior estratificação da coluna d'água (devido a redução da densidade das águas superficiais) e consequente enfraquecimento dos sistemas de ressurgência costeiros. As questões decorrentes desse processo serão melhor discutidas no decorrer deste capítulo, na secção em que abordaremos a importância dos sistemas de ressurgência para o sucesso do recrutamento de organismos pelágicos, especificamente, da espécie usada como estudo de caso desse trabalho, a *S. brasiliensis*.

3.2.4 Dipolo Subtropical do Atlântico Sul

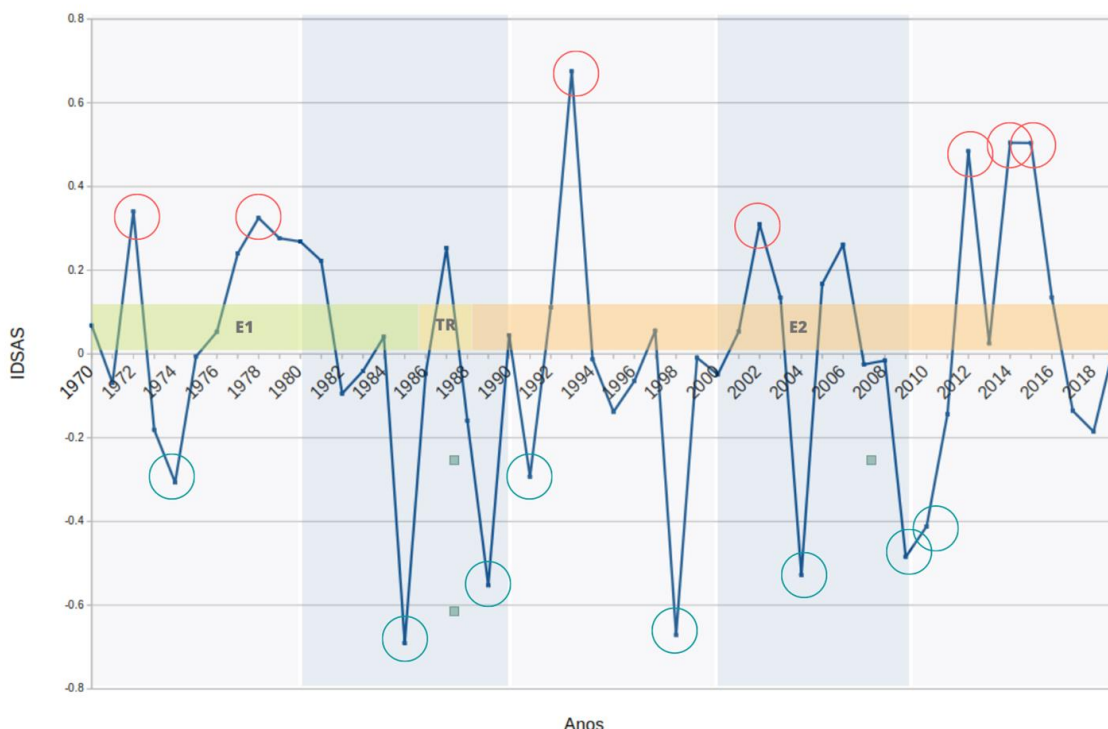


Figura 16: Série Temporal IDSAS para a média DJ de 1970 a 2019. Pontos destacados com círculos da cor vermelha representam índices ivos maiores ou iguais ao $+\text{STD}$; Pontos destacados com círculos da azul representam índices negativos menores ou iguais ao $-\text{STD}$. (Onde $\text{STD}=0.292$).

Ao comparar os compostos de anos detectados como anos de ocorrência de DSAS neste estudo, seja de fases positivas quanto de fases negativas, com outros autores que também trataram sobre este tema (MORIOKA *et al.*, 2011; SILVA, 2020 - Tabela 5, é possível notar divergências consideráveis entre os anos obtidos entre eles. Isso pode ocorrer devido às diferentes escalas temporais e, também, aos diferentes meses selecionados para os cálculos das séries de ATSMs aplicadas nos cálculos do IDSAS em cada um dos respectivos estudos citados.

Tabela 5: Compostos dos anos de ocorrência de DSAS, fases positivas e negativas, selecionados a partir de séries temporais IDSAS em três diferentes estudos: PRESENTE ESTUDO; MORIOKA *et al.*, 2011; e SILVA, 2020. Onde, os números tachados indicam anos fora de período hábil para comparação. Nota-se que para o PRESENTE ESTUDO os anos foram selecionados a partir da série temporal IDSAS DJ entre 1970 a 2019 (Figura 16), sendo considerados em fase positiva os anos cujos índices foram maiores ou iguais ao +STD; e DSAS em fase negativa os anos cujos índices foram menores ou iguais ao -STD. Onde: STD=0.292.

Compostos			
	PRESENTE ESTUDO	MORIOKA <i>et al.</i> (2011)	SILVA (2020)
	(1970 a 2019)	(1960 a 2008)	(1994 a 2018)
DSAS			
Positivo	<i>1972; 1978; 1993; 2002; 2012; 2014; 2015</i>	1962; 1966; 1975, 1980, 1982, 1997, 1999	1997; 1999; 2012; 2018
DSAS			
Negativo	<i>1974; 1985; 1989; 1991; 1998; 2004; 2009; 2010</i>	1964; 1965; 1968; 1972; 1983; 1984; 1988; 1995; 1998; 2003; 2005	1997; 2003; 2005; 2010; 2016

○ **Frequência Relativa DSAS: Décadas de 1970 a 2019**

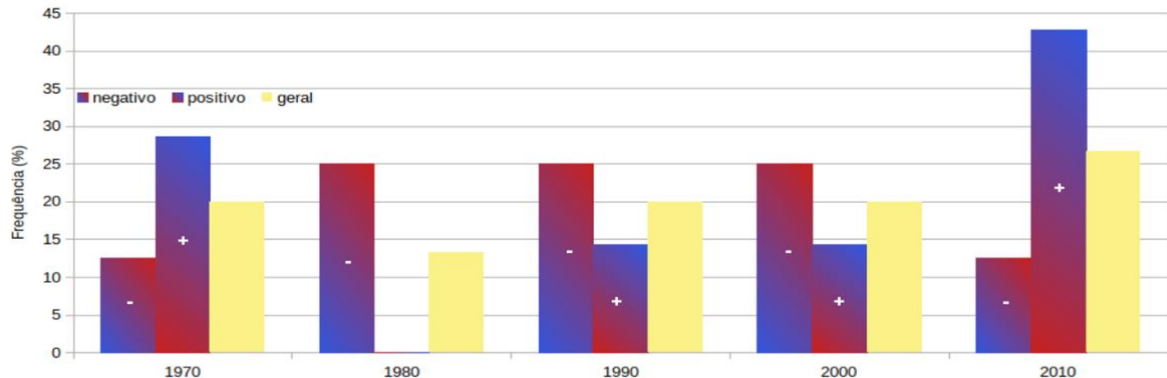


Figura 17: Frequência Relativa (%) de anos de ocorrência de cada fase do DSAS, assim como a ocorrência geral (a qual considera tanto ocorrência de fases positivas, quanto negativas) em cada década de 1970 a 2019. Dados utilizados para o cálculo IDSAS: anomalia de temperatura da superfície do mar mensal (DJ) média do conjunto de dados ($ATSM_{ens}$: COBE-SST2, NOAA ERSST.V5 e ICOADS 2 Degree) para os dois polos de aquecimento/resfriamento do Oceano Atlântico Sul entre 1970 e 2019.

A análise das barras do gráfico de Frequência Relativa (%) de ocorrência **geral** de formação de polos com anomalias de TSM opostas ao longo das *décadas de 1970 a 2019* (Figura 17), nos permite destacar um aumento geral de ocorrência de DSAS a partir da década de 80 (FR geral 13.34%) até década de 2010 (FR geral 26.67%). As décadas de 1970, 1990 e 2000 apresentaram a mesma FR geral de ocorrências (FR 20%).

De fato, assim como MORIOKA *et al.* (2011), percebemos um aumento de ocorrências de **fases negativas** do DSAS quando comparamos a década de 1970 com as décadas de 1980, 1990 e 2000. Contudo, diferentemente do esperado (que seria a continuidade da tendência crescente das ocorrências de fases negativas do modo) observamos uma queda na FR da fase negativa, em 2010.

O contrário do observado para as fases negativas ocorre para as **fases positivas**, as quais apresentam uma tendência progressiva de ocorrências desde 1980 (FR 0%) até 2010 (FR 42.85%). Contudo, nota-se que a década de 1970 teve o segundo maior número de ocorrências de DSAS+ entre as décadas avaliadas, chegando a uma FR de 28.57%. É interessante notar que esta década também apresentou valor máximo de ATSM anual (0.184°C em 1973), valor que só voltou a ser superado na década de 2000 (0.263° em 2009) (Figura 15). Assim, infere-se que a presença de anomalias de temperatura positivas no OAS podem estar associadas à formação do DSAS em fase positiva.

3.3 Capturas de *Sardinella Brasiliensis* e Temperatura da Superfície do Mar

3.3.1 Séries Temporais

A Figura 18, representa, em forma de séries temporais, os dados de capturas de *Sardinella brasiliensis* (CAP) e médias DJ das anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico Sul para o conjunto de dados ($ATSM_{ens}$) entre 1970 a 2019. Através da análise dessa figura é possível destacar a queda abrupta nas capturas de sardinha-verdadeira entre 1987 e 1990, passando de uma média de 167459.9 toneladas entre 1970 e 1987, para 66547.5 toneladas entre 1991 e 2019. A análise da STs de $ATSM_{ens}$ OAS DJ pode ser revisitada na página 49.

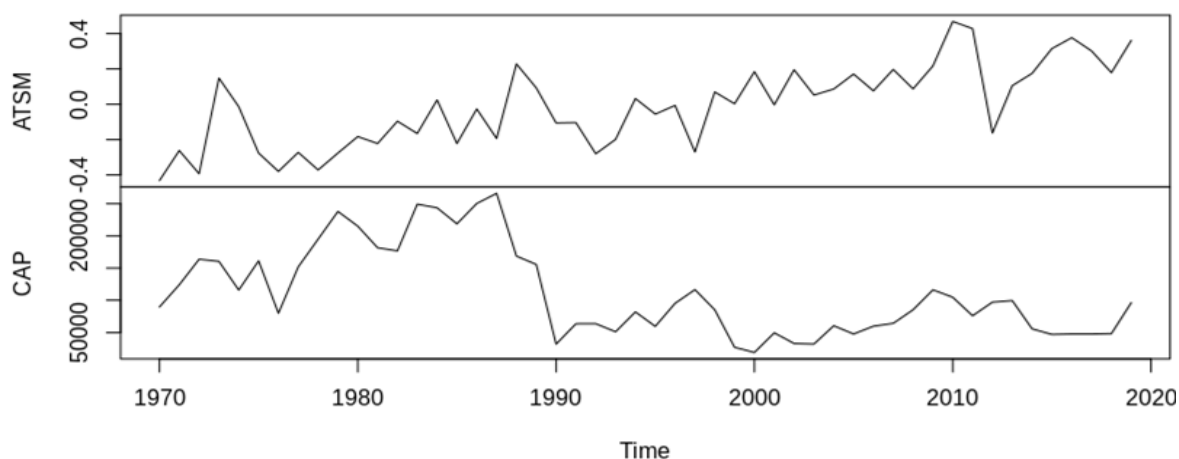


Figura 18: Séries temporais de capturas de *Sardinella brasiliensis* (CAP, gráfico inferior) e média mensal DJ das anomalias de temperatura da superfície do mar no Atlântico Sul para o conjunto de dados ($ATSM_{ens}$, superior) entre 1970 a 2019. O eixo horizontal indica a linha do tempo em anos; o eixo vertical inferior refere-se às CAP em toneladas, variando de 0 a 250000, com escala de 50000; o eixo vertical superior refere-se à $ATSM_{ens}$ em °C, variando de -0.4 a 0.6, com escala de 0.2. Esses gráficos não consideraram possíveis defasagens de tempo entre as séries temporais das variáveis CAP e $ATSM_{ens}$.

3.3.2 Análises estatísticas

Após obtermos as séries temporais de captura de *Sardinella brasiliensis* e $ATSM_{ens}$ OAS DJ de 1970 a 2019, lançamos mão de análises estatísticas, a fim de aprofundar a investigação sobre a relação entre essas variáveis (Objetivo III, Pág. 25). De maneira geral, pode-se resumir a logicidade usada para a aplicação de cada análise, a partir dos produtos obtidos em cada etapa imediatamente anterior.

Ao descobrirmos uma correlação linear regular ($|r| = -0.41$) entre as séries $ATSM_{ens}$ (variável preditora) e CAP (variável resposta), lançamos mão da técnica de Análise de

Correlação Cruzada²⁶ (*ACF*), para investigar possíveis defasagens de tempo entre as STs. A identificação de um intervalo significativo de diferenças entre elas [-12; +9] (Figura 20), deu origem a uma nova série de dados de captura, *CAPlag2*, com correção do adiantamento estatisticamente mais importante de *CAP* em relação a *ATSM_{ens}* encontrado: de dois passos de tempo ($|ACF| = 0.48$; em $h=2$). Após tal ajuste, demos início a etapa que chamamos de “Análises com Capturas Ajustadas”, em que passamos a estudar a relação entre as séries *ATSM_{ens}* e *CAPlag2* ($r = -0.496$), dando sequência à investigação através da Análise de Regressão Linear Simples (ARLS) e, desta forma, aprofundando as evidências de correlação linear entre as das STs trazida à tona através das verificações dos: Diagrama de Dispersão, Coeficiente Correlação Linear de Pearson e produtos da *CCF*.

- **Correlação Linear de Pearson**

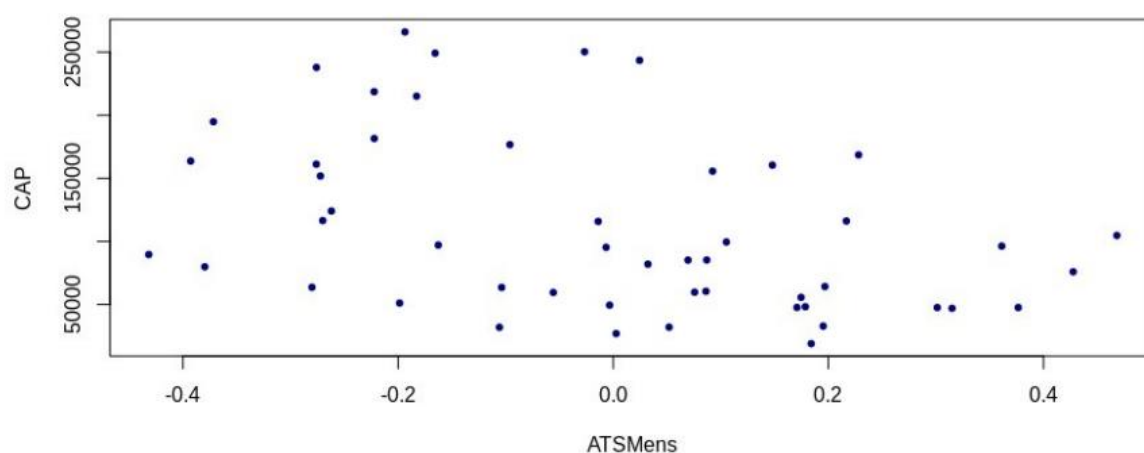


Figura 19: O Diagrama de dispersão ilustra a relação das variáveis resposta (capturas de *Sardinella brasiliensis* – *CAP*) e preditora (média mensal DJ das anomalias de temperatura da superfície do mar no Atlântico Sul para o conjunto de reanálises – *ATSM_{ens}*) entre 1970 a 2019, no Oceano Atlântico Sul.

O teste retornou um r igual a -0.412 associado a um p -valor igual a 0.002 . Partindo do pressuposto de que um p -valor menor que 0.05 leva a rejeição de H_0 e, logo, aceitação de H_1 (Página 33), concluímos que a correlação encontrada difere de zero, além de estar dentro do intervalo de 95% de significância (-0.619 ; -0.151), obtido através do mesmo teste.

²⁶ *ACF*: Função de Autocorrelação; do inglês, *Autocorrelation Function*.

- **Correlação Cruzada**

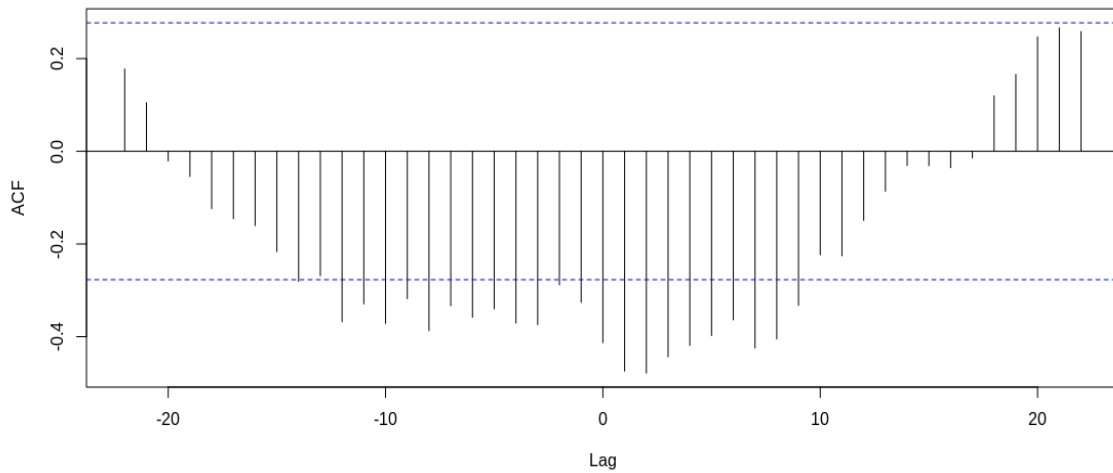


Figura 20: Produto da CCF para CAP em relação à $ATSM_{ens}$. O eixo horizontal representa o valor de diferentes atrasos de tempo (*Lags*) na relação entre as séries temporais das variáveis analisadas. O eixo vertical representa o valor da ACF. As linhas tracejadas em azul representam as Bandas de Intervalo de Confiança de 95% de Significância.

O posicionamento das hastes no gráfico (Figura 20) indicam correlação negativa significativa entre as variáveis com h dentro do intervalo $[-12; +9]$. Dentro desse intervalo, a ACF mais expressiva ocorre para $h=2$ ($|-0.479|$, Figura 20), indicando que o adiantamento de 2 passos de tempo, da variável resposta (CAP) em relação à variável preditora ($ATSM_{ens}$), é importante. Com base na interpretação desse resultado, reaplicamos o Teste de Correlação de Pearson, dessa vez tomando como variável resposta uma nova série de dados: valores de captura com correção do adiantamento encontrado ($CAPlag2$).

3.3.3 Capturas com Datas Ajustadas: $CAPlag2$

- **Correlação Linear de Pearson**

Coeficiente de Correlação de Pearson (r) igual a -0.496 indicou correlação negativa entre as variáveis analisadas (Figura 21). A verificação do p-valor associado ao teste (3.325×10^{-04}) indica que a correlação encontrada é significativa. Desta forma, notamos que o r encontrado, corrobora com os produtos das análises de CCFs, evidenciado uma maior relação entre as variáveis após a correção do adiantamento de dois anos das capturas em relação a $ATSM_{ens}$.

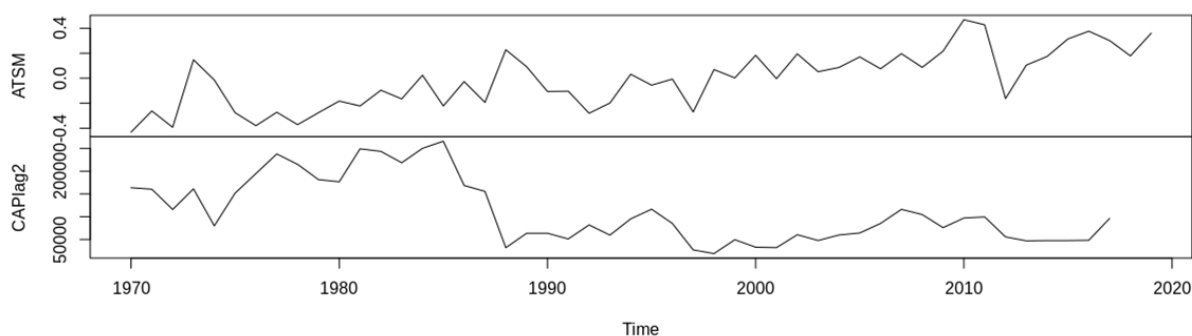


Figura 21: Séries temporais de capturas de *Sardinella brasiliensis* atrasada em 2 passos de tempo (CAPlag2, gráfico inferior) e média mensal DJ das anomalias de temperatura da superfície do mar no Atlântico Sul para o conjunto de dados ($ATSM_{ens}$, superior) entre 1970 a 2019. O eixo horizontal indica a linha do tempo em anos; o eixo vertical inferior refere-se às CAP, em toneladas, variando de 0 a 250000, com escala de 50000; o eixo vertical superior refere-se à $ATSM_{ens}$, em °C, variando de -0.4 a 0.6, com escala de 0.2. Esses gráficos não consideraram possíveis defasagens de tempos entre as séries temporais das variáveis CAP e $ATSM_{ens}$.

A partir da análise gráfica da Figura 21, destacamos o comportamento oposto das tendências das STs a partir de meados da década de 80. A queda abrupta de CAPlag2, de 266021.8 toneladas para 31915.7 toneladas, de 1985*²⁷ a 1988* respectivamente, demarca a inversão da tendência da ST de CAPlag2 que vinha sendo positiva desde 1970 até 1985*.

²⁷ O sinal gráfico asterisco [*] indica data atrasada em 2 anos referente à série temporal original dos dados de captura utilizados.

- **Análise de Regressão Linear Simples**

(a) Ajuste do Modelo Linear

Sejam as variáveis $ATSM_{ens}$ (preditora) e $CAPlag2$ (resposta) correspondentes a X e Y, respectivamente, foi obtido o MRL de primeira ordem, dado pela equação:

$$CAPlag2 = 108488 - 154283 * ATSM_{ens} + \epsilon \text{ (Eq. 5)}$$

(b) Esboço da Retra Ajustada ao Diagrama de Dispersão

A Figura 22 representa a reta ajustada aos pontos no Gráfico de Dispersão, em conjunto com o intervalo de confiança de 95% para os coeficientes encontrados Tabela 6:

Tabela 6: Intervalos de confiança de 95% associados aos coeficientes da Equação 5.

	2.5 %	97.5 %
α	90426.7	126549.81
β	234353.13	74213.33

A análise visual da Figura nos permite inferir a existência de uma correlação negativa de $CAPlag2$ em relação a $ATSM_{ens}$. Ou seja, de maneira geral, um aumento da TSM_{ens} OAS DJ implica redução das capturas, segundo a relação explicada pelo modelo (Equação 5)

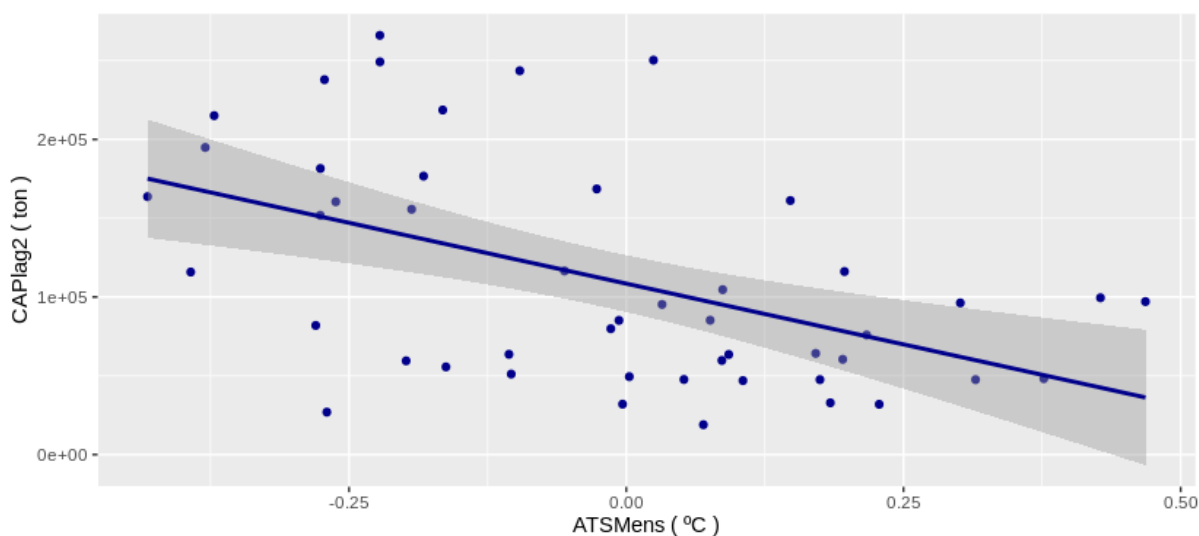


Figura 22: Representação gráfica da relação entre as variáveis Capturas de *Sardinella brasiliensis* e a $ATSM_{ens}$ OAS DJ: Gráfico de dispersão com reta ajustada aos pontos e intervalo de 95% de confiança. A equação da reta é dada pela Equação 5. O período das séries se estende de 1970 a 2017. Fonte dos dados de capturas de *Sardinella brasiliensis*: *SeaAroundUS*. Anomalia Anual da Temperatura da Superfície do Mar Atlântico Sul para a média do conjunto de dados ($ATSM_{ens}$)

(c) **Representatividade do Modelo Linear e Relação entre CAPlag2 e $ATSM_{ens}$**

A Tabela 7 permite a verificação da qualidade do ajuste da regressão e da relação entre as variáveis seguindo diretrizes e exemplos fornecidos por AMARAL *et al.* (2009) e REGO (2015).

Tabela 7: Valores estimados para cada coeficiente da equação de ARLS ($CAPlag2 = 108669 - 193554 * ATSM_{ens} + \epsilon$), acompanhados dos respectivos erros padrões, valores-t e valores-p associados. Os (***) indicam alta significância estatística.

Coeficiente	Estimativa	Erro Padrão dos Coeficientes	Valor-t	Valor-p Pr(> t)
α	108488	8973	12.091	$<6.96 \times 10^{-16}$ ***
β	-193554	39778	-3.879	3.32×10^{-04} ***

- **Erro Padrão dos Coeficientes**

O *Erro Padrão dos Coeficientes* (STD_{cf_s}) significativamente menores que suas respectivas estimativas (Tabela 7) podem ser considerados indícios de relação entre as variáveis CAPlag2 e $ATSM_{ens}$ OAS DJ.

- **Valores-t dos Coeficientes e Valores-p Associados:**

No caso avaliado, as estatísticas t (Tabela 7), ao fornecerem valores diferentes de zero, demonstraram que o sinal avaliado se sobressai em relação ao ruído, o que pode ser considerado uma evidência de relação entre as variáveis $CAPlag2$ e $ATSM_{ens}$.

- **Erro Padrão Residual e Graus de Liberdade**

No caso avaliado, obtemos um STD_{res} igual a 61930 que representa o desvio de $CAPlag2$ em relação a reta de regressão proposta (Figura 22). O STD_{res} foi obtido com base em 46 Graus de Liberdade (DFs²⁸), que representam os 48 pontos de dados com datas ajustadas (1970 a 2017) e a exclusão de dois graus correspondentes aos parâmetros restritivos (α e β). O STD_{res} pode ser visualmente avaliado pela (Figura 22), que traz os intervalos de 95% de confiança associados à reta de regressão e ao gráfico de dispersão com 46 DF.

- **Coefficiente de Determinação Ajustado**

Para o caso avaliado obtemos $R^2_{adj} = 0.2301$, o que sugere que o modelo linear, no qual acabamos de encaixar nossos dados, está explicando cerca de 23% da variância das $CAPlag2$ observada.

- **Teste F de Significância da Regressão e Relação entre as Variáveis:**

Para o cálculo da estatística F foi usando o valor da mediana de $CAPlag2$ (70721.54), para separar os dados em dois grupos, e compará-los. Os valores de estatística F e p-valor obtidos (3.302 em 28 DFs; p-valor: 0.0105) permitiram a rejeição da hipótese nula. Logo assumimos que o ajuste do modelo hipotético, que considera apenas o coeficiente de intercepto é significativamente reduzido quando comparado ao MRL proposto, destacando que a inclusão do coeficiente β melhorou o ajuste da reta aos pontos.

Além disso, notamos que a estatística F obtida é relativamente maior que 1, dado o tamanho da série temporal dos nossos dados, sendo, portanto, uma boa indicação de existência de relação entre a variável preditora e a variável resposta (REGO, 2015). Conjuntamente, um teste F global significativo pode ser considerado um indicador de um coeficiente de determinação significativamente diferente de zero (MINITAB, 2019), assim a alta significância da estatística F, destacada pelo p-valor associado muito pequeno, nos permite concluir que o

²⁸. Do inglês, *Degrees of Freedom*.

R^2_{adj} é significativamente diferente de zero, corroborando com os resultados alcançados até aqui.

(d) Análise dos Resíduos

- **Normalidade**

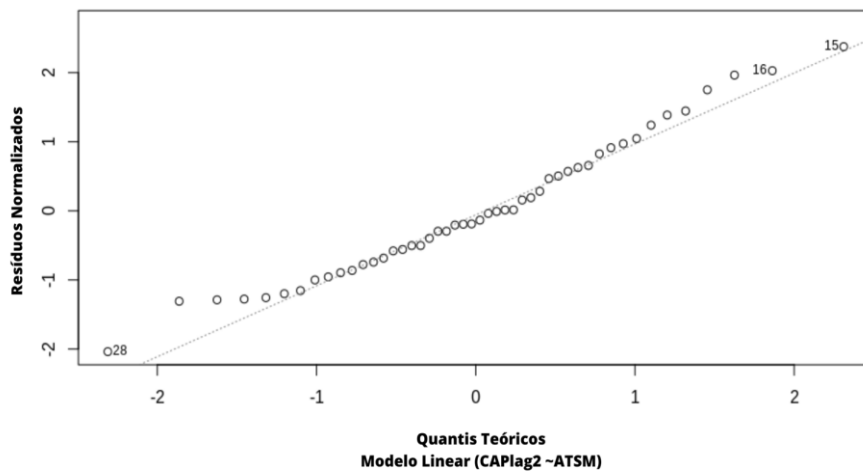


Figura 23: Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos. A linha diagonal pontilhada representa a distribuição normal teórica; os pontos representam a distribuição dos resíduos observada.

Uma vez que não existe grande fuga dos pontos que representam a distribuição dos resíduos em relação à reta de distribuição normal teórica (Figura 23), avaliamos o cumprimento da suposição de que os erros aleatórios têm distribuição normal. A fim de corroborar com esse resultado, formulamos o Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk, o qual retornou $W=0.97254$ e p-valor do teste ($0.3172 < 0.5$), possibilitando o aceite da hipótese nula: normalidade dos resíduos.

- ***Homoscedasticidade***

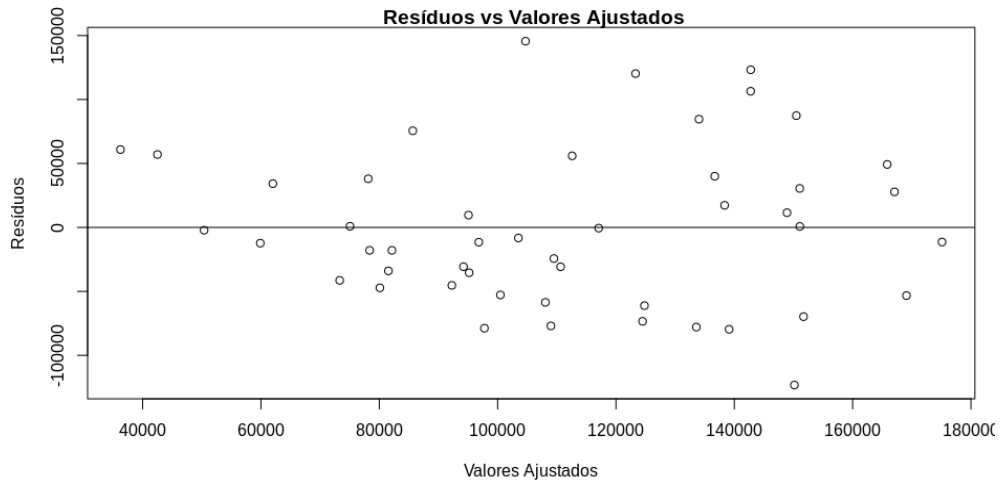


Figura 24: Resíduos em função dos valores ajustados.

A partir da verificação gráfica (Figura 24) podemos observar que não há um padrão dos pontos claramente estabelecido, em outras palavras, os resíduos se distribuem de forma razoavelmente aleatória em torno de zero, assim, não descartamos a existência de homoscedasticidade.

- ***Independência***

A verificação do gráfico de resíduos em função do tempo (Figura 25), nos permite avaliar que os resíduos se distribuem de maneira razoavelmente aleatória ao longo do tempo, desta forma, consideramos como satisfeita a condição de independência dos resíduos.

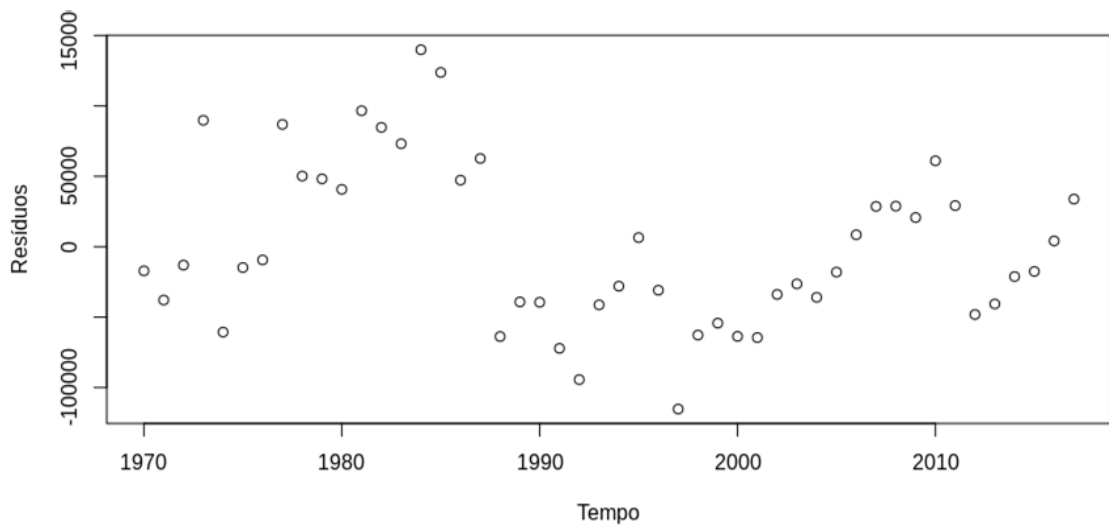


Figura 25: Resíduos em função do Tempo.

3.3.4 Padrões Médios: Estado 1, Transição e Estado 2

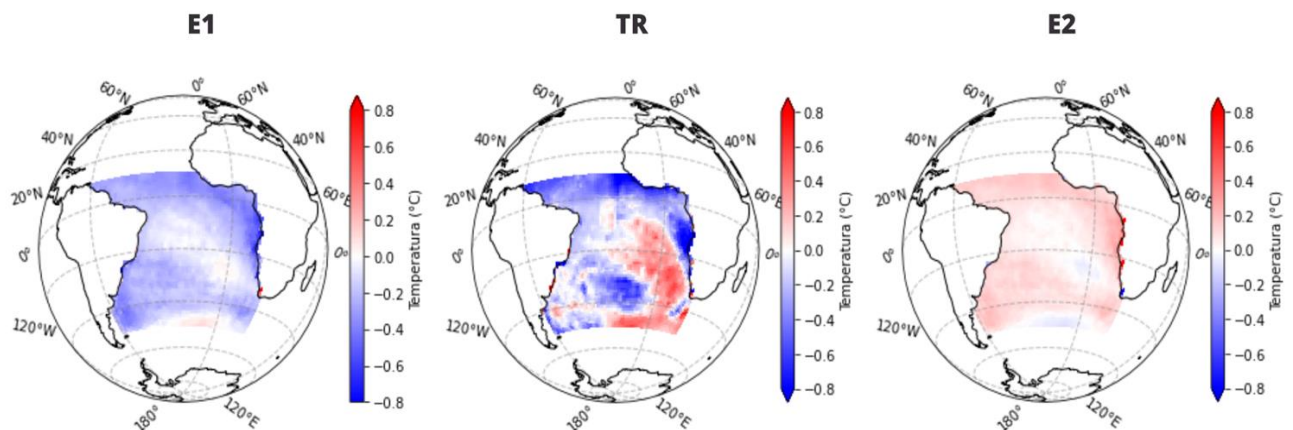


Figura 26: Padrões oceânicos de anomalia de temperatura da superfície do mar mensal (DJ) média do conjunto de dados (*ATSM_{ens}*: COBE-SST2, NOAA ERSST.V5 e ICOADS 2 Degree) para a região do Oceano Atlântico Sul: média do ESTADO 1 (**E1**; 1970 a 1985); média para os anos de TRANSIÇÃO (**TR**; 1986, 1987 e 1988); média do ESTADO 2 (**E2**; 1988 A 2017).

- **Estado 1**

A média dos anos de 1970 a 1985, aqui chamada de Estado 1 (E1, Figura 26), apresentou *ATSMs* predominantemente negativas (até -0.5°C) ou próximas a zero. Valores mínimos puderam ser identificados na região da PCSE do Brasil até a região de CBM. Enquanto valores próximos a zero, puderam ser observados na região ao sul e, também, central do OAS.

- ***Transição***

A média dos anos de 1986, 1987 e 1988, aqui chamada de fase de transição (TR, Figura 26), apresentou ATSMs que variaram entre -0.7°C e $+0.7^{\circ}\text{C}$, com intensos gradientes de temperatura no sentido NE-SO, caracterizando a formação de DSAS em fase negativa, o que é confirmado pela série de IDSAS, Figura 16. Valores mínimos de temperatura puderam ser verificados na região da ASAS; na região do Equador; e, também, na região dos Sistemas de Ressurgência da Corrente de Banguela. Valores máximos puderam ser identificados na região de Retroflexão da Agulhas e na região Centro-NE da bacia.

- ***Estado 2***

A média dos anos de 1989 a 2019, aqui chamada de Estado 2 (E2, Figura 26), apresentou ATSMs predominantemente positivas que variaram entre -0.1°C e $+0.25^{\circ}\text{C}$. Valores mínimos puderam ser percebidos na região ao sul e, também, na região central-leste do OAS. Valores máximos, por sua vez, puderam ser observados nas regiões: da PCSE do Brasil até a região de CBM; de Retroflexão da Agulhas; e dos Sistemas de Ressurgência da Corrente de Banguela até o norte da linha do Equador.

3.3.4 Diferenças entre E2 e E1

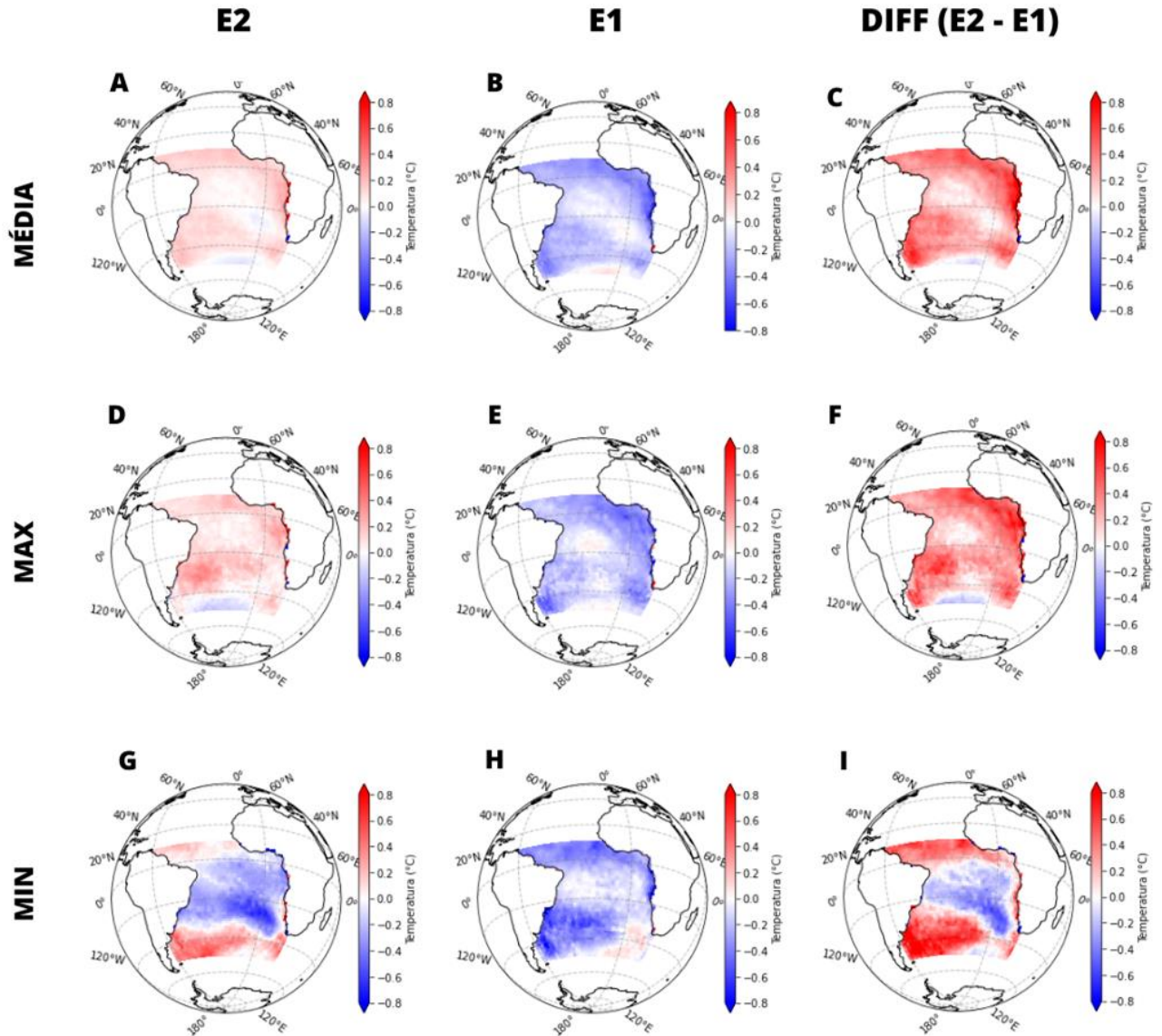


Figura 27: Padrões oceânicos de anomalia de temperatura da superfície do mar mensal (DJ) média do conjunto de dados ($ATSM_{ens}$: COBE-SST2, NOAA ERSST.V5 e ICOADS 2 Degree) para a região do Oceano Atlântico Sul: **(A)** Média do ESTADO 2 (E2; 1988 A 2017) **(B)** Média do ESTADO 1 (E1; 1970 a 1985) **(C)** Diferença entre os estados médios **(D)** Média do composto associado às capturas máximas de *S. brasiliensis* em E2 **(E)** Média do composto associado às capturas máximas de *S. brasiliensis* em E1 **(F)** Diferença entre os padrões associados às capturas máximas de ambos os estados. **(G)** Média do composto associado às capturas mínimas de *S. brasiliensis* em E2 **(H)** Média do composto associado às capturas mínimas de *S. brasiliensis* em E1 **(I)** Diferença entre os padrões associados às capturas mínimas de ambos os estados.

A partir da Figura 27C, buscou-se ilustrar a **diferença obtida entre os padrões médios de ATSM_{ens} DJ OAS para os períodos E2 e E1**, Figura 27A e Figura 27B, respectivamente, os quais já foram melhor descritos anteriormente segundo a Figura 26. Analisando Figura 27C, podemos destacar que E2 foi majoritariamente mais quente que E1, com exceção de porção extremo sul do OAS (entre 0-30°O), que apresenta anomalias negativas próximas a 0.1°C, e da porção Centro-NE do OAS, que apresentou diferenças nulas ou próximas a zero, indicando que não houve diferenças perceptíveis entre os estados para esta região dentro da escala espaço-temporal avaliada. As diferenças de ATSMs médias variaram entre cerca de -0.1°C e +0.65°C, com máximas nas regiões de borda oceânica, tanto a NE, quanto a SO do OAS, abrangendo regiões de frentes citadas do por BOAULI *et al.* (2017) (Figura 4), como: CBM; fusão das Frentes Subantártica e Polar Antártica; Retroflexão das Agulhas; e Sistemas de Ressurgência da Corrente de Banguela; além da região ao norte da linha do Equador.

Na sequência, a Figura 27 explana os padrões médios de ATSM_{ens} DJ OAS referentes aos compostos associados às máximas e mínimas capturas de *S. brasiliensis*, em cada estado avaliado, assim como a diferença entre os estados para cada composto (Figura 27F e Figura 27I, respectivamente).

A Figura 27E representa o **padrão médio de ATSM_{ens} DJ OAS referente ao composto associado às máximas capturas de *S. brasiliensis* em E1**. Com sua análise podemos destacar que neste período a maior parte do domínio é marcada por anomalias negativas e próximas a zero, variando entre -0.45°C até valores menores que +0.1°C. Valores mínimos de ATSM podem ser observados na região ao sul da CBM; na região de Retroflexão das Agulhas; e ao longo de toda a borda oriental do OAS. Anomalias positivas próximas a zero podem ser observados na região central (acima de 20°S) e, também, no extremo sul da área de estudo entre 0° e 30°O.

A Figura 27D representa o **padrão médio de ATSM_{ens} DJ OAS referente ao composto associado às máximas capturas de *S. brasiliensis* em E2**. As anomalias apresentadas nesta figura variam entre -0.2°C e +0.35°C. Sinal negativo de ATSM pode ser observado apenas na faixa longitudinal do OAS, ao sul de 40°S. Valores máximos de ATSM podem ser notados na região SO do oceano entre 20-40°S e ao NE entre 0-20°S.

Por meio da análise da Figura 27F, a qual descreve a **diferença entre os padrões médios de ATSM_{ens} DJ OAS relacionados aos anos de máximas capturas em cada estado**, observamos que E2 apresentou maior aquecimento com relação a E1 na maior parte do domínio

estudado, com diferenças variando entre -0.2°C até $+0.65^{\circ}\text{C}$. A distribuição de diferenças de ATSM em Figura 27F se mostra muito similar ao que é possível observar na análise da diferença entre os padrões médios de ATSM_{ens} DJ OAS da média total (E2 e E1) - Figura 27C. Contudo, os padrões relacionados aos máximos de capturas, apresentaram maior aquecimento na região oceânica adjacente a PCSE do Brasil até o centro do oceano, tanto em E1, quanto em E2, o qual será relatado com mais detalhes a diante, através da análise das diferenças entre padrões médios de cada estado e padrões médios de cada composto (E1, Figura 28; e E2, Figura 29). Nota-se ainda que, diferenças negativas indicam regiões onde E2 foi excepcionalmente mais frio que E1, puderam ser vistas no extremo sul do domínio, entre aproximadamente 0 e 40°O .

A Figura 27H representa o **padrão médio de ATSM_{ens} DJ OAS referente ao composto associado às mínimas capturas de *S. brasiliensis* em E1**. As anomalias apresentadas nesta figura variam entre -0.6°C e $+0.2^{\circ}\text{C}$. Sinal negativo de ATSM_{ens} é predominante ao longo do oceano no caso avaliado, com mínimos observados na região SO, desde a região costeira da América do Sul até o meridiano 0° , ao sul do paralelo 20°S e, também, na região costeira da África, entre $0-20^{\circ}\text{S}$. Porção com anomalias positivas podem ser vistas na região de Retroflexão das Agulhas. Enquanto valores nulos de ATSMs, podem ser observados na região oceânica entre $0-20^{\circ}\text{S}$.

A Figura 27G representa o **padrão médio de ATSM_{ens} DJ OAS referente ao composto associado às mínimas capturas de *S. brasiliensis* em E2**. O ponto de maior destaque neste padrão é o marcado gradiente de temperatura no sentido N-S do OAS, que variou de -0.5°C a $+0.5^{\circ}\text{C}$. Com anomalias positivas ao sul de 30°S e ao norte da linha do Equador; e demais regiões com anomalias predominantemente negativas.

Mediante análise da Figura 27I, a qual descreve a **diferença entre os padrões médios de ATSM_{ens} DJ OAS relacionados aos anos de mínimas capturas em cada estado**, é possível destacar um marcado gradiente de temperatura no sentido NE-SO do OAS. Onde, o sinal negativo de ATSM observado na região NE é destacado pela escala de cores da figura, apresentando-se até 0.1°C mais frio que a mesma região em E1. Já a região SO, atingiu temperaturas de até 0.1° mais altas em E2. Indicando que, em E2, o gradiente de temperatura entre os polos aumentou para até aproximadamente 0.2°C , quando comparado a E1. Além disso, ressaltamos o fato de a configuração de polos de ATSM opostos observada, tanto para o composto associado às capturas mínimas (Figura 27G), quanto à diferença entre E1 e E2 (Figura 27I), caracteriza um padrão de DSAS em fase positiva, o qual, por sua vez, teve maior

ocorrência em E2 (Figura 30). Percebe-se também que a região do OAS acima da linha do Equador teve anomalias de TSM de 0.1°C mais altas em E2.

3.3.5 ESTADO 1 – Diferenças entre Compostos de Capturas Máximas/Mínimas e Média Período e Diferenças entre os Compostos de Máximas e Mínimas

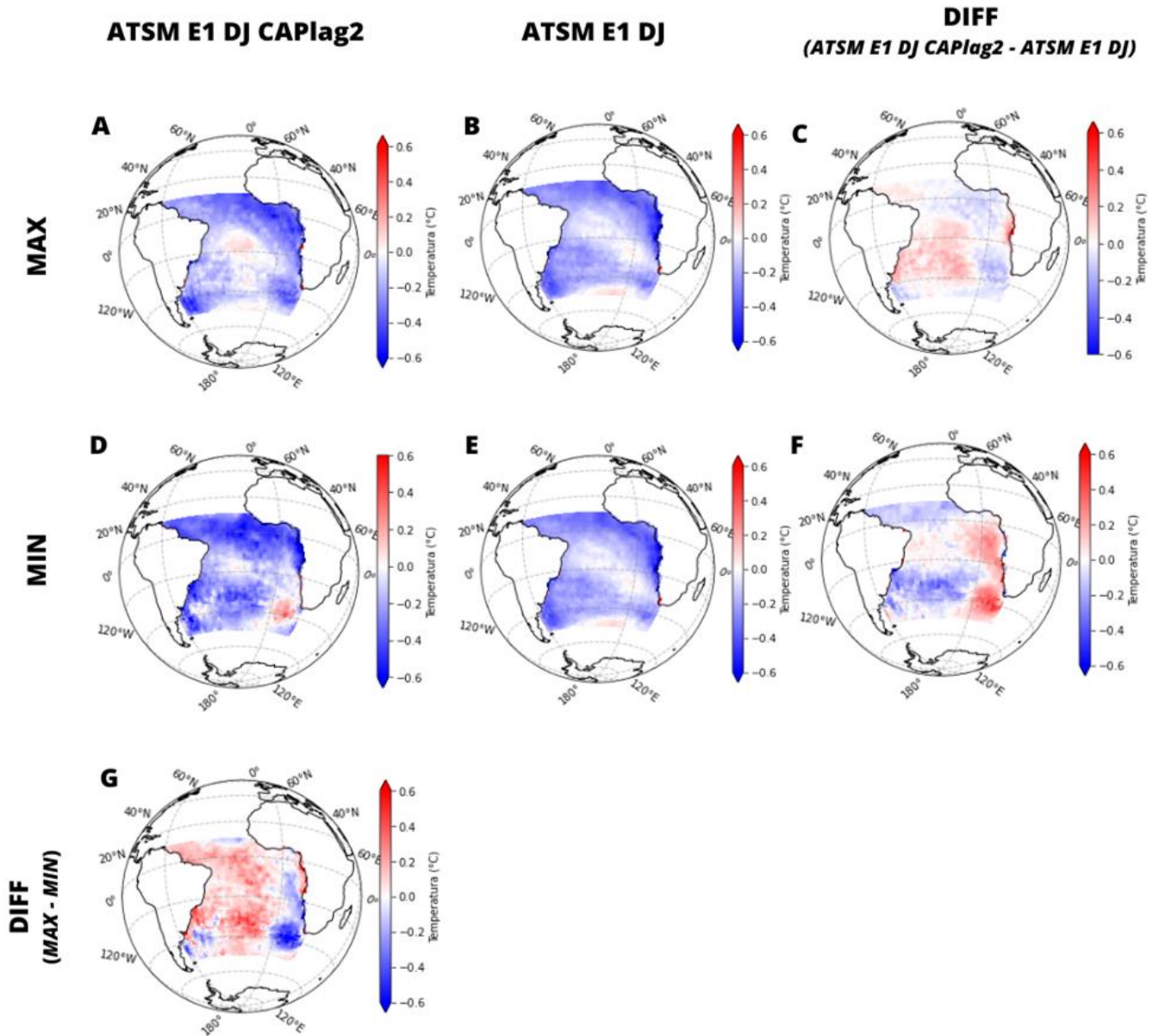


Figura 28: Padrões oceânicos de anomalia de temperatura da superfície do mar mensal (DJ) média do conjunto de dados ($ATSM_{ens}$: COBE-SST2, NOAA ERSST.V5 e ICOADS 2 Degree) para a região do Oceano Atlântico Sul entre 1970 e 2019: (A) Média do composto associado às capturas máximas de *S. brasiliensis* em E1 (B e E) Média do ESTADO 1 (E1; 1970 a 1985) (C) Diferença entre o E1 médio e a média do composto associado às capturas máximas em E1 (D) Média do composto associado às capturas mínimas de *S. brasiliensis* em E1 (F) Diferença entre o E1 médio e a média o composto associado às capturas mínimas E1 (G) Diferença entre média o composto associado às capturas máximas e às capturas mínimas em E1.

A partir da Figura 28, buscou-se ressaltar as diferenças estimadas entre os padrões médios de $ATSM_{ens}$ DJ OAS associados aos máximos e mínimos de capturas de *S. brasiliensis* em E1, assim como a diferença entre os padrões associados a cada composto (Figura 28G).

A diferença entre o padrão médio de $ATSM_{ens}$ DJ OAS associado aos máximos de capturas em E1 e o padrão médio de E1 (Figura 28C) variou entre -0.15 e $+0.15^{\circ}\text{C}$. Diferenças positivas máximas puderam ser observadas na porção SO (ao sul de 20°S) do OAS, desde a costa leste da América do Sul até o meridiano 0° e também na região costeira da África, de 0 a 20°S . Além disso, anomalias positivas de até aproximadamente $+0.1^{\circ}\text{C}$, puderam ser vistas ao norte da linha do Equador, a oeste do meridiano 30°O . Valores de diferenças inferiores a zero, logo demonstrando que a temperatura dos padrões associados aos MAX de E1 foi inferior à média do período E1, se estenderam na maior parte da região leste do OAS, abrangendo praticamente todas as latitudes desta faixa (exceto a região da costa africana citada). Destacam-se também a anomalias negativas e próximas a zero na região próxima a costa da América do Sul, ao sul de 40°S e, também, em alguns pontos na região de ressurgência de Cabo Frio.

A diferença entre o padrão médio de $ATSM_{ens}$ DJ OAS associado aos mínimos de capturas em E1 e o padrão médio de E1 (Figura 28F) variou entre -0.35 e $+0.35^{\circ}\text{C}$, indicando maiores gradientes de temperatura ao longo do OAS, quando comparados a Figura 28C. Sinal positivo máximo de $ATSM$ se estendeu na maior parte da região leste do OAS, abrangendo praticamente todas as latitudes desta faixa abaixo da linha do Equador. A região centro-oeste do OAS, entre 0 e 20°S , apresentou anomalias nulas ou próximas a zero. Diferenças negativas mínimas de $ATSM$ são observadas ao longo da PCSE do Brasil até o meridiano 0° , indicando a menor temperatura nesta faixa do oceano para os anos associados aos MIN em E1.

A diferença entre os padrões médios de $ATSM_{ens}$ DJ OAS E1 associados aos máximos e aos mínimos de capturas (Figura 28G) apresentou valores variando de -0.45°C a $+0.45^{\circ}\text{C}$. Anomalias positivas máximas puderam ser observadas na porção SO do OAS (ao sul de 20°S), desde a costa leste da América do Sul até o meridiano 0° e também na região costeira da África, entre 0° e 20°S . Além disso, anomalias positivas, de até aproximadamente $+0.2^{\circ}\text{C}$, puderam ser vistas ao norte da linha do Equador. Valores de diferenças inferiores a zero, logo demonstrando que os a temperatura dos padrões associados aos MAX de E1 foi inferior à associada aos MIN de E1, se estenderam na maior parte da região leste do OAS, abrangendo praticamente todas as latitudes desta faixa, com exceção da região da costa africana acima.

3.3.6 ESTADO 2 – Diferenças entre Compostos Capturas Máximas/Mínimas e Média Período e Diferenças entre os Compostos de Máximas e Mínimas

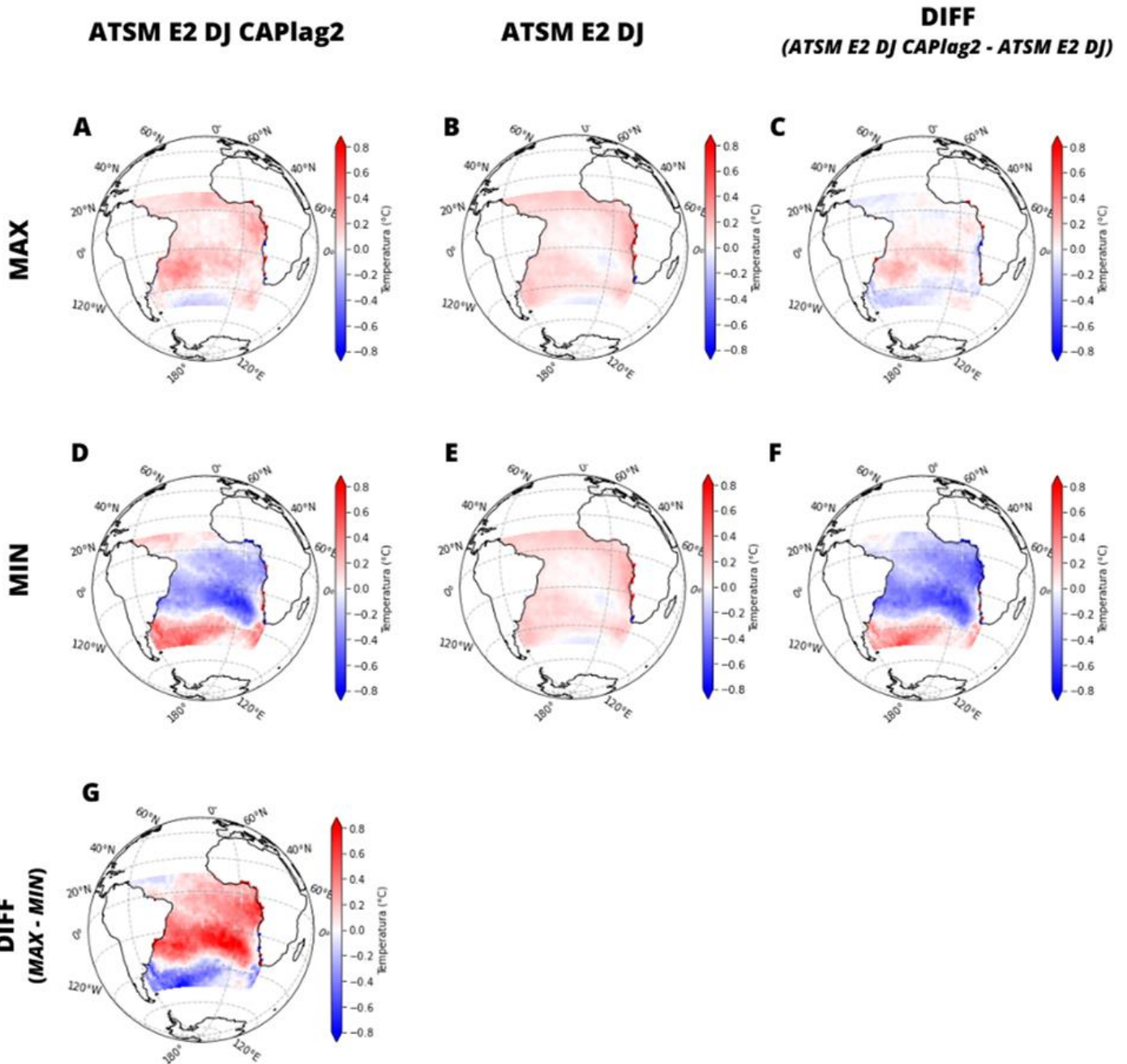


Figura 29: Padrões oceânicos de anomalia de temperatura da superfície do mar mensal (DJ) média do conjunto de dados (ATSM_{ens}: COBE-SST2, NOAA ERSST.V5 e ICOADS 2 Degree) para a região do Oceano Atlântico Sul: (A) Média do composto associado às capturas máximas de *S. brasiliensis* em E2 (B e E) Média do ESTADO 2 (E2; 1988 A 2017) (C) Diferença entre o E2 médio e a média de anos com capturas máximas em E2 (D) Média do composto associado às capturas mínimas de *S. brasiliensis* em E2 (F) Diferença entre o E2 médio e a média do composto associado às capturas mínimas em E2 (G) Diferença entre a média dos compostos associados às capturas máximas e às capturas mínimas em E2.

A partir da Figura 29, buscou-se ressaltar as diferenças estimadas entre os padrões médios de $ATSM_{ens}$ DJ OAS associados aos máximos e mínimos de capturas de *S. brasiliensis* em E2, assim como a diferença entre os padrões associados a cada composto (Figura 29G).

A diferença entre o padrão médio de $ATSM_{ens}$ DJ OAS associado aos máximos de capturas em E2 e o padrão médio de E2 (Figura 29C) variou entre -0.25°C e $+0.25^{\circ}\text{C}$. Diferenças positivas máximas puderam ser observadas na porção SO do OAS (entre 20°S e 40°S), estendendo-se desde a costa leste da América do Sul até o meridiano 10°L . Sinais positivos e próximos a zero podem ser identificados na região de Retroflexão das Agulhas; norte da linha do Equador (leste de 30°O); e entre os paralelos de 0 e 20°S . Diferenças negativas marcam as regiões: de CBM; de Frente do Atlântico Sul e a Frente Polar Antártica; e de Sistemas de Ressurgência da Corrente de Banguela.

A diferença entre o padrão médio de $ATSM_{ens}$ DJ OAS associado aos mínimos de capturas em E2 e o padrão médio de E2 (Figura 29F) variou entre -0.55 e $+0.55^{\circ}\text{C}$, indicando maiores gradientes de temperatura ao longo do OAS, quando comparados a Figura 29C. Sinal positivo máximo de diferença entre o padrão MIN E2 e o padrão médio E2 se estendeu na maior parte da região norte do OAS, abrangendo praticamente todas as latitudes desta faixa acima do paralelo de 40°S . Diferenças positivas são observadas ao sul de 40°S , abrangendo as regiões: de CBM; e de Retroflexão das Agulhas.

A diferença entre os padrões médios de $ATSM_{ens}$ DJ OAS E2 associados aos máximos e aos mínimos de capturas (Figura 29G) apresentou valores variando de -0.65°C a $+0.65^{\circ}\text{C}$, representado o maior gradiente de ATSM entre os casos avaliados neste estudo. Valores positivos são observados na maior parte do domínio acima de 40°S , com máximos ao longo da faixa do oceano entre 20°S e 40°S . Diferenças negativas são observadas ao sul de 40°S , abrangendo as regiões: de CBM; e de Retroflexão das Agulhas, pontuando a existência de maiores ATSMs associadas aos compostos de MIN capturas nessas regiões.

3.3.7 Dipolo Subtropical do Atlântico Sul e Capturas de *Sardinella Brasiliensis*

- **Frequência Ocorrência Relativa (%) DSAS: E1, TR e E2**

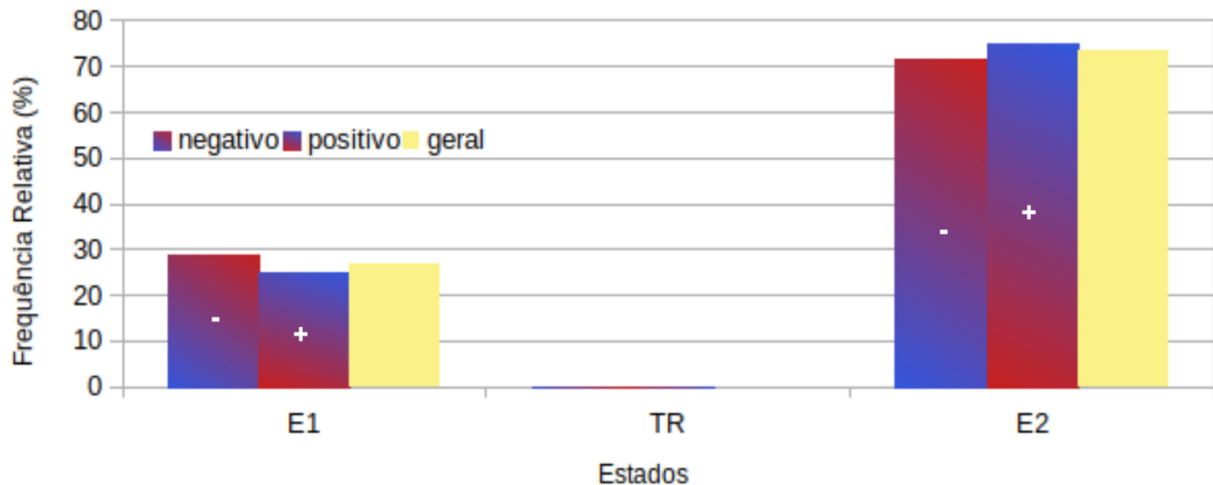


Figura 30: Frequência Relativa (%) de anos de ocorrência de cada fase do DSAS, assim como a ocorrência geral (a qual considera tanto ocorrência de fases positivas, quanto negativas) em cada estado de 1970 a 2019. Onde E1 se estende de 1970 a 1985; TR de 1986 a 1988; e E2 de 1989 a 2019. Dados utilizados para o cálculo IDSAS: anomalia de temperatura da superfície do mar mensal (DJ) média do conjunto de dados ($ATSM_{ens}$: COBE-SST2, NOAA ERSST.V5 e ICOADS 2 Degree) para os dois polos de aquecimento/resfriamento do Oceano Atlântico Sul entre 1970 e 2019.

Através do gráfico de Frequência de Ocorrência Relativa (%; Figura 30) é possível ressaltar que, para **E1**, obtivemos 28,57% de ocorrência de DSAS em fase negativa, e 25% de DSAS em fase positiva, as quais equivalem a 26,57 % de ocorrências gerais (formação de DSAS independente da fase). Enquanto, para **E2**, obtivemos 71,42% de ocorrência de DSAS em fase negativa, 75% de DSAS em fase positiva, as quais equivalem a 73,34% de ocorrências gerais. Desta forma, estima-se um número cerca de três vezes maior de ocorrências de formação de DSAS geral (ambas as fases) em E2, quando comparado a E1.

- **Resultados Análises Estatística IDSAS vs CAPlag2**

Tabela 8: Quadro comparativo dos resultados estatísticos referentes ao estudo da correlação entre as fases do DSAS (positiva e negativa) e os extremos de captura de sardinha (máximos e mínimos). Onde: CAPmaxlag2 indica o composto de anos com máximos de capturas com atraso de dois passos de tempo; CAPminlag2 indica o composto de anos com mínimos de capturas com atraso de dois passos de tempo.

O (*) indica valores de Coeficiente de Correlação de Pearson (r) significativos estatisticamente (p -valor <0.5).

	DSAS+	DSAS-	DSAS Geral
CAPmaxlag2	$r = -0.167^*$	$r = -0.082^*$	$r = -0.193^*$
Capminlag2	$r = +0.203^*$	$r = +0.031$	$r = +0.179^*$

A Tabela 8 ilustra os resultados de Análise de Correção Linear de Pearson entre anos de ocorrência de DSAS, tanto em fase positiva, quanto em fase negativa, com anos de ocorrência de extremos de capturas de *S. brasiliensis* (máximos e mínimos) com correção de dois passos de tempo. Os principais pontos que podem ser ressaltados a partir da análise desta tabela são:

- **Correlação negativa** para ocorrência de **DSAS geral** (fases positivas e negativas) com os anos associados a ocorrência de **capturas máximas** (CAPmaxlag2).
- **Correlação positiva** entre a ocorrência de **DSAS geral** (fases positivas e negativas) com os anos associados a ocorrência de **capturas mínimas** (CAPminlag2).
- Maior valor de correlação observado para **DSAS+** e **CAPminlag2**.

Num primeiro momento, podemos destacar que esses resultados podem ser considerados indícios de que a formação de DSAS no OAS, independente da fase, não seria favorável para o sucesso no recrutamento da *S. brasiliensis*. Num segundo momento, tendo em mãos o maior valor de correlação observado para **DSAS+** e **CAPminlag2**, em conjunto com os padrões oceânicos associados aos MIN de capturas em E2 (Figura 29D), podemos indicar que marcados gradientes de temperatura ao longo do OAS, principalmente em formato de DSAS em fase positiva, não são favoráveis para o sucesso do recrutamento da espécie analisada.

- **DSAS Positivo e Mínimos de Captura em E2**

De forma geral, a análise dos padrões obtidos nos permite destacar que o padrão oceânico associado ao composto de mínimas capturas de *S. brasiliensis* em E2 (Figura 27G) apresentou polos opostos de ATSM no sentido NE-SO. Vele lembrar que E2 (1988 a 2019)

corresponde a fase em que o OAS se mostrou majoritariamente mais quente que o oceano global - Figura 11). A configuração de anomalias opostas no sentido NE-SO observada é similar à de eventos de DSAS em fase positiva, ou seja, com anomalias positivas no polo SO e anomalias negativas no polo NE. Ao mesmo tempo, em E2 é observada uma maior ocorrência geral de formação de DSAS no OAS, tanto em fase positiva, quanto em fase negativa (Figura 30). Além disso, observa-se que existe uma correlação positiva entre os anos de ocorrência de DSAS, tanto geral (ambas as fases), quanto em fase positiva, com os anos associados às capturas mínimas (Tabela 8). Enquanto se observa correlação negativa entre os anos de ocorrência de DSAS, tanto geral, quanto em fases positivas, com os anos associados às capturas máximas (Tabela 8).

Silva (2020) afirmou que fases positivas de DSAS estão associadas à alteração do padrão de ventos no OAS, de modo a favorecer o Transporte de Ekman e, conseqüentemente, o Índice de Mistura da região em questão. O contrário seria observado para as fases negativas. Neste contexto, o padrão oceânico associado ao composto de mínimas capturas de *S. brasiliensis* em E2 (Figura 27G), o qual apresentou configuração correspondente ao DSAS em fase positiva, acompanhado da observação de maior ocorrência de DSAS geral (ambas as fases) no período E2, são importantes indícios de que a formação de gradientes de $ATSM_{ens}$ DJ OAS na figuração de DSAS em fase positiva está relacionada com mínimos de capturas de *S. brasiliensis*. Nesse contexto, vale lembrar que eventos de ressurgência costeira são fundamentais para a ocorrência de processos biológicos nas regiões próximas à costa, uma vez que o movimento ascendente da água traz nutrientes para regiões superficiais, favorecendo a atividade biológica (PINAYA, 2008). Contudo, diversos autores (BAKUN & PARRISH, 1990; JABLONSKY & LEGEY, 2004; SOARES *et al.*, 2011) asseguram que o excesso de T. de Ekman no sentido off shore, assim como a mistura a ele associada, são considerados fatores prejudiciais ao recrutamento de ictioplâncton epipelágico. Tal excedente de transporte, em direção oposta à costa (ideal entre 520 e 700 kg s⁻¹m⁻¹; JABLONSKY & LEGEY, 2004), pode levar esses organismos para longe das regiões ideais para sua sobrevivência²⁹, assim como o excesso de mistura (ideal entre 0.035-0.045 N m⁻¹; JABLONSKY & LEGEY, 2004) pode destruir partículas de alimento, inviabilizando a nutrição necessária de larvas de peixe, podendo

²⁹ No caso da *S. brasiliensis*, na região da Plataforma Continental Sudeste do Brasil, até a isóbata 100m (MATSUURA, 1998). Sendo os principais locais de desova observados por este autor, as regiões de Ubatuba/Santos, Iguape-Paranaguá e São Francisco do Sul/Florianópolis. Nota-se que há evidências de ocorrência da espécie até as regiões adjacentes ao Rio Grande do Sul (GIGLIOTTI, 2010).

levá-las a inanição ou enfraquecimento (e consequente maior susceptibilidade aos predadores)³⁰.

- ***Padrões Associados aos Máximos de Captura em E2***

Além dos intervalos de T. de Ekman e de índice de mistura favoráveis ao recrutamento de *S. brasiliensis*³¹, Jablonsky & Legey (2004) também ressaltaram a existência de uma janela ótima de temperatura (24.75°C a 25.5°C). Tendo essa informação em mente, o fato de as maiores ATSM_{ens} DJ OAS dos padrões associados aos compostos de máximas capturas (Figura 29C) serem observados na região da PCSE, principal local de recrutamento das fases iniciais da *S. brasiliensis*, pode ser considerado um indício de que esses organismos, jovens e adultos em fase reprodutiva, estão migrando cada vez mais para o sul para se reproduzir. Esta afirmação corrobora com a discussão proposta por Matsuura (1998) e Gigliotti (2010), de que estes organismos revelam tendência de migrar para o sul como forma de adaptação ao aumento da TSM dos locais convencionais de desova.

3.3.8 Comportamento de Histerese da População de Sardinella Brasiliensis Diante da Aceleração do Aquecimento do Oceano Atlântico Sul na Década de 1980

A fim de investigar evidências do comportamento não linear de CAP (Figura 2 e Figura 3) e tomando como inspiração as classificações de estado propostas por Saygu *et al.* (2022), o conceito de histerese e, também, o de *tipping elements* abordados por Leton *et al.* (2008), o presente estudo lançou mão da divisão da série temporal de dados de capturas em três períodos de acordo com os **diferentes estados médios observados na série** (Figura 9). Corroborando com essa abordagem, Scherer & Richard (2018) admitiram a natureza dinâmica dos ecossistemas marinhos, ressaltando que, embora correspondam a sistemas resilientes e, portanto, resistentes às pressões antropogênicas, quando ultrapassado um certo nível de pressão, existe o perigo do ecossistema mudar radicalmente (com a analogia de 'cair de um penhasco'), de modo que o mesmo só possa se recuperar lentamente e não necessariamente às condições originais (Figura 31).

³⁰ LASKER (1975) foi o primeiro a inferir essa possibilidade, a ideia foi reforçada por outros autores (MATSUURA, 1996; PINAYA, 2008; SILVA, 2020).

³¹ Neste caso o texto se refere ao recrutamento de *S. brasiliensis* da fase ictioplanctônica para a fase juvenil.

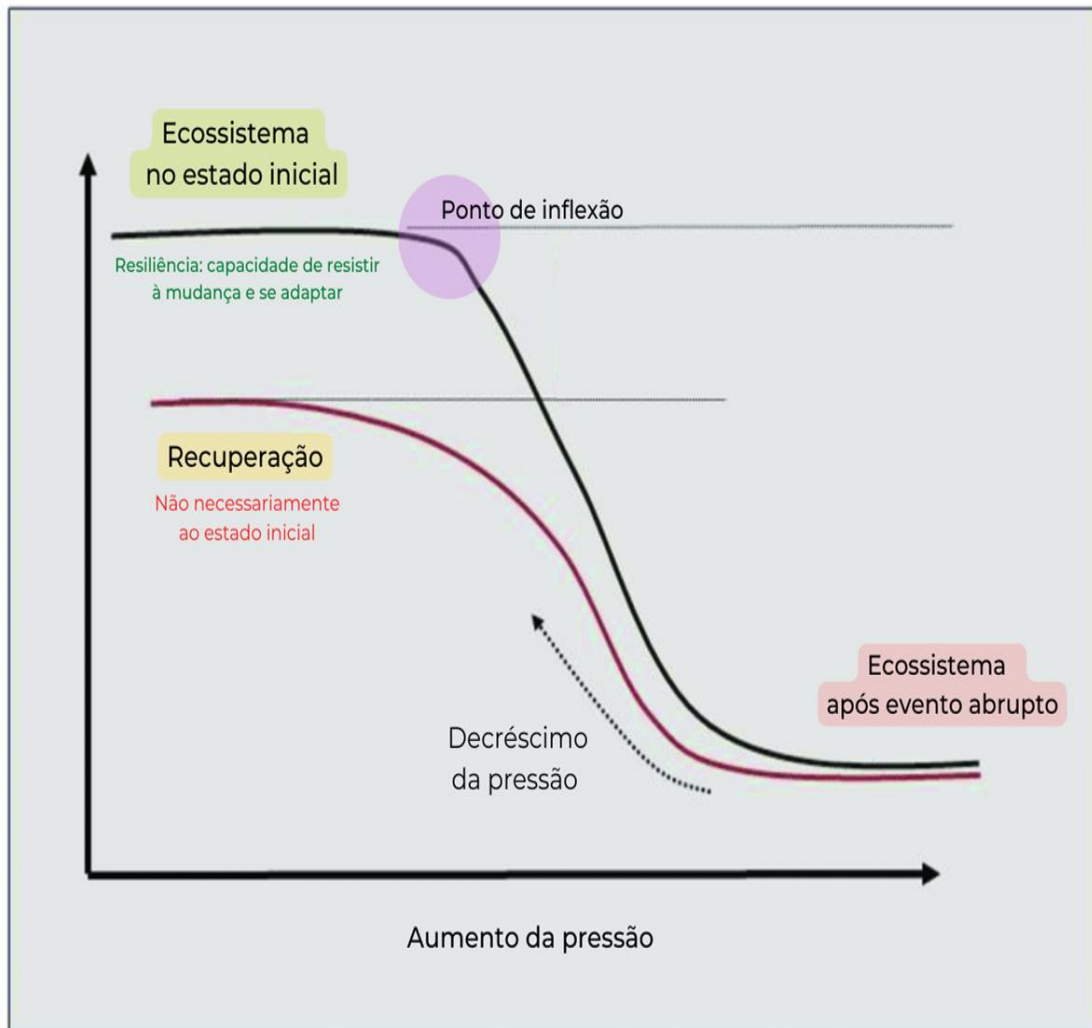


Figura 31: Esquema ilustrativo do conceito de *histerese em um ecossistema hipotético*. Tomou-se como exemplo de fator desencadeante da *mudança*: a pressão humana. O diagrama mostra o **ecossistema em estado inicial**, o qual se mostra resiliente à pressão antropogênica até um limite crítico (**ponto de inflexão**), que o faz mudar de um estado para outro, com energia diferente. O decréscimo da pressão possibilita a recuperação do ecossistema avaliado, porém sem que o mesmo recupere necessariamente ao estado inicial. Adaptado de Scherer & Richard (2018).

A Figura 31, adaptada de Scherer & Richard, (2018), ilustra os principais fundamentos que *tiveram papel-chave para este estudo, estando presente na definição dos períodos aqui avaliados e comparados (E1; TR; e E2)*. Observando o esquema é possível detectar o padrão geral de comportamento da série de capturas de sardinha verdadeira analisada (Figura 9), onde, por analogia, temos:

- I. Um **'ecossistema em estado inicial'**, representado por **E1**, período de 1970 a 1985, em que a tendência de capturas se apresentou positiva, com média total de 167459.9

toneladas. E1 apresentou ATSMs predominantemente negativas (até -0.5°C) ou próximas a zero.

II. Um ‘Ponto de inflexão’ ou limiar crítico, representando por **TR**:

i. Valor crítico de $ATSM_{ens}$ DJ OAS atingindo $+0.29^{\circ}\text{C}$ em 1988. Nesse sentido, vale lembrar que: o ano de 1988, pertencente a fase de transição da ST CAPlag2 (TR; período de 1986 a 1988), foi o primeiro ano da série de $ATSM_{ens}$ DJ OAS (Figura 13) a apresentar anomalia positiva, sendo sucedido apenas por anos com anomalias positivas ou próximas a zero.

ii. Padrão oceânico com gradientes de temperatura marcados no sentido SO-NE, caracterizando a formação de DSAS em fase negativa no período de transição (TR, Figura 26). A mesma informação é corroborada, tanto pela série temporal de IDSAS (Figura 16), a qual demonstra a ocorrência de dipolo negativo em DJ 1989 (média de dez/88 e janeiro/89), quanto pelo resultado do Coeficiente de Correlação de Pearson, que demonstra correlação negativa de formação de DSAS negativo com CAPminlag2.

III. Um ‘ecossistema após evento abrupto’ representado por **E2**, período de 1989 a 2019, em que a média total de capturas foi de 66547.5 toneladas. E2 apresentou ATSMs predominantemente positivas que variaram entre -0.1°C e $+0.25^{\circ}\text{C}$, com maior aquecimento com relação a E1 na maior parte do domínio estudado, com diferenças entre os estados variando entre -0.2°C até $+0.65^{\circ}\text{C}$ (Figura 27F). A configuração de polos de ATSM opostos observada, tanto para o composto associado às capturas mínimas (Figura 27G), quanto à diferença entre E1 e E2 (Figura 27I), caracteriza um padrão de DSAS em fase positiva, o qual, por sua vez, teve maior ocorrência em E2 (Figura 30).

IV. ‘Recuperação’, estágio não alcançado pela espécie avaliada. A mesma depende da redução da pressão no sistema, neste caso, seria necessário a inversão da tendência de TSM DJ OAS.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O OAS apresentou um aumento da TSM ao longo dos séculos XX e XXI (taxa de aquecimento de aproximadamente $0,014^{\circ}\text{C}/\text{ano}$), demonstrando uma tendência positiva da série temporal de anomalias da superfície do mar desde 1909. O OAS apresentou-se mais quente que o OG em todos os anos desde 1999 até 2019 (entre ~ 0.01 e 0.35°C), além de apresentar amplitude sazonal de temperatura média mais expressiva, com verões de até 4°C mais quentes, e invernos de até 0.44°C mais frios que o OG. O ano de 1973 se destacou entre as séries, uma vez que neste ano o OAS se mostrou $+0.55^{\circ}\text{C}$ mais quente que o OG.

Entre 1970 e 1987, o OAS apresentou médias anuais de anomalias de temperatura da superfície do mar DJ predominantemente negativas ou próximas a zero (exceto o ano de 1973, onde a anomalia foi de $+0.15^{\circ}\text{C}$). Na sequência, destacamos o ano de 1988 ($ATSM_{ens}$ DJ: $+0.22^{\circ}\text{C}$), que iniciou um novo período, marcado pelo predomínio de anomalias positivas ou muito próximas a zero, até o fim da série, em 2019.

O padrão oceânico de climatologia de $ATSM_{ens}$ DJ do OAS entre 1970 e 2019 demonstrou um intervalo de temperatura que variou de $+5^{\circ}\text{C}$ ao sul a $+30^{\circ}\text{C}$ ao norte da bacia. Em relação aos padrões de anomalias de temperatura DJ decadais, foi possível notar aquecimento progressivo ($\sim 0.016^{\circ}\text{C}/\text{ano}$) no decorrer das décadas ao longo de 1970 a 2019, além da alteração no padrão de distribuição espacial das anomalias. Na década de 1970, foi observado predomínio de anomalias negativas de TSM ao logo do domínio, enquanto na década de 2010, houve predomínio de anomalias positivas. As regiões que apresentaram maior aquecimento foram as regiões próximas à costa, no SE da América do Sul e no NO da África, as mesmas regiões foram destacadas por SILVA, (2020) por apresentarem importantes sistemas de ressurgência costeira associados.

Como já citado anteriormente, foi possível notar algumas divergências entre os anos de ocorrência de DSAS, seja de fases positivas quanto de fases negativas, obtidos por Morioka *et al.* (2011) e Silva (2020) e aqueles obtidos pelo presente estudo, provavelmente devido às diferentes escalas temporais e, também, aos diferentes meses selecionados para os cálculos das séries de ATSMs aplicadas nos cálculos do IDSAS em cada um dos respectivos estudos citados. Na análise de frequência relativa, ressaltamos o aumento geral de ocorrência de DSAS (ambas as fases) a partir da década de 80 (FR geral 13.34%) até década de 2010 (FR geral 26.67%), com destaque para as fases positivas, as quais atingiram FR de 42.85% em 2010.

A análise de Correlação Cruzada levou a identificação de um adiantamento estatisticamente importante de CAP em relação a $ATSM_{ens}$ DJ OAS de dois passos de tempo, o qual, corrigido, deu origem a série $CAPlag2$. O estudo da correlação entre $ATSM_{ens}$ DJ OAS e $CAPlag2$ retornou correlação negativa regular entre as séries ($r = \sim -0.5$), indicando que a queda nas capturas pode estar relacionada ao aumento da $ATSM_{ens}$ DJ OAS. Corroborando com esses resultados, a ARLS nos permitiu aprofundar as evidências sobre a existência de correlação linear entre as séries avaliadas.

Lançando mão do conceito de histerese e inspirando-se em definições abordadas por Leton *et al.* (2008) e Saygu *et al.* (2022), este estudo sugeriu a definição de três períodos (E1; TR; e E2) a fim de esquematizar o padrão geral de comportamento da série de capturas de *S. brasiliensis* ao longo de 1970 e 2019, os quais se mostraram coerentes com a proposta de Scherer & Richard (2018), sobre mudanças abruptas em ecossistemas. Cada um dos períodos demonstrou padrões oceânicos de $ATSM_{ens}$ DJ OAS distintos: E1 (1970 – 1985) apresentou anomalias predominantemente negativas (até -0.5°C) ou próximas a zero, com valores mínimos na região da PCSE do Brasil até a região de CBM; TR (1986 – 1988) apresentou anomalias que variaram entre -0.7°C e $+0.7^{\circ}\text{C}$, com intensos gradientes de temperatura no sentido NE-SO, caracterizando a formação de DSAS em fase negativa; e E2 (1989 – 2019) apresentou anomalias predominantemente positivas que variaram entre -0.1°C e $+0.25^{\circ}\text{C}$, com mínimos na região ao sul e a centro-leste do OAS. E2 foi majoritariamente mais quente que E1 e as diferenças de $ATSMs$ médias entre eles variaram entre cerca de -0.1°C e $+0.65^{\circ}\text{C}$, com máximas nas regiões de borda oceânica, tanto a NE, quanto a SO do OAS, abrangendo regiões de frentes citadas do por Bouali *et al.* (2017).

Foram encontrados indícios de que a formação de DSAS no OAS entre 1970 e 2019 (cujo $|IDSAS| > 70\%$ STD da série de capturas sem tendência), independente da fase, não é favorável para o sucesso no recrutamento da *S. brasiliensis*. Porém, destaca-se que a formação de marcados gradientes de temperatura ao longo do OAS no sentido SO-NE, em formato de DSAS em fase positiva, é ainda menos favorável para o sucesso do recrutamento da espécie analisada, uma vez que esta fase demarca os padrões de anomalias de TSM associados às mínimas capturas em E2.

Os padrões associados aos compostos de máximas capturas apresentaram máximos de $ATSM$ na região da PCSE, a qual seria considerada um dos principais local de recrutamento das fases iniciais da *S. brasiliensis*. Desta forma, sabendo da existência de uma janela ótima de

temperatura para o recrutamento da espécie (24.75°C a 25.5°C; JABLONSKY & LEGEY, 2004), corrobora-se com a discussão proposta por Matsuura (1998) e Gigliotti (2010) – *S. brasiliensis* apresenta tendência de migrar para o sul como forma de adaptação ao aumento da TSM dos locais convencionais de desova.

Por fim, os resultados do presente estudo, evidenciam que o aumento de TSM do OAS, relacionado ao aquecimento global acelerado das últimas décadas³² e suas consequências (como a maior frequência de formação de DSAS) pode ser um fator relevante para o comportamento não linear da série temporal de capturas ajustadas de *S. brasiliensis*.

³² A Terra aqueceu em torno de 1,0°C acima dos níveis pré-industriais desde o início do século 21 (IPCC, 2021).

5. REFERÊNCIAS

AMARAL, G. D. *et al.* **Análise de Regressão Linear no Pacote R**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 53 p. Disponível em: <http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/rts/RT-SE-2009.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2022.

BOJORGE, N. **TEQ102- CONTROLE DE PROCESSOS**: modelagem de processos técnica de linearização. Niterói: Uff, 2017. 49 slides, color. Disponível em: https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/09/Control_Aula05-ModProcessos_2sem2017-1.pdf. Acesso em: 13 jan. 2022.

BOUALI, M.; SATO, O. T.; POLITO, P. S. Temporal trends in sea surface temperature gradients in the South Atlantic Ocean. **Remote Sensing Of Environment**, [S.l.], v. 194, p. 100-114, jun. 2017.

BUCHHOLZ, K. The Oceans Are Getting Warmer. 2023. Disponível em: <https://www.statista.com/chart/19418/divergence-of-ocean-temperatures-from-20th-century-average/>. Acesso em: 13 jan. 2023.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. Bioestatística: princípios e aplicações. [S.l.]: Artmed, 2003. 264 p.

CERGOLE, M. C. Stock assessment of the Brazilian sardine, *Sardinella brasiliensis*, of the southeastern coast of Brazil. **Scientia Marina**, [S.l.], v. 59, n. 3 – 4, p. 597 – 610, 1995.

CERGOLE, M. C.; SACCARDO, S. A.; ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C. L. D. B. Fluctuations in the spawning stock biomass and recruitment of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) 1977-1997. **Revista Brasileira de Oceanografia**, [S.l.], v. 50, n. único, p. 13-26, 2002.

COCHRANE, K. *et al.* Climate change implications for fisheries and aquaculture: overview of current scientific knowledge. **Fao Fisheries And Aquaculture Technical Paper**, Roma, v. 530, p. 1-128, 2009.

DASKALOV, G. M. *et al.* Trophic cascades triggered by overfishing reveal possible mechanisms of ecosystem regime shifts. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 104, n. 25, p. 10518-10523, 19 jun. 2007.

DIAS, D. F.; *et al.* Modeling the spawning strategies and larval survival of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*). **Progress In Oceanography**, [S.l.], v. 123, p. 38-53, abr. 2014.

DROUIN, K. L.; LOZIER, M. S.; JOHNS, W. E. Variability and Trends of the South Atlantic Subtropical Gyre. **Journal Of Geophysical Research: Oceans**, [S.l.], v. 126, n. 1, p. 1-19, jan. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS OF THE UNITED NATIONS – **FAO DATABASE**. 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/3/Y4849E/y4849e06.htm#bm06> . Acesso realizado em 25 de agosto de 2021.

FRANCIS, R. *et al.* Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the NE Pacific. **Fisheries Oceanography**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 1-21, abr. 1998.

FRANCO, B. C. *et al.* Climate change impacts on the atmospheric circulation, ocean, and fisheries in the southwest South Atlantic Ocean: a review. **Climatic Change**, [S.l.], v. 162, n. 4, p. 2359-2377, 7 jul. 2020.

FREEMAN, E. *et al.* *ICOADS Release 3.0: A major update to the historical marine climate record*. **Int. J. Climatol**, [S.l.], v.37, n.5, p.2211-2237, 2017.

FREIRE, K. M. F. *et al.* SEA AROUND US. 2022. Disponível em: <https://www.searoundus.org/data/#/eez/76?chart=catch-chart&dimension=taxon&measure=tonnage&limit=10>. Acesso em: 01 jan. 2022.

GIGLIOTTI, E. S., *et al.* Spatial analysis of egg distribution and geographic changes in the spawning habitat of the Brazilian sardine *Sardinella brasiliensis*. **Journal of Fish Biology**, [S.l.], v. 77, p. 2248 – 2267, 2010.

GOMES, L. M. J.; FREITAS, A. C. V. Alterações na Circulação de Hadley Regional e na Alta Subtropical do Atlântico Sul em um Cenário de Aquecimento Global. In: **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, XLIII, 2018, Itajubá. Anais, Itajubá: UFRJ, 2020. p. 227-239.

GUIMARÃES, P. R. B. **Análise de Regressão**. Curitiba: UFPR, 2008. Color. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~jomarc/regressao.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2022.

HIRAHARA, S. *et al.* Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. **J. of Climate**, [S.l.], v.27, p.57-75, 2014.

HUANG, B. *et al.* 2017. NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Version 5. Sea Surface Temperature. **NOAA National Centers for Environmental Information**. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>. Acesso em: 13 jan. 2021.

HUTCHINGS, L. *et al.* The chemical and biological consequences of coastal upwelling. **Environmental Sciences Research Report Es**, v. 18, p. 65-82, 1995.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Doi:10.1017/9781009157896.

JABLONSKI, S.; LEGEY, L. F. L. Quantifying environmental effects on the recruitment of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*), 1977-1993. **Scientia Marina**, [S.l.], v. 68, n. 3, p. 385-398, 30 set. 2004.

LASKER, R. Field criteria for survival of anchovy larvae: The relation between inshore chlorophyll maximum layers and successful first feeding. **Fish. Bu/l.** U.S. v.73, p.453-462, 1975.

LENTON, T. M. *et al.* Tipping elements in the Earth's climate system. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 105, n. 6, p. 1786-1793, 12 fev. 2008.

LI, Guancheng *et al.* Increasing ocean stratification over the past half-century. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 12, p. 1116-1123, 2020.

LÜBBECKE, J. F.; BURLS, N. J.; REASON, C. J. C.; MCPHADEN, M. J. Variability in the South Atlantic Anticyclone and the Atlantic Niño Mode. **Journal Of Climate**, [S.l.], v. 27, n. 21, p. 8135-8150, 24 out. 2014.

MARCELLO, F.; WAINER, I.; RODRIGUES, R. R. South Atlantic Subtropical Gyre Late Twentieth Century Changes. **Journal of Geophysical Research: Oceans**. [S.l.], v. 123, n. 8, p. 5194-5209, jun 2018.

MATSUURA, Y. A probable cause of recruitment failure of the Brazilian sardine *Sardinella aurita* population during the 1974/75 spawning season. **South African Journal Of Marine Science**, [S.l.], v. 17, n. 1, p. 29-35, jun. 1996.

MATSUURA, Y. Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) spawning in the southeast Brazilian Bight over the period 1976-1993. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 46, n. 1, p. 33-43, 1998.

MINITAB (ed.). Análise de regressão: Como interpretar o R-quadrado e avaliar a qualidade de ajuste? 2019. Disponível em: <https://blog.minitab.com/pt/analise-de-regressao-como-interpretar-o-r-quadrado-e-avaliar-a-qualidade-de-ajuste>. Acesso em: 01 jan. 2022.

MOLTÓ, V. *et al.* Projected effects of ocean warming on an iconic pelagic fish and its fishery. **Scientific Reports**, [S.l.], v. 11, n. 1, abr. 2021.

MORAES, L. E. D. S., GHERARDI, D. F. M., KATSURAGAWA, M., PAES, E. T. Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis* Steindachner, 1879) spawning and nursery habitats: spatial-scale partitioning and multiscale relationships with thermohaline descriptors. **ICES Journal of Marine Science** [S.l.], v. 69, p.939–952. 2012.

MORIOKA, Y.; TOZUKA, T.; YAMAGATA, T. On the Growth and Decay of the Subtropical Dipole Mode in the South Atlantic. **Journal Of Climate**, [S.l.], v. 24, n. 21, p. 5538-5554, 1 nov. 2011.

MUTHUKRISHNAN, R. *et al.* Harnessing NEON to evaluate ecological tipping points: opportunities, challenges, and approaches. **Ecosphere**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 1-16, mar. 2022.

NNAMCHI, H. C. *et al.* Does a dipole mode really exist in the South Atlantic Ocean? **Journal Of Geophysical Research**, [S.L.], v. 116, n. 15, p. 1-15, 4 ago. 2011.

OCEAN TIPPING POINTS. 2023. Disponível em: <http://oceantippingpoints.org/>. Acesso em: 01 jan. 2023.

PARREIRA, G. **Coeficiente de correlação de pearson**. 2018. Disponível em: <https://gpestatistica.netlify.app/blog/correlacao/>. Acesso em: 01 jan. 2022.

PEREZ, J. A. A. *et al.* RECURSOS MARINHOS VIVOS. In: CASTELLO, Jorge P.; KRUG, Luiz C. **Introdução Às Ciências do Mar**. Pelotas: Editora Textos, 2015. Cap. 13. p. 382-407.

PERIN, S. *et al.* Morphometry and relative growth of the Brazilian sardine, *Sardinella brasiliensis* (Steindachner,1879) in the southeastern Brazilian bight. **Arquivos de Zoologia**, [S.l.], v. 45, p. 63, 25 nov. 2014.

PINAYA, W. H. D. **Variabilidade climática marinha na plataforma sudeste brasileira e sua relação com a pesca da sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*)**. 2008. 209 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Setor de Ciências da Terra, Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paraná, 2008.

REGO, F. Quick Guide: Interpreting Simple Linear Model Output in R: linear regression models are a key part of the family of supervised learning models. **Linear regression models are a key part of the family of supervised learning models**. 2015. Disponível em: <https://feliperego.github.io/blog/2015/10/23/Interpreting-Model-Output-In-R>. Acesso em: 01 jan. 2022.

ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C. L. B. *et al.* **Prospecção de recursos pesqueiros demersais da ZEE sudeste-sul do Brasil: armadilhas e parqueiras** - Programa REVIZEE - SCORE SUL. 2002, Anais. São Paulo: Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 2002.

SAYGU, İ. *et al.* Fisheries impact on the Sea of Marmara ecosystem structure and functioning during the last three decades. **Frontiers In Marine Science**, [S.l.], v. 9, p. 1-17, 13 jan. 2023.

SCHERER C.; RICHARD G. **Ecosystem based Management of Irish Fisheries and other resources - WP1 Managing Marine Ecosystem Services**: a review of the ecosystem approach. Dublin: Wp1 Of The Eff Project Ca/033766/11, 2013. 83 p.

SHELTON, C. Climate change adaptation in fisheries and aquaculture – compilation of initial examples. **Fao Fisheries And Aquaculture Circular**, Rome, n. 1088, p. 01-45, 2014.

SHIMAKURA, S. **O Diagrama de Dispersão**. 2005. Disponível em: <http://www.leg.ufpr.br/~silvia/CE701/node15.html>. Acesso em: 01 jan. 2022.

SILVA, L. H. O. **Influência do Dipolo Subtropical do Atlântico Sul na Dinâmica de Ressurgência Costeira de Duas Regiões no Oceano Atlântico Sul**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Rio Grande, p. 84, 2020.

SOARES, H. C. *et al.* Oceanic and atmospheric patterns during spawning periods prior to extreme catches of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) in the southwest Atlantic. **Scientia Marina (Barcelona)**, v. 75, n. 4, p. 665-677, 2011.

SOUZA, C. A. de; REBOITA, M. S. Ferramenta para o Monitoramento dos Padrões de Teleconexão na América do Sul. **Terra e Didática**, Campinas, SP, v. 17, p. 2109, 2021.

SUN, X.; COOK, K. H.; VIZY, E. K. The South Atlantic Subtropical High: climatology and interannual variability. **Journal Of Climate**, [S.l.], v. 30, n. 9, p. 3279-3296, maio 2017.

WAINER, I. & TASCETTO, A. S. 2006. Climatologia na região entre Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). Diagnóstico para os períodos relativos aos levantamentos pesqueiros do Programa REVIZEE. Pp 121-160. In: Rossi-Wongtschowski, C. L. B & Madureira, L. S. (Eds.). **O Ambiente Oceanográfico da Plataforma ontinental e do Talude na Região Sudeste do Brasil**. Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), São Paulo, 466 p.

WAINER, I. *et al.* Reconstruction of the South Atlantic Subtropical Dipole index for the past 12,000 years from surface temperature proxy. **Scientific Reports**, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 1-8, 13 jun. 2014.

XIU, Peng *et al.* Future changes in coastal upwelling ecosystems with global warming: The case of the California Current System. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 2866, 2018.

ZWOLINSKI, J.; MASON, E.; OLIVEIRA, P. B.; STRATOUDAKIS, Y. Fine-scale distribution of sardine (*Sardina pilchardus*) eggs and adults during a spawning event. **Journal Of Sea Research**, [S.l.], v. 56, n. 4, p. 294-304, nov. 2006.