



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS E OCEÂNICAS QUE  
FAVORECERAM A SECA NO SUDESTE DO BRASIL DURANTE O VERÃO  
DE 2020-2021**

Pedro Antonio Rodrigues Garcez

Relatório Final de Iniciação Científica do  
programa PIBIC, orientado pelo Dr. Silvio  
Silvio Nilo Figueroa.

URL do documento original:

<?>

CPTEC/INPE  
Cachoeira Paulista  
2023



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS E OCEÂNICAS QUE  
FAVORECERAM A SECA NO SUDESTE DO BRASIL DURANTE O VERÃO  
DE 2020-2021**

Pedro Antonio Rodrigues Garcez

Relatório Final de Iniciação Científica do  
programa PIBIC, orientado pelo Dr. Silvio  
Silvio Nilo Figueroa.

CPTEC/INPE  
Cachoeira Paulista  
2023



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**



## **AGRADECIMENTOS**

O desenvolvimento deste trabalho não seria possível sem a ajuda das seguintes pessoas, dentre as quais agradeço:

Ao meu orientador, Dr. [Silvio Nilo Figueroa](#) que durante 12 meses esteve disponível para me auxiliar e compartilhar seus conhecimentos relacionados ao tema de estudo.

Ao meu amigo e professor, Dr. Jhonatan Andres Aguirre Manco, responsável por me ensinar e familiarizar de maneira voluntária com os princípios de programação em Python, que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus pais, Januário Carlos da Silva Garcez e Ronilza dos Santos Rodrigues Garcez, por todos investimentos feitos em minha formação profissional.

A minha companheira, Cíntia de Toledo Nogueira, que sempre esteve presente e me incentivou a continuar.

A Deus, responsável por guiar meus passos e colocar pessoas especiais em minha trajetória.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **RESUMO**

Os períodos de chuva na região Sudeste do Brasil desempenham um papel crucial na manutenção dos recursos hídricos e no abastecimento de água para milhões de pessoas da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Nesse contexto, o Sistema Cantareira se destaca como um elemento fundamental para a gestão e o fornecimento de água na região, sendo responsável por suprir tanto o consumo doméstico quanto o uso comercial e industrial. Sabendo dos possíveis impactos que um período de estiagem pode desempenhar sobre a economia e abastecimento de uma população tão densa quanto a metropolitana, o objetivo deste trabalho foi estudar as condições atmosféricas e oceânicas de Pacífico e Atlântico que favoreceram a ocorrência da seca no Sudeste do Brasil no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro de 2021. Através de análise da circulação em baixa e alta troposfera, os resultados indicam que esta seca esteve associada com uma circulação atmosférica anômala, de tipo bloqueio, sobre a região leste do Oceano Pacífico, responsável por impedir o avanço de frentes frias e sistemas de chuva em direção a região Sudeste. Resultados preliminares indicam que esta circulação anômala esteve relacionada com as fases negativas de ENSO (La Niña) e Dipolo do Índico.

Palavras-chave: Condições atmosféricas. Sudeste do Brasil. Seca. Rossby. ENSO (La Niña). Atmospheric condition. Southern Brazil. Dry. Rossby. ENSO (La Niña).



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1:</b> Localização das regiões de estudo.	3
<b>Figura 2:</b> Média do volume total armazenado nos Sistemas Produtores que abastecem a RMSP em % para os anos de 2010, 2020 e 2021	6
<b>Figura 3:</b> (a) Anomalia da precipitação em JFM de 2020 (b) Anomalia da precipitação em JFM de 2021	6
<b>Figura 4:</b> Série temporal de anomalia da precipitação (mm/mês) e temperatura (°C) no Sistema Cantareira de 1980 a 2021.	7
<b>Figura 5 -</b> Série temporal de anomalia trimestral da TSM na região de Niño 3,4	8
<b>Figura 6 -</b> Anomalia de TSM de Niño 3.4 nos anos de 2020 e 2021	8
<b>Figura 7 –</b> Condições sobre o oceano Pacífico Equatorial do fenômeno ENOS em eventos de (a) El Niño, (b) normais e de (c) La Niña	9
<b>Figura 8 -</b> Anomalia de DOI nos anos de 1980 a 2021	9
<b>Figura 9 –</b> Componente principal das Funções Ortogonais Empíricas (FOE) para a variável Geopotencial 500 mba nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro	10
<b>Figura 10 -</b> Componente principal das Funções Ortogonais Empíricas (FOE) para a variável geopotencial 500 mba nas estações (a) Primavera SON , (b) Verão DJF, (c) Outono MAM e (d) Inverno JJA	11

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
RMSP: Região Metropolitana de São Paulo  
ANA: Agência Nacional das Águas  
ENOS: El Niño/Oscilação Sul  
AED: Análise Exploratória de Dados  
FOE: Funções Ortogonais Empíricas  
ERA5: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts  
GPCP: Global Precipitation Climatology Project  
NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration  
TSM: Temperatura de Superfície do Mar  
DOI: Dipolo de oscilação do índico



## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral	2
1.2 Objetivos específicos	2
2. DADOS E METODOLOGIA	2
2.1 Dados Utilizados	2
2.2 Metodologia de análise	4
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	5
3.1 Condições de precipitação nos anos de 2020 e 2021	5
3.2 Possíveis fatores que potencializaram a crise hídrica nos anos de 2020 e 2021	7
3.2.1 Análises do fenômeno El Niño/Oscilação Sul	7
3.2.2 Análises do fenômeno Dipolo de oscilação do índice	9
4. CONCLUSÕES	11
5. ETAPAS FUTURAS	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

## 1. INTRODUÇÃO

Considerada o principal centro financeiro e industrial do País, a região Sudeste (SE) do Brasil desempenha papel crucial no contexto nacional, principalmente no que está relacionado ao abastecimento hídrico de 44% da população brasileira. Porém, apesar da necessidade de um período de chuvas regular que é responsável por abastecer o principal reservatório da região, o Sistema Cantareira, os valores apresentados no primeiro trimestre de 2020 indicam uma seca severa que resultou na maior estiagem dos últimos 91 anos.

Como consequência, a região precisou estabelecer medidas preventivas de consumo de água, além da criação de políticas econômicas para tentar afetar o mínimo o abastecimento da população.

A evidência de altas temperaturas e falta de chuvas tem impactos diretos no fornecimento de água para Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), haja visto que em conjunto com as represas que o compõem, o Cantareira é o maior reservatório de água destinados para abastecimento de aproximadamente 46% das pessoas que moram na grande São Paulo, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA).

Sabendo que o clima do planeta Terra está fortemente condicionado a variabilidade natural da temperatura dos oceanos, a interação com a atmosfera é uma das principais dinâmicas que determinam a propagação de frentes frias e a criação de padrões climáticos. Nesse contexto, o estudo realizado visa analisar o comportamento de fenômenos que se manifestam de maneira cíclica em torno do continente sul americano, como El Niño/Oscilação Sul (ENOS) e Dipolo do Oceano Índico. Utilizam-se, para tal, técnicas estatísticas, como Análise Exploratória de Dados (AED), que permitiu a identificação de padrões e tendências nos dados climáticos coletados, além Funções Ortogonais Empíricas (FOE), utilizada para decompor a variabilidade climática em componentes significativos. Por meio dessa abordagem, busca-se não apenas descrever os eventos climáticos que contribuíram para a seca no Sudeste do Brasil, mas também entender os mecanismos subjacentes que os impulsionam. Essa compreensão é crucial

para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação, visando a minimização dos impactos socioeconômicos e ambientais causados por eventos climáticos extremos.

## **1.1 Objetivo Geral**

A investigação das condições atmosféricas e oceânicas que contribuíram para seca torna-se imperativa para a compreensão de padrões climáticos que podem desencadear eventos extremos semelhantes no futuro. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar as anomalias nas temperaturas da superfície do mar, ventos atmosféricos e padrões de pressão que desempenharam um papel determinante na configuração do cenário de seca que atuou durante o verão de 2020/2021 e que culminou na escassez de chuvas na região Sudeste. Utilizando ferramentas analíticas e técnicas de modelagem climática, será possível identificar não somente os determinantes climáticos desse evento, mas também entender as interações complexas entre esses fatores. Assim, será possível contribuir não somente para o conhecimento científico de adaptação em condições extremas, mas também fornecer informações relevantes para a tomada de decisões políticas e práticas, visando a resiliência e a sustentabilidade da região Sudeste diante de desafios climáticos.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Treinamento com a parte teórica e prática do uso de análise de FOE.
- Treinamento com a parte teórica e prática do análises de bloqueios atmosféricos.
- Identificar os casos de El Niño, La Niña e anos normais relacionados com a seca no Sudeste e aplicar a análise de FOE do vento em 200 hPa
- Identificar os casos de bloqueios relacionados com a seca no Sudeste através de índices de bloqueio usando dados de geopotencial em 500 hPa.
- Encontrar uma explicação física/dinâmica da ocorrência da seca no Sudeste durante o verão 2020/21.

## **2. DADOS E METODOLOGIA**

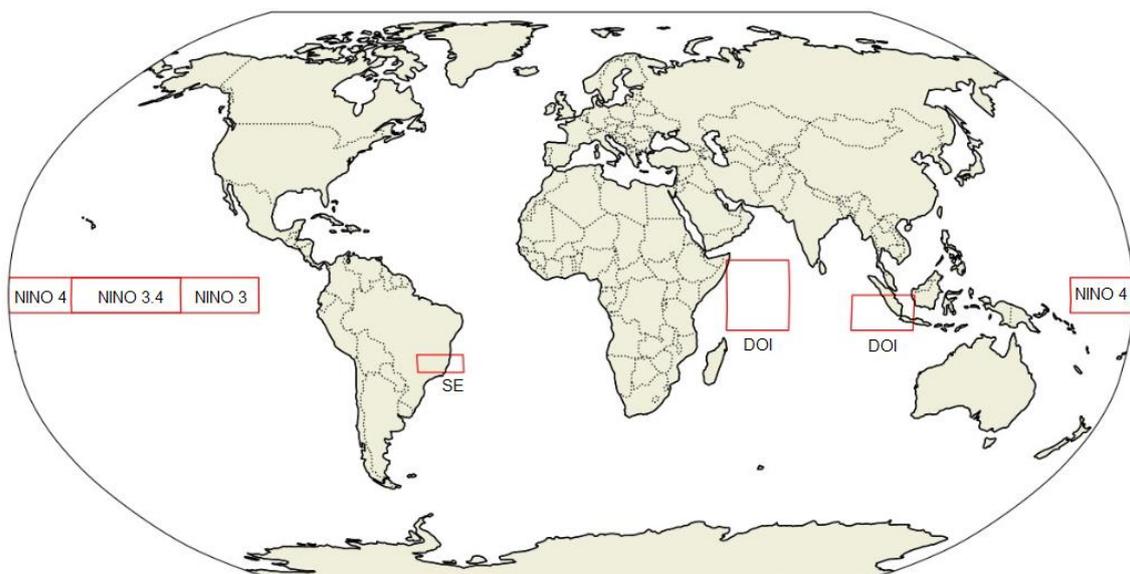
### **2.1 Dados utilizados**

O conjunto de dados atmosféricos e oceânicos provém da quinta geração de reanálises do clima (ERA5) desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) para o intervalo de 1940 a 2020. Além disso, foram utilizados também dados atmosféricos de *Global Precipitation Climatology Project*

(GPCP). A variável "Temperatura de Superfície do Mar" (° C) foi utilizada para identificar a presença de ENSO e não ENSO durante o período de seca no Sudeste sobre a área de El Niño 3,4 (5N-5S, 170W-120W). As regiões são chamadas de EN1+2, EN3, EN3.4 e EN4 (Fig. 1) e os índices (anomalias de TSM) obtidos nessas regiões recebem o mesmo nome delas. Dados de Dipolo do Oceano Índico são definidos pela anomalia de TSM entre as regiões oeste (50°L-70°L e 10°S-10°N) e leste (90°E-110°E e 10°S-0°N) do Oceano Índico. Em sua fase positiva, tem-se anomalia positivas de TSM na região oeste e negativas na região leste.

Dados de precipitação foram delimitados para estudo sobre o Sistema Cantareira (25S-19.5S,55W-40W) contando com a média de precipitação na região além da anomalia. Os anos de estudos referem-se a dezembro, janeiro e fevereiro de 1940-2022, período o qual se concentram o principal período de abastecimento da região Sudeste. Dados da população de São Paulo são fornecidos pelo Município de São Paulo. Já as informações sobre a situação de vazão e nível de abastecimento provém da Agência Nacional das Águas (ANA) e da SABESP. Valores necessários para classificação dos índices relacionados a ENOS foram disponibilizados pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). A figura abaixo evidencia as regiões de análise e localização referentes a cada índice em estudo.

Figura 1 – Localização das regiões de estudo



Fonte: De autoria própria

## **2.2 Metodologia de análise:**

Através do embasamento proporcionado por análises estatísticas na compreensão de complexos fenômenos que influenciam a ocorrência de seca na região sudeste do Brasil, é possível identificar diferentes relações entre cenários extremos e índices que se manifestam nos oceanos ao redor do continente.

Para entender essas conexões, primeiramente analisou-se o índice El Niño/Oscilação Sul (ENOS), caracterizado pelo aquecimento anômalo da TSM do Oceano Pacífico Equatorial. Com o objetivo de identificar sua relação com o período de seca no Sudeste, foram realizadas análises estatísticas das variáveis climáticas em diferentes fases do fenômeno, o que envolveu o cálculo das médias e anomalias e que possibilitou determinar as fases de ENOS e Dipolo do Índico ao longo dos últimos 80 anos.

Nesse contexto de estudo, utilizou-se também das Funções Ortogonais Empíricas (FOE) como método de correlação entre manifestações de fenômenos oceânicos atmosféricos e interferências nos deslocamentos de massas de ar, o que possibilitou a decomposição das séries temporais complexas em padrões ortogonais independentes, conhecidos como modos empíricos. Esses modos são obtidos por meio de uma análise de componentes principais aplicada à matriz de dados, em que cada variável é tratada como uma dimensão. O processo de análise seguiu os seguintes passos:

- Preparação dos Dados: As séries temporais das variáveis de interesse foram organizadas em uma matriz de dados, em que cada coluna representa uma variável e cada linha representa um período de tempo.

- Normalização: As séries temporais foram normalizadas para garantir que todas as variáveis tenham a mesma importância na análise.

- Decomposição: A matriz de dados foi decomposta em modos empíricos usando a análise de componentes principais

- Identificação de Padrões: Os modos empíricos obtidos foram interpretados para identificar padrões espaciais e temporais relevantes. No contexto deste estudo, buscou-se identificar padrões que estivessem associados à formação de bloqueios atmosféricos e à falta de deslocamentos de frentes frias.

- Análise de Correlações: Os modos empíricos foram correlacionados com índices de bloqueio atmosférico e outros parâmetros relevantes, a fim de identificar possíveis associações estatisticamente significativas.

Dessa forma, as FOE são utilizadas para compactar os conjuntos de dados e representa-los como combinações lineares que podem ser descritas como:

$$u_m = e_m^T x' = \sum_{k=1}^K e_{km} x'_k, m=1, \dots, M. \quad (1)$$

em que,  $u_m$  são as principais componentes,  $e_m$  são autovetores e  $x'$  são os desvios das combinações lineares.

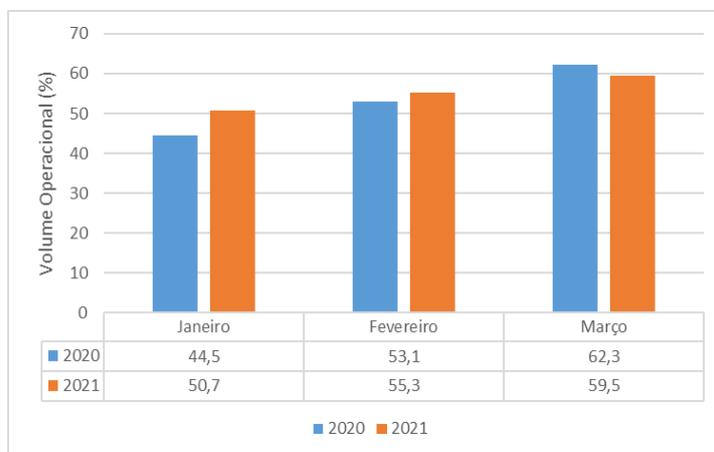
Em síntese, a metodologia adotada combinou análises estatísticas, visualizações gráficas e técnicas avançadas como as FOE para investigar as relações entre o ENOS, o Dipolo do Índico e as variáveis climáticas relevantes. Todo o conjunto de dados e imagens foram analisadas e geradas utilizando a linguagem de programação Python. Vale ressaltar que na presença de fenômenos oceânicos atmosféricos, este projeto adotou uma abordagem cautelosa, buscando lidar com as incertezas por meio de métodos estatísticos e análises exploratórias. Apesar das limitações inerentes à natureza complexa dos fenômenos climáticos, a análise criteriosa dos dados disponíveis nos proporcionou conhecimentos valiosos e contribuiu para uma compreensão mais profunda das condições que favoreceram a seca no Sudeste do Brasil.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **3.1 Condições de precipitação nos anos de 2020 e 2021**

Em meio às crises hídricas que afetaram a Região Metropolitana nos anos anteriores, as condições encontradas no início dos anos de 2020-2021 evidenciam baixos índices de precipitação na área que engloba o Sistema Cantareira. Apesar da temporada de chuva ocorrer nos meses entre outubro e abril, o que foi apresentado são valores negativos de anomalias relacionadas a precipitação e ao nível de vazão, além de volumes bem inferiores quando comparados a anos com índices positivos. Como consequência, devido à ausência de chuvas nesse período “ideal”, foram encontrados níveis operacionais ainda menores nos meses seguintes de 2020 e 2021, como mostra a figura 2.

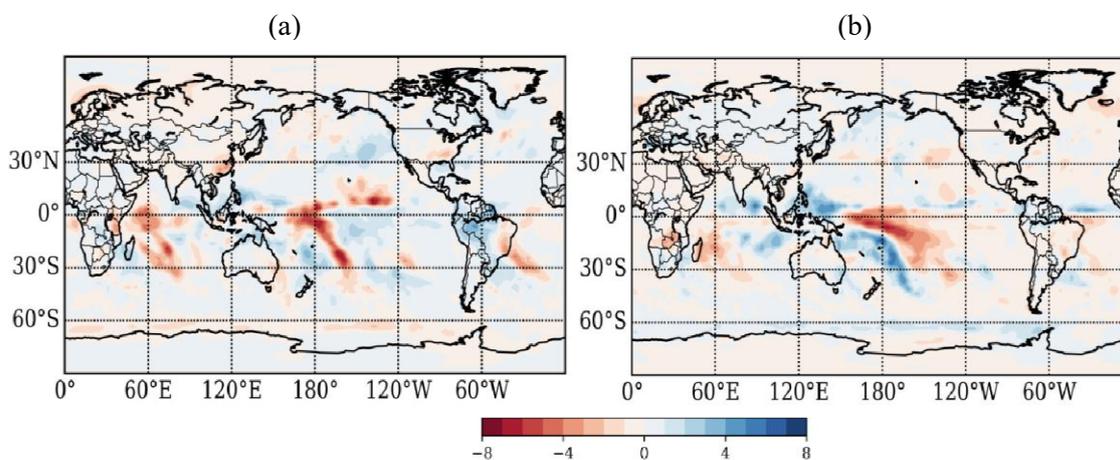
Figura 2 - Média do volume total armazenado nos Sistemas Produtores que abastecem a RMSP em % para os anos de 2010, 2020 e 2021



Fonte: De autoria própria

A partir das condições apresentadas, temos como principal causador a ausência de chuvas. A figura 3 (a) e (b) evidencia esse fato, mostrando a anomalia da precipitação para os anos de 2020 e 2021, respectivamente. Apesar de ser uma região caracterizada por verões quentes e chuvosos, o início de 2020 (DJF) foi marcado pela maior estiagem desde 2005. A partir das figuras, é possível identificar a magnitude das anomalias de precipitação que apresentam valores negativos na região central do Oceano Pacífico Equatorial e também na região Sudeste do Brasil.

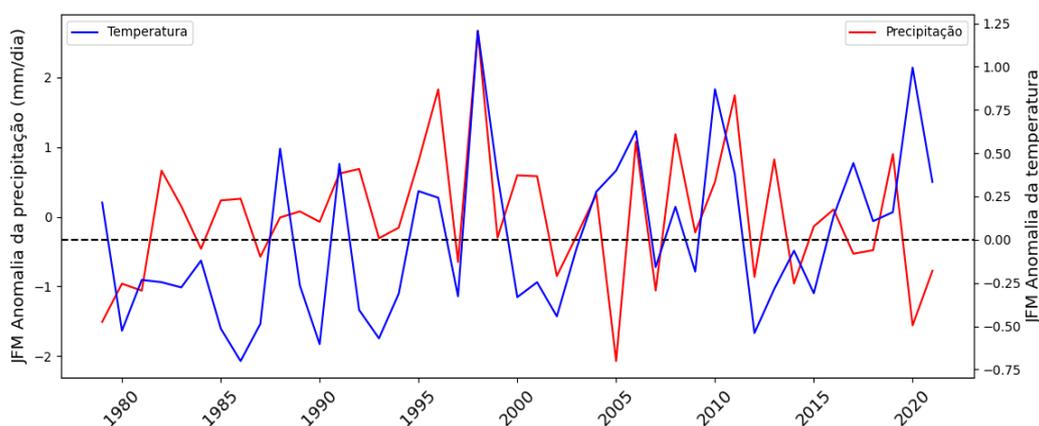
Figura 3 - (a) Anomalia da precipitação em JFM de 2020 (b) Anomalia da precipitação em JFM de 2021



Fonte: De autoria própria

Além disso, através do gráfico 4, é possível evidenciar altas temperaturas e falta de chuvas na região.

Figura 4 - Série temporal de anomalia da precipitação (mm/mês) e temperatura (°C) no Sistema Cantareira de 1980 a 2021.



Fonte: Autoria própria

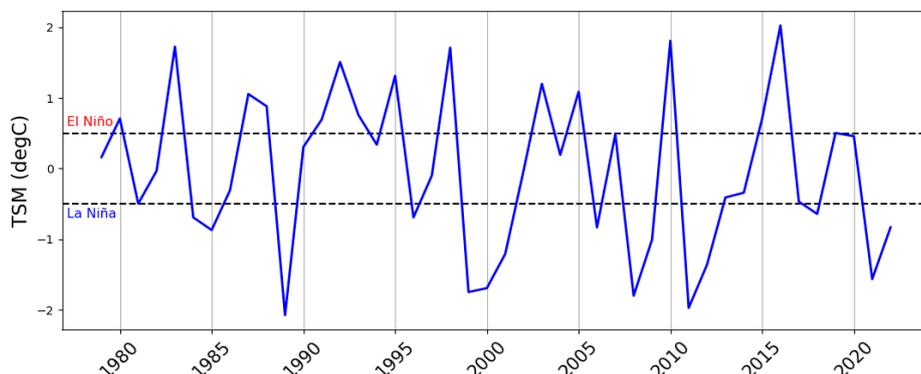
Portanto, a partir das análises realizadas acima, torna-se evidente um cenário de seca que se instalou durante dois anos na região Sudeste. Dessa forma, faz-se necessário identificar quais são os principais causadores desses fenômenos.

### 3.2 Possíveis fatores que potencializaram a crise hídrica nos anos de 2020 e 2021

#### 3.2.1 Análises do fenômeno El Niño/Oscilação Sul

As secas que acontecem em algumas regiões do Brasil em geral estão associadas a fenômenos oceano-atmosféricos, que são consequências das mudanças cíclicas de temperatura nos oceanos que cercam o continente. No caso da Região Sudeste, uma das variáveis causadoras dos períodos de estiagem são as diferentes Temperaturas de Superfície do Mar (TSM) que ocorrem no Oceano Pacífico Equatorial, onde acontece o fenômeno natural El Niño/Oscilação Sul (ENOS). A figura 04 apresenta a série temporal relacionada à ocorrência no intervalo de 40 anos em diferentes porções do Pacífico (Niño 3,4: 5N-5S, 170W-120W, Niño 3: 5N-5S, 150W-90W, Niño 4: 5N-5S, 160E-150W). Baseado nos resultados obtidos, podemos notar a frequência de oscilação do fenômeno ENOS.

Figura 5 - Série temporal de anomalia trimestral da TSM na região de Niño 3,4



Fonte: Autoria própria

Com uma análise referente aos anos de estudo, é possível identificar o fenômeno La Niña no intervalo do segundo semestre de 2020 até maio de 2021.

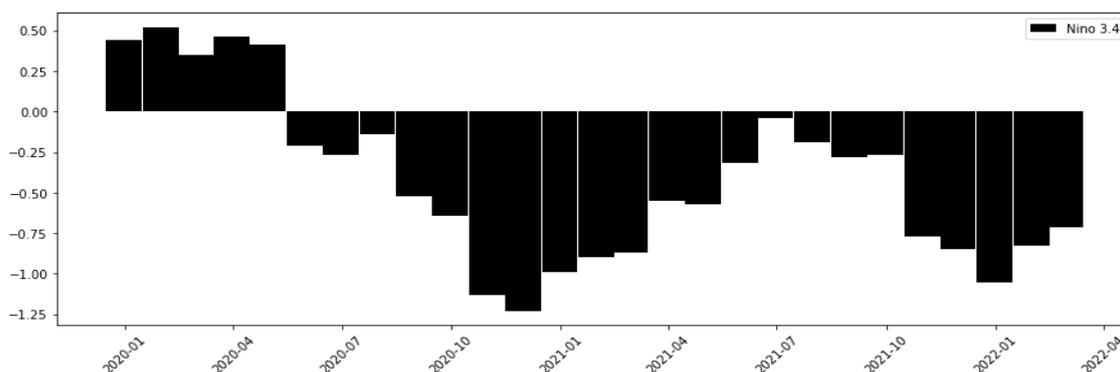
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2020	+							-	-	-	-	-
2021	-	-	-	-						-	-	-

Positivo (+): Índices de El Niño superior a 0.5 (Fase positiva)

Negativo (-): Índices de La Niña inferior a 0.5 (Fase negativa)

Neutro ( ): Condições comuns de TSM

Figura 6 - Anomalia de TSM de Niño 3.4 nos anos de 2020 e 2021

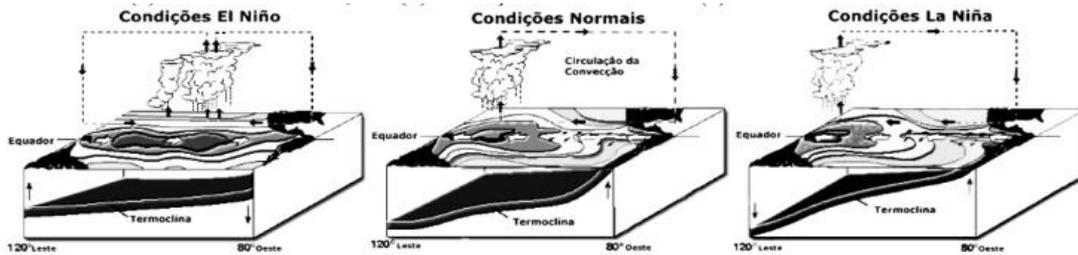


Fonte: De autoria própria

Como consequência, em relação às componentes oceânicas, tem-se o processo de resfriamento das águas do Oceano Pacífico Equatorial, intensificado pelo fenômeno de ressurgência que ocorre na costa Oeste do continente sul-americano. Além disso, devido à maior intensidade dos ventos alísios que ocorrem na direção Leste-Oeste, as águas

quentes do oceano (que estão na superfície por ter menor densidade) são “carregadas e acumuladas” na parte Nordeste do Oceano Índico. A figura 05 ilustra todo esse processo anômalo.

Figura 7 – Condições sobre o oceano Pacífico Equatorial do fenômeno ENOS em eventos de (a) El Niño, (b) normais e de (c) La Niña

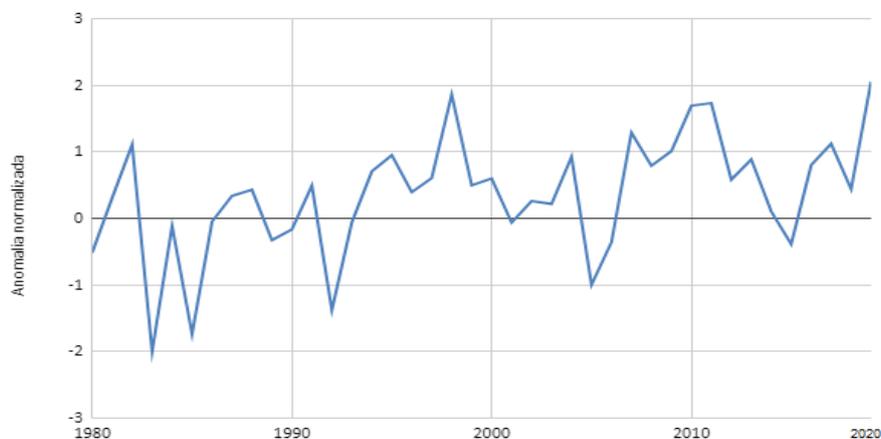


Fonte: Adaptada de Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL/NOAA)

### 3.2.2 Análises do fenômeno Dipolo de oscilação do Índico

No âmbito das análises de fenômenos atmosféricos que possuem teleconexão com os oceanos, é necessário identificar as variações interanuais das TSM no Oceano Índico. Para isso, foram exploradas as características e os padrões associados ao DOI e sua influência nas condições de seca no Sudeste do Brasil durante o verão de 2020/2021. A análise revelou como as variações na temperatura da superfície do mar, criadas pelo DOI, podem desencadear mudanças na circulação atmosférica, impactando o padrão de chuvas em regiões distantes. A figura 8 identifica as fases quentes e frias do DOI.

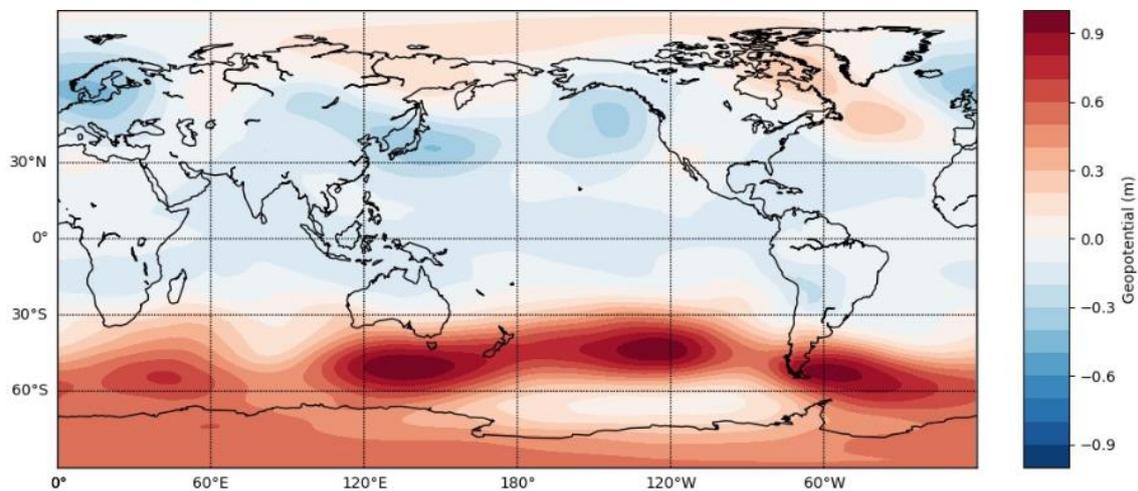
Figura 8 - Anomalia de DOI nos anos de 1980 a 2021



Fonte: De autoria própria

Segundo Chan et al., as fases positivas de DOI podem levar a um enfraquecimento do jato subtropical, uma corrente de ventos em altitude que influencia os sistemas climáticos na América do Sul. Esse enfraquecimento do jato subtropical está associado a uma diminuição na quantidade de chuvas na região Sudeste do Brasil, o que pode resultar em condições de seca. Além disso, há uma tendência de formação de bloqueios atmosféricos na região do Pacífico Equatorial no qual as zonas de alta pressão são responsáveis por interromper o fluxo normal de deslocamentos de sistemas frontais e frentes frias. As figuras 9, evidencia esse fenômeno.

Figura 9 – Componente principal das Funções Ortogonais Empíricas (FOE) para a variável geopotencial 500 mba nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro

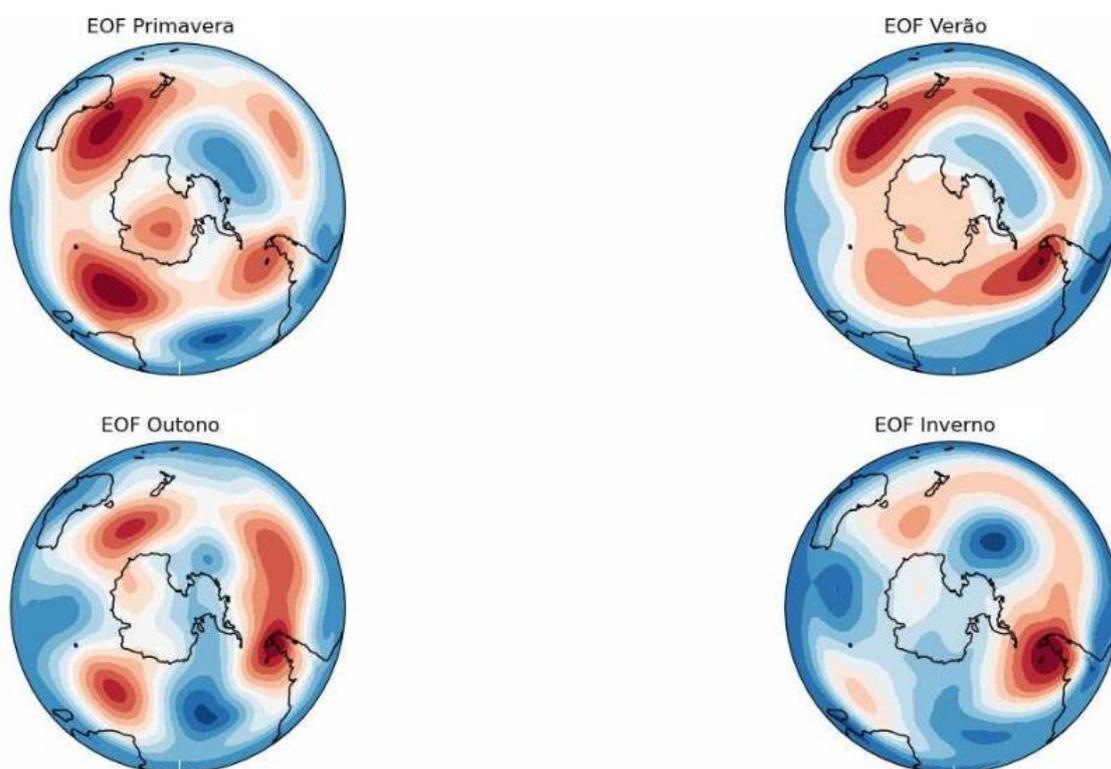


Fonte: De autoria própria

Através do cálculo de covariância possibilitado pela utilização das FOE, torna-se evidente os bloqueios atmosféricos em diferentes estações do ano através do cálculo de FOE, o que de forma direta impede o deslocamento normal de massas de ar. Nesse caso, assim como uma pedra que se estabelece na correnteza de um rio, temos uma barreira devido a diferença de pressão entre duas regiões. Dessa forma, as teleconexões entre oceano e atmosfera se manifestam como consequência da variação de TSM ao longo dos oceanos. V

Vale ressaltar que essas perturbações no ciclo ideal por permanecer por meses, anos, décadas e assim por diante.

Figura 10 - Componente principal das Funções Ortogonais Empíricas (FOE) para a variável geopotencial 500 mba nas estações (a) Primavera SON , (b) Verão DJF, (c) Outono MAM e (d) Inverno JJA



Fonte: De autoria própria

#### 4. CONCLUSÕES

Diante do exposto, a presente pesquisa realizou uma análise profunda das condições atmosféricas e oceânicas que favoreceram a ocorrência de secas na região Sudeste do Brasil durante o verão de 2020/2021. Com base na investigação dos fenômenos El Niño/Oscilação Sul (ENOS) e Dipolo do Índico, assim como das variáveis de temperatura, precipitação, TSM, vento e geopotencial, foi possível obter insights valiosos sobre os mecanismos subjacentes a essas secas. Os resultados apontaram para a influência significativa do ENOS nas condições de seca na região Sudeste. A fase negativa do ENOS, caracterizada pela presença do La Niña, demonstrou uma relação direta com a

formação de bloqueios atmosféricos no Pacífico Equatorial, o que impactou a distribuição das frentes frias e reduziu a quantidade de chuvas na região. Por outro lado, a fase positiva do Dipolo do Índico também se mostrou como um fator determinante, enfraquecendo o jato subtropical e contribuindo para as condições de seca. A análise estatística e as funções ortogonais empíricas trouxeram uma perspectiva mais clara das correlações entre os fenômenos climáticos e os padrões de seca na região. As visualizações gráficas, séries temporais e mapas revelaram tendências e padrões, reforçando a importância desses fenômenos na modulação do clima local.

Entretanto, é importante reconhecer as limitações impostas pela complexidade desses fenômenos e pelas incertezas inerentes à modelagem climática. A natureza intrincada das interações oceano-atmosfera e as variações naturais dificultam a previsão precisa das condições climáticas. Recomenda-se, portanto, a continuidade de estudos nessa área, com o aprimoramento das técnicas estatísticas e a incorporação de modelos de simulação mais sofisticados. Em síntese, o estudo proporcionou uma compreensão mais profunda das condições que levaram à seca no Sudeste do Brasil durante o verão de 2020/2021, ressaltando a importância dos fenômenos ENOS e Dipolo do Índico. As conclusões obtidas contribuem para o conhecimento científico e têm implicações práticas na gestão de recursos hídricos e na tomada de decisões relacionadas à mitigação dos impactos das secas nessa região estratégica.

#### **4. ETAPAS FUTURAS**

Almejando novos resultados, é possível traçar os seguintes tópicos para enriquecer a pesquisa:

- Expansão do Período de Análise: Ampliar o período de análise para incluir mais anos e temporadas de verão, permitindo uma avaliação mais abrangente das variações climáticas e suas relações com as secas na região Sudeste.
- Análise de Outras Variáveis Climáticas: Investigar outras variáveis climáticas relevantes, como umidade do solo, evapotranspiração e índices de vegetação, para compreender melhor os mecanismos subjacentes das secas e suas interações complexas.
- Modelagem de Tendências Futuras: Utilizar modelos climáticos para projetar tendências futuras das condições atmosféricas e oceânicas na região Sudeste,

considerando diferentes cenários de mudanças climáticas e suas possíveis influências nas secas.

- Avaliação de Impactos Setoriais: Realizar análises mais detalhadas dos impactos das secas em setores específicos, como agricultura, abastecimento de água, energia e saúde pública, considerando diferentes cenários climáticos e contribuindo para estratégias de adaptação mais eficazes.

### **Referências bibliográficas**

- [1] Nobre, C.A., Marengo, J.A., Seluchi, M.E., Cuartas, L.A. and Alves, L.M. (2016) Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, 8, 252-262
- [2] Rodrigues, R. et al., 2019. Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic. *Nat. Geosci.*, 12, 620–626
- [3] Adlet, R.F., et al. 2003. The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *J. Hydrometeor.*, 4,1147-1167.
- [4] Souza, C., & Reboita, M. S. (2021). Ferramenta para o Monitoramento dos Padrões de Teleconexão na América do Sul. *Terræ Didática*, 17(Publ. Contínua), 1-13, e021009. doi: 10.20396/td.v17i0.8663474
- [5] Chan, S. C., S. K. Behera, and T. Yamagata (2008), Indian Ocean Dipole influence on South American rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L14S12, doi:10.1029/2008GL034204
- [6] : S Koesuma et al 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1918 022030, Analyzing of the Indian Ocean Dipole (IOD) phenomena in relation to climate change in Indonesia: a review
- [7] Ding, Y. H.; Chan, J. C. L. The East Asian summer monsoon: an overview. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 89, n. 1-4, p. 117-142, July 2005.