



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO DO ESTADO NO MARANHÃO EM ANOS DE OCORRÊNCIA DO NIÑO DO ATLÂNTICO

Thalita Mirian Santos Furtado

Orientador: Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad

Co-Orientadora: Dr.(a) Claudia Klose Parise

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO 2024

**VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO DO ESTADO NO MARANHÃO EM
ANOS DE OCORRÊNCIA DO NIÑO DO ATLÂNTICO**

THALITA MIRIAN SANTOS FURTADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientador: Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad

Co-orientadora: Dra. Claudia Klose Parise

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO 2024

VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO DO ESTADO NO MARANHÃO EM
ANOS DE OCORRÊNCIA DO NIÑO DO ATLÂNTICO

THALITA MIRIAN SANTOS FURTADO


DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

Banca Examinadora:




Prof. Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad (PPGM/UFRJ) - Orientador


Profª. Dra. Claudia Klose Parise (UFMA) - Coorientadora

Documento assinado digitalmente
 CLAUDIA KLOSE PARISE
Data: 27/02/2024 16:43:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Profª. Dra. Fernanda Cerqueira Vasconcellos (PPGM/UFRJ)

Documento assinado digitalmente
 FERNANDA CERQUEIRA VASCONCELLOS
Data: 27/02/2024 17:38:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dra. Livia Maria Barbosa Sancho (UFRJ)

Documento assinado digitalmente
 LIVIA MARIA BARBOSA SANCHO ALVARES MEND
Data: 27/02/2024 19:27:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Camila Bertoletti Carpenedo (UFPR)

Documento assinado digitalmente
 CAMILA BERTOLETTI CARPENEDO
Data: 27/02/2024 19:58:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO 2024

CIP - Catalogação na Publicação

F992v Furtado, Thalita Mirian Santos
VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO DO ESTADO NO
MARANHÃO EM ANOS DE OCORRÊNCIA DO NIÑO DO ATLÂNTICO
/ Thalita Mirian Santos Furtado. -- Rio de Janeiro,
2024.
75 f.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Paulo de Freitas
Assad.
Coorientadora: Profa. Dra. Claudia Klose Parise.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Meteorologia, 2024.

1. Niño do Atlântico. 2. Maranhão. 3.
Precipitação. I. Assad, Prof. Dr. Luiz Paulo de
Freitas, orient. II. Parise, Profa. Dra. Claudia
Klose, coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço do fundo do meu coração a Deus e à minha mãe, que foram os pilares inabaláveis da minha jornada acadêmica e pessoal. O apoio incansável e o amor incondicional de minha mãe iluminaram o caminho, enquanto a graça divina guiou cada passo desta trajetória. Sem a orientação, as bênçãos e o carinho de ambos, esta dissertação não teria sido possível.

Quero expressar minha profunda gratidão aos meus estimados orientadores, o Professor Luiz Paulo Assad e a Professora Claudia Klose Parise, pela paciência, sabedoria e todos os valiosos ensinamentos que compartilharam comigo ao longo dessa jornada desafiadora. Suas orientações foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Agradeço também ao meu querido namorado, Júlio César, por seu apoio incondicional e pela força que me deu nos momentos mais desafiadores. Sua presença ao meu lado foi um apoio inestimável.

Além disso, sou grata a todas as pessoas que, de diversas maneiras, contribuíram para a conquista deste título. Suas palavras de encorajamento, apoio e colaboração foram essenciais para tornar este sonho uma realidade.

Que este seja o início de uma jornada repleta de realizações e aprendizados, e que eu possa retribuir de alguma forma todo o apoio e carinho que recebi ao longo deste caminho.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - (a) Domínio espacial das regiões do Oceano Atlântico Tropical Norte (ATN) ($5,5^{\circ}\text{N}$ – $23,5^{\circ}\text{N}$; $57,5^{\circ}\text{W}$ – 15°W), Atlântico Tropical Sul (ATS) (0° – 20°S ; 30°W – 10°E) e ATL3 (3°N – 3°S ; 20°W – 0°E); (b) Localização do estado do Maranhão (em verde) e das estações meteorológicas do INMET utilizadas neste estudo. 20
- Figura 2** - (a) Série temporal das anomalias de TSM ($^{\circ}\text{C}$) na região do ATL3, evidenciando os eventos positivos (vermelho) e negativos (azul), bem como os limiares (linhas tracejadas) para eventos positivos ($> +0,5$) e negativos ($< -0,5^{\circ}\text{C}$), (b) espectro de potência de ondeletas do índice ATL3 e cone de influência (linha preta tracejada), (c) espectro de potência global do ATL3 e nível de confiança de 95% (linha vermelha tracejada) e (d) média por escalas das potências ou variâncias de ondeleta e nível de confiança de 95% (linha vermelha tracejada). 23
- Figura 3** - Evolução temporal do índice do ATL3, nos anos de ocorrência de Niño do Atlântico entre 1980 e 2020, classificados em (a) término precoce positivo, (b) término precoce negativo, (c) persistente positivo, (d) persistente negativo, (e) início tardio positivo, (f) início tardio negativo, (g) transicional positivo e (h) transicional negativo. As linhas pretas tracejadas representam os limiares de anomalias de TSM (ATSM) para os eventos positivos ($> +0,5^{\circ}\text{C}$) e negativos ($< -0,5^{\circ}\text{C}$). 25
- Figura 4** - Evolução espacial das anomalias trimestrais de TSM ($^{\circ}\text{C}$) e de vento a 10m (m s^{-1}) no Atlântico tropical nos eventos de início tardio (a-d) positivos e (e-h) negativos..... 27
- Figura 5**- Evolução espacial das anomalias trimestrais de TSM ($^{\circ}\text{C}$) e de vento a 10m (m s^{-1}) no Atlântico tropical nos eventos de término precoce (a-d) positivos e (e-h) negativos..... 28
- Figura 6** - Evolução espacial das anomalias trimestrais de TSM ($^{\circ}\text{C}$) e de vento a 10m (m s^{-1}) no Atlântico tropical nos eventos persistentes (a-d) positivos e (e-h) negativos. 29
- Figura 7** - Evolução das ATSMs ($^{\circ}\text{C}$) e ventos superficiais (m/s) no AT para os eventos de fase negativa do Niño do Atlântico que ocorreu em 1991 (a — d) e do MMA que ocorreu em 1992 (e — h). Domínio espacial das regiões do ATN ($5,5^{\circ}\text{N}$ – $23,5^{\circ}\text{N}$; $57,5^{\circ}\text{W}$ – 15°W), ATS (0° – 20°S ; 30°W – 10°E) e ATL3 (3°N – 3°S ; 20°W – 0°E)..... 31
- Figura 8** - Compostos médios de anomalias trimestrais de precipitação (mm) no estado do Maranhão em eventos positivos (primeira coluna) e negativo (segunda coluna) nos

anos de ocorrência do Niño do Atlântico do tipo: **(a-b) início tardio**, **(c-d) término precoce** e **(e-f) persistente**. As linhas em cinza indicam valores estatisticamente significativos ao nível de 95%..... 34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Anos de ocorrências de eventos de Niño do Atlântico entre janeiro de 1980 e dezembro de 2020, classificados quanto à fase (negativa ou positiva), à categoria (término precoce, persistente, início tardio e transicional) e à duração (em trimestres de cada evento).....	22
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
AT	Oceano Atlântico Tropical
ATN	Oceano Atlântico Tropical Norte
ATS	Oceano Atlântico Tropical Sul
ATSM	Anomalia de Temperatura da Superfície do Mar
BDMET	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENOS	El Niño - Oscilação Sul
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MMA	Modo Meridional do Atlântico
NEB	Nordeste Brasileiro
NNEB	Norte do Nordeste Brasileiro
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical do Atlântico

SUMÁRIO

I. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
II. CAPÍTULO	16
1. INTRODUÇÃO	16
2. DADOS E MÉTODOS	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
4. CONCLUSÕES	34
AGRADECIMENTOS.....	35
MATERIAL SUPLEMENTAR	36
REFERÊNCIAS	39
III. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
ANEXO	46

I. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esse documento de dissertação foi elaborado na forma de Artigo Científico, o qual será submetido a revista ATMÓSFERA (Qualis Capes B2), em abril de 2024. O artigo a ser submetido em língua inglesa encontra-se no ANEXO I.

O artigo apresenta uma análise importante sobre a variabilidade climática das anomalias de precipitação no estado do Maranhão sob a influência do Niño do Atlântico (NA). O estudo se estende por um período de 41 anos, permitindo uma visão abrangente das tendências e padrões climáticos ao longo do tempo. Um dos resultados notáveis é a heterogeneidade da precipitação em anos de ocorrência do NA. Também é relevante apontar a tendência de redução na ocorrência de eventos do NA observada a partir dos anos 2000, possivelmente associada a mudanças na retroalimentação de Bjerknes e à fase da Oscilação Multidecadal do Atlântico. Isso ressalta a importância de se compreender as causas e os mecanismos subjacentes às variações climáticas, visando a antecipação e adaptação aos impactos econômicos e sociais desses fenômenos. Em suma, o estudo oferece uma visão abrangente da influência do NA nas anomalias de precipitação no Maranhão ao longo de quatro décadas, destacando a complexidade desses padrões e a necessidade de considerar a interação entre diferentes modos de variabilidade climática para compreender seu impacto sobre o estado. Isso é fundamental para o planejamento e a gestão dos setores econômicos e sociais afetados pela variabilidade climática na região.

Somada a essas **I. Considerações Iniciais**, este documento segue com o **II. Capítulo 1**, constando, na íntegra, o artigo científico a ser submetido, seguido das **III. Considerações Finais**.

II. CAPÍTULO

1. INTRODUÇÃO

À medida que o planeta enfrenta mudanças climáticas cada vez mais evidentes, compreender os fatores que impulsionam as variações climáticas em nível regional torna-se importante para a tomada de decisões. Nesse contexto, o Oceano Atlântico desempenha um papel crucial, sendo afetado diretamente pelas mudanças climáticas globais, como o aumento da temperatura da superfície do mar (TSM) e alterações nos padrões de circulação atmosférica e oceânica (Campos, 2014).

As mudanças no Oceano Atlântico têm impactos significativos na variabilidade da precipitação no estado do Maranhão, localizado na Região Nordeste do Brasil (Soares et al., 2023). Compreender esta relação é importante para garantir um planejamento eficiente dos diferentes usos dos recursos hídricos, tais como o abastecimento público, a geração de energia, a irrigação e dessedentação animal, dentre outras atividades socioeconômicas sensíveis ao clima no estado.

A variabilidade da TSM e dos ventos no Atlântico tropical tem uma relação direta com a regulação dos padrões de temperatura do ar e precipitação em diversas regiões do planeta (Lübbecke e Mcphaden, 2013). Nos últimos anos, estas relações têm sido amplamente investigadas para o estabelecimento de medidas de adaptação aos possíveis impactos na região nordeste do Brasil (NEB; Lübbecke e Mcphaden, 2013; Foltz et al., 2019; Utida et al., 2019; Mao et al., 2022).

A variabilidade climática do Atlântico tropical envolve diferentes processos de interação oceano-atmosfera, oscilações climáticas, gradientes inter-hemisféricos de TSM e padrões anômalos de vento (Chiang e Gianni, 2002; Okumura e Xie, 2004; Xie e Carton, 2004). Diversos estudos têm sido conduzidos para entender os processos climáticos que influenciam essa variabilidade, em diferentes escalas espaciais e temporais (Kushnir et al., 2006; Marengo et al. 2017). Entre eles, destacam-se os modos de variabilidade interanual Niño do Atlântico (Hastenrath e Heller 1977) e do Modo Meridional do Atlântico (MMA; Moura e Shukla, 1981; Servain e Seva, 1987; Chang et al., 2006; Hastenrath, 2006).

O Modo Meridional do Atlântico (MMA) é reconhecido como um agente fundamental na regulação do clima no NEB, sendo amplamente considerado o principal

modo de variabilidade de longo prazo para as flutuações climáticas interanuais no Atlântico Tropical (AT). Sua formação implica em variações nas TSM, padrões de vento em baixos níveis e pressão atmosférica ao nível do mar tanto no ATN quanto no ATS, em escalas temporais que variam desde sazonal até decadal.

O Niño do Atlântico é um modo acoplado oceano-atmosfera responsável por controlar a variabilidade interanual do Atlântico tropical. Esse modo está associado a mudanças na circulação atmosférica (Merle et al., 1980; Servain et al., 1982; Hirst e Hastenrath, 1983; Philander, 1984; Lübbecke et al., 2018; Wang, 2019) e no aumento da frequência de inundações em países próximos ao Golfo da Guiné, na África Ocidental, e no nordeste da América do Sul, durante a fase positiva (Folland et al., 2001; Giannini et al., 2002; Okumura e Xie, 2004; Losada et al., 2010; Lübbecke et al., 2018; Foltz et al., 2019). O desenvolvimento do Niño do Atlântico normalmente inicia-se no outono austral (MAM), em resposta ao enfraquecimento anômalo dos ventos alísios sobre o Atlântico Equatorial (Zebiak, 1993; Ruiz-Barradas et al., 2000a; Richter et al., 2013, 2014; Lübbecke et al., 2018), com seu máximo ocorrendo no inverno austral (JJA) (Zebiak, 1993; Lübbecke et al., 2018). Durante a fase positiva do Niño do Atlântico, são estabelecidas anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul, conforme observado por Torralba et al. (2015). Essas anomalias enfraquecem o gradiente térmico inter-hemisférico no Atlântico tropical, resultando no deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para o sul, o que acaba trazendo chuvas para o NEB.

Alguns estudos têm destacado a relação entre o Niño do Atlântico e a precipitação no NEB (*e.g.*, Hounsou-Gbo et al., 2019; Vallès-Casanova et al., 2020). Vallès-Casanova et al. (2020) investigaram os diferentes tipos de Niño do Atlântico e notaram que durante eventos de fase positiva há um aumento significativo da precipitação no nordeste da América do Sul. Hounsou-Gbo et al. (2019) demonstraram que a fase positiva (negativa) do Niño do Atlântico está associada ao aumento (redução) das chuvas no norte do NEB, especialmente nos municípios de Recife - PE e Fortaleza - CE, com o pico ocorrendo com uma defasagem de 2 a 4 meses em relação ao índice do Niño do Atlântico.

Estudos como os de Nascimento (2017) e Soares et al. (2023) destacam a influência das condições do Atlântico tropical sobre o regime de chuvas no Maranhão.

Em particular, Soares et al. (2023) examinaram os impactos da teleconexão Pacífico-Atlântico no regime de precipitação do estado, entre 1980 e 2015, e observaram uma clara influência das anomalias de TSM do Atlântico Equatorial Ocidental sobre a precipitação no Maranhão, principalmente na região norte. Tais estudos tornam evidente que as condições do Atlântico tropical desempenham um papel crucial na variabilidade da precipitação no Maranhão. Além disso, as regiões norte e sul do Maranhão possuem um papel fundamental na economia do estado, abrangendo atividades como agricultura, mineração, pecuária e turismo (Petti et al., 2001).

Dentro deste contexto, o objetivo deste estudo é investigar a relação entre a precipitação no estado do Maranhão e a TSM no Atlântico tropical, identificando sinais espectrais não-estacionários da TSM.

Na Seção 2, apresentamos os conjuntos de dados utilizados, o que inclui as observações in situ e a reanálise climática global. Adicionalmente, explicamos a metodologia utilizada para caracterizar e identificar os eventos de Niño do Atlântico e do MMA, e a correlação entre as anomalias de precipitação no Maranhão e as anomalias de TSM na região do Atlântico tropical. Nessa seção, também abordamos a identificação de padrões espectrais não-estacionários do Niño do Atlântico. Os principais resultados são discutidos na Seção 3, e finalmente, as conclusões do estudo são apresentados na Seção 4.

2. DADOS E MÉTODOS

O estado do Maranhão, que é o foco deste estudo, localiza-se na região do NEB. Com uma população de mais de 7 milhões de habitantes, o estado abriga parte da área do bioma cerrado do país, integrando a região Matopiba, que também engloba áreas dos estados do Tocantins, Piauí e Bahia (Bolfé et al., 2016). Essa região é reconhecida por adotar uma agricultura moderna e orientada para a exportação, destacando-se a produção de soja e milho como seus principais cultivos (Loayza et al., 2023). Os totais pluviométricos no estado apresentam variações significativas, variando de 700 mm/ano (no interior) a 2.000 mm/ano (no litoral) (NuGeo UEMA, 2016). A distribuição espacial da chuva é heterogênea devido, em parte, às características geográficas que permitem que o estado receba influências do complexo amazônico ao norte e noroeste, onde o clima apresenta características equatoriais, sendo quente e úmido (Nascimento et al., 2017). Enquanto isso, outra parte do estado está inserida na região semiárida do

Nordeste, conferindo-lhe características distintas e peculiares. (Nascimento et al., 2017). A precipitação no Maranhão apresenta uma acentuada variabilidade semianual, com uma estação chuvosa ocorrendo de dezembro a maio, com destaque para os meses de fevereiro a maio, que são os meses mais chuvosos, e uma estação seca de junho a novembro (Nascimento et al., 2017; Silva et al., 2017). Essa variabilidade é significativamente afetada pelas condições climáticas do Atlântico tropical (Soares et al. 2023).

A área de estudo compreende a região do Atlântico tropical (Fig. 1a) e o estado do Maranhão (Fig. 1b). Os retângulos tracejados representam as regiões do Atlântico Tropical Norte (ATN: 5,5°N-23,5°N; 57,5°W-15°W) e Atlântico Tropical Sul (ATS: 0°-20°S; 30°W-10°E), onde foram estimados os anos de ocorrência do MMA (Moura e Shukla, 1981); enquanto o retângulo contínuo representa a região do ATL3 (3°N-3°S e 20°W-0°), onde foram estimados os anos de ocorrência do Niño do Atlântico.

As saídas mensais de TSM e vento a 10m foram obtidas das reanálises climáticas do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) *reanálises v5* (ERA5; Hersbach et al., 2020), com resolução horizontal de 0,25° (~28 km) e compreendendo o período de janeiro de 1980 a dezembro de 2020 (41 anos).

Este estudo utilizou os acumulados mensais de precipitação para o mesmo período (1980-2020) de 23 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Dessas 23 estações, 12 estão localizados nos limites territoriais do Maranhão e os demais nos estados vizinhos, Pará e Piauí (Fig. 1b), visando melhorias durante a interpolação dos dados de precipitação.

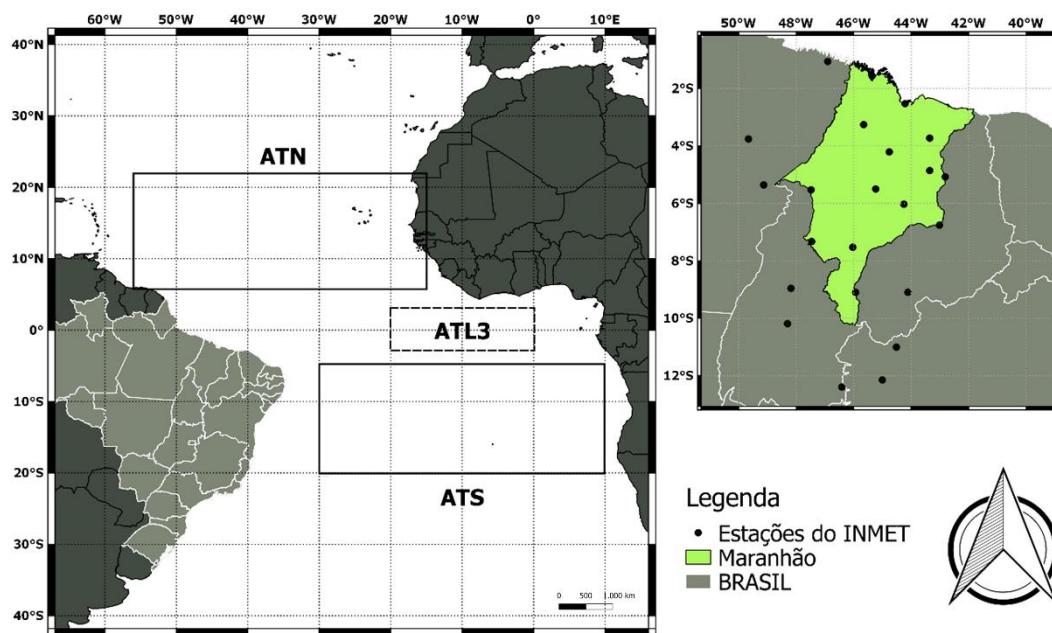


Figura 1 - (a) Domínio espacial das regiões do Oceano Atlântico Tropical Norte (ATN) ($5,5^{\circ}\text{N}$ – $23,5^{\circ}\text{N}$; $57,5^{\circ}\text{W}$ – 15°W), Atlântico Tropical Sul (ATS) (0° – 20°S ; 30°W – 10°E) e ATL3 (3°N – 3°S ; 20°W – 0°E); (b) Localização do estado do Maranhão (em verde) e das estações meteorológicas do INMET utilizadas neste estudo.

2.1 Tratamento dos dados de precipitação

A partir da identificação visual de falhas nas séries temporais dos dados de precipitação in situ, desenvolvemos um algoritmo capaz de identificar as falhas e criar os vetores de tempo (anos e meses) dos dados faltantes. A interpolação espacial dos dados para o domínio do estado do Maranhão foi realizada através do método estatístico *Biharmonic spline* (Sandwell, 1987), o qual apresentou os menores erros de precipitação. Após a espacialização dos dados, calculamos as anomalias trimestrais de precipitação com médias móveis de um mês (*e.g.*, DJF, JFM, FMA, etc.) a partir da média climatológica de 1980-2020 para cada trimestre.

2.2 Índices dos modos de variabilidade do Atlântico

Com o objetivo de avaliar os anos de ocorrência do Niño do Atlântico, foram calculadas as anomalias trimestrais de TSM na região do ATL3 (Fig. 1a) a partir das médias trimestrais com janela móvel de um mês (*e.g.*, DJF, JFM, FMA, etc.). Os anos de ocorrência do Niño do Atlântico foram definidos de acordo com a metodologia

proposta por Vallès-Casanova et al. (2020), baseada na normalização pelo desvio padrão e na persistência das anomalias trimestrais de TSM iguais ou maiores (menores) a $+0,5^{\circ}\text{C}$ ($-0,5^{\circ}\text{C}$), por pelo menos três trimestres consecutivos. As anomalias de TSM acima de $+0,5^{\circ}\text{C}$ caracterizaram a fase positiva do ATL3 e as anomalias iguais ou abaixo de $-0,5^{\circ}\text{C}$, a fase negativa. Os eventos positivos e negativos do Niño do Atlântico foram classificados conforme o padrão de evolução temporal das anomalias de TSM na região do ATL3 ao longo dos trimestres, em que definimos 4 categorias, conforme proposto por Vallès-Casanova et al. (2020): *i*) início tardio (eventos com duração de 4 trimestres consecutivos – de ASO a NDJ); *ii*) término precoce (eventos com duração de 4 trimestres consecutivos – de FMA a MJJ); *iii*) eventos persistente (eventos com duração acima de 4 trimestres consecutivos); e *iv*) transicionais (eventos que, em um mesmo ano, ocorreu um evento de término precoce e um evento de início tardio).

Já os anos de ocorrência do MMA foram identificados com base no seu índice (IMMA; Eq. 1), que consiste na diferença das médias de anomalias mensais de TSM (ATSM) entre as regiões do ATN e ATS, normalizadas pelo desvio padrão (Fig. 1a). Posteriormente foram identificados os anos de ocorrência do MMA, com foco entre os meses de fevereiro e maio (FMAM), quando se estabelece a estação chuvosa do NEB. Os anos em que o índice do MMA ficou entre -0.5 e $+0.5$ foram eliminados, tendo em vista que representam a fase neutra deste modo. Os anos de ocorrência do MMA podem ser consultados no material suplementar (Tabela SI).

$$IMMA = ATSM_{ATN} - ATSM_{ATS} \quad (\text{Eq. 1})$$

2.3 Análises estatísticas

A partir das anomalias trimestrais de precipitação no Maranhão e das anomalias trimestrais de TSM na região do ATL3, foram calculados os compostos dos anos e trimestres que caracterizaram a ocorrência dos diferentes tipos do Niño do Atlântico para as fases negativa e positiva. Os compostos de precipitação foram construídos para os eventos de início tardio, término precoce e persistente, apenas.

Por fim, utilizamos a Transformada de Ondeletas complexa de Morlet (Torrence e Compo, 1998), visando identificar e analisar a variabilidade interanual e decadal, e

detectar os períodos mais significativos de ocorrência de Niño do Atlântico entre 1980 e 2020. A análise de ondeleta de Morlet (Eq. 2) foi utilizada com base no algoritmo escrito por Torrence e Compo (1998), em que $\psi_0(\eta)$ é a frequência, η é o tempo não dimensional e ω_0 é a frequência adimensional.

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (\text{Eq. 2})$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através do índice ATL3, identificamos a ocorrência de 20 eventos do Niño do Atlântico no período de janeiro de 1980 a dezembro de 2020. Desse total, 9 eventos foram classificados como de fase negativa e 11 como de fase positiva (Tab. I e Fig. 2a).

Tabela 1 - Anos de ocorrências de eventos de Niño do Atlântico entre janeiro de 1980 e dezembro de 2020, classificados quanto à fase (negativa ou positiva), à categoria (término precoce, persistente, início tardio e transicional) e à duração (em trimestres de cada evento).

Eventos de Niño do Atlântico				
Fase negativa		Fase positiva		
1982, 1983, 1986, 1991*, 1992, 1996*, 1997*, 2005, 2014		1981, 1984, 1987, 1988, 1991*, 1995, 1996*, 1997*, 1998, 1999, 2019		
Categoria	Fase Negativa	Duração (meses)	Fase Positiva	Duração (meses)
Término Precoce	2005	3	1995	3
Persistente	1984 e 1988	6-7	1992	9
Início Tardio	1981 e 2019	3-4	1986 e 2014	3
Transicional	1991 e 1996	3-4	1997	6-9

*Anos de Niño do Atlântico com características de eventos transicionais.

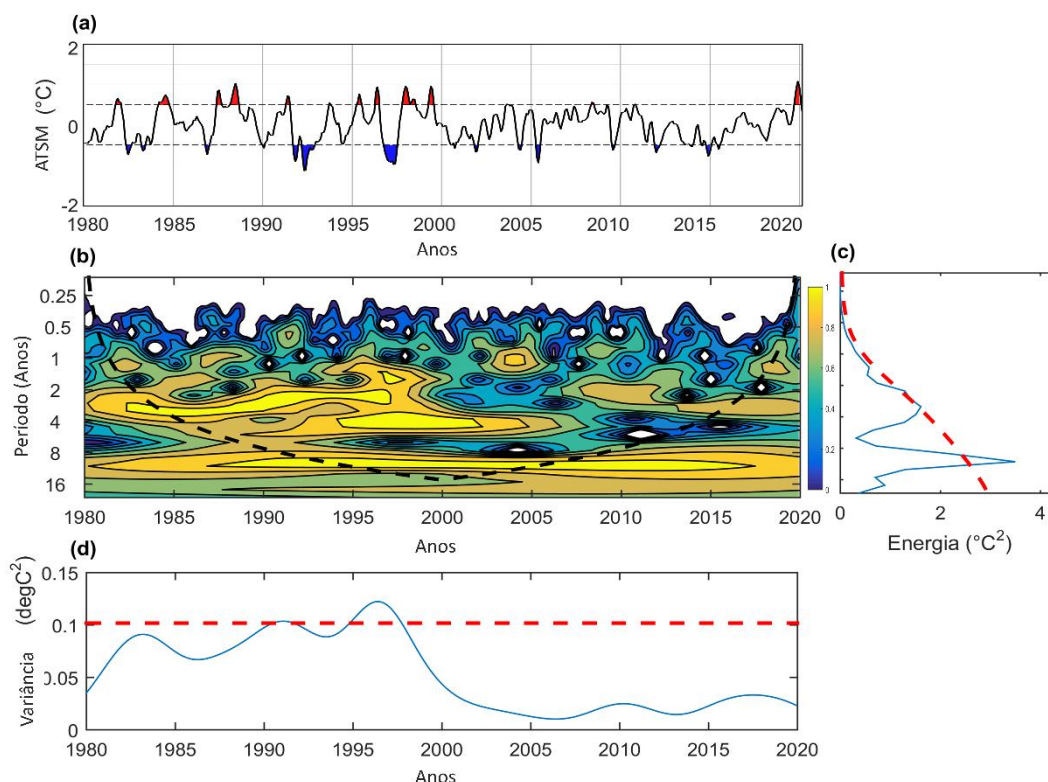


Figura 2 - (a) Série temporal das anomalias de TSM ($^{\circ}\text{C}$) na região do ATL3, evidenciando os eventos positivos (vermelho) e negativos (azul), bem como os limiares (linhas tracejadas) para eventos positivos ($> +0,5$) e negativos ($< -0,5^{\circ}\text{C}$), (b) espectro de potência de ondeletas do índice ATL3 e cone de influência (linha preta tracejada), (c) espectro de potência global do ATL3 e nível de confiança de 95% (linha vermelha tracejada) e (d) média por escalas das potências ou variâncias de ondeleta e nível de confiança de 95% (linha vermelha tracejada).

Os eventos de Niño do Atlântico possuem uma periodicidade entre 2-8 anos, com os contornos espectrais mais intensos em torno de 4-8 anos (Fig. 2b-c). Ademais, observou-se que as maiores variância de ondeleta foram registradas em um conjunto específico de anos: 1992, 1996, 1997, 1998 e 1999 (Fig. 2d). O pico observado na escala de 2-8 anos pode estar associado ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Estudos realizados por Chiang et al. (2000) e Munnich e Neelin (2005) demonstraram que a convecção atmosférica anômala provocada pelo ENOS no Pacífico Equatorial oriental influencia a variabilidade interanual dos ventos alísios durante a primavera boreal no Atlântico Equatorial e, por consequência, desencadeia um evento de Niño do Atlântico. Tokinaga et al. (2019) sugeriram que eventos sucessivos do ENOS podem iniciar eventos de Niño do Atlântico através de teleconexão atmosférica. O ano de 1997, quando ocorreu um forte evento de El Niño (NOAA, 2021), também foi um ano de evento transicional negativo do Niño do Atlântico.

Desde os anos 2000, há uma diminuição significativa nos eventos de Niño do Atlântico (Fig. 2a). Essa queda pode ser atribuída ao enfraquecimento do mecanismo de

retroalimentação de Bjerknes (Prigent et al., 2020). Esse mecanismo consiste em anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical oriental, reduzindo os gradientes de temperatura entre o setor oeste (comumente mais quente) e leste (geralmente mais frio) da bacia. Esse desequilíbrio térmico enfraquece os ventos zonais de leste (os alísios), gerando uma oscilação de longo período, conhecida como onda de Kelvin equatorial (Dippe et al., 2019). A onda de Kelvin equatorial propaga para leste ao longo do equador, afetando a estrutura vertical do oceano e aprofundando a termoclina no leste da bacia, onde há maior conteúdo de calor estocado nas camadas superficiais do oceano (Deppenmeier, 2022). Alterações em qualquer um dos três componentes desse mecanismo (anomalias positivas de TSM no leste, ventos alísios mais fracos ou termoclina mais profunda no leste) podem impactar o desenvolvimento do Niño do Atlântico.

Além do enfraquecimento do feedback de Bjerknes, a diminuição da variabilidade decadal da TSM no Atlântico Equatorial leste a partir dos anos 2000 também pode estar associada com a fase positiva da Oscilação Multidecadal do Atlântico (Martín-Rey et al., 2018). Embora se tenha presumido que o período de 2000 a 2020 não apresentaria eventos tão expressivos do Niño do Atlântico, como o período de 1980 a 1999, o evento positivo ocorrido em 2019 foi o evento mais intenso de Niño do Atlântico observado na série estudada, conforme evidenciado pela Figura 2a. Um estudo realizado recentemente (Richter et al., 2022) mostrou o desenvolvimento de um evento intenso positivo do Niño do Atlântico, no trimestre de JJA de 2021, que se estendeu até o final do ano.

O padrão de evolução temporal dos 20 eventos de Niño do Atlântico varia em relação ao início, pico e decaimento. Tal fato pode ser observado nas séries temporais do índice ATL3 (Fig. 3) para os eventos de Niño do Atlântico (*cf.* Tab.I).

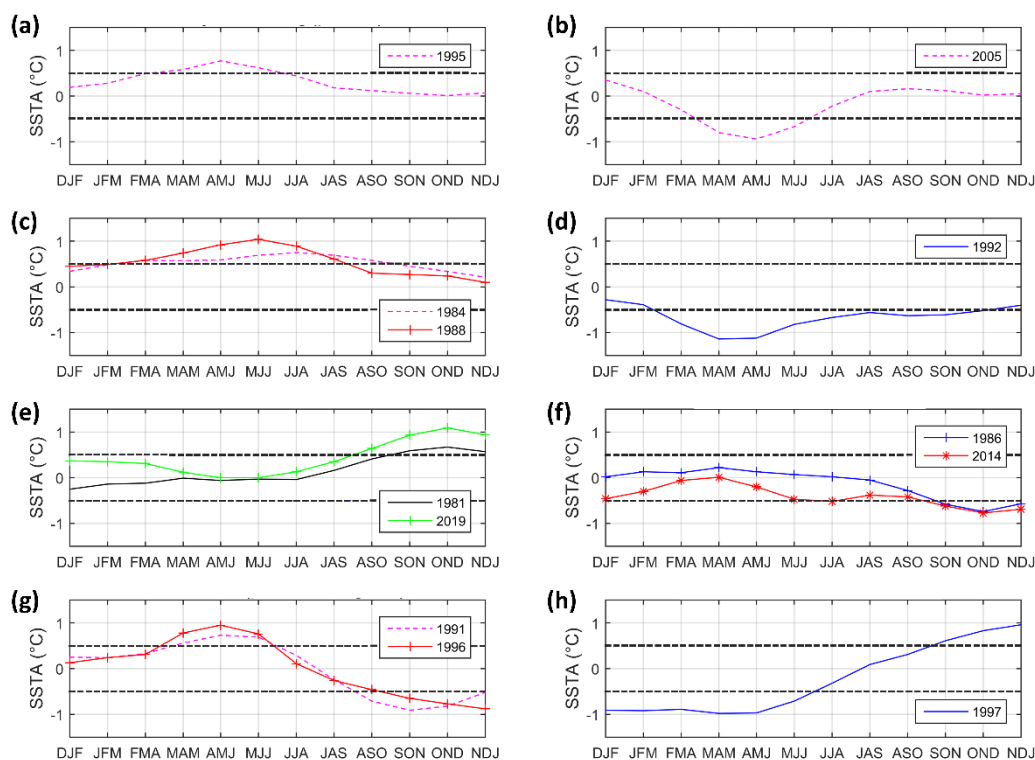


Figura 3 - Evolução temporal do índice do ATL3, nos anos de ocorrência de Niño do Atlântico entre 1980 e 2020, classificados em (a) término precoce positivo, (b) término precoce negativo, (c) persistente positivo, (d) persistente negativo, (e) início tardio positivo, (f) início tardio negativo, (g) transicional positivo e (h) transicional negativo. As linhas pretas tracejadas representam os limiares de anomalias de TSM (ATSM) para os eventos positivos (> +0,5°C) e negativos (< -0,5°C).

Os eventos de início tardio seguiram o padrão do desenvolvimento dos eventos do NA já encontrados por outros estudos, esses eventos foram precedidos pelo relaxamento dos eventos alísios equatoriais (Fig. 4). Alguns trabalhos sugerem que esse tipo de evento pode ser desencadeado por processos internos (Keenlyside e Latif, 2007) e externo (Zhang e Han, 2021) ao Oceano Atlântico Equatorial. Por exemplo, Okumura e Xie (2006) pode ser desencadeado por um enfraquecimento secundário e sazonal dos ventos alísios no Golfo de Guiné. Zhang e Han (2021) relatam que a intensidade do Dipolo do Oceano Índico pode afetar os eventos de início tardio, inclusive o forte evento de fase positiva e de início tardio ocorrido em 2019 (Fig. 2a), coincidiu com o forte evento de fase positiva do Dipolo do Oceano Índico de 2019, que foi considerado um dos eventos mais fortes desde 1979 (Zhang *et al.*, 2021).

Para o evento de fase negativa e de término precoce em 2005, observamos que este esteve associado a intensas anomalias positivas de TSM no ATN e ventos anômalos de leste na região equatorial do Atlântico, podendo ser caracterizado, conforme Richter

et al. (2013), como um evento "não-canônico" (Fig. 5e-h). Eventos negativos do Niño do Atlântico do tipo "não-canônico" estão associados a anomalias positivas intensas no ATN e/ou à fase positiva do MMA (Ruiz-Barradas et al., 2000b; Chiang e Vimont, 2004). Nesse caso, esses eventos podem ser explicados pelo feedback vento-*evaporação-TSM*. Segundo Foltz e McPhaden (2010b) e Vallès-Casanova et al. (2020), eventos positivos e de término precoce do Niño do Atlântico podem ser desencadeados por um evento de fase negativa do MMA no outono austral. Por exemplo, os eventos de término precoce positivo (1995) e negativo (2005) foram precedidos por eventos negativos e positivos do MMA, respectivamente, no outono austral (não apresentado). Para eventos persistentes (Fig. 6), foram observadas anomalias de ventos de leste na região equatorial, principalmente nas fases negativas do Niño do Atlântico, nos trimestres MAM a MJJ, que estavam associadas a pronunciadas anomalias negativas de *TSM* no ATS.

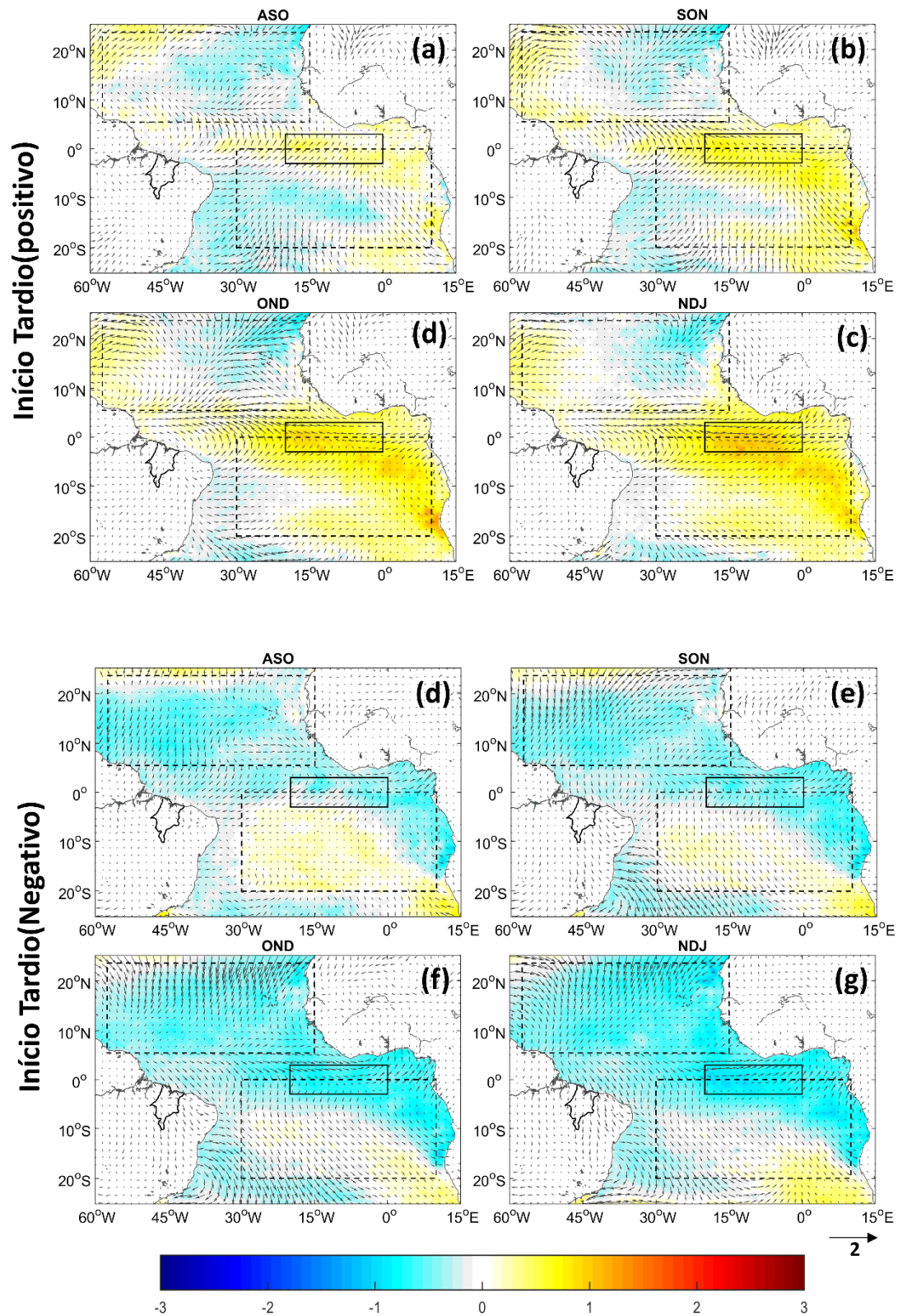


Figura 4 - Evolução espacial das anomalias trimestrais de TSM (°C) e de vento a 10m (m s⁻¹) no Atlântico tropical nos eventos de início tardio (a-d) positivos e (e-h) negativos.

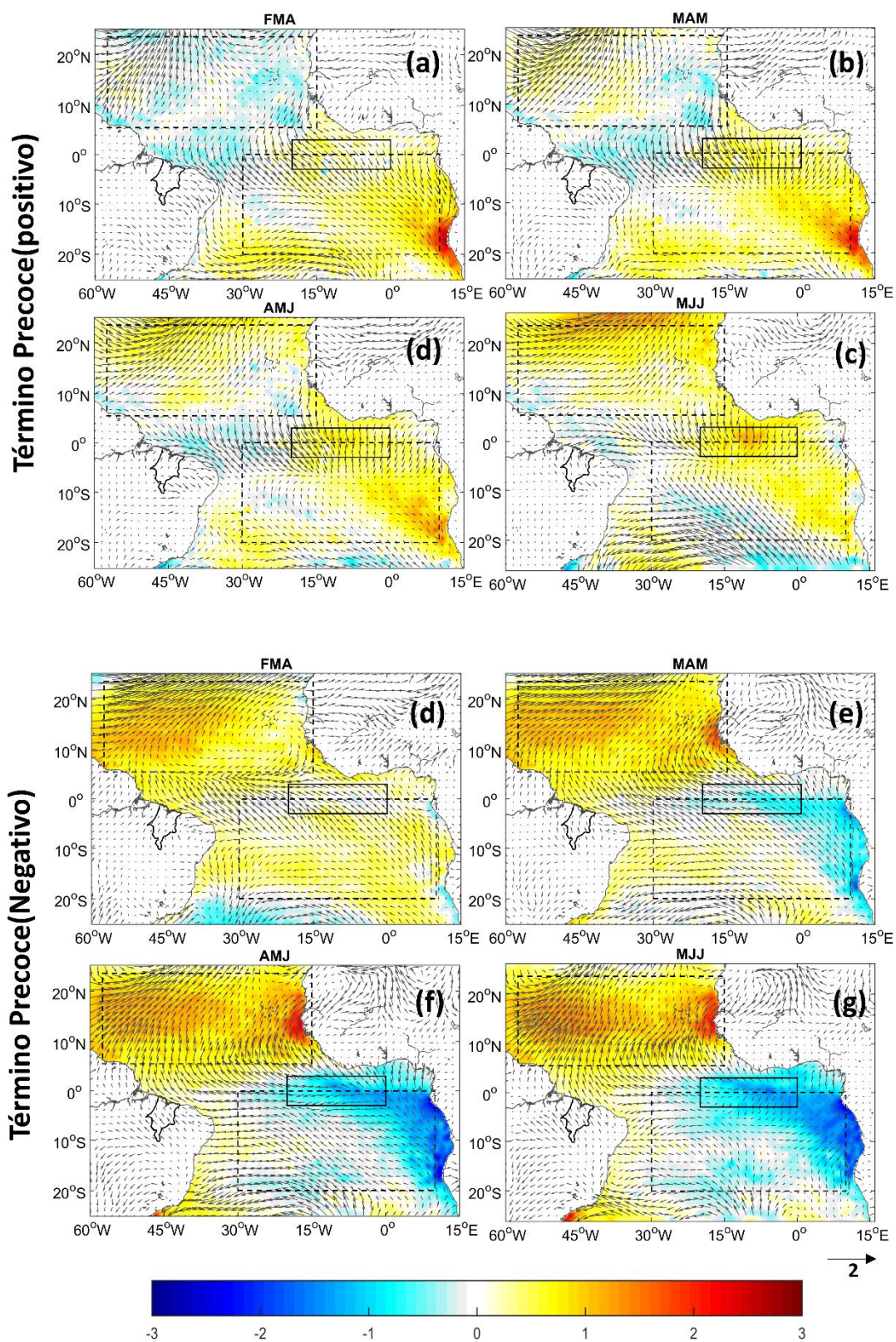


Figura 5- Evolução espacial das anomalias trimestrais de TSM (°C) e de vento a 10m (m s⁻¹) no Atlântico tropical nos eventos de término precoce **(a-d)** positivos e **(e-h)** negativos.

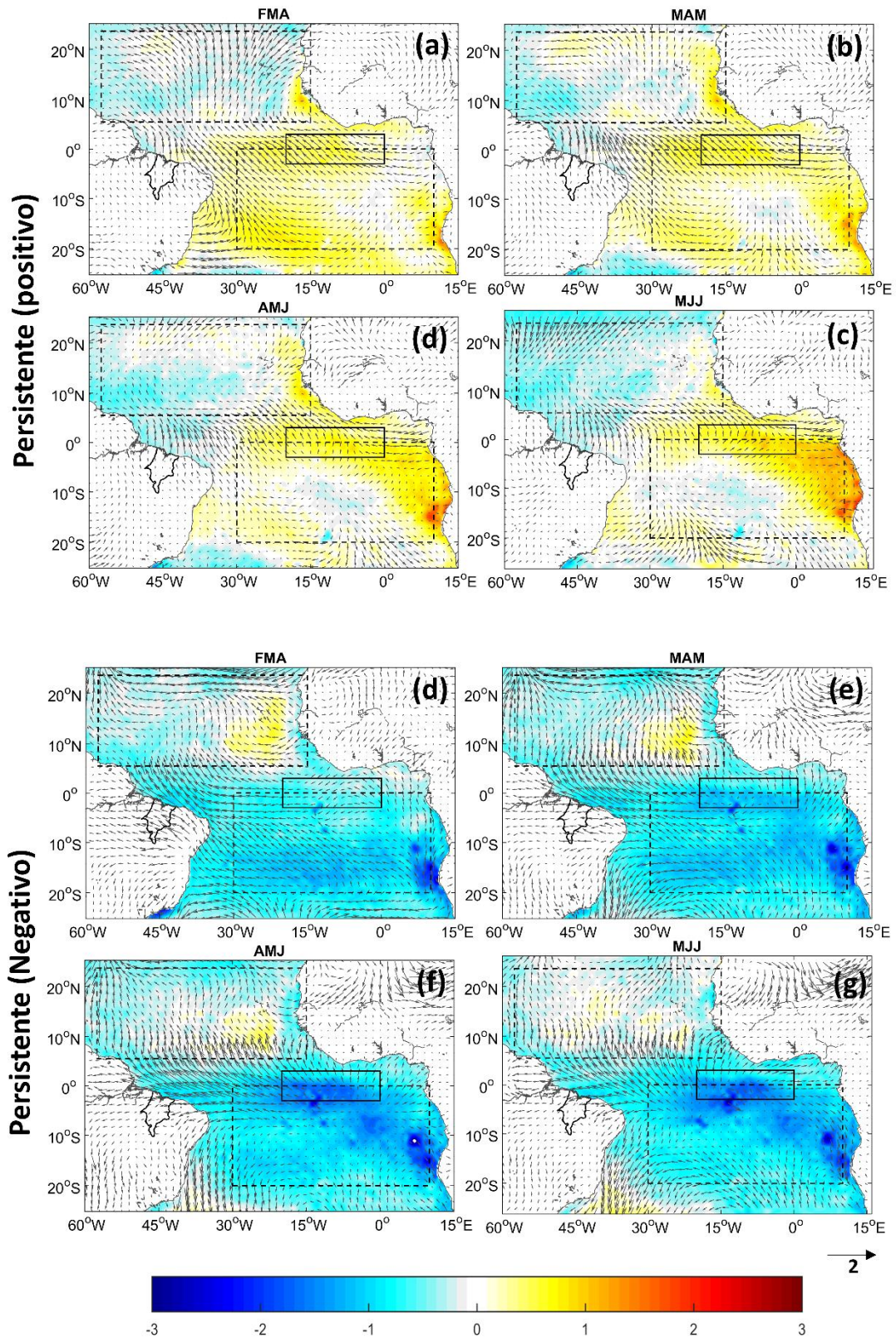


Figura 6 - Evolução espacial das anomalias trimestrais de TSM (°C) e de vento a 10m (m s⁻¹) no Atlântico tropical nos eventos persistentes (a-d) positivos e (e-h) negativos.

O evento positivo do MMA em 1992 (Fig. 7 e-h), foi precedido por um evento negativo e persistente do Niño do Atlântico em 1991 (Fig. 7 a-d). Também observamos que eventos de início tardio, como o ocorrido em 2014, podem desencadear eventos do MMA de mesmo sinal no ano seguinte (Fig. S1). Esse mesmo padrão foi observado nos eventos de início tardio do Niño do Atlântico em 1986, que iniciou um evento de mesmo sinal no MMA em 1987 (Fig. S2). Isso sugere que a fase e intensidade dos eventos do MMA podem influenciar a evolução temporal dos eventos do Niño do Atlântico. Essa relação entre os modos Niño do Atlântico e MMA tem sido amplamente investigada em estudos anteriores (Plaut e Vautard, 1994; Moron et al., 1998; Huang et al., 1998; Foltz e McPhaden, 2010b; Martín-Rey et al., 2019). A literatura sugere que os modos Niño do Atlântico e MMA estão conectados através do deslocamento meridional da ZCIT (Servain et al., 1999; Murtugudde et al., 2001; Andreoli e Kayano, 2003). Foltz e McPhaden (2010b) destacam que a relação entre o Niño do Atlântico e o MMA ocorre por meio de anomalias nos ventos equatoriais em superfície e suas relações com o gradiente meridional e zonal da TSM.

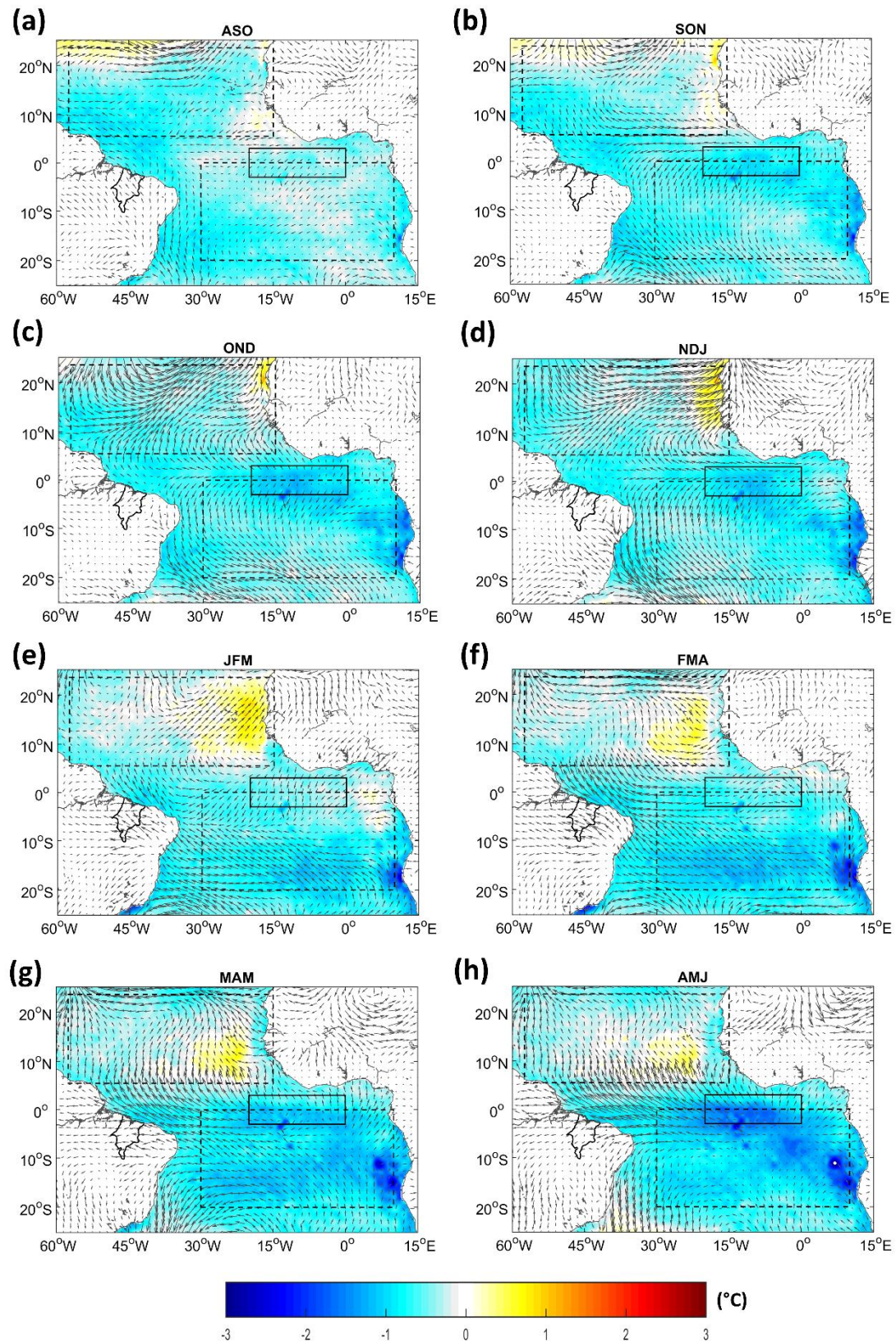


Figura 7 - Evolução das ATSMs (°C) e ventos superficiais (m/s) no AT para os eventos de fase negativa do Niño do Atlântico que ocorreu em 1991 (a — d) e do MMA que ocorreu em 1992 (e — h). Domínio espacial das regiões do ATN (5,5°N–23,5°N; 57,5°W–15°W), ATS (0°–20°S; 30°W–10°E) e ATL3 (3°N–3°S; 20°W–0°E).

Também observamos que nos eventos transicionais (não apresentados), caracterizados pela ocorrência de dois eventos de fases opostas no mesmo ano, o pico secundário (que ocorre de SON a OND) pode ser desencadeado pelo escoamento oceânico associado à Corrente Sul Equatorial (Okumura e Xie, 2006). Essa corrente flui para oeste, em parte em resposta à intensificação dos ventos de leste, juntamente com uma termoclina mais rasa e um processo de ressurgência equatorial intensificado a leste da bacia (Okumura e Xie, 2006). Ademais, Lübbecke et al. (2014) sugeriram que uma atividade mais intensa da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) em fevereiro pode antecipar a formação da língua fria do Atlântico Equatorial, ou seja, a fase negativa do Niño do Atlântico. Por outro lado, uma ASAS menos intensa atrasaria o desenvolvimento dessa língua fria, acarretando um evento positivo do Niño do Atlântico (Lübbecke et al., 2014). Essa atividade da ASAS pode estar sendo influenciada por eventos de El Niño. Rodrigues et al. (2011) mostra que eventos de El Niño fortes e prolongados (fracos e curtos), associados a uma fonte de aquecimento no Pacífico Leste (Central), desencadeiam o segundo (terceiro) modo do Pacífico-América do Sul em SON, que, conseqüentemente, leva a um fortalecimento (enfraquecimento) da ASAS. Além disso, os eventos do Niño do Atlântico também podem ser desencadeados por advecção oceânica para leste através da propagação da onda de Kelvin equatorial, na ausência de anomalias de ventos de oeste no outono austral (MAM; Richter e Tokinaga, 2021).

Quanto às anomalias de precipitação nas diferentes categorias de Niño do Atlântico (Fig. 8), observamos que durante a fase negativa do evento de término precoce, o estado do Maranhão apresentou precipitação expressiva acima da média histórica para as regiões noroeste e sul, com anomalias acima de +100 mm (Fig. 8d). Comumente, a fase negativa do Niño do Atlântico está associada à diminuição significativa das chuvas na região nordeste (Hounsou-Gbo et al., 2019), como também foi observado no Maranhão nos eventos negativos de início tardio e persistente (Fig. 8b e 8f). O aumento da precipitação na fase negativa do evento de término precoce nas regiões noroeste e sul do estado, mesmo durante um evento positivo do MMA, pode ter resultado da intensificação do fluxo de umidade transportada do oceano para o continente pelos ventos equatoriais (Fig. S3) ou por influência da La Niña ocorrida em 2005 (NOAA, 2021). Durante os eventos persistentes positivos, observamos expressivas anomalias positivas de precipitação na região oeste do estado (Fig. 8e). De forma

contrária, durante a fase negativa do evento persistente, observamos expressivas anomalias negativas de precipitação praticamente em quase todo o estado com destaque para região oeste (Fig. 8f)

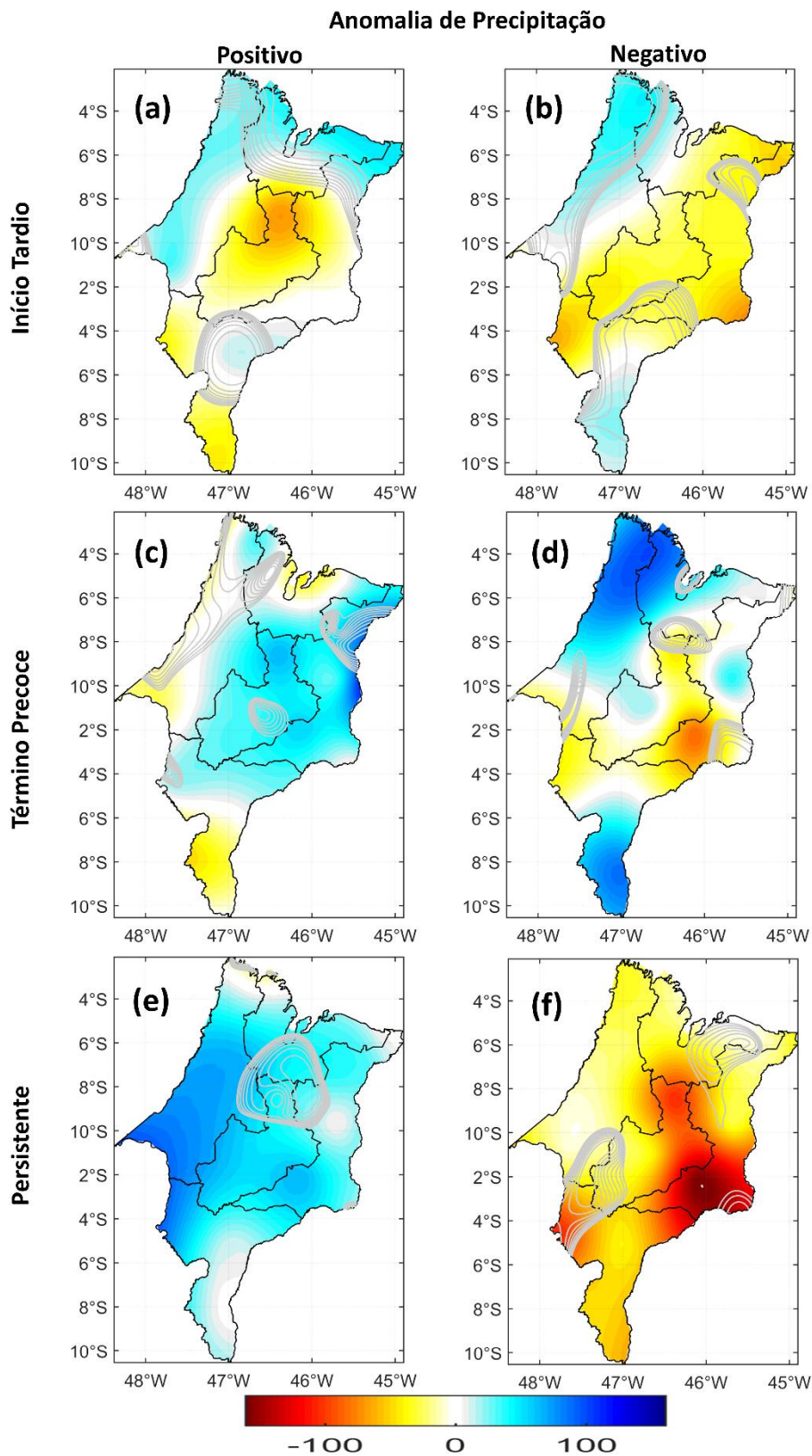


Figura 8 - Compostos médios de anomalias trimestrais de precipitação (mm) no estado do Maranhão em eventos positivos (primeira coluna) e negativo (segunda coluna) nos anos de ocorrência do Niño do Atlântico do tipo: **(a-b) início tardio**, **(c-d) término precoce** e **(e-f) persistente**. As linhas em cinza indicam valores estatisticamente significativos ao nível de 95%.

4. CONCLUSÕES

Nesse estudo foi investigado o impacto da TSM do Atlântico tropical sobre as anomalias de precipitação no estado do Maranhão. Analisando o índice ATL3, entre 1980 e 2020, foram identificados 20 eventos do Niño do Atlântico, com escala dominante de 2 a 8 anos. Houve uma diminuição significativa dos eventos a partir dos anos 2000, provavelmente devido ao enfraquecimento do feedback de Bjerknes e à influência da Oscilação Multidecadal do Atlântico. No entanto, alguns eventos positivos do Niño do Atlântico que se apresentaram fora desse padrão, como os de 2019 e 2021, indicaram a influência da fase negativa da Oscilação Multidecadal do Atlântico sobre a potencial reativação do Niño do Atlântico após 19 anos inativos (Richter et al., 2022).

O evento negativo de término precoce, caracterizado por anomalias positivas de TSM no ATN e anomalias positivas de ventos de leste, foi considerado um evento "não-canônico". Além disso, observamos uma relação entre o Niño do Atlântico e o MMA, indicando que a intensidade do MMA influencia a evolução temporal dos eventos de Niño do Atlântico e vice-versa. A interseção desses modos acaba por influenciar elementos cruciais como a TSM e os ventos inter-hemisféricos. Esses fatores, por sua vez, impactam diretamente os padrões de precipitação no Maranhão. Destaca-se que, durante a fase negativa do evento de término precoce do Niño do Atlântico, uma tendência de precipitação atípica foi observada no estado. Nessa fase, houve um aumento notável nos níveis de precipitação, especialmente na região noroeste. Isso contrapõe o padrão geralmente associado à fase negativa do Niño do Atlântico e fase positiva do MMA, que tipicamente estão correlacionados com reduções nas chuvas na região. Uma explicação plausível para esse aumento inesperado na precipitação durante a fase negativa do evento de término precoce pode estar relacionada à intensificação do fluxo de umidade transportado do oceano para o continente pelos ventos equatoriais. Além disso, a possível influência do fenômeno La Niña ocorrido em 2005 pode ter contribuído para esse padrão. Essa análise evidencia a complexidade das interações climáticas na região do Maranhão e destaca a importância de considerar múltiplos fatores, incluindo modos climáticos locais e remotos e eventos extremos de sistemas

atmosféricos, para uma compreensão mais completa dos padrões de precipitação e variabilidade climática nessa área.

Em síntese, os resultados revelam que os eventos de Niño do Atlântico podem ser distintos com base nos mecanismos geradores. Além disso, a precipitação apresenta diferentes comportamentos para os diferentes tipos desses eventos. Portanto, são fundamentais o monitoramento contínuo e a realização de estudos relacionados ao Niño do Atlântico e ao MMA para aprofundar a compreensão desses padrões de variabilidade e, assim, antecipar possíveis impactos no volume e distribuição das chuvas no Maranhão. Além disso, os resultados deste estudo têm o potencial de contribuir significativamente para o planejamento agrícola no sul do estado, bem como para as operações portuárias no norte, especialmente no Complexo Portuário do Itaqui. Este complexo, classificado como o maior porto do Arco norte, enfrenta desafios frequentes durante os períodos chuvosos, já que a maioria dos grãos sólidos, como o milho e soja, não podem ser movimentados nessas condições. Isso leva a atrasos operacionais significativos e, conseqüentemente, a perdas financeiras substanciais. Portanto, compreender como o Niño do Atlântico influencia as chuvas no estado torna-se uma ferramenta essencial no planejamento estratégico.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro da CAPES para o Projeto "Uso e Desenvolvimento do Modelo Brasileiro de Sistema Terrestre para o Estudo do Sistema Oceano-Atmosfera-Criosfera em Latitudes Altas e Médias - BESM/SOAC" (Processo 145668/2017-00), o apoio financeiro do CNPq para o Projeto "Sistema de Observação e Modelagem da Antártica - ATMOS" (Processo 443013/2018-7) e o apoio financeiro da FAPEMA/EMAP para o Projeto "Desenvolvimento de um sistema de modelagem acoplada oceano-atmosfera-ondas nos domínios aninhados da Plataforma Continental do Maranhão - Golfão Maranhense - Baía de São Marcos para análise dos impactos às mudanças climáticas e áreas vulneráveis à inundação e agitação marítima no Complexo Portuário do Itaqui" (Processo APP-09097/22). Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) (Processo 88887.499469/2020-00).

MATERIAL SUPLEMENTAR

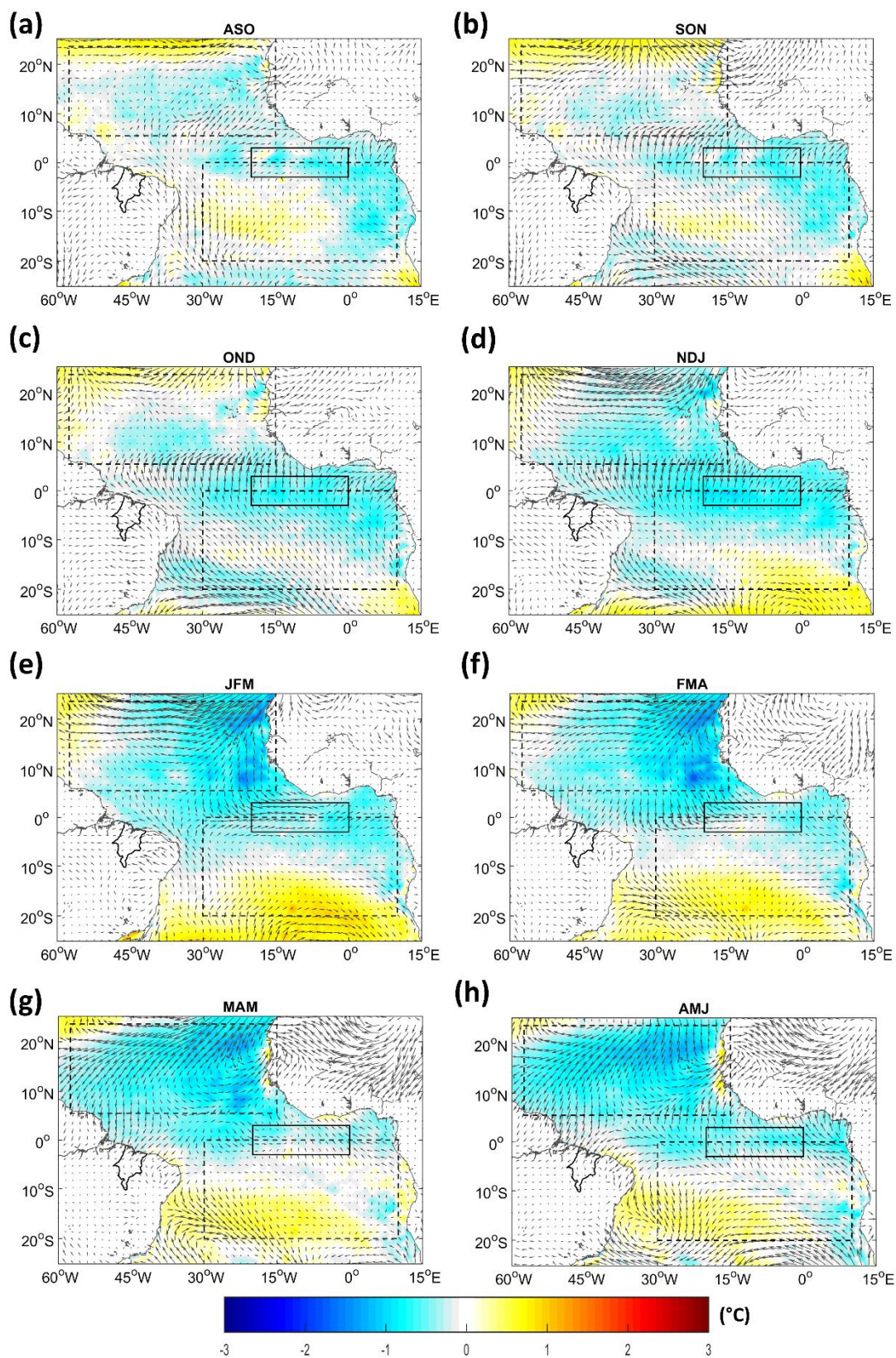


Figura S1 - Evolução das ATSMs (°C) e ventos superficiais (m/s) para os eventos de fase negativa do Niño do Atlântico que ocorreu em 2014 (a — d) e do MMA que ocorreu em 2015 (e — h). Domínio espacial das regiões do Oceano Atlântico Tropical Norte (ATN) (5,5°N–23,5°N; 57,5°W–15°W), Atlântico Tropical Sul (ATS) (0°–20°S; 30°W–10°E) e Atlântico ATL3 (3°N–3°S; 20°W–0°E).

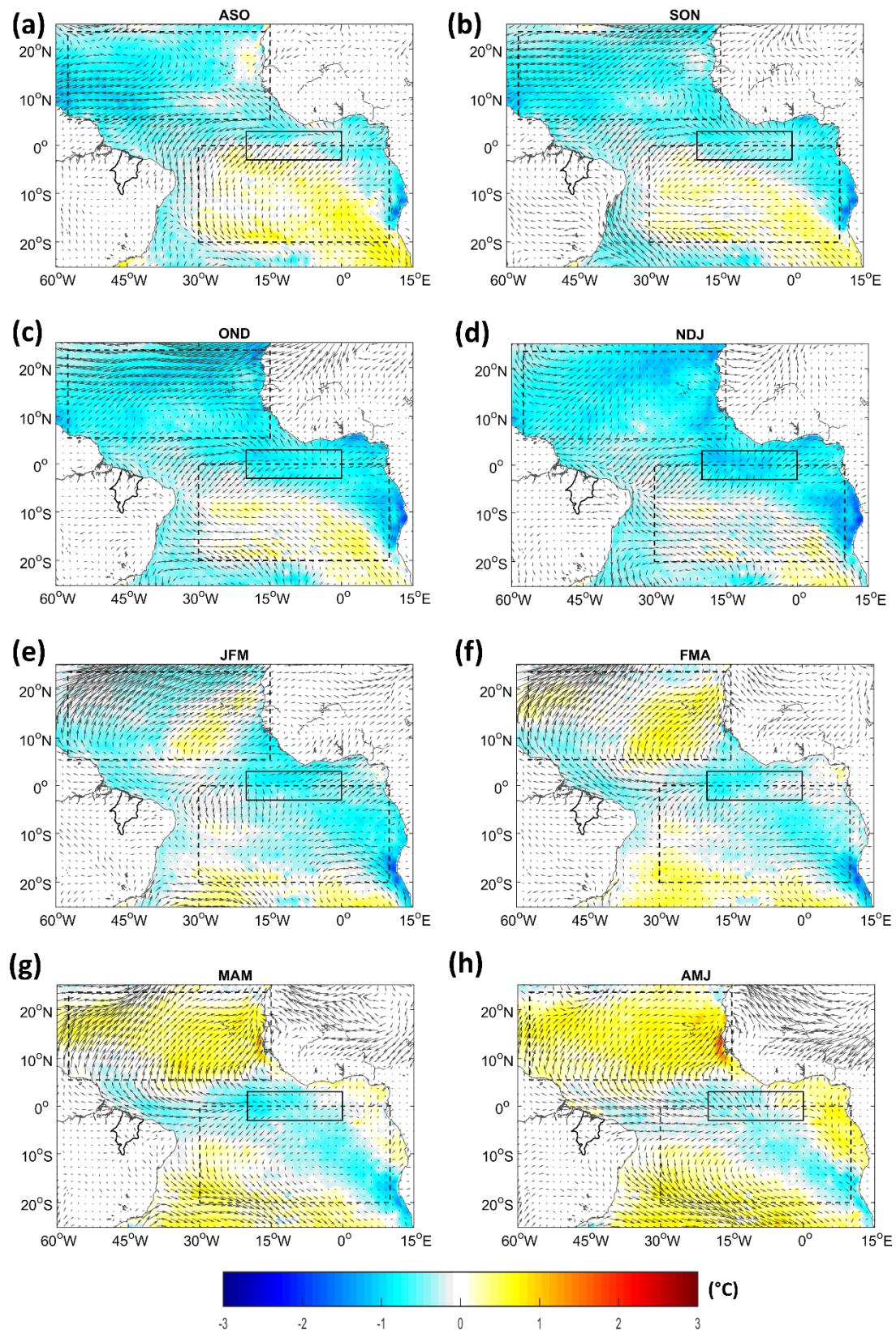


Figura S2 - Evolução das ATSMs (°C) e ventos superficiais (m/s) para os eventos de fase negativa do Niño do Atlântico que ocorreu em 1986 (a — d) e do MMA que ocorreu em 1987 (e — h). Domínio espacial das regiões do Oceano Atlântico Tropical Norte (ATN) (5,5°N–23,5°N; 57,5°W–15°W), Atlântico Tropical Sul (ATS) (0°–20°S; 30°W–10°E) e Atlântico ATL3 (3°N–3°S; 20°W–0°E).

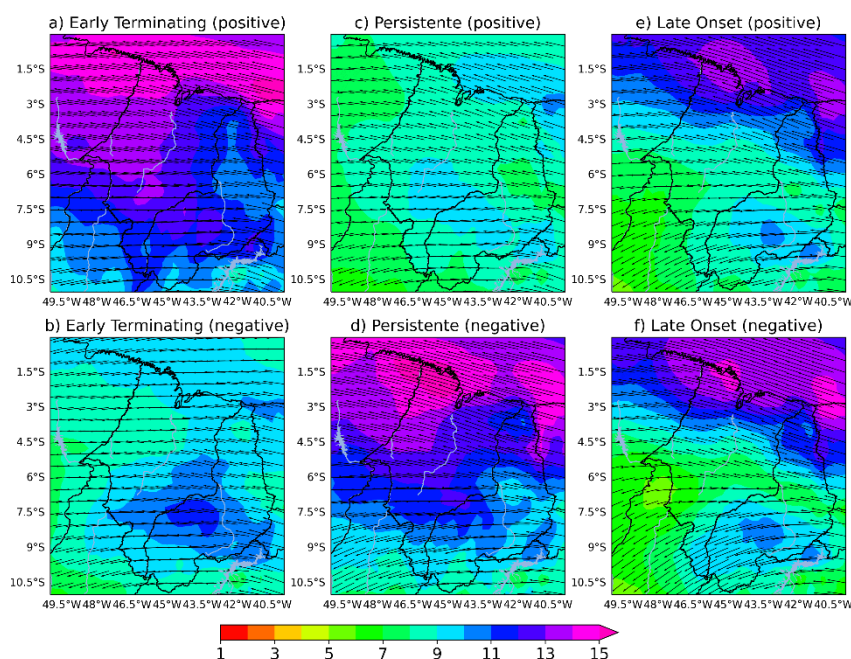


Figura S3 - Transporte de umidade integrado verticalmente ($\text{Kg/m}^{-2} \text{s}^{-1}$) entre os níveis de 850 a 900 hPa para a) Término Precoce (fase positiva), b) Término Precoce (fase negativa), c) Persistente (fase positiva), d) Persistente (fase negativa), e) Término Tardio (fase positiva) e f) Término Tardio (fase negativa).

Tabela S1 – Anos de ocorrência do Niño do Atlântico e MMA de 1980 a 2020 classificados quanto à fase (negativa vs positiva). Em negrito os anos comuns de ocorrência do Niño do Atlântico e MMA, e *Anos de Niño do Atlântico com características de eventos transicionais.

Eventos do Niño do Atlântico	
Fase Negativa	Fase Positiva
1982, 1983, 1986, 1991*, 1992, 1996*, 1997*, 2005, 2014.	1981, 1984, 1987, 1988, 1991*, 1995, 1996*, 1997*, 1998, 1999, 2019.
Eventos do Modo Meridional do Atlântico	
Fase Negativa	Fase Positiva
1984, 1986, 1988, 1991, 1995, 1999, 2014, 2019.	1981, 1982, 1983, 1987, 1992, 1996, 1997, 1998, 2005.

REFERÊNCIAS

Andreoli, R. V., and Kayano, M. T. (2003). Evolution of the equatorial and dipole modes of the sea-surface temperature in the Tropical Atlantic at decadal scale. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 83(3–4), 277–285. <https://doi.org/10.1007/s00703-002-0568-4>

Bolfe, É. L., Victória, D. D. C., Contini, E., Bayma-Silva, G., Spinelli-Araujo, L., and Gomes, D. (2016). Matopiba em crescimento agrícola Aspectos territoriais esocioeconômicos. *Revista de política agrícola*, 25(4), 38-62.

Burmeister, K., Brandt, P., and Lübbecke, J. F. (2016). Revisiting the cause of the eastern equatorial Atlantic cold event in 2009. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7), 4777–4789. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2016JC011719>

Campos, E. J. O papel do oceano nas mudanças climáticas globais. *Revista USP*, São Paulo, n. 103, p. 55-66, 2014.

Chang, P., Fang, Y., Saravanan, R., Ji, L., and Seidel, H. (2006). The cause of the fragile relationship between the Pacific El Niño and the Atlantic Niño. *Nature*, 443(7109), 324–328. <https://doi.org/10.1038/nature05053>

Chiang, J. C. H., and Vimont, D. J. (2004). Analogous Pacific and Atlantic Meridional Modes of Tropical Atmosphere–Ocean Variability. *Journal of Climate*, 17(21), 4143–4158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI4953.1>

Chiang, J. C. H., Kushnir, Y. and Giannini, A. (2002). Deconstructing Atlantic intertropical convergence zone variability: influence of the local cross-equatorial sea surface temperature gradient and remote forcing from the eastern equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 107(D1), 4004.

Chiang, J. C. H., Kushnir, Y., and Zebiak, S. E. (2000). Interdecadal changes in eastern Pacific ITCZ variability and its influence on the Atlantic ITCZ. *Geophysical Research Letters*, 27(22), 3687–3690. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999GL011268>

Deppenmeier, A.-L. (2022). The Atlantic Niño weakens. *Nature Climate Change*, 12(9), 780–781. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01460-z>

Dippe, T., Lübbecke, J. F., and Greatbatch, R. J. (2019). A comparison of the Atlantic and Pacific Bjerknes feedbacks: Seasonality, symmetry, and stationarity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 2374–2403. <https://doi.org/10.1029/2018JC014700>.

Folland, C. K., Colman, A. W., Rowell, D. P., and Davey, M. K. (2001). Predictability of Northeast Brazil Rainfall and Real-Time Forecast Skill, 1987-98. *Journal of Climate*, 14, 1937–1958.

Foltz, G. R., Brandt, P., Richter, I., Rodriguez-fonseca, B., Hernandez, F., Dengler, M., Rodrigues, R. R., Schmidt, J. O., Yu, L., Lefevre, N., Da Cunha, L. C., McPhaden, M. J., Araujo Filho, M. C., Karstensen, J., Hahn, J., Martín-Rey, M., Patricola, C. M., Poli, P., Zuidema, P., ... Duha, J. T. (2019). The tropical atlantic observing system. *Frontiers in Marine Science*, 6(APR).
<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00206>

Foltz, G. R., and McPhaden, M. J. (2010a). Abrupt equatorial wave-induced cooling of the Atlantic cold tongue in 2009. *Geophysical Research Letters*, 37(24).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010GL045522>

Foltz, G. R., and McPhaden, M. J. (2010b). Interaction between the Atlantic meridional and Niño modes. *Geophysical Research Letters*, 37(18).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010GL044001>

Giannini, A., Saravanan, R., and Chang, P. (2002). Linking Climate Change to Land Surface Change. *World Resources Institute: Earth Trends*, 419(4), 291.
<https://doi.org/10.1016/S1364>

Hastenrath S., and Heller L. (1977). Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. *Royal Meteorological Society*, 103, 17–92.

Hastenrath, S. (2006). Circulation and teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts. *Progress in Oceanography*, 70(2–4), 407–415.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2005.07.004>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hirst, A. C., and Hastenrath, S. (1983). Atmosphere–ocean mechanisms of climate anomalies in the Angola–tropical Atlantic sector. *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 1146–1157.

Hounsou-Gbo, G. A., Servain, J., Araujo, M., Caniaux, G., Boulès, B., Fontenele, D., and Martins, E. S. P. R. (2019). SST indexes in the tropical South Atlantic for forecasting rainy seasons in Northeast Brazil. *Atmosphere*, 10(6).
<https://doi.org/10.3390/atmos10060335>

Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C. C., e Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903–995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>

Keenlyside, N. S.; LATIF, M. (2007). Understanding equatorial Atlantic interannual variability. *Journal of climate*, v. 20, n. 1, p. 131-142.

Kushnir, Y., Robinson, W. A., Chang, P., and Robertson, A. W. (2006). The Physical Basis for Predicting Atlantic Sector Seasonal-to-Interannual Climate Variability. *Journal of Climate*, 5949–5970.

Loayza, A. C. V., dos Reis, M. V. S., de Jesus, F. R., Ipolito, A. L. M., and Ribeiro, I. G. (2023). Evolução dos indicadores da produção de soja no Matopiba. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, 21(12), 27824-27845.

Losada, T., Rodríguez-Fonseca, B., Janicot, S., Gervois, S., Chauvin, F., and Ruti, P. (2010). A multi-model approach to the Atlantic Equatorial mode: Impact on the West African monsoon. *Climate Dynamics*, 35(1), 29–43. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0625-5>

Lübbecke, J. F., Burls, N. J., Reason, C. J. C., and McPhaden, M. J. (2014). Variability in the South Atlantic Anticyclone and the Atlantic Niño Mode. *Journal of Climate*, 27(21), 8135–8150. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00202.1>

Lübbecke, J. F., and Mcphaden, M. J. (2013). A comparative stability analysis of atlantic and pacific niño modes. *Journal of Climate*, 26(16), 5965–5980. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00758.1>

Lübbecke, J. F., Rodríguez-Fonseca, B., Richter, I., Martín-Rey, M., Losada, T., Polo, I., e Keenlyside, N. S. (2018). Equatorial Atlantic variability—Modes, mechanisms, and global teleconnections. *WIREs Climate Change*, 9(4), e527. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wcc.527>

Mao, Y., Zou, Y., Alves, L. M., Macau, E. E. N., Taschetto, A. S., Santoso, A., and Kurths, J. (2022). Phase Coherence Between Surrounding Oceans Enhances Precipitation Shortages in Northeast Brazil. *Geophysical Research Letters*, 49(9), e2021GL097647. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL097647>

Marengo, J. A., Torres, R. R., and Alves, L. M. (2017). Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3–4), 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

Martín-Rey, M., Polo, I., Rodríguez-Fonseca, B., Lazar, A., and Losada, T. (2019). Ocean dynamics shapes the structure and timing of Atlantic Equatorial Modes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(11), 7529–7544. <https://doi.org/10.1029/2019JC015030>

Martín-Rey, M., Polo, I., Rodríguez-Fonseca, B., Losada, T., and Lazar, A. (2018). Is There Evidence of Changes in Tropical Atlantic Variability Modes under

AMO Phases in the Observational Record? *Journal of Climate*, 31(2), 515–536.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0459.1>

Merle, J., Fieux, M., and Hisard, P. (1980). Annual signal and interannual anomalies of sea surface temperature in the eastern equatorial atlantic ocean. *Oceanography and Surface Layer Meteorology in the B/C Scale*, 77–101.

Moron, V., Vautard, R., and Ghil, M. (1998). Trends, interdecadal and interannual oscillations in global sea-surface temperatures. *Climate Dynamics*, 14(7), 545–569.
<https://doi.org/10.1007/s003820050241>

Moura, A. D., and Shukla, J. (1981). On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 38(12), 2653–2675.

Munnich, M., and Neelin, J. D. (2005). Seasonal Influence of ENSO on the Atlantic ITCZ and equatorial South America. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (21), L21709.
<https://doi.org/10.1029/2005GL023900>

Murtugudde, R. G., Ballabrera-Poy, J., Beauchamp, J., and Busalacchi, A. J. (2001). Relationship between zonal and meridional modes in the tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 28(23), 4463–4466.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2001GL013407>

Nascimento, F. C. A., Braga, C. C., e Araújo, F. R. C. D. (2017). Análise estatística dos eventos secos e chuvosos de precipitação do estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(3), 375–386. <https://doi.org/10.1590/0102-77863230005>

NOAA. (2021). NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL). <https://psl.noaa.gov/>

NUGEO. (2024). Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão, Laboratório de Meteorologia, http://www.nugeo.uema.br/?page_id=81.

Okumura, Y., and Xie, S.-P. (2004). Interaction of the Atlantic Equatorial Cold Tongue and the African Monsoon. *Journal of Climate*, 17(18), 3589–3602.

Okumura, Y., and Xie, S.-P. (2006). Some Overlooked Features of Tropical Atlantic Climate Leading to a New Niño-Like Phenomenon. *Journal of Climate*, 19(22), 5859–5874. <https://doi.org/10.1175/JCLI3928.1>

PETTI, R. H. V. et al. 2001. Estudo de mercado de trabalho como subsídio para a reforma da educação profissional no estado do Maranhão. São Paulo: IEA/SEADE.

Philander, S. G. H. (1984). Unusual conditions in the tropical Atlantic Ocean in 1984. *Nature*, 322, 236–238.

Plaut, G., and Vautard, R. (1994). Spells of Low-Frequency Oscillations and Weather Regimes in the Northern Hemisphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51(2), 210–236. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<0210:SOLFOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<0210:SOLFOA>2.0.CO;2)

Prigent, A., Lübbecke, J. F., Bayr, T., Latif, M., and Wengel, C. (2020). Weakened SST variability in the tropical Atlantic Ocean since 2000. *Climate Dynamics*, 54(5–6), 2731–2744. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05138-0>

Richter, I., Behera, S. K., Doi, T., Taguchi, B., Masumoto, Y., and Xie, S. P. (2014). What controls equatorial Atlantic winds in boreal spring? *Climate Dynamics*, 43(11), 3091–3104. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2170-0>

Richter, I., Behera, S. K., Masumoto, Y., Taguchi, B., Sasaki, H., and Yamagata, T. (2013). Multiple causes of interannual sea surface temperature variability in the equatorial Atlantic Ocean. *Nature Geoscience*, 6(1), 43–47. <https://doi.org/10.1038/ngeo1660>

Richter, I., and Tokinaga, H. (2021). 7 - The Atlantic zonal mode: Dynamics, thermodynamics, and teleconnections. In S. K. Behera (Ed.), *Tropical and Extratropical Air-Sea Interactions* (pp. 171–206). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818156-0.00008-3>

Richter, I., Tokinaga, H., and Okumura, Y. M. (2022). The Extraordinary Equatorial Atlantic Warming in Late 2019. *Geophysical Research Letters*, 49(4), e2021GL095918. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL095918>

Rodrigues, R., Haarsma, R., Campos, E. and Ambrizzi, T. (2011). The Impacts of Inter–El Niño Variability on the Tropical Atlantic and Northeast Brazil Climate. *Journal of Climate* 24(13) pp. 3402-3422. Available at: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/24/13/2011jcli3983>

Ruiz-Barradas, A., Carton, J. A., and Nigam, S. (2000a). Structure of Interannual-to-Decadal Climate Variability in the Tropical Atlantic Sector. *Journal of Climate*, 13(18), 3285–3297.

Ruiz-Barradas, A., Carton, J. A., and Nigam, S. (2000b). Structure of Interannual-to-Decadal Climate Variability in the Tropical Atlantic Sector. *Journal of Climate*, 13(18), 3285–3297. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<3285:SOITDC>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<3285:SOITDC>2.0.CO;2)

Sandwell, D. T. (1987). Biharmonic spline interpolation of geos-3 and seasat altimeter data. *Geophysical Research Letter*, 14(2), 139–142.

Servain, J. ; Picaut, J. ; and Merle, J. (1982). Evidence of remote forcing in the equatorial Atlantic Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 12, 457–463.

Servain, J., and Seva, M. (1987). On relationships between tropical atlantic sea surface temperature, wind stress and regional precipitation indices: 1964-1984. *Ocean-Air Inneractions*, 1, 183–190.

Servain, J., Wainer, I., McCreary Jr., J. P., and Dessier, A. (1999). Relationship between the equatorial and meridional modes of climatic variability in the tropical

Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 26(4), 485–488.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999GL900014>

Silva, M. N. da, Tereza, A., Bezerra, D. da S., Pereira, L., Eloi, C. M. de A., and Santos, A. L. S. dos. (2017). A seca no Maranhão no período de 2010 a 2016 e seus impactos. *Parcerias Estratégicas*, 22(44), 119–138.

Soares, L. A. M., Parise, C. K., Machado, A. M. B., Carpenedo, C. B., Furtado, T. M. S., Barreto, H. N., Lima, L. G., Sousa, H. L. S. (2023). Influences of strong and moderate ENSO events on the precipitation in Maranhão–Brazil through the western equatorial Atlantic SST anomalies. *Ocean and Coastal Research*, 71, e23043.
<https://doi.org/10.1590/2675-2824072.22057lams>

Tokinaga, H., Richter, I., and Kosaka, Y. (2019). ENSO Influence on the Atlantic Niño, Revisited: Multi-Year versus Single-Year ENSO Events. *Journal of Climate*, 32(14), 4585–4600. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0683.1>

Torralla, V., Rodríguez-Fonseca, B., Mohino, E., and Losada, T. (2015). The non-stationary influence of the Atlantic and Pacific niños on north Eastern South American rainfall. *Frontiers in Earth Science*, 3.
<https://doi.org/10.3389/feart.2015.00055>

Torrence, C., and Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61–78.

Utida, G., Cruz, F. W., Etourneau, J., Bouloubassi, I., Schefuß, E., Vuille, M., Novello, V. F., Prado, L. F., Sifeddine, A., Klein, V., Zular, A., Viana, J. C. C., e Turcq, B. (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific Reports*, 9(1), 1698.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>

Vallès-Casanova, I., Lee, S. K., Foltz, G. R., and Pelegrí, J. L. (2020). On the Spatiotemporal Diversity of Atlantic Niño and Associated Rainfall Variability Over West Africa and South America. *Geophysical Research Letters*, 47(8).
<https://doi.org/10.1029/2020GL087108>

Wang, R., He, J., Luo, J.-J., and Chen, L. (2024). Atlantic warming enhances the influence of Atlantic Niño on ENSO. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL108013. <https://doi.org/10.1029/2023GL108013>

Wang, C. (2019). Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective. *Climate Dynamics*, 53(7–8), 5119–5136. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04930-x>

Wilks, D. S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. San Diego, CA: Academic Press. 627p. (International Geophysics Series 91) ISBN 978-0-12-751966-1

Xie, S. P., and Carton, J. A. (2004). Tropical atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts. In Geophysical Monograph Series (Vol. 147, pp. 121–142). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1029/147GM07>

Zebiak, S. E. (1993). Air–Sea Interaction in the Equatorial Atlantic Region. *Journal of Climate*, 6(8), 1567–1586. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1567:AIITEA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1567:AIITEA>2.0.CO;2)

Zhang, L., HAN, W. and HU, Z.-Z. (2021). Inter-basin and multi-time scale interactions in generating the 2019 extreme indian ocean dipole. *J. Clim.*, v. 34, p. 4553 – 4566.

Zhang, L., HAN, W. (2021). Indian Ocean Dipole leads to Atlantic Niño. *Nat Commun.*, v. 12, p. 5952.

III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo fornece *insights* relevantes sobre a complexa dinâmica climática no estado do Maranhão e a influência do Niño do Atlântico (NA) nas anomalias de precipitação. Uma análise abrangente realizada ao longo de décadas ressalta a importância de considerar diversos fatores climáticos para uma compreensão completa dos padrões de chuva na região. O estudo distingue diferentes tipos de eventos do NA e suas correlações variadas com as anomalias de ocorrência em várias regiões do Maranhão. Um achado intrigante é o aumento inesperado nas precipitações durante a fase negativa de um evento de término precoce do NA, indicando a influência de fluxos de umidade e do fenômeno La Niña. Essa observação realça a necessidade de considerar múltiplos fatores na análise dos padrões de opções e variabilidade climática na região. Em resumo, os resultados deste estudo reforçam a complexidade das interações climáticas no Maranhão e sublinham a importância contínua do monitoramento e da pesquisa relacionada ao NA e ao MMA. Esse conhecimento é essencial para antecipar os impactos potenciais nas chuvas e para apoiar decisões informadas em setores econômicos e sociais, adaptando-se às variações climáticas e fortalecendo a resiliência da região diante dessas mudanças.

ANEXO I
PRECIPITATION VARIABILITY IN THE STATE OF MARANHÃO
ASSOCIATED WITH ATLANTIC NIÑO EVENTS

^{1*}Thalita Mirian Santos FURTADO, ²Luiz Paulo de Freitas ASSAD, ²Claudia Klose
PARISE, ³Fernanda Cerqueira VASCONCELLOS, ⁴Lívia SANCHO, ⁵Camila Bertoletti
CARPENEDO, ⁶Wesley Lima BARBOSA and ⁷Laisa Alves Malheiros SOARES

^{1,2,3} *Department of Meteorology, Institute of Geosciences, Federal University of Rio de Janeiro, Athos da Silveira Ramos Street, 274, Block G, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, Brazil, ZIP Code: 21941- 916.*

^{2,7} *Climate Study and Modeling Laboratory (LACLIMA), Department of Oceanography and Limnology, Federal University of Maranhão (UFMA), Portugueses Avenue, 1966, Vila Bacanga, 65080805, São Luís, MA, Brazil.*

⁴ *Computational Methods in Engineering Laboratory, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil.*

⁵ *NUVEM - Center for Studies on Climate Variability and Change, Department of Soil and Agricultural Engineering, Federal University of Paraná (UFPR), Rua dos Funcionários, 1540 - Cabral Neighborhood, 80035-050, Curitiba, PR, Brazil.*

⁶ *Ocean and Atmosphere Studies Laboratory (LOA), Earth Observation and Geoinformatics Division (DIOTG), National Institute for Space Research (INPE), Astronauts Avenue, 1,758 - Jardim da Granja, 12227-010, São José dos Campos - SP, Brazil.*

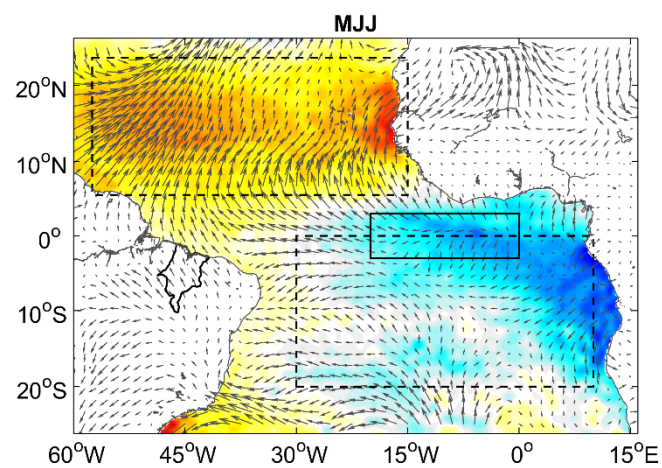
***Corresponding author:** Thalita Mirian Santos Furtado. Email: thalitafurt@hotmail.com

Precipitation variability in the State of Maranhão associated with Atlantic Niño events

Highlights

- The study emphasizes the importance of considering various climatic factors for a better understanding of rainfall patterns in Maranhão.
- The unexpected increase in precipitation during the negative phase of the early termination event of the Atlantic Niño indicates the influence of factors beyond the Atlantic Niño.

Graphical Abstract



RESUMEN

El estudio investigó el impacto de la temperatura de la superficie del mar del Atlántico tropical en las anomalías de precipitación en el estado de Maranhão. Entre 1980 y 2020, utilizando el índice ATL3, se identificaron 20 eventos del Niño del Atlántico, predominantemente con escalas de 2 a 8 años, con una disminución significativa observada a partir de los años 2000, posiblemente debido al debilitamiento del feedback de Bjerknes y a la influencia de la Oscilación Multidecadal del Atlántico. Sin embargo, algunos eventos positivos del Niño del Atlántico, como los de 2019 y 2021, indicaron la influencia de la fase negativa de la Oscilación Multidecadal del Atlántico en la potencial reactivación del Niño del Atlántico después de 19 años inactivos. El evento negativo de terminación temprana fue considerado "no canónico", caracterizado por anomalías positivas de TSM en el Atlántico Tropical Norte y anomalías positivas de vientos del este. Se identificó una relación entre el Niño del Atlántico y el Modo Meridional del Atlántico, afectando la evolución temporal de estos eventos e influenciando elementos como TSM y vientos interhemisféricos, impactando consecuentemente los patrones de precipitación en Maranhão. Los resultados evidencian la complejidad de las interacciones climáticas en la región, destacando la importancia de considerar múltiples factores, incluyendo modos climáticos locales y remotos, para una comprensión completa de los patrones de precipitación y variabilidad climática. Por lo tanto, el estudio destaca la importancia del monitoreo continuo y estudios relacionados con el Niño del Atlántico y el Modo Meridional del Atlántico para anticipar posibles impactos en el volumen y distribución de las lluvias en Maranhão y para la planificación estratégica regional.

ABSTRACT

The study investigated the impact of tropical Atlantic sea surface temperature anomalies on precipitation anomalies in the State of Maranhão. Between 1980 and 2020, using the ATL3 index, 20 Atlantic Niño events were identified, predominantly with scales of 2 to 8 years, with a significant decrease observed from the 2000s, possibly due to the weakening of the Bjerknes feedback and the influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation. However, some positive Atlantic Niño events, such as those in 2019 and 2021, indicated the influence of the negative phase of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the potential reactivation of the Atlantic Niño after 19 inactive years. The negative early termination event was considered "non-canonical," characterized by positive sea surface temperature anomalies in the North Tropical Atlantic and positive east winds. A relationship was identified between the Atlantic Niño and the Atlantic Meridional Mode, affecting the temporal evolution of these events and influencing elements such as sea surface temperature and interhemispheric winds, consequently impacting precipitation patterns in Maranhão. The results highlight the complexity of climate interactions in the region, underscoring the importance of considering multiple factors, including local and remote climate modes, for a comprehensive understanding of precipitation patterns and climate variability. Therefore, the study emphasizes the importance of continuous monitoring and research related to the Atlantic Niño and the Atlantic Meridional Mode to anticipate possible impacts on the volume and distribution of rainfall in Maranhão and for regional strategic planning.

Keywords: Atlantic Niño; Bjerknes feedback; Northeast Region of Brazil.

1. Introduction

As the planet faces increasingly evident climate changes, understanding the factors driving climatic variations at the regional level becomes important for decision-making. In this context, the Atlantic Ocean plays a crucial role, being directly affected by global climate changes, such as increased sea surface temperature (SST) and alterations in atmospheric and oceanic circulation patterns (Campos, 2014).

Changes in the Atlantic Ocean have significant impacts on precipitation variability in the State of Maranhão, located in the Northeast Region of Brazil (Soares et al., 2023). Understanding this relationship is important to ensure efficient planning of various water resource uses, such as public supply, energy generation, irrigation, and animal watering, among other climate-sensitive socioeconomic activities in the state.

The variability of SST and winds in the tropical Atlantic has a direct relationship with regulating patterns of air temperature and precipitation in various regions of the planet (Lübbecke and McPhaden, 2013). In recent years, these relationships have been widely investigated for the establishment of adaptation measures to potential impacts in the Northeast region of Brazil (NEB; Lübbecke and McPhaden, 2013; Foltz et al., 2019; Utida et al., 2019; Mao et al., 2022).

The climatic variability of the tropical Atlantic involves different processes of ocean-atmosphere interaction, climate oscillations, inter-hemispheric SST gradients, and anomalous wind patterns (Chiang and Gianni, 2002; Okumura and Xie, 2004; Xie and Carton, 2004). Several studies have been conducted to understand the climatic processes that influence this variability, at different spatial and temporal scales (Kushnir et al., 2006; Marengo et al., 2017). Among them, the modes of interannual variability Atlantic Niño (Hastenrath and Heller, 1977) and the Atlantic Meridional Mode (AMM; Moura and Shukla, 1981; Servain and Seva, 1987; Chang et al., 2006; Hastenrath, 2006) stand out.

The Atlantic Meridional Mode (AMM) is recognized as a key player in regulating the climate in the NEB, widely regarded as the primary mode of long-term variability for interannual climate fluctuations in the Tropical Atlantic (TA). Its

formation involves variations in SSTs, low-level wind patterns, and sea-level atmospheric pressure in both the North Tropical Atlantic (NTA) and South Tropical Atlantic (STA), on temporal scales ranging from seasonal to decadal.

The Atlantic Niño is a coupled ocean-atmosphere mode responsible for controlling interannual variability in the TA. This mode is associated with changes in atmospheric circulation (Merle et al., 1980; Servain et al., 1982; Hirst and Hastenrath, 1983; Philander, 1984; Lübbecke et al., 2018; Wang, 2019) and an increase in the frequency of floods in countries near the Gulf of Guinea in West Africa and northeastern South America during the positive phase (Folland et al., 2001; Giannini et al., 2002; Okumura and Xie, 2004; Losada et al., 2010; Lübbecke et al., 2018; Foltz et al., 2019).

The development of the Atlantic Niño typically begins in the austral autumn (MAM), in response to anomalous weakening of the trade winds over the Equatorial Atlantic (Zebiak, 1993; Ruiz-Barradas et al., 2000a; Richter et al., 2013, 2014; Lübbecke et al., 2018), with its maximum occurring in the austral winter (JJA) (Zebiak, 1993; Lübbecke et al., 2018). During the positive phase of the Atlantic Niño, positive SST anomalies are established in the South Tropical Atlantic, as observed by Torralba et al. (2015). These anomalies weaken the inter-hemispheric thermal gradient in the tropical Atlantic, resulting in the southward displacement of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), bringing rainfall to the NEB.

Some studies have highlighted the relationship between the Atlantic Niño and precipitation in the NEB (e.g., Hounsou-Gbo et al., 2019; Vallès-Casanova et al., 2020). Vallès-Casanova et al. (2020) investigated the different types of Atlantic Niño and noted that during positive phase events there is a significant increase in precipitation in northeastern South America. Hounsou-Gbo et al. (2019) demonstrated that the positive (negative) phase of the Atlantic Niño is associated with increased (reduced) rainfall in the northern NEB, especially in the municipalities of Recife - PE and Fortaleza - CE, with the peak occurring with a lag of 2 to 4 months relative to the Atlantic Niño index.

Studies such as those by Nascimento (2017) and Soares et al. (2023) highlight the influence of tropical Atlantic conditions on rainfall patterns in Maranhão. In particular, Soares et al. (2023) examined the impacts of the Pacific-Atlantic teleconnection on the state's precipitation regime between 1980 and 2015, and observed

a clear influence of Western Equatorial Atlantic SST anomalies on rainfall in Maranhão, mainly in the northern region. Such studies make it evident that tropical Atlantic conditions play a crucial role in precipitation variability in Maranhão. Furthermore, the northern and southern regions of Maranhão play a fundamental role in the state's economy, encompassing activities such as agriculture, mining, livestock farming, and tourism (Petti et al., 2001).

Within this context, the objective of this study is to investigate the relationship between precipitation in the State of Maranhão and SST in the tropical Atlantic, identifying non-stationary spectral signals of SST.

In Section 2, we present the datasets used, including in-situ observations and global climate reanalysis. Additionally, we explain the methodology used to characterize and identify Atlantic Niño and AMM events. In this section, we also address the identification of non-stationary spectral patterns of Atlantic Niño. The main findings are discussed in Section 3, and finally, the study's conclusions are presented in Section 4.

2. Data and Methods

a. Study Area

The study area comprises the tropical Atlantic region (Fig. 1a) and the State of Maranhão (Fig. 1b). The dashed rectangles represent the regions of the North Tropical Atlantic (NTA: 5.5°N–23.5°N; 57.5°W–15°W) and South Tropical Atlantic (STA: 0°–20°S; 30°W–10°E), where the years of occurrence of the AMM (Moura and Shukla, 1981) were estimated; while the solid rectangle represents the ATL3 region (3°N–3°S and 20°W–0°E), where the years of occurrence of the Atlantic Niño were estimated.

The State of Maranhão has a population of over 7 million inhabitants, and it encompasses part of the cerrado biome area of the country, integrating the Matopiba region, which also includes areas of the states of Tocantins, Piauí, and Bahia (Bolfe et al., 2016). This region is recognized for adopting modern agriculture geared towards exports, with soybean and corn production being its main crops (Loayza et al., 2023). Rainfall totals in the state show significant variations, ranging from 700 mm/year (inland) to 2,000 mm/year (coastal areas) (NuGeo UEMA, 2016).

The spatial distribution of rainfall is heterogeneous due, in part, to geographic features that allow the state to be influenced by the Amazonian complex to the north and northwest, where the climate exhibits equatorial characteristics, being hot and humid (Nascimento et al., 2017). Meanwhile, another part of the state is located in the semi-arid region of the Northeast, giving it distinct and peculiar characteristics (Nascimento et al., 2017). Precipitation in Maranhão shows marked semi-annual variability, with a rainy season occurring from December to May, with emphasis on the months of February to May, which are the rainiest months, and a dry season from June to November (Nascimento et al., 2017; Silva et al., 2017). This variability is significantly affected by the climatic conditions of the tropical Atlantic (Soares et al., 2023).

2.2 *Data*

The monthly outputs of SST and 10m wind were obtained from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) reanalysis v5 (ERA5; Hersbach et al., 2020), with a horizontal resolution of 0.25° (~28 km) and covering the period from January 1980 to December 2020 (41 years).

This study used monthly precipitation accumulations for the same period (1980-2020) from 23 meteorological stations of the National Institute of Meteorology (INMET), obtained from the Meteorological Database for Teaching and Research (BDMEP). Of these 23 stations, 12 are located within the territorial limits of Maranhão and the remaining ones in neighboring states, Pará and Piauí (Fig. 1b), aiming for improvements during precipitation data interpolation.

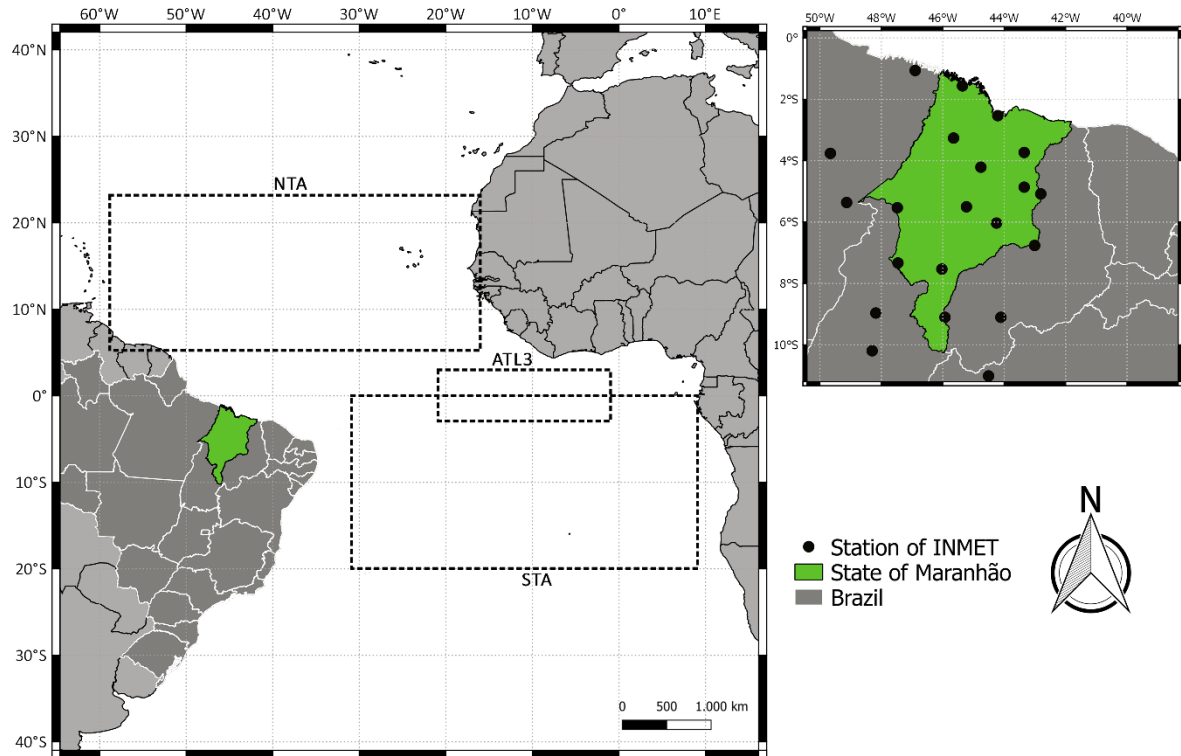


Figure 9 - (a) Spatial domain of the North Tropical Atlantic (NTA) (5.5°N–23.5°N; 57.5°W–15°W), South Tropical Atlantic (STA) (0°–20°S; 30°W–10°E), and ATL3 (3°N–3°S; 20°W–0°E) regions; (b) Location of the State of Maranhão (in green) and the INMET meteorological stations analyzed in this study.

2.3 Treatment of precipitation data

From the visual identification of flaws in the time series of in situ precipitation data, we developed an algorithm capable of identifying the flaws and creating time vectors (years and months) for the missing data. The spatial interpolation of the data for the State of Maranhão domain was performed using the statistical method Biharmonic spline (Sandwell, 1987), which showed the lowest precipitation errors. After data spatialization, we calculated quarterly precipitation anomalies with one-month moving averages (e.g., DJF, JFM, FMA, etc.) from the climatological mean of 1980-2020 for each quarter.

2.4 Indices of Atlantic Variability Modes

With the aim of assessing the occurrence years of the Atlantic Niño, quarterly SST anomalies in the ATL3 region (Fig. 1a) were calculated using quarterly means with a one-month moving window (e.g., DJF, JFM, FMA, etc.). The Atlantic Niño occurrence years were defined following the methodology proposed by Vallès-

Casanova et al. (2020), based on standard deviation normalization and persistence of SST anomalies equal to or greater (less) than $+0.5^{\circ}\text{C}$ (-0.5°C), for at least three consecutive quarters. SST anomalies above $+0.5^{\circ}\text{C}$ characterized the positive phase of ATL3, and anomalies equal to or below -0.5°C , the negative phase. The positive and negative Atlantic Niño events were classified according to the temporal evolution pattern of SST anomalies (SSTAs) in the ATL3 region over the quarters, where we defined 4 categories, as proposed by Vallès-Casanova et al. (2020): i) late onset (events lasting 4 consecutive quarters – from ASO to NDJ); ii) early termination (events lasting 4 consecutive quarters – from FMA to MJJ); iii) persistent events (events lasting more than 4 consecutive quarters); and iv) transitional events (events in which, in the same year, an early termination event and a late onset event occurred).

The occurrence years of the AMM were identified based on its index (IAMM; Eq. 1), which consists of the difference between the monthly SST anomaly means in the ATN and ATS regions, normalized by the standard deviation (Fig. 1a). Subsequently, the occurrence years of the AMM were identified, focusing on the months between February and May (FMAM), when the rainy season of the NEB is established. The years in which the AMM index ranged between -0.5 and $+0.5$ were excluded, as they represent the neutral phase of this mode. The occurrence years of the AMM can be found in the supplementary material (Table SI).

$$IAMM = SSTA_{NTA} - SSTA_{STA} \quad (\text{Eq. 1})$$

2.5 Statistical Analyses

From the quarterly precipitation anomalies in Maranhão and the quarterly TSM anomalies in the ATL3 region, the mean compounds of the years and quarters that characterized the occurrence of different types of Atlantic Niño for both negative and positive phases were calculated. Precipitation compounds were constructed for the late onset, early termination, and persistent events only.

Finally, we used the Complex Morlet Wavelet Transform (Torrence and Compo, 1998) to identify and analyze the interannual and decadal variability, and to detect the most significant periods of Atlantic Niño occurrence between 1980 and 2020. The Morlet wavelet analysis (Eq. 2) was employed based on the algorithm written by

Torrence and Compo (1998), where $\psi_0(\eta)$ is the frequency, η is the non-dimensional time, and ω_0 is the non-dimensional frequency.

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (\text{Eq. 2})$$

3. Results and Discussions

Through the ATL3 index, we identified the occurrence of 20 Atlantic Niño events from January 1980 to December 2020. Out of this total, 9 events were classified as negative phase and 11 as positive phase (Table I and Fig. 2a).

Table I - Years of occurrences of Atlantic Niño (AN) events between January 1980 and December 2020, classified by phase (negative or positive), category (early termination, persistent, late onset, and transitional), and duration (in quarters of each event).

Atlantic Niño events				
Negative		Positive		
1982, 1983, 1986, 1991*, 1992, 1996*, 1997*, 2005, 2014		1981, 1984, 1987, 1988, 1991*, 1995, 1996*, 1997*, 1998, 1999, 2019		
Category	Negative	Duration (quarterly)	Positive	Duration (quarterly)
early termination	2005	3	1995	3
persistent	1984 e 1988	6-7	1992	9
late onset	1981 e 2019	3-4	1986 e 2014	3
transitional	1991 e 1996	3-4	1997	6-9

* Years of Atlantic Niño with characteristics of transitional events.

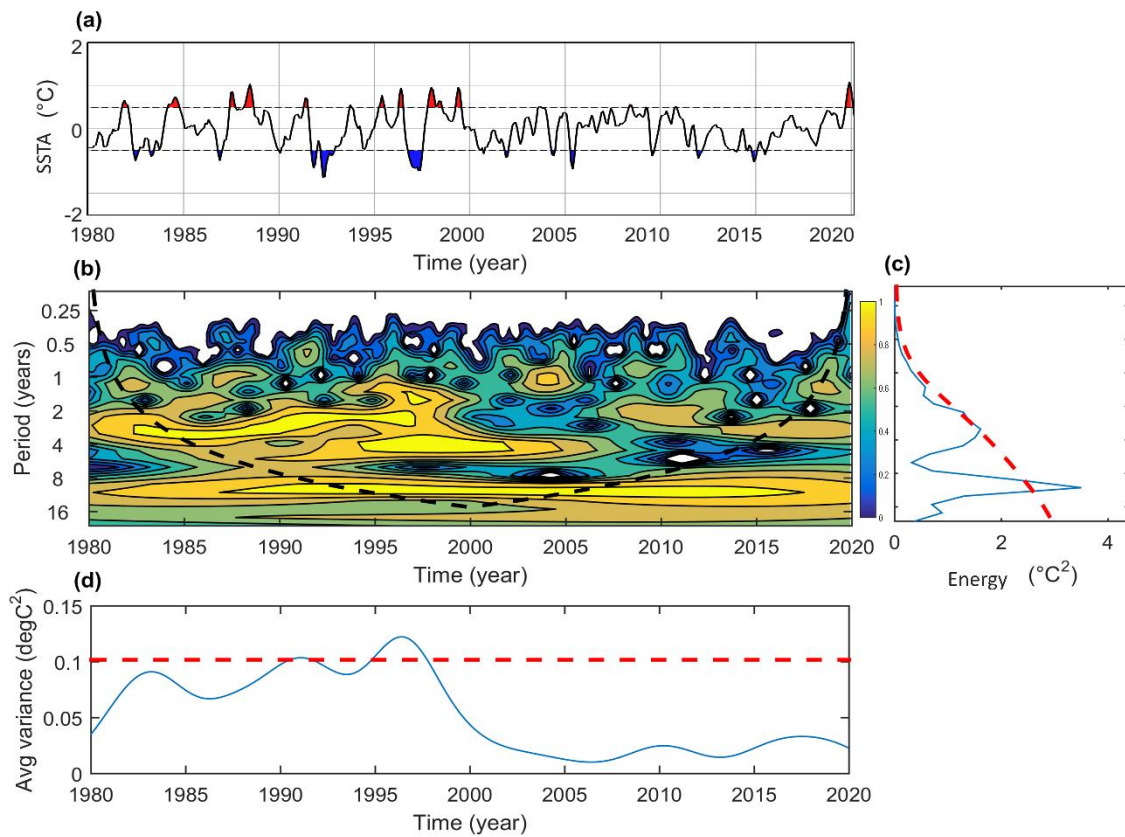


Figure 10 - (a) Time series of sea surface temperature (SST) anomalies (°C) in the ATL3 region, highlighting positive (red) and negative (blue) events, as well as thresholds (dashed lines) for positive ($\geq +0.5$) and negative (≤ -0.5 °C) events; (b) wavelet power spectrum of the ATL3 index and cone of influence (dashed black line); (c) global power spectrum of the ATL3 and 95% confidence level (dashed red line); and (d) scale-averaged wavelet power or variance and 95% confidence level (dashed red line).

The Atlantic Niño events have a periodicity between 2-8 years, with the most intense spectral contours around 4-8 years (Fig. 2b-c). Furthermore, it was observed that the highest wavelet variances were recorded in a specific set of years: 1992, 1996, 1997, 1998, and 1999 (Fig. 2d). The peak observed in the 2–8 year scale may be associated with the El Niño–Southern Oscillation (ENSO). Studies by Chiang et al. (2000) and Munnich and Neelin (2005) have shown that the anomalous atmospheric convection caused by ENSO in the eastern Equatorial Pacific influences the interannual variability of the trade winds during the boreal spring in the Equatorial Atlantic and, consequently, triggers an Atlantic Niño event. Tokinaga et al. (2019) suggested that successive ENSO events may initiate Atlantic Niño events through atmospheric teleconnection. Wand et al. (2024) explains that the key factor for the long-term strengthening of the relationship

between Atlantic Niño-ENSO is the average increase in SST in the Atlantic due to global warming. The year 1997, when a strong El Niño event occurred (NOAA, 2021), was also a year of negative transitional Atlantic Niño event.

Since the 2000s, there has been a significant decrease in Atlantic Niño events (Fig. 2a). This decline can be attributed to the weakening of the Bjerknes feedback mechanism (Prigent et al., 2020). This mechanism involves positive sea surface temperature (SST) anomalies in the eastern Tropical Atlantic, reducing temperature gradients between the western (typically warmer) and eastern (usually cooler) sectors of the basin. This thermal imbalance weakens the eastward zonal winds (the trade winds), generating a long-period oscillation known as the equatorial Kelvin wave (Dippe et al., 2019). The equatorial Kelvin wave propagates eastward along the equator, affecting the vertical structure of the ocean and deepening the thermocline in the eastern basin, where there is higher heat content stored in the surface layers of the ocean (Deppenmeier, 2022). Changes in any of the three components of this mechanism (positive SST anomalies in the east, weaker trade winds, or deeper thermocline in the east) can impact the development of the Atlantic Niño.

In addition to the weakening of the Bjerknes feedback, the decrease in decadal variability of SST in the eastern Equatorial Atlantic since the 2000s may also be associated with the positive phase of the Atlantic Multidecadal Oscillation (Martín-Rey et al., 2018). Although it was presumed that the period from 2000 to 2020 would not present such expressive Atlantic Niño events as the period from 1980 to 1999, the positive event that occurred in 2019 was the most intense Atlantic Niño event observed in the studied series, as evidenced by Figure 2a. A recent study (Richter et al., 2022) showed the development of an intense positive Atlantic Niño event in the JJA trimester of 2021, which extended until the end of the year.

The temporal evolution pattern of the 20 Atlantic Niño events varies in terms of onset, peak, and decay. This can be observed in the time series of the ATL3 index (Fig. 3) for the Atlantic Niño events (*cf.* Table.I).

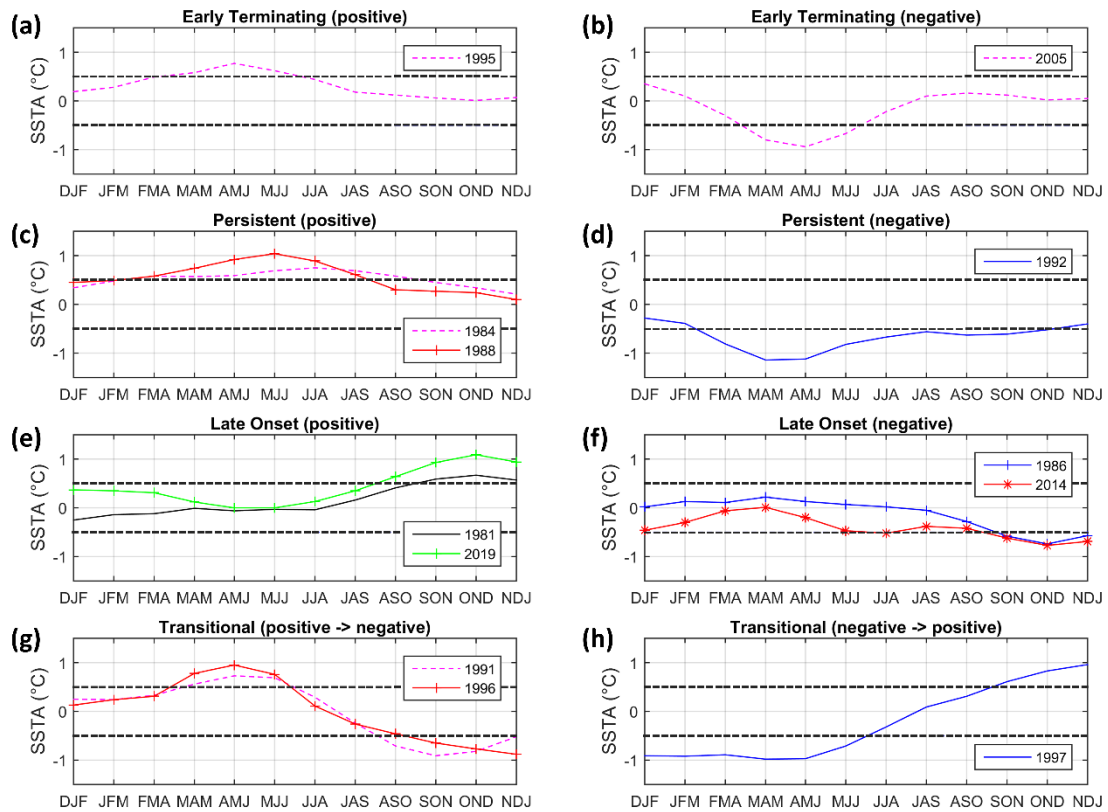


Figure 11 - Temporal evolution of the ATL3 index during the years of Atlantic Niño occurrences between 1980 and 2020, classified as (a) positive early termination, (b) negative early termination, (c) positive persistent, (d) negative persistent, (e) positive late onset, (f) negative late onset, (g) positive transitional, and (h) negative transitional. The dashed black lines represent the sea surface temperature (SST) anomaly thresholds (SSTAs) for positive ($> +0.5^{\circ}\text{C}$) and negative ($< -0.5^{\circ}\text{C}$) events.

The late onset events followed the pattern of development of the Atlantic Niño events already found by other studies, these events were preceded by the relaxation of the equatorial trade winds (Fig. 4). Some works suggest that this type of event can be triggered by internal (Keenlyside and Latif, 2007) and external (Zhang and Han, 2021) processes to the Equatorial Atlantic Ocean. For example, Okumura and Xie (2006) it can be triggered by a secondary and seasonal weakening of the trade winds in the Gulf of Guinea. Zhang and Han (2021) report that the intensity of the Indian Ocean Dipole can affect late onset events, including the strong positive phase event and late onset event that occurred in 2019 (Fig. 2a), which coincided with the strong positive phase event of the Indian Ocean Dipole in 2019, which was considered one of the strongest events since 1979 (Zhang et al., 2021).

For the negative phase and early termination event in 2005, we observed that it was associated with intense positive SSTAs in the NTA and anomalous easterly winds in the equatorial region of the Atlantic, which could be characterized, according to Richter et al. (2013), as a "non-canonical" event (Fig. 5e-h). Negative Atlantic Niño events of the "non-canonical" type are associated with intense positive anomalies in the NTA and/or the positive phase of the AMM (Ruiz-Barradas et al., 2000b; Chiang and Vimont, 2004). In this case, these events can be explained by the wind-evaporation-SST feedback. According to Foltz and McPhaden (2010b) and Vallès-Casanova et al. (2020), positive and early termination events of the Atlantic Niño can be triggered by a negative phase of the AMM in the austral autumn. For example, positive (1995) and negative (2005) early termination events were preceded by negative and positive phases of the AMM, respectively, in the austral autumn (not shown). For persistent events (Fig. 6), easterly wind anomalies were observed in the equatorial region, especially during the negative phases of the Atlantic Niño, in the MAM to MJJ quarters, which were associated with pronounced negative SST anomalies in the ATS.

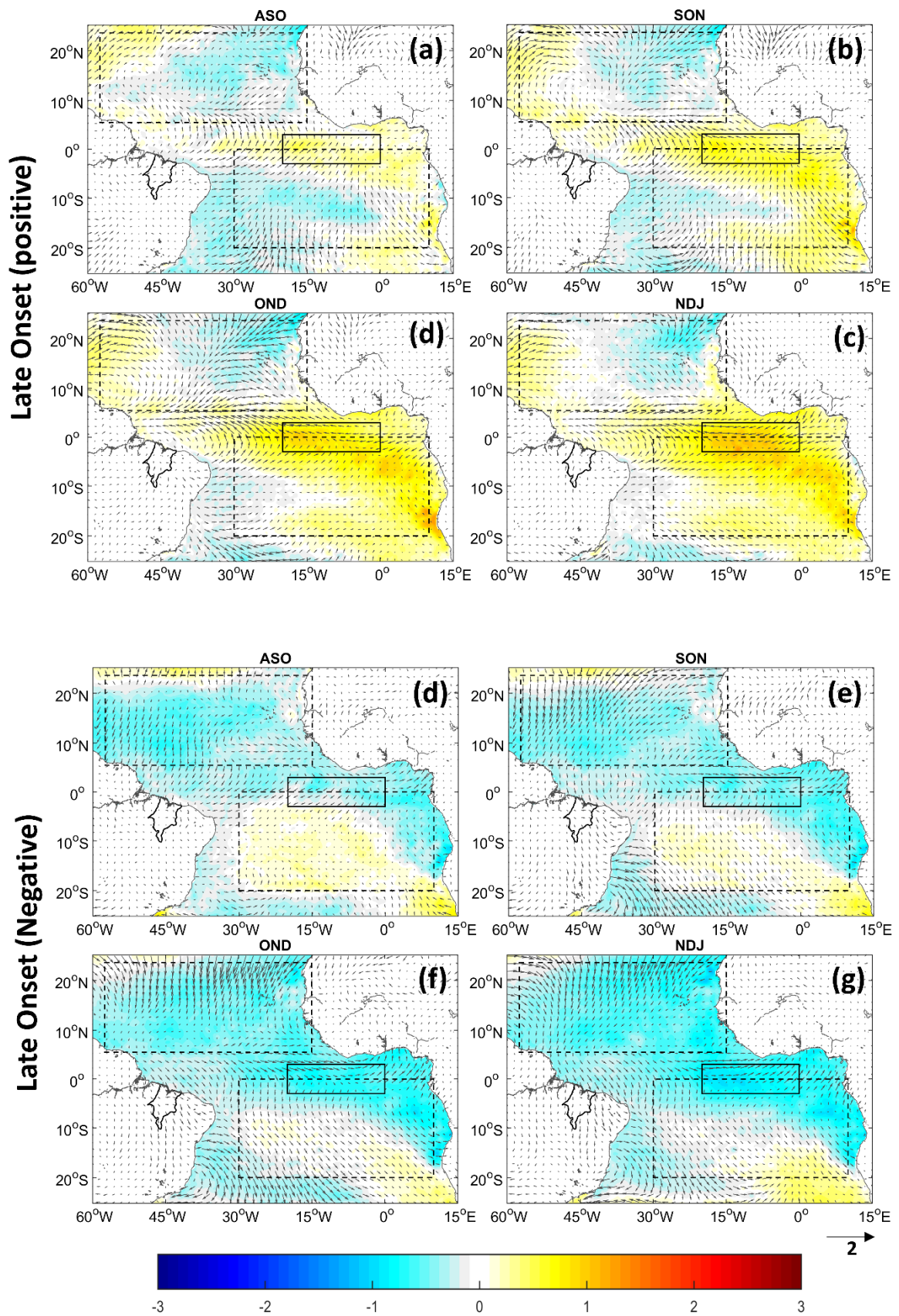


Figure 12 - Spatial evolution of quarterly sea surface temperature (SST) anomalies ($^{\circ}\text{C}$) and 10m wind (m s^{-1}) in the tropical Atlantic during positive (a-d) and negative (e-h) late onset events.

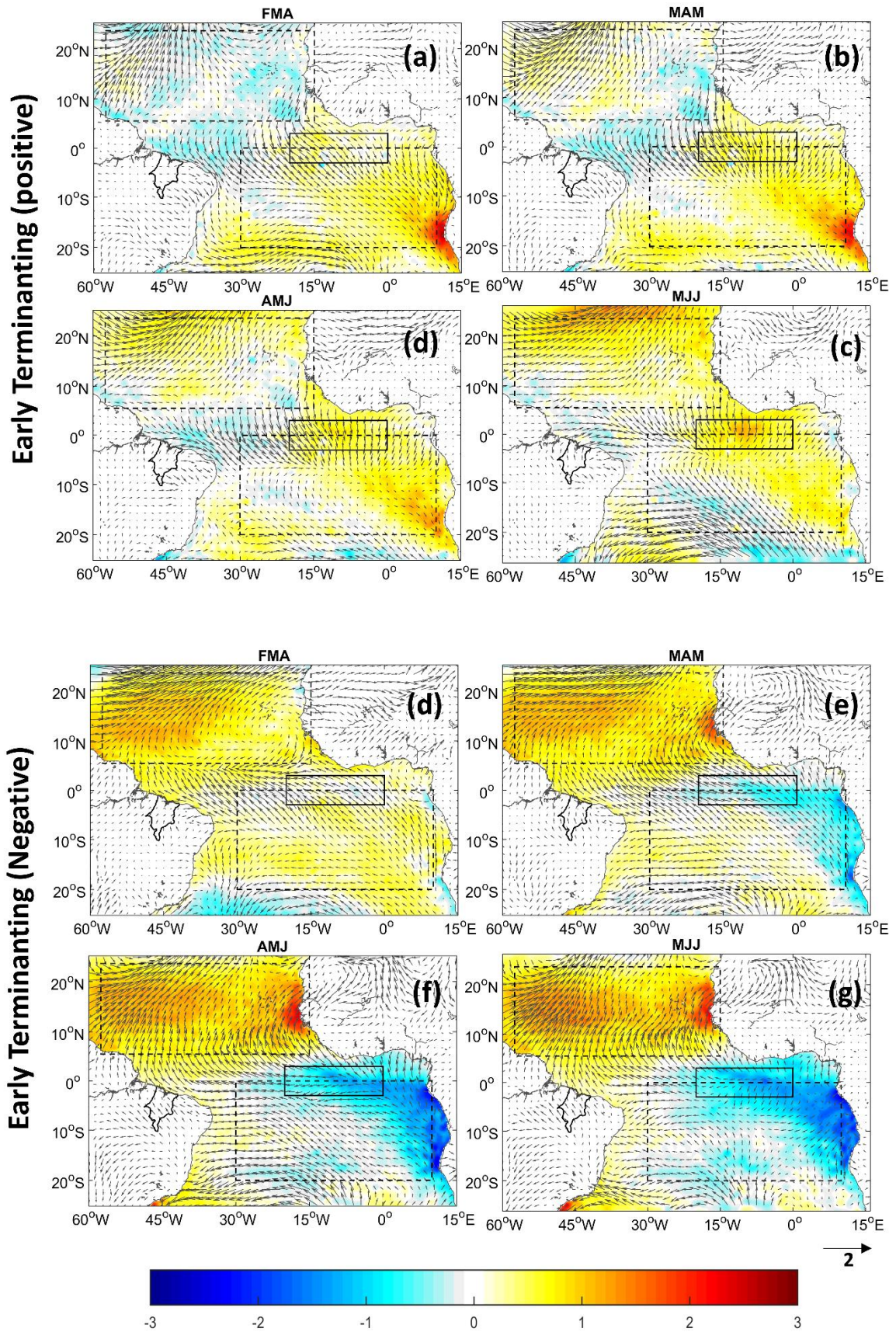


Figure 13 - Spatial evolution of quarterly sea surface temperature (SST) anomalies ($^{\circ}\text{C}$) and 10m wind (m s^{-1}) in the tropical Atlantic during positive (a-d) and negative (e-h) early termination events.

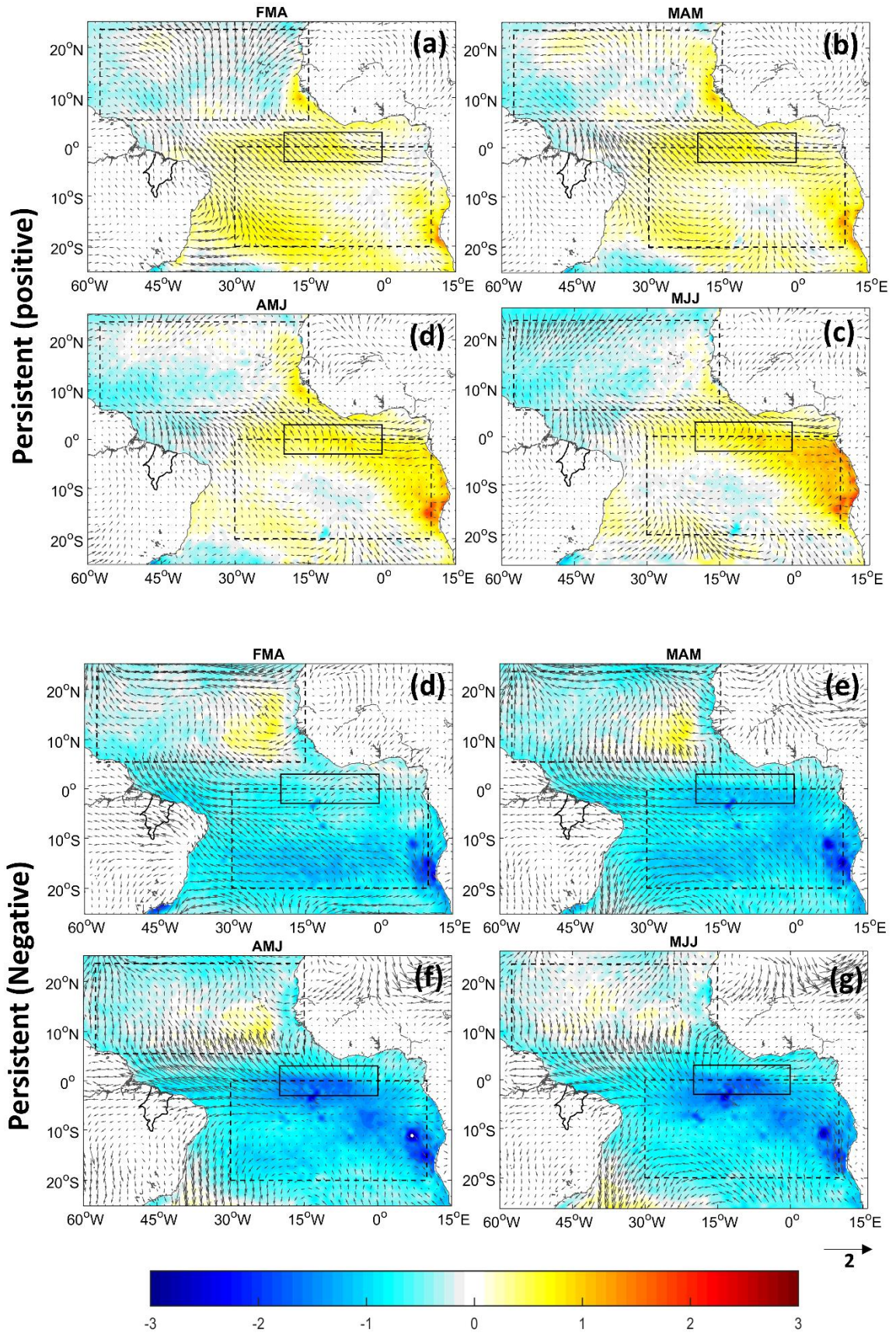


Figure 14 - Spatial evolution of quarterly sea surface temperature (SST) anomalies ($^{\circ}\text{C}$) and 10m wind (m s^{-1}) in the tropical Atlantic during positive (a-d) and negative (e-h) persistent events.

The positive AMM event in 1992 (Fig. 7 e-h) was preceded by a negative and persistent Atlantic Niño event in 1991 (Fig. 7 a-d). We also observed that late onset events, like the one in 2014, can trigger AMM events of the same sign the following year (Fig. S1). This same pattern was observed in late onset Atlantic Niño events in 1986, which initiated an event of the same sign in AMM in 1987 (Fig. S2). This suggests that the phase and intensity of AMM events can influence the temporal evolution of Atlantic Niño events. This relationship between the Atlantic Niño and AMM modes has been widely investigated in previous studies (Plaut and Vautard, 1994; Moron et al., 1998; Huang et al., 1998; Foltz and McPhaden, 2010b; Martín-Rey et al., 2019). The literature suggests that the Atlantic Niño and AMM modes are connected through the meridional displacement of the ITCZ (Servain et al., 1999; Murtugudde et al., 2001; Andreoli and Kayano, 2003). Foltz and McPhaden (2010b) emphasize that the relationship between the Atlantic Niño and AMM occurs through anomalies in surface equatorial winds and their relationships with the meridional and zonal gradients of SST.

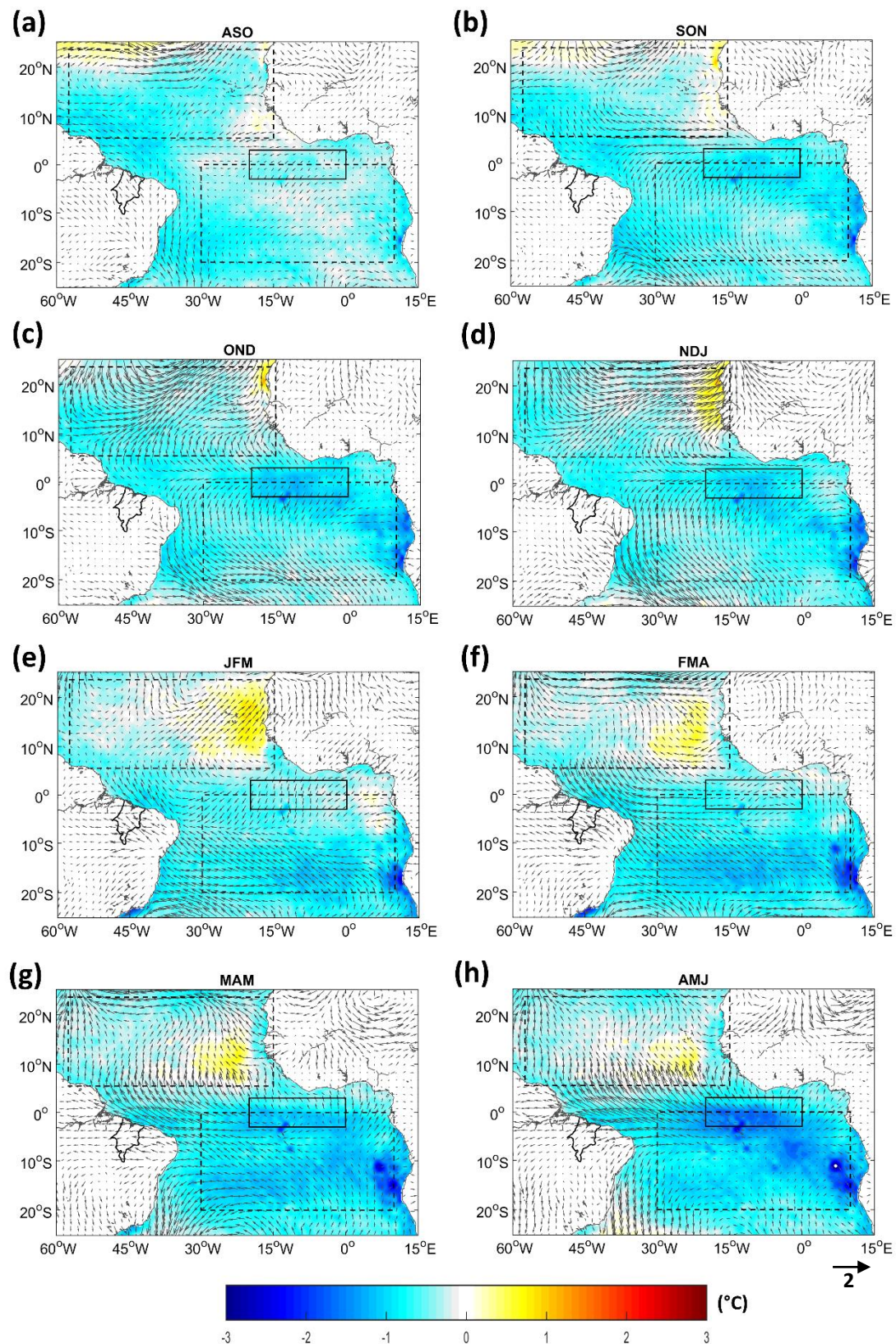


Figure 7 - Evolution of SST anomalies ($^{\circ}\text{C}$) and surface winds (m/s) in the Tropical Atlantic for the negative phase events of the Atlantic Niño occurring in 1991 (a — d) and the AMM

occurring in 1992 (e — h). Spatial domain of the NTA (5.5°N–23.5°N; 57.5°W–15°W), STA (0°–20°S; 30°W–10°E) and ATL3 (3°N–3°S; 20°W–0°E).

We also observed that in transitional events (not shown), characterized by the occurrence of two events of opposite phases in the same year, the secondary peak (occurring from SON to OND) can be triggered by oceanic outflow associated with the South Equatorial Current (Okumura and Xie, 2006). This current flows westward, partly in response to the intensification of easterly winds, along with a shallower thermocline and an intensified equatorial upwelling process east of the basin (Okumura and Xie, 2006). Furthermore, Lübbecke et al. (2014) suggested that a more intense activity of the South Atlantic Subtropical High (SASH) in February may anticipate the formation of the cold tongue of the Equatorial Atlantic, i.e., the negative phase of the Atlantic Niño. On the other hand, a less intense SASH would delay the development of this cold tongue, resulting in a positive Atlantic Niño event (Lübbecke et al., 2014). This SASH activity may be influenced by El Niño events. Rodrigues et al. (2011) show that strong and prolonged El Niño events (weak and short), associated with a heating source in the Eastern (Central) Pacific, trigger the second (third) mode of the Pacific-South America pattern in SON, which consequently leads to a strengthening (weakening) of the SASH. Additionally, Atlantic Niño events can also be triggered by eastward oceanic advection through the propagation of the equatorial Kelvin wave, in the absence of westerly wind anomalies in the austral autumn (MAM; Richter and Tokinaga, 2021).

Regarding precipitation anomalies in different categories of the Atlantic Niño events (Fig. 8), we observed that during the negative phase of the early termination event, the state of Maranhão experienced significant above-average precipitation in the northwest and south regions, with anomalies exceeding +100 mm (Fig. 8d). Typically, the negative phase of the Atlantic Niño is associated with a significant decrease in rainfall in the northeast region (Hounsou-Gbo et al., 2019), as also observed in Maranhão during the negative events of late onset and persistence (Fig. 8b and 8f). The increase in precipitation during the negative phase of the early termination event in the northwest and south regions of the state, even during a positive AMM event, may have resulted from the intensification of moisture transport from the ocean to the continent by equatorial winds (Fig. S3) or from the influence of the La Niña event in 2005 (NOAA, 2021). During positive persistent events, we observed significant positive precipitation anomalies in the western region of the state (Fig. 8e). Conversely, during the negative

phase of the persistent event, we observed significant negative precipitation anomalies practically throughout the state, with a highlight for the western region (Fig. 8f).

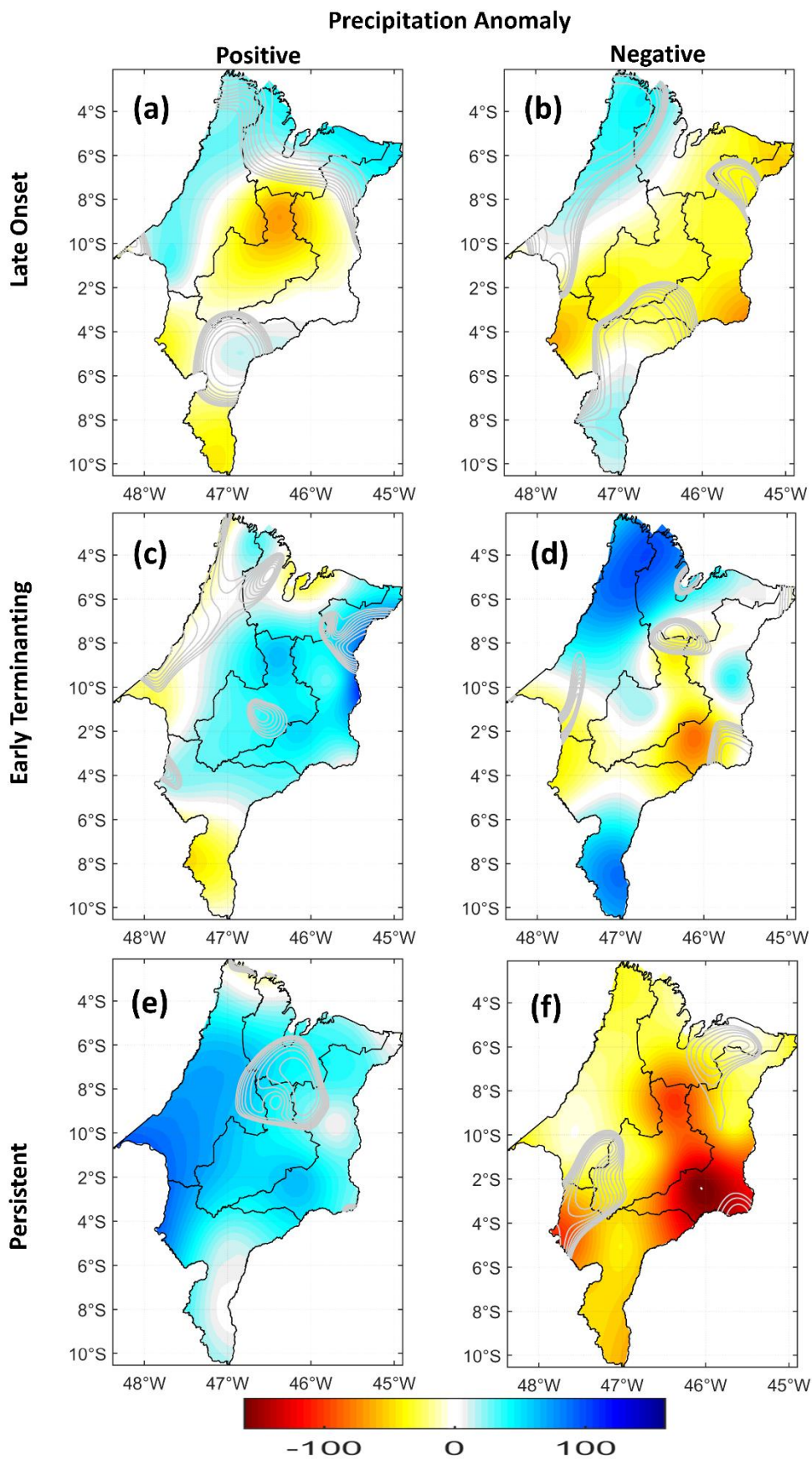


Figure 8 - Average quarterly precipitation anomalies (mm) in the State of Maranhão during positive (first column) and negative (second column) events in years of Atlantic Niño

occurrences of the following types: (a-b) late onset, (c-d) early termination, and (e-f) persistent. Gray lines indicate statistically significant values at the 95% level.

4. Conclusions

In this study, the impact of tropical Atlantic SST on precipitation anomalies in the State of Maranhão was investigated. Analyzing the ATL3 index between 1980 and 2020, 20 Atlantic Niño events were identified, with a dominant scale of 2 to 8 years. There was a significant decrease in events from the 2000s, probably due to the weakening of the Bjerknes feedback and the influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation. However, some positive Atlantic Niño events that occurred outside of this pattern, such as those in 2019 and 2021, indicated the influence of the negative phase of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the potential reactivation of the Atlantic Niño after 19 inactive years (Richter et al., 2022).

The negative early termination event, characterized by positive anomalies of SST in the NTA and positive anomalies of easterly winds, was considered a "non-canonical" event. Furthermore, we observed a relationship between the Atlantic Niño and the AMM, indicating that the intensity of the AMM influences the temporal evolution of Atlantic Niño events and vice versa. The intersection of these modes ultimately influences crucial elements such as SST and inter-hemispheric winds. These factors, in turn, directly impact precipitation patterns in Maranhão. It is noteworthy that during the negative phase of the Atlantic Niño's early termination event, an atypical precipitation trend was observed in the state. In this phase, there was a noticeable increase in precipitation levels, especially in the northwest region. This contrasts with the pattern generally associated with the negative phase of the Atlantic Niño and the positive phase of the AMM, which are typically correlated with reductions in rainfall in the region.

A plausible explanation for this unexpected increase in precipitation during the negative phase of the early termination event may be related to the intensification of moisture flux transported from the ocean to the continent by equatorial winds. Additionally, the possible influence of the La Niña phenomenon that occurred in 2005 may have contributed to this pattern. This analysis highlights the complexity of climate interactions in the Maranhão region and underscores the importance of considering

multiple factors, including local and remote climate modes and extreme events of atmospheric systems, for a more comprehensive understanding of precipitation patterns and climate variability in this area.

In summary, the results reveal that Atlantic Niño events can be distinct based on the generating mechanisms. Additionally, precipitation exhibits different behaviors for the different types of these events. Notably, late onset events demonstrate significant relationships with the northern and southern regions of the state, which play a crucial role in the socio-economic development of the region. Therefore, continuous monitoring and conducting studies related to Atlantic Niño and AMM are essential to deepen the understanding of these variability patterns and thus anticipate possible impacts on the volume and distribution of rainfall in Maranhão. Furthermore, the results of this study have the potential to contribute significantly to agricultural planning in the southern part of the state, as well as to port operations in the north, especially in the Itaqui Port Complex. This complex, classified as the largest port in the Northern Arc, faces frequent challenges during rainy periods, as most bulk solids, such as corn and soybeans, cannot be moved under these conditions. This leads to significant operational delays and consequently substantial financial losses. Therefore, understanding how Atlantic Niño influences rainfall in the state becomes an essential tool in strategic planning.

Acknowledgments

The authors would like to thank CAPES for providing funding support to the project “Use and Development of the Brazilian Earth System Model for the Study of the Ocean-Atmosphere-Cryosphere System in High and Medium Latitudes – BESM/SOAC” (Process 145668/2017–00), the funding support of CNPq to the project “Antarctic Modeling Observation System – ATMOS” (Process 443013/2018-7) and the funding support of FAPEMA/EMAP to the project “Development of a coupled ocean-atmosphere-wave modeling system in the nested domains of the continental shelf of Maranhão-Maranhão Gulf- São Marcos Bay for analysis of the impacts of climate change and areas vulnerable to inundation and rough seas in the Itaqui Port Complex” (Process APP-09097/22). This study was financed in part by the Coordenação de

Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) (Process 88887.499469/2020-00).

References

Andreoli, R. V., and Kayano, M. T. (2003). Evolution of the equatorial and dipole modes of the sea-surface temperature in the Tropical Atlantic at decadal scale. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 83(3–4), 277–285. <https://doi.org/10.1007/s00703-002-0568-4>

Bolfe, É. L., Victória, D. D. C., Contini, E., Bayma-Silva, G., Spinelli-Araujo, L., and Gomes, D. (2016). Matopiba em crescimento agrícola Aspectos territoriais esocioeconômicos. *Revista de política agrícola*, 25(4), 38-62.

Burmeister, K., Brandt, P., and Lübbecke, J. F. (2016). Revisiting the cause of the eastern equatorial Atlantic cold event in 2009. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7), 4777–4789. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2016JC011719>

Campos, E. J. O papel do oceano nas mudanças climáticas globais. *Revista USP*, São Paulo, n. 103, p. 55-66, 2014.

Chang, P., Fang, Y., Saravanan, R., Ji, L., and Seidel, H. (2006). The cause of the fragile relationship between the Pacific El Niño and the Atlantic Niño. *Nature*, 443(7109), 324–328. <https://doi.org/10.1038/nature05053>

Chiang, J. C. H., and Vimont, D. J. (2004). Analogous Pacific and Atlantic Meridional Modes of Tropical Atmosphere–Ocean Variability. *Journal of Climate*, 17(21), 4143–4158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI4953.1>

Chiang, J. C. H., Kushnir, Y. and Giannini, A. (2002). Deconstructing Atlantic intertropical convergence zone variability: influence of the local cross-equatorial sea surface temperature gradient and remote forcing from the eastern equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 107(D1), 4004.

Chiang, J. C. H., Kushnir, Y., and Zebiak, S. E. (2000). Interdecadal changes in eastern Pacific ITCZ variability and its influence on the Atlantic ITCZ. *Geophysical Research Letters*, 27(22), 3687–3690. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999GL011268>

Deppenmeier, A.-L. (2022). The Atlantic Niño weakens. *Nature Climate Change*, 12(9), 780–781. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01460-z>

Dippe, T., Lübbecke, J. F., and Greatbatch, R. J. (2019). A comparison of the Atlantic and Pacific Bjerknes feedbacks: Seasonality, symmetry, and stationarity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 2374–2403. <https://doi.org/10.1029/2018JC014700>.

Folland, C. K., Colman, A. W., Rowell, D. P., and Davey, M. K. (2001). Predictability of Northeast Brazil Rainfall and Real-Time Forecast Skill, 1987-98. *Journal of Climate*, 14, 1937–1958.

Foltz, G. R., Brandt, P., Richter, I., Rodriguez-fonseca, B., Hernandez, F., Dengler, M., Rodrigues, R. R., Schmidt, J. O., Yu, L., Lefevre, N., Da Cunha, L. C., McPhaden, M. J., Araujo Filho, M. C., Karstensen, J., Hahn, J., Martín-Rey, M., Patricola, C. M., Poli, P., Zuidema, P., ... Duha, J. T. (2019). The tropical atlantic observing system. *Frontiers in Marine Science*, 6(APR).
<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00206>

Foltz, G. R., and McPhaden, M. J. (2010a). Abrupt equatorial wave-induced cooling of the Atlantic cold tongue in 2009. *Geophysical Research Letters*, 37(24).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010GL045522>

Foltz, G. R., and McPhaden, M. J. (2010b). Interaction between the Atlantic meridional and Niño modes. *Geophysical Research Letters*, 37(18).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010GL044001>

Giannini, A., Saravanan, R., and Chang, P. (2002). Linking Climate Change to Land Surface Change. *World Resources Institute: Earth Trends*, 419(4), 291.
<https://doi.org/10.1016/S1364>

Hastenrath S., and Heller L. (1977). Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. *Royal Meteorological Society*, 103, 17–92.

Hastenrath, S. (2006). Circulation and teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts. *Progress in Oceanography*, 70(2–4), 407–415.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2005.07.004>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hirst, A. C., and Hastenrath, S. (1983). Atmosphere–ocean mechanisms of climate anomalies in the Angola–tropical Atlantic sector. *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 1146–1157.

Hounsou-Gbo, G. A., Servain, J., Araujo, M., Caniaux, G., Bourlès, B., Fontenele, D., and Martins, E. S. P. R. (2019). SST indexes in the tropical South Atlantic for forecasting rainy seasons in Northeast Brazil. *Atmosphere*, 10(6).
<https://doi.org/10.3390/atmos10060335>

Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C. C., e Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903–995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>

Keenlyside, N. S.; LATIF, M. (2007). Understanding equatorial Atlantic interannual variability. *Journal of climate*, v. 20, n. 1, p. 131-142.

Kushnir, Y., Robinson, W. A., Chang, P., and Robertson, A. W. (2006). The Physical Basis for Predicting Atlantic Sector Seasonal-to-Interannual Climate Variability. *Journal of Climate*, 5949–5970.

Loayza, A. C. V., dos Reis, M. V. S., de Jesus, F. R., Ipolito, A. L. M., and Ribeiro, I. G. (2023). Evolução dos indicadores da produção de soja no Matopiba. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, 21(12), 27824-27845.

Losada, T., Rodríguez-Fonseca, B., Janicot, S., Gervois, S., Chauvin, F., and Ruti, P. (2010). A multi-model approach to the Atlantic Equatorial mode: Impact on the West African monsoon. *Climate Dynamics*, 35(1), 29–43. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0625-5>

Lübbecke, J. F., Burls, N. J., Reason, C. J. C., and McPhaden, M. J. (2014). Variability in the South Atlantic Anticyclone and the Atlantic Niño Mode. *Journal of Climate*, 27(21), 8135–8150. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00202.1>

Lübbecke, J. F., and Mcphaden, M. J. (2013). A comparative stability analysis of atlantic and pacific niño modes. *Journal of Climate*, 26(16), 5965–5980. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00758.1>

Lübbecke, J. F., Rodríguez-Fonseca, B., Richter, I., Martín-Rey, M., Losada, T., Polo, I., e Keenlyside, N. S. (2018). Equatorial Atlantic variability—Modes, mechanisms, and global teleconnections. *WIREs Climate Change*, 9(4), e527. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wcc.527>

Mao, Y., Zou, Y., Alves, L. M., Macau, E. E. N., Taschetto, A. S., Santoso, A., and Kurths, J. (2022). Phase Coherence Between Surrounding Oceans Enhances Precipitation Shortages in Northeast Brazil. *Geophysical Research Letters*, 49(9), e2021GL097647. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL097647>

Marengo, J. A., Torres, R. R., and Alves, L. M. (2017). Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3–4), 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

Martín-Rey, M., Polo, I., Rodríguez-Fonseca, B., Lazar, A., and Losada, T. (2019). Ocean dynamics shapes the structure and timing of Atlantic Equatorial Modes.

Journal of Geophysical Research: Oceans, 124(11), 7529–7544.
<https://doi.org/10.1029/2019JC015030>

Martín-Rey, M., Polo, I., Rodríguez-Fonseca, B., Losada, T., and Lazar, A. (2018). Is There Evidence of Changes in Tropical Atlantic Variability Modes under AMO Phases in the Observational Record? *Journal of Climate*, 31(2), 515–536.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0459.1>

Merle, J., Fieux, M., and Hisard, P. (1980). Annual signal and interannual anomalies of sea surface temperature in the eastern equatorial atlantic ocean. *Oceanography and Surface Layer Meteorology in the B/C Scale*, 77–101.

Moron, V., Vautard, R., and Ghil, M. (1998). Trends, interdecadal and interannual oscillations in global sea-surface temperatures. *Climate Dynamics*, 14(7), 545–569.
<https://doi.org/10.1007/s003820050241>

Moura, A. D., and Shukla, J. (1981). On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 38(12), 2653–2675.

Munnich, M., and Neelin, J. D. (2005). Seasonal Influence of ENSO on the Atlantic ITCZ and equatorial South America. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (21), L21709.
<https://doi.org/10.1029/2005GL023900>

Murtugudde, R. G., Ballabrera-Poy, J., Beauchamp, J., and Busalacchi, A. J. (2001). Relationship between zonal and meridional modes in the tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 28(23), 4463–4466.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2001GL013407>

Nascimento, F. C. A., Braga, C. C., e Araújo, F. R. C. D. (2017). Análise estatística dos eventos secos e chuvosos de precipitação do estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(3), 375–386. <https://doi.org/10.1590/0102-77863230005>

NOAA. (2021). NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL). <https://psl.noaa.gov/>

NUGEO. (2024). Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão, Laboratório de Meteorologia, http://www.nugeo.uema.br/?page_id=81.

Okumura, Y., and Xie, S.-P. (2004). Interaction of the Atlantic Equatorial Cold Tongue and the African Monsoon. *Journal of Climate*, 17(18), 3589–3602.

Okumura, Y., and Xie, S.-P. (2006). Some Overlooked Features of Tropical Atlantic Climate Leading to a New Niño-Like Phenomenon. *Journal of Climate*, 19(22), 5859–5874. <https://doi.org/10.1175/JCLI3928.1>

PETTI, R. H. V. et al. 2001. Estudo de mercado de trabalho como subsídio para a reforma da educação profissional no estado do Maranhão. São Paulo: IEA/SEADE.

Philander, S. G. H. (1984). Unusual conditions in the tropical Atlantic Ocean in 1984. *Nature*, 322, 236–238.

Plaut, G., and Vautard, R. (1994). Spells of Low-Frequency Oscillations and Weather Regimes in the Northern Hemisphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51(2), 210–236. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<0210:SOLFOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<0210:SOLFOA>2.0.CO;2)

Prigent, A., Lübbecke, J. F., Bayr, T., Latif, M., and Wengel, C. (2020). Weakened SST variability in the tropical Atlantic Ocean since 2000. *Climate Dynamics*, 54(5–6), 2731–2744. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05138-0>

Richter, I., Behera, S. K., Doi, T., Taguchi, B., Masumoto, Y., and Xie, S. P. (2014). What controls equatorial Atlantic winds in boreal spring? *Climate Dynamics*, 43(11), 3091–3104. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2170-0>

Richter, I., Behera, S. K., Masumoto, Y., Taguchi, B., Sasaki, H., and Yamagata, T. (2013). Multiple causes of interannual sea surface temperature variability in the equatorial Atlantic Ocean. *Nature Geoscience*, 6(1), 43–47. <https://doi.org/10.1038/ngeo1660>

Richter, I., and Tokinaga, H. (2021). 7 - The Atlantic zonal mode: Dynamics, thermodynamics, and teleconnections. In S. K. Behera (Ed.), *Tropical and Extratropical Air-Sea Interactions* (pp. 171–206). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818156-0.00008-3>

Richter, I., Tokinaga, H., and Okumura, Y. M. (2022). The Extraordinary Equatorial Atlantic Warming in Late 2019. *Geophysical Research Letters*, 49(4), e2021GL095918. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL095918>

Rodrigues, R., Haarsma, R., Campos, E. and Ambrizzi, T. (2011). The Impacts of Inter-El Niño Variability on the Tropical Atlantic and Northeast Brazil Climate. *Journal of Climate* 24(13) pp. 3402-3422. Available at: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/24/13/2011jcli3983>

Ruiz-Barradas, A., Carton, J. A., and Nigam, S. (2000a). Structure of Interannual-to-Decadal Climate Variability in the Tropical Atlantic Sector. *Journal of Climate*, 13(18), 3285–3297.

Ruiz-Barradas, A., Carton, J. A., and Nigam, S. (2000b). Structure of Interannual-to-Decadal Climate Variability in the Tropical Atlantic Sector. *Journal of Climate*, 13(18), 3285–3297. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<3285:SOITDC>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<3285:SOITDC>2.0.CO;2)

Sandwell, D. T. (1987). Biharmonic spline interpolation of geos-3 and seasat altimeter data. *Geophysical Research Letter*, 14(2), 139–142.

Servain, J. ; Picaut, J. ; and Merle, J. (1982). Evidence of remote forcing in the equatorial Atlantic Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 12, 457–463.

Servain, J., and Seva, M. (1987). On relationships between tropical atlantic sea surface temperature, wind stress and regional precipitation indices: 1964-1984. *Ocean-Air Interactions*, 1, 183–190.

Servain, J., Wainer, I., McCreary Jr., J. P., and Dessier, A. (1999). Relationship between the equatorial and meridional modes of climatic variability in the tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 26(4), 485–488.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999GL900014>

Silva, M. N. da, Tereza, A., Bezerra, D. da S., Pereira, L., Eloi, C. M. de A., and Santos, A. L. S. dos. (2017). A seca no Maranhão no período de 2010 a 2016 e seus impactos. *Parcerias Estratégicas*, 22(44), 119–138.

Soares, L. A. M., Parise, C. K., Machado, A. M. B., Carpenedo, C. B., Furtado, T. M. S., Barreto, H. N., Lima, L. G., Sousa, H. L. S. (2023). Influences of strong and moderate ENSO events on the precipitation in Maranhão–Brazil through the western equatorial Atlantic SST anomalies. *Ocean and Coastal Research*, 71, e23043.
<https://doi.org/10.1590/2675-2824072.22057lams>

Tokinaga, H., Richter, I., and Kosaka, Y. (2019). ENSO Influence on the Atlantic Niño, Revisited: Multi-Year versus Single-Year ENSO Events. *Journal of Climate*, 32(14), 4585–4600. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0683.1>

Torralba, V., Rodríguez-Fonseca, B., Mohino, E., and Losada, T. (2015). The non-stationary influence of the Atlantic and Pacific niños on north Eastern South American rainfall. *Frontiers in Earth Science*, 3.
<https://doi.org/10.3389/feart.2015.00055>

Torrence, C., and Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61–78.

Utida, G., Cruz, F. W., Etourneau, J., Bouloubassi, I., Schefuß, E., Vuille, M., Novello, V. F., Prado, L. F., Sifeddine, A., Klein, V., Zular, A., Viana, J. C. C., e Turcq, B. (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific Reports*, 9(1), 1698.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>

Vallès-Casanova, I., Lee, S. K., Foltz, G. R., and Pelegrí, J. L. (2020). On the Spatiotemporal Diversity of Atlantic Niño and Associated Rainfall Variability Over West Africa and South America. *Geophysical Research Letters*, 47(8).
<https://doi.org/10.1029/2020GL087108>

Wang, R., He, J., Luo, J.-J., and Chen, L. (2024). Atlantic warming enhances the influence of Atlantic Niño on ENSO. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL108013. <https://doi.org/10.1029/2023GL108013>

Wang, C. (2019). Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective. *Climate Dynamics*, 53(7–8), 5119–5136. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04930-x>

Wilks, D. S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. San Diego, CA: Academic Press. 627p. (International Geophysics Series 91) ISBN 978-0-12-751966-1

Xie, S. P., and Carton, J. A. (2004). Tropical atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts. In *Geophysical Monograph Series* (Vol. 147, pp. 121–142). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1029/147GM07>

Zebiak, S. E. (1993). Air–Sea Interaction in the Equatorial Atlantic Region. *Journal of Climate*, 6(8), 1567–1586. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1567:AIITEA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1567:AIITEA>2.0.CO;2)

Zhang, L., HAN, W. and HU, Z.-Z. (2021). Inter-basin and multi-time scale interactions in generating the 2019 extreme indian ocean dipole. *J. Clim.*, v. 34, p. 4553 – 4566.

Zhang, L., HAN, W. (2021). Indian Ocean Dipole leads to Atlantic Niño. *Nat Commun.*, v. 12, p. 5952.