



ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA E DE DISCURSO

*South Atlantic Convergence Zone: a systematic and discourse
review*

*Zona de Convergencia del Atlántico Sur: una revisión
sistemática y del discurso*

Ian Verdan 

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais (INPE)
ianverdan2@gmail.com

Resumo: A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é o principal sistema atmosférico responsável pela precipitação de verão na região central do Brasil, estando intrinsecamente relacionado com extremos de precipitação e desastres hidrometeorológicos. Com cerne nesse cenário, o presente artigo tem por objetivo apresentar a principal contribuição que a literatura recente trás sobre a temática, considerando aspectos como variabilidade climática, impactos e sua previsibilidade. A metodologia incluiu a busca por palavras-chave em artigos revisados por pares na base de dados da CAPES, entre 2018 e 2023. Através desta 21 artigos foram selecionados. Os resultados indicam que a maioria dos estudos associam a ZCAS à variabilidade, foram identificados padrões de circulação atmosférica distintos em diferentes níveis atmosféricos. O artigo analisa também a distribuição geográfica dos estudos, destacando a predominância de autores brasileiros. A discussão dos resultados apresentados nos artigos revelou tendências significativas nos padrões de circulação atmosférica e distribuição temporal dos episódios de ZCAS, os quais são responsáveis por 56% da precipitação observada no mês de março, na região Sudeste do Brasil, estando associados a eventos extremos e desastres, como inundações e deslizamentos de terra. Dessa forma, o estudo contribui para a compreensão dos mecanismos que governam a ZCAS e seus impactos, fornecendo uma base sólida para futuras investigações e aprimoramento de políticas públicas de mitigação de desastres naturais relacionados a este fenômeno climático, considerando uma abordagem abrangente e multidisciplinar.

Palavras-chave: ZCAS. Desastres. Revisão de literatura. Precipitação. Impacto.

Abstract: The South Atlantic Convergence Zone (SACZ) is the main atmospheric system responsible for summer precipitation in central Brazil, intrinsically linked to precipitation extremes and hydrometeorological disasters. Within this context, the present article aims to present the main contributions of recent literature on this topic, considering aspects such as climatic variability, impacts,

and predictability. The methodology included a search for keywords in peer-reviewed articles from the CAPES database, covering the period from 2018 to 2023. Through this process, 21 articles were selected. The results indicate that most studies associate the SACZ with variability, identifying distinct atmospheric circulation patterns at different atmospheric levels. The article also examines the geographical distribution of the studies, highlighting the predominance of Brazilian authors. The discussion of the results presented in these articles revealed significant trends in atmospheric circulation patterns and the temporal distribution of SACZ episodes, which account for 56% of the observed precipitation in March in southeastern Brazil. These episodes are associated with extreme events and disasters such as floods and landslides. Thus, the study contributes to understanding the mechanisms that govern the SACZ and its impacts, providing a solid foundation for future investigations and the enhancement of public policies aimed at mitigating natural disasters related to this climatic phenomenon, emphasizing a comprehensive and multidisciplinary approach.

Keywords: SACZ. Disasters. Literature review. Precipitation. Impact.

Resumen: La Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) es el principal sistema atmosférico responsable de las precipitaciones estivales en la región central de Brasil, intrínsecamente relacionado con extremos de precipitación y desastres hidrometeorológicos. En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo destacar las principales contribuciones de la literatura reciente sobre este tema, considerando aspectos como la variabilidad climática, los impactos y su previsibilidad. La metodología incluyó una búsqueda de palabras clave en artículos revisados por pares en la base de datos de CAPES, entre 2018 y 2023. De esta búsqueda se seleccionaron 21 artículos. Los resultados indican que la mayoría de los estudios asocian la ZCAS con la variabilidad climática. Además, se identificaron patrones de circulación atmosférica distintos en diferentes niveles durante los episodios de la ZCAS. El autor también analiza la distribución geográfica de los estudios, destacando la predominancia de autores brasileños. La discusión de los resultados presentados en los artículos reveló tendencias significativas en los patrones de circulación atmosférica y la distribución temporal de los episodios de la ZCAS. Estos episodios son responsables del 56% de las precipitaciones observadas en marzo en la región Sudeste de Brasil y están asociados con eventos extremos y desastres, como inundaciones y deslizamientos de tierra. De esta manera, el estudio contribuye a una mejor comprensión de los mecanismos que rigen la ZCAS y sus impactos, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y para la mejora de las políticas públicas destinadas a mitigar los desastres naturales relacionados con este fenómeno climático, adoptando un enfoque integral.

Palabras clave: ZCAS. Desastres. Revisión de literatura. Precipitación. Impacto.

Submetido em: 12/09/2024

Aceito para publicação em: 06/01/2025

Publicado em: 05/02/2025

1. INTRODUÇÃO

No início dos anos 90 o sistema meteorológico das zonas de convergências fora identificado (KODAMA, 1993, 1992), sendo descoberto que a taxa de evaporação em algumas regiões era menor que a precipitação, com a presença de um corredor com correntes convergentes, o qual era responsável por transportar vapor de água para essa área. Várias regiões com feições similares foram identificadas entre 5° e 25° de latitude, em ambos os hemisférios, com três principais: Zona Frontal de Baiu, Zona de Convergência do Pacífico Sul e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A primeira se localiza no leste da Ásia, entre os meses de maio e julho, responsável por grande parte da precipitação anual, com uma média de 400 mm por mês (KODAMA, 1992). A segunda, se localiza no oceano Pacífico Sul, sobre a região da Polinésia e a última sobre o centro do Brasil, na América do Sul e oceano Atlântico adjacente (KODAMA, 1992).

Sua principal diferença em relação a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) está na sua localização geográfica e na sua sazonalidade, uma vez que a ZCIT persiste durante todo o ano, apenas migrando conforme a mudança dos solstício de verão, enquanto as zonas de convergências são ativas apenas no verão e não se posicionam ao redor da linha do Equador (KODAMA, 1992). Em relação a sistemas frontais, a principal diferença está na sua movimentação, no gradiente de temperatura e na sua associação com algum sistema de baixa pressão, coisas que não são observadas nos episódios de ZCAS.

A ZCAS exerce um papel crucial no regime de precipitação do Sistema de Monções da América do Sul (SMAS), sendo responsável por aproximadamente 25% do volume de chuvas no Sudeste do Brasil entre os meses de outubro e abril, enquanto em seu auge, corresponde por 56% em março e 41% em janeiro (NIELSEN et al., 2019). Devido a isso, é comum que ela esteja associada a eventos extremos de precipitação ou desastres naturais, segundo Carvalho et al. (2002) cerca de 30% dos eventos extremos de precipitação observados no estado de São Paulo, entre os anos de 1979 e 1996, estavam associados a ocorrências de ZCAS intensas, sendo maior a concentração (35%) quando esses eventos estão sobre o continente. No que tanque a ocorrência de desastre naturais, segundo Da Fonseca Aguiar e Cataldi (2021), a probabilidade média de ocorrência de desastres, dada a presença da ZCAS no Sudeste do Brasil, foi de 24% entre os anos de 1995 e 2016, com 41% para enxurradas e 30% para

inundações. Esses resultados demonstram a vulnerabilidade do Sudeste brasileiro associada a ocorrência de ZCAS.

Na contramão, a ausências de episódios de ZCAS também deflagra inúmeras consequências ambientais e sociais, como o observado no ano de 2014, quando a ausência do sistema, em resposta a uma alta pressão fixada por 45 dias sobre o oceano Atlântico Sul, na altura da região Sudeste do Brasil, deixou o ar mais seco e estável, como um bloqueio atmosférico, impedindo a formação do corredor de umidade característico da ZCAS (MARENGO et al., 2015). Em decorrência o período foi marcado por uma anomalia de precipitação negativa, levando a redução do nível de água dos reservatórios e um quadro de crise hídrica (MARENGO et al., 2015). Esse cenário evidencia a relevância dos episódios de ZCAS no regime pluviométrico da região Sudeste, com consequências para o consumo urbano, agrícola, industrial e para a geração de energia elétrica, bem como para a deflagração de desastres ou a desestruturação de sistemas urbanos e produtivos.

Ao longo do tempo a identificação de episódios de ZCAS apresentou uma evolução por vias técnicas e operacionais, inicialmente, em 1995 eles começaram a serem identificados nas cartas sinóticas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), porém até o ano de 2005 essa identificação era baseada somente em imagens de satélite (ROSA et al., 2020), pois a circulação atmosférica específica dos episódios ainda não tinha sido explorada. Somente no início dos anos 2000 que esse campo começou a ser estudado, inicialmente direcionado para a radiação de onda longa (OLR) (CARVALHO et al., 2002) e posteriormente para a circulação atmosférica (CARVALHO et al., 2004; FERREIRA et al., 2004).

Segundo Carvalho et al. (2004) os ventos em baixos níveis atmosféricos modularam as variações intrazonais da ZCAS sobre a região norte do Brasil, entre 1979 e 1996, com os episódios mais intensos relacionados a regimes de ventos provindos de oeste. Ferreira et al. (2004) encontraram maior variabilidade temporal de ocorrência de episódios de ZCAS e a intensificação da atividade convectiva sobre o continente em anos de La Niña, para os meses de verão, no período de 1980 a 2000. Essa compreensão mais aprofundada é fundamental para aprimorar não apenas a previsão meteorológica, mas também subsidiar políticas de adaptação e mitigação dos impactos associados a esses eventos climáticos extremos.

Os estudos de Grimm e Tedeschi (2009), Grimm (2004) e Drummond e Ambrizzi (2005) fornecem uma abordagem integrada para a compreensão dos complexos padrões climáticos

na América do Sul, particularmente em relação ao impacto do El Niño–Southern Oscillation (ENSO) para a precipitação e o Sistema Monçônico da América do Sul (SMAS). Grimm e Tedeschi (2009) destacaram a influência do ENSO na ocorrência de eventos extremos de precipitação em diversas regiões do SMAS, enfatizando a sazonalidade desses impactos durante a estação chuvosa. Por sua vez, Grimm (2004) aprofunda a compreensão dos efeitos do La Niña (LN) no sistema de monções de verão, com mudanças intra-sazonais e variações regionais complexas, particularmente no Brasil. Enquanto isso, Drumond e Ambrizzi (2005) contribuem para uma análise mais abrangente ao examinar a variabilidade inter-ENSO e sua relação com padrões de precipitação dipolar, destacando a associação de eventos de ZCAS com LN. A integração destas conclusões reforça a importância de considerar não apenas os impactos isolados do EN e da LN, mas também as complexas interações temporais e regionais que moldam a variabilidade climática na América do Sul.

Estudos conduzidos por Tedeschi et al. (2013), Bombardi et al. (2014) e Ham et al. (2021) contribuem para a compreensão das interações entre o ENSO e o clima sul-americano. Tedeschi et al. (2013) analisam os tipos ENSO, canônico e Modoki, enfatizando suas influências distintas na precipitação e na circulação atmosférica na América do Sul durante as estações, obtendo como resultado um aumento (diminuição) da precipitação na Bacia do Prata e uma diminuição (aumento) sobre o norte da América do Sul durante todas as estações durante o EN Canônico (LN). Bombardi et al. (2014) concentram-se na relação entre as anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) do Atlântico Sul e a precipitação durante períodos neutros do ENSO, com a presença do Dipolo do Atlântico Sul (SAD) e seu impacto significativo na ZCAS, apresentando um aumento da precipitação sobre o Sudeste do Brasil em episódios de ZCAS associados a ciclones extratropicais. Ham et al. (2021) investigaram as interações bidirecionais entre a variabilidade do oceano Atlântico Sul, particularmente o SAD, e o ENSO, destacando seu papel na modulação dos padrões de precipitação ao longo da ZCAS, uma vez que o aumento da precipitação leva a uma superfície anômala a leste que reduz a TSM sobre o oceano Atlântico equatorial, modula a circulação de Walker e favorece o desenvolvimento do EN. Juntos, esses estudos fornecem informações valiosas sobre a intrincada dinâmica que molda o clima sul-americano, melhorando nossa capacidade de prever e interpretar os impactos climáticos do ENSO na região, uma vez que considera suas influências nos episódios de ZCAS e na precipitação local.

Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo apresentar a principal contribuição que a literatura recente traz sobre a ZCAS, com cerne em aspectos como variabilidade climática, impactos e previsibilidade. Visando por meio de uma revisão da literatura, observar os principais conceitos associados ao fenômeno analisado, assim como as lacunas e tendências para futuros trabalhos, contribuindo para o corpo da literatura existente, ao fornecer uma visão abrangente das estruturas e conceitos aplicados no estudo da ZCAS.

2. METODOLOGIA

Pautada na revisão de literatura, a metodologia do presente trabalho, buscou trazer uma atualização sobre o que tem sido publicado sobre a ZCAS em artigos e periódicos nacionais e internacionais, a busca por artigos científicos foi desenvolvida na base de dados da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), sendo as seguintes palavras-chave pesquisadas: “Zona de Convergência do Atlântico Sul” e “South Atlantic Convective Zone”, além de suas respectivas abreviações “ZCAS” e “SACZ”. A pesquisa foi finalizada no dia 08 de abril de 2024.

A decisão de incluir ou excluir estudos na revisão da literatura foi determinada de acordo com cinco critérios, os quais estão descritos na Tabela 1, foram incluídos todos os artigos acadêmicos revisados por pares que contenham os termos buscados no título ou nas palavras-chave e foram publicados entre os anos de 2018 e 2023, em caso de periódicos sem palavras-chave a busca foi feita no resumo. Artigos de periódicos que não foram revisados por pares, anais de congressos e capítulos de livros foram desconsiderados, assim como artigos em outros idiomas que não sejam português e inglês.

A metodologia adotada opta pela seleção de artigos científicos dentro de um recorte específico, pois está otimiza a leitura e revisão dos trabalhos, tendo em consideração o tempo para a realização da mesma, dessa forma, é de se esperar que alguns trabalhos não sejam contemplados e que outros sejam mais aprofundados. Além disto, o recorte temporal atribui quantidades homogêneas de anos antes, durante e depois da pandemia de SARS-CoV-2, a qual, refletiu em uma redução das publicações anuais.

Tabela 1- Critérios para a seleção de artigos.

Critérios para a seleção de artigos	Decisão
Artigos acadêmicos	Incluído
Conter um dos termos pesquisados no título ou palavras-chave	Incluído
Publicados entre 2018 e 2023	Incluído
Revisados por pares	Incluído
Escritos em português ou inglês	Incluído

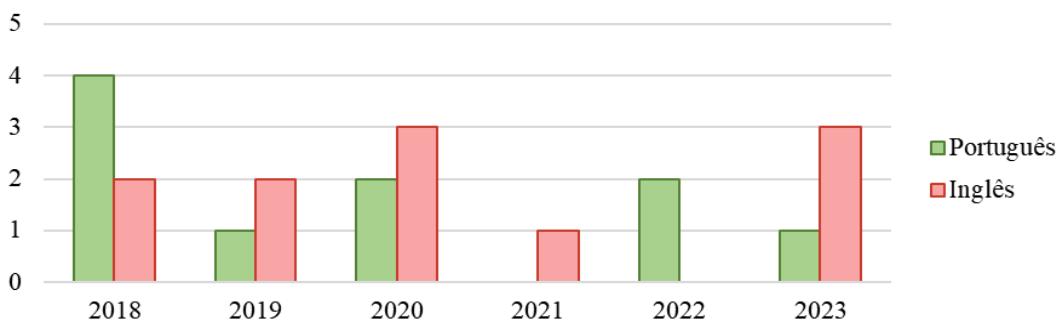
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Posteriormente os artigos selecionados foram lidos e agrupados em três eixos temáticos, para otimizar e facilitar a apresentação dos resultados apresentados, com a análise do tópico mais relevante, à exceção da ZCAS. Sendo os seguintes grupos: variabilidade climática, estudos de casos e impactos dos episódios de ZCAS. Por fim, uma seção sobre a relação entre a ZCAS e a mudança climática foi inserida, pois a revisão bibliográfica não encontrou nenhum trabalho que abordasse esse tema, dentro dos critérios de seleção.

3. RESULTADOS

Com a busca por termos na CAPES foram encontrados dez artigos em português e onze em inglês, totalizando 21 artigos que contemplaram todos os requisitos necessários para a seleção. Os anos com a maior concentração de artigos foram 2018 e 2020, com seis e cinco artigos, respectivamente, na contramão, no ano de 2021 apenas um artigo foi selecionado, podendo ser um impacto da pandemia de SARS-CoV-2 na produção científica (Figura 1). Além desses 21 trabalhos selecionados uma nota técnica foi adicionada, desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) no ano de 2019, junto a trabalhos clássicos de períodos anteriores, porém esses não são incluídos nas análises a seguir.

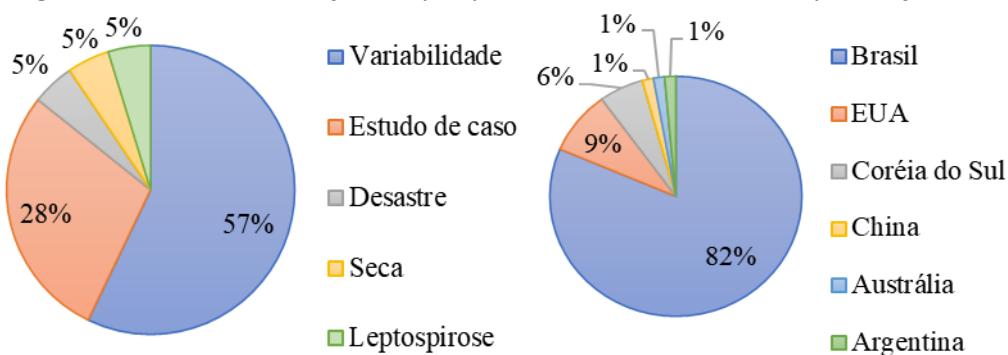
Figura 1- Distribuição dos artigos selecionados por ano e idioma de origem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Como resultado doze trabalhos associavam a ZCAS com a variabilidade climática, nas mais diferentes escalas de análise, esse foi tema mais frequente, com mais de 50% dos trabalhos, o segundo foram os estudos de caso, concentrando seis artigos, em suma maioria com análise de eventos extremos de precipitação em decorrência de episódios de ZCAS, e por fim os três últimos temas, todos com 1 artigo em cada, sendo os três: desastres, eventos de secas e casos de leptospirose, os quais foram agrupados em impactos da ZCAS, porém sem caráter unificador, conforme pode ser observado na Figura 2a.

Figura 2- (a) Distribuição dos artigos selecionados por eixos temáticos e (b) origem dos autores dos artigos, com base na instituição ao qual pertenciam no momento de publicação do mesmo.



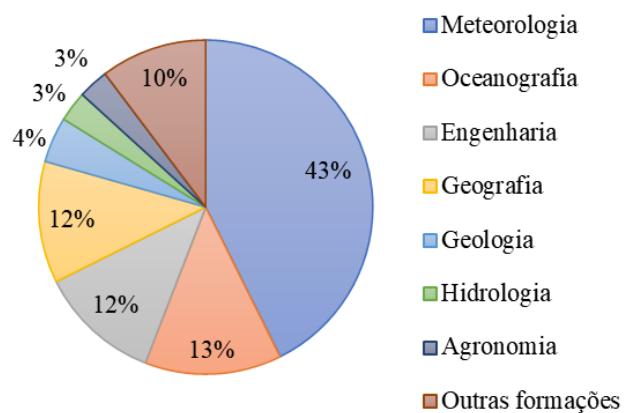
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nos 21 artigos científicos selecionados, um total de 70 autores contribuíram com seus conhecimentos e pesquisas. Desse total 57 estavam associados a instituições brasileiras, as mais relevantes foram o INPE, a USP e a UFRJ, aglutinando oito, sete e sete autores em cada, respectivamente. Além desses também foi relevante a presença de autores norte-americanos, com 9% do total, com destaque para a University of California (Figura 2b). A Coréia do Sul também apresentou um número significativo de autores, porém todos estavam em

colaboração em um mesmo artigo. Importante ressaltar que os brasileiros representam 66,7% dos autores de publicações em inglês, destacando o papel significativo desempenhado no cenário acadêmico internacional.

Em relação a formação acadêmica dos autores, a maioria deles são meteorologistas, representando um total de 43%, enquanto áreas como Oceanografia, Engenharia e Geografia possuem uma menor expressividade, com pouco menos de dez autores em cada formação (Figura 3). Ainda foi observado a presença de geólogos, hidrólogos e agrônomos, além de outras formações com apenas um representante em cada. Revelando em suma maioria, a contribuição de meteorologistas nos trabalhos elaborados sobre a ZCAS nesse período.

Figura 3- Distribuição dos artigos selecionados por área de formação dos autores.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A seguir será apresentada uma discussão detalhada com os principais resultados apresentados em cada seção temática, conforme representado na Figura 2a. Trazendo inicialmente uma discussão sobre os impactos dos episódios de ZCAS, afim de apresentar como o sistema humano é afetado pelos eventos, elucidando sua relevância. Posteriormente há um aprofundamento em vias atmosféricas, para que se possa entender como esse sistema se configura e se há padrões favoráveis ou não há ocorrência de impactos e desastres.

4. DISCUSSÃO

4.1. Impactos da ZCAS

Por estar associada a eventos extremos de precipitação, os episódios de ZCAS desempenham um papel essencial no padrão de precipitação, contribuindo com

aproximadamente 41% do volume de chuvas no Sudeste do Brasil no mês de janeiro, enquanto no mês de março esse valor aumenta para 56% (NIELSEN et al., 2019). Em resposta a essa concentração, cerca de 30% dos eventos extremos de precipitação no estado de São Paulo, entre os anos de 1979 e 1996, foram associados a episódios intensos de ZCAS, com uma proporção ainda maior, de 35%, quando esses eventos ocorrem sobre o continente (Carvalho et al., 2002). Dessa forma, pode-se afirmar que a presença da ZCAS aumenta a probabilidade de ocorrência de desastres, de acordo com Da Fonseca Aguiar e Cataldi (2021), entre 1995 e 2016, essa probabilidade foi de 24% para desastres de maneira geral, com 41% somente para enxurradas e de 30% para inundações, comunicando com os resultados obtidos por Carvalho et al. (2002).

Entre os anos de 2013 e 2017, de um total de 62 episódios de ZCAS, 28 deflagraram desastres naturais no estado de São Paulo, desse total dez episódios podem ser considerados compostos, envolveram a atuação de ZCAS e complexos convectivos de mesoescala (SILVA; YNOUE, 2023). A análise desses dez eventos compostos mostrou que os mais fortes acontecerem em baixos níveis atmosféricos, com uma configuração favorável ao fortalecimento da ZCAS, com convergência em baixos níveis, movimento ascendente em toda a coluna atmosférica e presença de valores elevados de precipitação (SILVA; YNOUE, 2023). Outro estudo para o estado de São Paulo mostrou através de um estudo de caso, a presença de um vórtice ciclônico próximo ao litoral do estado de Santa Catarina, o qual intensificou a convergência de ar na região da ZCAS e a velocidade ascendente por meio de uma frente fria, deslocando o vórtice até o Triângulo Mineiro, resultado em 192 mm de precipitação em Cruzeiro – SP no dia três de janeiro de 2000 e 522 mm durante cinco dias no município de Pindamonhangaba – SP (BRASILIENSE et al., 2018).

Já entre os anos de 2013 e 2014 foram observadas 25 ocorrências de inundações no município de Petrópolis, na região serrana do estado do Rio de Janeiro, segundo dados do INEA, desse total 48% esteve associada a atuação de ZCAS, com 28% para frente frias e 24% para complexos convectivos de mesoescala (DA SILVA et al., 2019). Ambos os estudos mostraram o potencial deflagrador de desastres marcado pela combinação de episódios de ZCAS com outras formações atmosféricas, como complexos convectivos de mesoescala, frente frias e vórtices ciclônicos, algo que pode se tornar mais frequente em respostas às mudanças climáticas.

Os eventos meteorológicos descritos nos estudos de Silva et al., (2020), Coelho e Nunes (2020) e Lyra e Arraut (2023) revelam uma variedade de padrões atmosféricos que influenciam as condições climáticas de diferentes episódios de ZCAS, mostrando que apesar da existência de uma configuração específica, alguns eventos apresentam variações. O primeiro estudo destaca a ocorrência de eventos de precipitação extrema, selecionados pelo percentil 99 (P99), no período de outubro a abril de 2006 a 2017, em três municípios do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, Ibirité e Sete Lagoas, segundo os resultados esses eventos extremos estiveram acompanhados por anomalias de umidade específica no Paraguai dois dias antes dos eventos, a qual se moveu em direção ao estado de São Paulo, atraindo a convergência, além de padrões anômalos de circulação ciclônica em altos níveis atmosférico sobre o Uruguai (SILVA et al., 2020).

Já o segundo estudo analisa três episódios de ZCAS distintos, o primeiro ocorreu entre 14 e 15 de fevereiro de 2018, o posterior deu-se entre 06 e 07 de fevereiro de 2019 enquanto o último entre 08 a 09 de abril de 2019, ambos foram caracterizados pela atuação do VCAN e da AB em suas posições climatológicas, passagem de frentes frias e do JBN, deflagrando valores de precipitação superiores a 100 mm em 24 horas (COELHO; NUNES, 2020).

Por fim, o estudo desenvolvido por Lyra e Arraut (2023) foca em eventos específicos ocorridos em janeiro de 2016, destacando a persistência de movimentos ascendentes na “periferia” oeste do VCAN, com convergência e valores elevados de índices de instabilidade atmosférica, com influência na distribuição espacial da temperatura e formação de nuvens de precipitação. Ao examinar esses eventos em diferentes regiões e períodos, fica claro que, apesar da existência de configurações atmosféricas específicas, há uma notável variedade de padrões e fenômenos que influenciam as condições climáticas presentes em episódios de ZCAS, porém é evidente a persistência de sistemas como VCAN e AB em todos os casos.

Dutra et al. (2018) ofereceram uma análise detalhada da relação entre eventos de ZCAS e casos de leptospirose no estado de Minas Gerais, usando dados do DataSUS entre os anos de 1998 a 2012. Os resultados mostram a distribuição da doença e sua relação com a ocorrência de ZCAS, cujos eventos de alta frequência concentram 70% das inundações e 193 casos de leptospirose, enquanto em eventos de frequência média e baixa, foram registrados 101 e 143 casos, respectivamente (DUTRA et al., 2018).

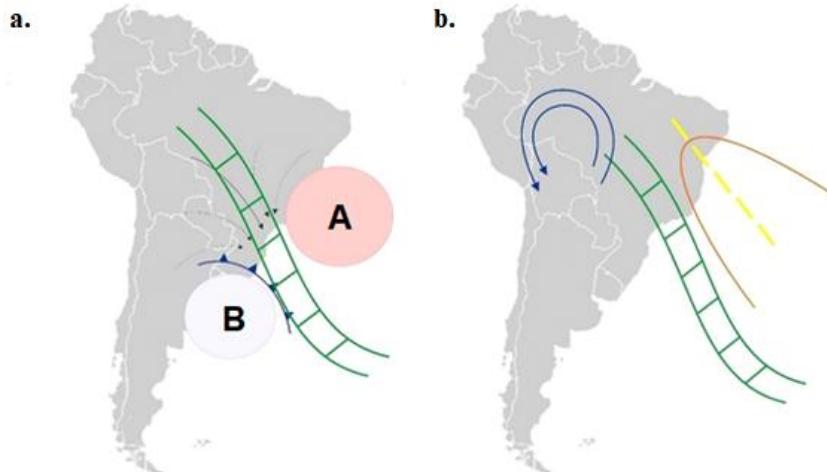
Na contramão ao apresentado, Correia Filho et al. (2018) examinaram a influência da

precipitação e da variabilidade climática sobre o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) (Enhanced Vegetation Index), que é um índice que quantifica a densidade e a saúde da vegetação em uma determinada área com base em dados de sensoriamento remoto, com o qual constataram que quando os episódios de ZCAS estão em sua posição mais a norte há um aumento da precipitação e melhora nos valores do EVI (CORREIA FILHO et al., 2018). Esses resultados mostram a relevância da ZCAS, pois quando presente em excesso pode deflagrar problemas para sistemas humanos, como inundações ou aumento de casos de leptospirose, no entanto, em alguns momentos sua ausência também gera consequências, como a redução da saúde da vegetação ou crise hídrica.

4.2. Análise sinótica da ZCAS

Como o cenário exposto, abordar a circulação atmosférica característica dos episódios de ZCAS pode ser um caminho para compreender a gênese desses impactos e como distintos padrões atmosféricos refletem em desastres dispare. Dessa forma, será apresentada a circulação atmosférica característica da ZCAS, a qual apresenta, em altos níveis (250 hPa) a presença da Alta da Bolívia (AB) e do cavado no nordeste do Brasil. O cavado, muitas vezes, exibe um padrão de circulação ciclônica com um núcleo bem definido, conhecido como Vórtice Ciclônico em Altos Níveis no Nordeste (VCAN). Este sistema induz o movimento descendente do ar, resultando na advecção de ventos secos em direção à superfície, ou seja, uma condição de estabilidade atmosférica (BRAGA; AMBRIZZI, 2022; ESCOBAR, 2019; LYRA; ARRAUT, 2023). Já a AB consiste em uma componente de alta pressão atmosférica com circulação no sentido anti-horário, presente no nível de 250 hPa sobre a Bolívia, comumente sobre o altiplano boliviano, nos meses de verão austral ela se intensifica e se expande, sendo caracterizada pela presença de tempo estável, com ar quente e seco (CAVALCANTI; SHIMIZU, 2012; DA SILVA et al., 2019; ESCOBAR, 2019; SILVA; REBOITA; ESCOBAR, 2019). A Figura 4a ilustra a circulação atmosférica presente em baixos níveis e a Figura 4b em altos níveis durante um episódio de ZCAS.

Figura 4- (a) Configuração sinótica em baixos níveis atmosféricos para um episódio de ZCAS, contendo a posição típica da ZCAS (escada em verde), o sistema quase-estacionário (baixa pressão (B) e frente fria, linha azul com triângulos), a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (A) e a convergência de ar (setas em preto). (b) Circulação característica em altos níveis, com a ZCAS (escada em verde), a Alta da Bolívia (linhas azuis) e o cavado do Nordeste (linhas laranja e amarela).



Fonte: adaptado do Conceptual Models for Southern Hemisphere (2015).

Em baixos níveis atmosféricos, 850 hPa, as condições sinóticas mais frequentes são a convergência do ar e um sistema frontal estacionário, cobrindo áreas do oceano Atlântico Sul e Sudeste brasileiro (ESCOBAR, 2019; ESCOBAR; DE ALMEIDA MARQUES; DERECZYNSKI, 2022; SILVA; REBOITA; ESCOBAR, 2019). A convergência do ar é crucial para a manutenção do sistema, com ela ventos quentes e úmidos na região Amazônica encontram com outros frios e secos provindos do oceano Atlântico sul, esse encontro favorece a convecção, induzindo a ascensão do ar e o desenvolvimento de nuvens convectivas (NIELSEN et al., 2019; SATYAMURTY; ROSA, 2020). Com estas características, analisar a radiação de onda longa é fundamental para a identificação de episódios de ZCAS, pois valores inferiores a 200 W m^{-2} indicam a presença de nuvens profundas com topes frios, ou seja, nuvens cúmulos com temperatura de 0°C em seus pontos mais elevados (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002; ROSA et al., 2020).

A circulação descrita em altos níveis atmosféricos cria um padrão de divergência de ventos em altitude, o qual mantém a convecção sobre grande parte da região de atuação da ZCAS, enquanto o sistema frontal estacionário presente em baixos níveis fomenta a convergência, criando um padrão de auto alimentação (ESCOBAR, 2019; SATYAMURTY; ROSA, 2020). O estabelecimento desse padrão de circulação, contribui para a absorção dos sistemas

transientes que seguem ao sul do paralelo 30S, o que fortalece a ZCAS (ESCOBAR, 2019). Resultando na manutenção prolongada da convergência de umidade, esse padrão de circulação atmosférica determina a persistência dos eventos de ZCAS por períodos prolongados, geralmente entre 4 e 10 dias (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002; ESCOBAR, 2019; FIALHO et al., 2023), em alguns casos superaram os 15 dias de duração (SILVA et al., 2019).

Apesar da existência de uma circulação atmosférica característica, alguns episódios de ZCAS podem apresentar divergências, sendo identificado por Escobar (2019) três padrões predominantes. O primeiro deles é caracterizado pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) em baixos níveis atmosféricos, com um padrão de bloqueio atmosférico ao norte da ZCAS; o segundo consiste na presença de uma frente fria continental, podendo avançar até o Mato Grosso e o terceiro é representado por um sistema de baixa pressão profundo e um cavado continental, contribuindo para a maior advecção de ar úmido e quente (CAVALCANTI; SHIMIZU, 2012; ESCOBAR, 2019).

Por fim, os jatos de altos níveis também possuem uma relação com a atuação dos episódios de ZCAS, o Jato Subtropical (JST) pode contornar um cavado, favorecendo o sistema em baixos níveis, enquanto o Jato Polar (JP) pode aparecer em episódios com a presença de uma frente fria sobre o oceano, estando esse acoplado ao JST. O Jato de Baixos Níveis (JBN) por vezes pode explicar eventos mais prolongados de ZCAS, principalmente durante períodos de LN (ESCOBAR, 2019; FIALHO et al., 2023; MONTINI; JONES; CARVALHO, 2019).

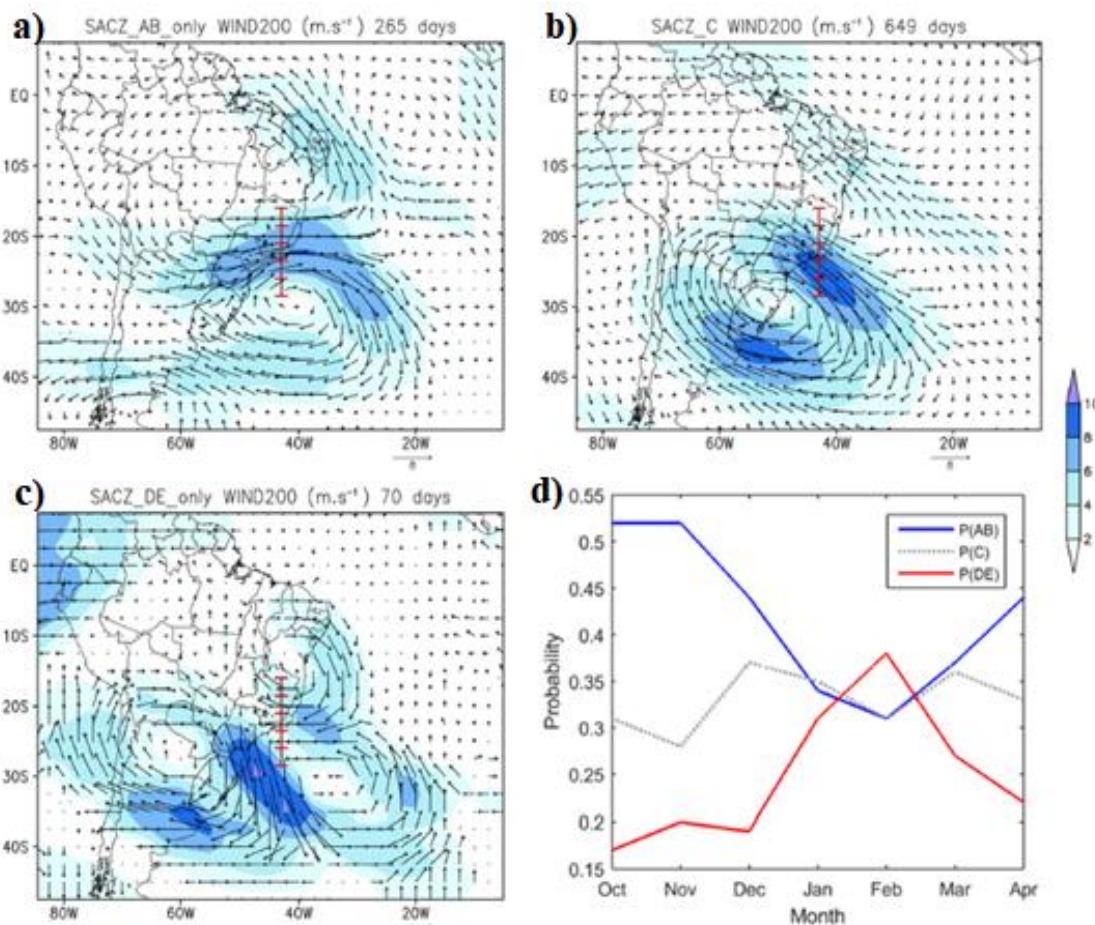
4.3. Variabilidade climática da ZCAS

A ZCAS possui uma componente sazonal, uma vez que é o sistema mais importante da fase ativa do SMAS (REBOITA et al., 2022b), apenas entre os meses de outubro a abril (SILVA et al., 2019). Segundo Silva et al. (2019) entre os anos de 2006 e 2017, dos 114 episódios de ZCAS identificados nas cartas sinóticas elaboradas pelo CPTEC do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 40% ocorreram nos meses de dezembro (24 episódios) e janeiro (22) quando somados, sendo esses os únicos com mais de 20 ocorrências, em novembro, fevereiro e março cada mês concentrou, isoladamente cerca de 15% dos episódios, havendo uma grande redução nos meses de início e fim do sistema, com 13 eventos em outubro e

apenas três em abril. Em relação ao tempo de vida do sistema, entre os meses de novembro e março a média foi superior a cinco dias, enquanto nos meses de transição foi inferior a quatro dias (NIELSEN et al., 2019; SILVA; REBOITA; ESCOBAR, 2019). Isso ocorre pois na fase ativa da monção há uma condição propícia para a formação de convecção na América do Sul, favorecendo o estabelecimento do sistema (SATYAMURTY; ROSA, 2020).

De acordo com Nielsen et al. (2019), que utilizaram dados dos boletins da Climanálise e boletins técnicos do CPTEC para identificar os episódios de ZCAS entre outubro de 1995 e abril de 2015, as ocorrências podem ser divididas em três regiões principais: AB (norte), C (centro) e DE (sul). Após essa segmentação por região, os autores verificaram os períodos mais favoráveis para o desenvolvimento do corredor de umidade em cada uma delas, com predomínio de ZCAS a norte em outubro e novembro, com uma probabilidade superior a 50% (Figura 6d), enquanto nos meses de janeiro e fevereiro os eventos mais prováveis são concentrados na porção sul (NIELSEN et al., 2019). Em síntese foi observado que no início do período monçônico a ZCAS tende a começar na região norte e ao longo da estação desce em direção ao centro e sul (NIELSEN et al., 2019). Essa distribuição latitudinal das ZCAS foi justificada pela circulação atmosférica, havendo uma anomalia ciclônica em 200 hPa, logo ao sul da ZCAS, para as três posições, conforme mostrado na Figura 5a, 5b e 5c.

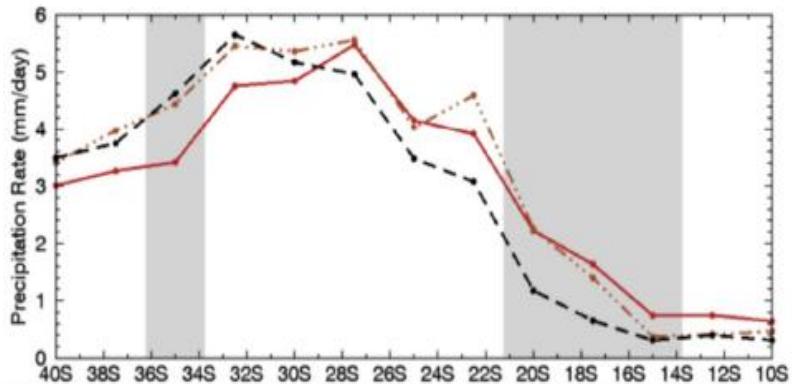
Figura 5- Campos de anomalias diárias de vento a 200 hPa (em m/s), médios pelos conjuntos de referência: os tipos mais ao norte (a), médio (b), mais ao sul (c) e proporção de dias com ZCAS em relação ao total de dias com episódios por mês, para cada posição (d).



Fonte: Adaptado de Nielsen et al. (2019).

Em um trabalho focado nos impactos da mudança climática para a climatologia de verão, Zilli et al. (2019), observaram uma tendência de migração da precipitação para o sul entre os meses de dezembro e fevereiro, ao comparar os anos de 1979 até 1991 com os anos entre 2005 e 2014, com os dados do GPCP, NCEP e ERAI. Os autores identificaram uma migração equivalente a 4° de latitude em direção ao hemisfério sul, quando comparado os valores superiores a 5 mm/dia de precipitação (Figura 6), assim como o aumento da área com temperatura da superfície do mar superior a 27°C e uma expansão vertical da atmosfera, observado pela elevação dos valores de altura geopotencial, podendo explicar a mudança latitudinal da precipitação supracitada (ZILLI et al., 2019). Outro ponto observado foi a expansão da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), a qual pode, assim como descrito por Nielsen et al. (2019), afetar a posição dos episódios de ZCAS.

Figura 6 - Média para cada um dos três períodos (1979-1991, vermelho sólido; 1992-2004, marrom tracejado ponto-traço; e 2005-2014, preto tracejado). Tons de cinza mostram pontos de grade com diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) na média de precipitação entre os primeiros e últimos períodos.



Fonte: Adaptado de Zilli et al. (2019).

Essa mudança na posição da ZCAS ao longo do tempo pode ocorrer em resposta a alterações nos valores de TSM, pois essa funciona como um forçamento térmico em escala sazonal e interanual (CARPENEDO et al., 2023). Em períodos em que a TSM do oceano Atlântico está menor, a condição torna-se propícia para o estabelecimento de um sistema de baixa pressão atmosférica, fortalecendo os movimentos ascendentes e/ou enfraquecendo os descendentes, com uma maior presença de nuvens o que reduz ainda mais a TSM, pelo bloqueio radiativo, criando um feedback positivo, observado com os dados do ERA-5, entre os anos de 1979 e 2020 por Carpenedo et al. (2023). Esse sistema pode fortalecer ou inibir o desenvolvimento de ZCAS (CARPENEDO et al., 2023), como também alterar sua posição (NIELSEN et al., 2019; ZILLI; CARVALHO; LINTNER, 2019).

A TSM também pode afetar o desenvolvimento de episódios de ZCAS pelo enfraquecimento do Jato de Baixos Níveis (JBN). Para atingir esse resultado, Ham et al. (2021), destacaram a importância da regressão com defasagem para os meses de novembro, dezembro e janeiro, para entender a dinâmica do dipolo do Atlântico Sul (SASD). Com isso os autores identificaram que a fase positiva do dipolo é caracterizada por anomalias positivas em altas latitudes e negativas em baixas (oposto ocorrendo na fase negativa), e observaram uma correlação significativa de 0,45 entre o SASD e a TSM do oceano Atlântico. Além disso, apontaram que no período positivo durante o inverno austral o SASD pode influenciar o El Niño, resultando em uma modulação do ENSO em resposta às condições da TSM no oceano

Atlântico (HAM et al., 2021). Essa influência positiva do SASD é associada a uma circulação anticiclônica em médias latitudes na América do Sul, resultando em redução da convecção, enfraquecimento do JBN e da ZCAS.

Um dos modos de variabilidade interanual mais conhecidos nos trópicos é o ENSO (CAI et al., 2020; POUR et al., 2020; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018), constituindo no acoplamento atmosférico-oceânico gerado pela redistribuição de calor e momento na porção equatorial do oceano Pacífico (CAI et al., 2020; MCPHADEN, 2002; WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2014). Apresentando uma ciclidade irregular, cuja periodicidade oscila entre dois e sete anos, a fase quente do fenômeno ENSO é conhecida como EN, marcada pelo enfraquecimento dos ventos alísios e pelo aumento da TSM na região central e leste do Pacífico Equatorial, esses períodos geralmente duram de 9 a 15 meses (CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2021; LIN; QIAN, 2019; POUR et al., 2020). Por outro lado, o estágio frio, conhecido como LN, é caracterizado por ventos alísios mais vigorosos que o usual e águas oceânicas mais frias no Pacífico Equatorial. Em geral, a LN é uma anomalia menos intensa que o EN, embora tenda a persistir por um período que varia de um a três anos. O intervalo entre esses dois estágios, quando não há predominância clara de nenhum deles, é denominado período neutro (LIN; QIAN, 2019; POUR et al., 2020; VIEGAS et al., 2019; YANG et al., 2018).

O ENSO é um dos modos de variabilidade que impacta a ocorrência de ZCAS, segundo Braga e Ambrizzi (2022) durante a LN há um favorecimento do transporte de umidade da Amazônia para os episódios de ZCAS, através dos valores de radiação de onda longa, assim como o posicionamento do VCAN alguns graus em direção a linha do Equador. Durante o período positivo do ENSO, ou seja, EN, há uma redução da área com valores de OLR relevantes para determinar a ocorrência de episódios de ZCAS, bem como o deslocamento do VCAN para o sul, esses resultados foram observados com dados diários do ERA-Interim entre os anos de 1979 e 2013 (BRAGA; AMBRIZZI, 2022). Em consonância com esse resultado, Verdan e Silva (2022), também identificaram uma relação de enfraquecimento dos episódios de ZCAS durante a fase positiva do ENSO, mostrando através de valores de correlação o favorecimento em períodos de LN, com dados entre o ano de 2000 até 2021, obtendo resultados similares aos encontrados por Braga e Ambizzi (2022).

Chang et al. (2020) investigaram a origem da água subterrânea em aquíferos não confinados, em relação à precipitação atual coletada na região Sudeste do Brasil. Utilizando

dados de isótopos de água subterrânea para mais de mil amostras e dados de precipitação isotópica de 11 estações, entre 1960 e 2015, buscando determinar se a água presente nos aquíferos apresenta a mesma origem da água da chuva atual (CHANG et al., 2020). Os resultados revelaram uma correlação significativa de 0,81 entre os dois conjuntos de dados, o que indica que ao longo dos últimos cinco mil anos não houve grandes alterações na circulação atmosférica na região estudada, sugerindo uma atuação prolongada da ZCAS e a estabilidade dos padrões climáticos ao longo do tempo (CHANG et al., 2020).

O último trabalho da seção de variabilidade foi desenvolvido por Oliveira e Quaresma (2018) com o qual construíram uma análise focada nos ventos no Espírito Santo, caracterizando-os durante os anos entre 1995 e 2014 (outubro a abril). Seus resultados indicam que a maioria dos episódios de ZCAS está associada aos ventos provindos da ASAS no período prévio à formação da ZCAS.

4.4. ZCAS em um cenário de mudanças climáticas

Segundo considerado pelo sexto relatório do IPCC (IPCC, 2021) a mudança climática é um fato sem margem para ambiguidade ou dúvidas, pois desde a década de 1950, algumas mudanças são evidentes em todos os componentes do sistema climático: a atmosfera e o oceano estão cada vez mais quentes, a quantidade de neve e gelo reduziram, o nível do mar se elevou, o oceano acidificou-se, o seu teor de oxigénio diminuiu e as concentrações de gases com efeito de estufa aumentaram (IPCC, 2021). Tomando como indicativo base para essa mudança o valor da temperatura média da superfície global, entre os anos de 1850-1900 até o período mais recente, de 2011-2020, foi observado um aumento de 1,09°C (IPCC, 2021). Essa mudança altera a toda a dinâmica atmosférica, repercutindo em impactos nos episódios de ZCAS, o qual se faz um problema pois esses episódios podem, em um futuro mais aquecido, concentrar um quantitativo maior de eventos extremos e desastres naturais, elevando os desafios para a mitigação e adaptação aos mesmos.

Com cerne nessa problemática, para além dos episódios de ZCAS, os eventos extremos podem apresentar-se rearranjados em resposta a mudança climática, podendo ser observados cinco implicações possíveis (IPCC, 2021), a primeira diz respeito a magnitude dos mesmos, a qual pode ser intensificada no decorrer do tempo; o segundo aspecto que pode

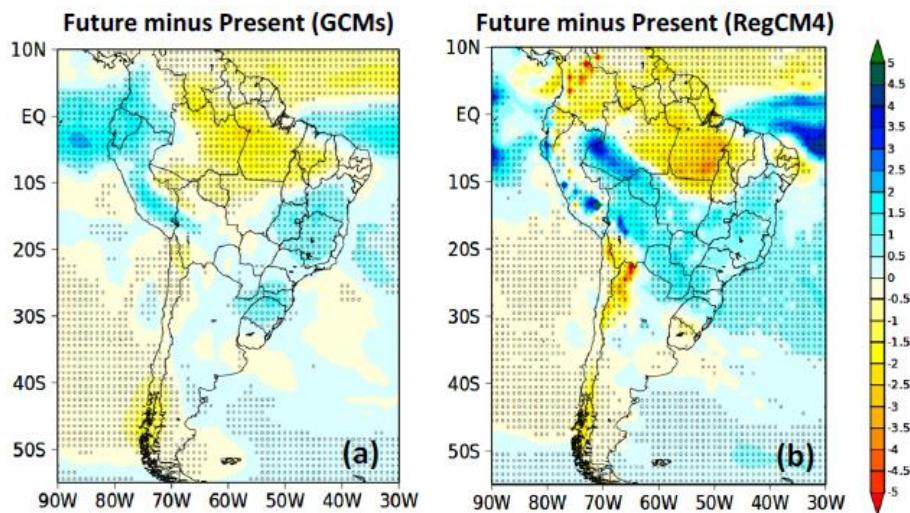
ser modificado é a frequência, ou seja, eventos que ocorriam a cada dez anos podem tornar-se mais comuns ou mesmo a sua quantidade pode aumentar; o terceiro impacto aborda a localização dos extremos, os quais podem apresentar-se em novas áreas; a quarta forma como os extremos podem ser apresentados em uma atmosfera aquecida considera que o período de ocorrência deles pode ser alterado; por fim, o quinto impacto aborda a combinação de eventos, como mostrado por Verdan e Oscar Júnior (2023) em que uma microexplosão combinou-se com uma frente fria e uma maré meteorológica no município do Rio de Janeiro.

A luz desse cenário de aquecimento climático, o sexto relatório do IPCC aponta que haverá um aumento dos eventos extremos de precipitação na região Sudeste do Brasil (IPCC, 2021). Outros estudos mostram que a estação seca aumentou no sul da Amazônia entre os anos 1979 até 2014 além de uma significativa redução nos valores de precipitação na estação chuvosa (outubro-fevereiro) (ALVES, 2016). Em geral, os padrões das tendências de temperatura são mais consistentes do que os da precipitação em toda a América do Sul, regionalmente, as análises apontam para uma tendência de aquecimento sobre a Amazônia nos últimos 40 anos, que atingiu aproximadamente $0,6^{\circ}\text{C} - 0,7^{\circ}\text{C}$ e com aquecimento mais forte durante o período seco, havendo um padrão constante de elevação das temperaturas em toda a América do Sul (IPCC et al., 2021). Em resposta a isso, o IPCC aponta, com um grau médio de confiança, para um aumento no número de eventos extremos na América do Sul, como as inundações (IPCC et al., 2021).

Em relação aos impactos da mudança climática diretamente nos episódios de ZCAS não há trabalhos diretamente que os associem, porém alguns possuem resultados voltados para o SMAS, permitindo uma aproximação desses impactos. Segundo Teodoro et al. (2021), entre os anos de 2080-2099 haverá um aumento na precipitação sobre o Sudeste do Brasil e sudeste da América do Sul nos meses ativos da monção (novembro-março) e uma redução desses valores na Amazônia, no cenário RCP 8.5, considerando o conjunto dos dados dos ensembles do GCMs e do RegCM4, tendo como base de dados os anos de 1995 até 2014, conforme mostrado na Figura 8. Os autores ainda apontam para um aumento no escoamento superficial e na umidade do solo, nos meses de verão, para a mesma região onde foi projetado o aumento da precipitação, com uma redução da evapotranspiração e da umidade do solo na região Amazônica. O RCP 2.6 não apresentou valores significativos ao nível de 95% de confiança. Todavia, Reboita et al. (2022a) apontaram que essa elevação nos valores diários de

precipitação pode ocorrer em respostas ao aquecimento do oceano Atlântico, favorecendo o transporte de umidade do mesmo para o continente, e não em resposta a circulação monçônica associada a ZCAS. No RCP 8.5 um possível enfraquecimento dos episódios de ZCAS na primavera pode ser explicado pela atenuação do JBN e do transporte de umidade da Amazônia, enquanto o fortalecimento de uma anomalia ciclônica no oceano Atlântico sul, próximo ao litoral de Santa Catarina, pode justificar o aumento dos valores de precipitação no verão (REBOITA et al., 2022a).

Figura 7- Diferença entre a precipitação (mm dia-1) projetada para o futuro (2080–2099) e o clima atual (1995–2014) durante a fase úmida do SAMS (novembro–março): (a) conjunto de GCMs e (b) Conjunto RegCM4. Os pontos representam as áreas estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Teodoro et al. (2021).

Essa redução nos valores de precipitação sobre a região Amazônica também foi observada por Bochow e Boers (2023). Segundo os autores o desmatamento e as mudanças climáticas aumentam a frequência de secas e incêndios, ameaçando a floresta tropical, o modelo dinâmico utilizado por eles sugere sinais de uma transição crítica na dinâmica atmosfera-vegetação, indicando que a floresta poderia entrar em colapso, resultando em condições mais secas e, eventualmente, a uma savanização, (BOCHOW; BOERS, 2023). A floresta desempenha um papel crucial nas monções sul-americanas e consequentemente para a ZCAS, seu declínio teria implicações sérias na circulação atmosférica continental (BOCHOW; BOERS, 2023).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O texto oferece uma análise sobre os episódios de ZCAS, abordando desde sua configuração sinótica até seus impactos e projeções. A amplitude dos temas tratados reflete a complexidade desse fenômeno meteorológico e sua importância para entender não apenas os padrões climáticos regionais, mas também os desafios e riscos associados, considerando alterações futuras em resposta as mudanças climáticas. Até 2005, os métodos de reconhecimento dos episódios de ZCAS eram simplificados, centrados apenas na análise de imagens de satélite pelos órgãos de previsão do tempo (ROSA et al., 2020). Isso resultava em uma compreensão limitada da circulação atmosférica subjacente. A identificação de ZCAS era prejudicada pela falta de uma análise minuciosa para a circulação atmosférica, suscitando incertezas sobre a ocultação de eventos e a confiabilidade dos casos desse período, os quais foram empregados pela grande maioria dos artigos aqui citados. Portanto, a importância da adoção de critérios uniformes para o reconhecimento desses eventos em trabalhos futuros é destacada.

Apesar da relevância climática da ZCAS, as pesquisas apresentam diversas lacunas que limitam uma compreensão mais ampla do sistema e seus impactos. A maioria dos estudos concentra-se na relação entre a ZCAS e a variabilidade climática, enquanto temas como desastres naturais, secas e impactos socioeconômicos são abordados de forma pontual e pouco aprofundada. Além disso, há uma predominância de meteorologistas como autores, o que evidencia a sub-representação de áreas multidisciplinares como Geografia, Engenharia e Oceanografia, fundamentais para análises mais abrangentes. A colaboração internacional também é limitada, com poucos esforços para diversificar as parcerias e integrar perspectivas globais.

Notou-se ainda uma desconexão entre escalas de análise, com estudos que não articulam a variabilidade climática com os impactos específicos de eventos extremos. Os impactos da ZCAS, quando abordados, carecem de um caráter unificador que relate desastres, saúde e secas em uma perspectiva sistêmica. Além disso, a análise temporal mostrou-se restrita, com poucas publicações recentes e uma exploração limitada do potencial tecnológico e das modelagens climáticas. Por fim, a dimensão histórica e as particularidades regionais da ZCAS têm sido subexploradas, o que compromete tanto a compreensão dos

padrões históricos quanto a projeção de tendências futuras, especialmente no contexto das mudanças climáticas.

Inicialmente, a análise sinótica apresentada revela os padrões atmosféricos associados aos episódios de ZCAS. São observadas, em diferentes níveis atmosféricos, a presença do VCAN, da AB, da convergência de ventos e valores de radiação inferiores a 200 W m^{-2} . Essa compreensão é fundamental para identificar as condições favoráveis à formação e manutenção da ZCAS, destacando a interação entre sistemas atmosféricos e a convergência de massas de ar. Posteriormente, o estudo da variabilidade climática elucidou suas características sazonais, mostrando sua concentração nos meses ativos do SMAS e sua interação com fenômenos atmosféricos e oceânicos, como o ENSO, por exemplo. Revelando também a ligação intrínseca da ZCAS com padrões climáticos de maior amplitude e como suas características podem sofrer variações ao longo do tempo, sob a influência de fatores como as mudanças na TSM.

As ZCAS e seus impactos são explorados em diversas dimensões, desde a sua influência na distribuição da precipitação até a sua associação com surtos de doenças e desastres naturais, como inundações e secas. Abrangendo tanto as consequências desencadeadas pelo excesso de precipitação quanto pela sua ausência. Portanto, sublinha-se a relevância de entender além dos elementos meteorológicos, mas as implicações sociais e ambientais que esses episódios imprimem no espaço geográfico, ressaltando a importância de conectar o conhecimento científico com as experiências das comunidades locais. Considerando os danos humanos e econômicos deflagrados tornar-se-á crucial compreender os fatores que desencadeiam os desastres naturais associados aos episódios de ZCAS, principalmente quando considerado os impactos provocados pelas mudanças climáticas, com o aumento do seu período de duração e intensidade.

O sexto relatório do IPCC (2021) confirma a mudança climática como um fato inquestionável. Desde a década de 1950, a atmosfera e os oceanos aqueceram, a neve e o gelo diminuíram, o nível do mar subiu, o oceano acidificou-se e os gases de efeito estufa aumentaram, entre 1850-1900 e 2011-2020, a temperatura média global subiu $1,09^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2021), essas alterações afetam a dinâmica atmosférica e os episódios de ZCAS. Os eventos extremos estão mudando de cinco formas principais: magnitude, frequência, localização, período de ocorrência e combinação de eventos. A monção da América do Sul pode ter início

mais cedo e término mais tardio, com aumento na precipitação no Sudeste e redução na Amazônia, especialmente sob o cenário RCP 8.5.

Por fim, os desafios acerca da projeção climática para episódios de ZCAS enfatizam a amalgama de interações entre sistemas atmosféricos e oceânicos com o maior deles. Embora a projeção para eventos individuais possa apresentar limitações, elas desempenham um papel crucial na detecção de tendências e na preparação para potenciais impactos, sendo um caminho a análise de elementos isolados, com a precipitação ou a pressão. Um direcionamento para trabalhos futuros pode ser a identificação de uma série temporal maior sobre a ZCAS e a associação desta com desastres, ao longo de um longo recorte temporal. Em suma, o texto oferece uma visão abrangente dos episódios de ZCAS, ressaltando sua complexidade e importância para a compreensão do clima regional e suas repercussões na sociedade e no ambiente.

Os estudos analisados apontam lacunas importantes que podem ser exploradas em futuras pesquisas. Primeiramente, a interação entre a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e outros sistemas atmosféricos, como os complexos convectivos de mesoescala e os vórtices ciclônicos, ainda precisa ser mais investigada para entender como essas interações podem amplificar os eventos extremos de precipitação. Além disso, há uma necessidade de modelos mais precisos para prever a variação espacial e temporal desses eventos no Brasil, especialmente em áreas mais afetadas por desastres naturais, como o Sudeste.

A análise das mudanças climáticas no longo prazo também carece de uma maior integração com os impactos socioeconômicos e a vulnerabilidade de diferentes regiões, como evidenciado pelas lacunas em estudos como os de Silva et al. (2020) e Lyra e Arraut (2023). Outro ponto importante é o impacto da ZCAS em outras áreas além da precipitação, como saúde pública, geração de energia e a agricultura, que ainda é pouco explorado, embora pesquisas como a de Dutra et al. (2018) indiquem uma relação entre a ZCAS e a ocorrência de leptospirose. Em termos de futuras direções, é fundamental investigar o papel da ZCAS em cenários de variabilidade climática extrema e suas implicações para a adaptação e mitigação de desastres naturais, com ênfase em soluções práticas e aplicáveis à gestão de risco em nível local e regional.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a CAPES e ao CNPq pelas bolsas de doutorado sobre os processos 88887.824112/2023-00 e 166808/2023-7, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. M. **Análise Estatística da sazonalidade e tendências das estações chuvosas e seca na Amazônia: Clima Presente E Projeções Futuras.** [s.l.] INPE, 2016.
- BOCHOW, N.; BOERS, N. The South American monsoon approaches a critical transition in response to deforestation. **Science Advances**, v. 9, n. 40, p. 1–13, 2023.
- BOMBARDI, R. J. et al. Precipitation over eastern South America and the South Atlantic Sea surface temperature during neutral ENSO periods. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 5–6, p. 1553–1568, 15 mar. 2014.
- BRAGA, H. A.; AMBRIZZI, T. A Variabilidade Intrassazonal e Interanual do Acoplamento entre a Zona de Convergência do Atlântico Sul e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 3, p. 305–311, set. 2022.
- BRASILIENSE, C. S. et al. Synoptic analysis of an intense rainfall event in Paraíba do Sul river basin in southeast Brazil. **Meteorological Applications**, v. 25, n. 1, p. 66–77, 23 jan. 2018.
- CAI, W. et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, p. 215–231, 2020.
- CARPENEDO, C. B. et al. Atmospheric circulation patterns associated with surface air temperature variability trends between the Antarctic Peninsula and South America. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 95, n. suppl 3, 2023.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, set. 2002.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004.
- CAVALCANTI, I. F. A.; AMBRIZZI, T. **Teleconexões e suas influencias no Brasil.** In: Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2021. p. 145–161.
- CAVALCANTI, I. F. A.; SHIMIZU, M. H. Climate Fields over South America and Variability of SACZ and PSA in HadGEM2-ES. **American Journal of Climate Change**, v. 01, n. 03, p. 132–144, 2012.
- CHANG, H. K. et al. Groundwater isotope ratios reflect convective and stratiform (paleo)precipitation fractions in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 585, p. 124801, jun. 2020.

COELHO, L. A. F.; NUNES, A. B. Eventos Recentes De Chuva Intensa Na Cidade Do Rio De Janeiro: Análise Sinótica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 994–1012, 1 jun. 2020.

CORREIA FILHO, W. L. F. et al. Diagnóstico da Precipitação e EVI em Dois Eventos de Seca no Nordeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, v. 35, p. 102–112, 24 jul. 2018.

DA FONSECA AGUIAR, L.; CATALDI, M. Social and environmental vulnerability in Southeast Brazil associated with the South Atlantic Convergence Zone. **Natural Hazards**, v. 109, n. 3, p. 2423–2437, 14 dez. 2021.

DA SILVA, F. P. et al. Synoptic thermodynamic and dynamic patterns associated with Quitandinha River flooding events in Petropolis, Rio de Janeiro (Brazil). **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 131, n. 4, p. 845–862, 2019.

DRUMOND, A. R. DE M.; AMBRIZZI, T. The role of SST on the South American atmospheric circulation during January, February and March 2001. **Climate Dynamics**, v. 24, n. 7–8, p. 781–791, 13 jun. 2005.

DUTRA, F. R. L. S. et al. Associações entre a Zona de Convergência do Atlântico Sul e o El Niño e sua influência sobre a distribuição espacotemporal da leptospirose em Minas Gerais. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, v. v. 14, n. n. 27, p. 1–13, 2018.

ESCOBAR, G. C. J. **Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS):** Critério de Detecção para Uso em Centros Operacionais de Previsão de Tempo. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, p. 19, 2019.

ESCOBAR, G. C. J.; DE ALMEIDA MARQUES, A. C.; DEREZYNSKI, C. P. Synoptic patterns of South Atlantic Convergence Zone episodes associated with heavy rainfall events in the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Atmósfera**, v. 35, n. 2, p. 287–305, 1 abr. 2022.

FERREIRA, N. J.; SANCHES, M. B.; SILVA DIAS, M. A. F. DA. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. v. 19, p. 89–98, 2004.

FIALHO, W. M. B. et al. Mechanisms controlling persistent South Atlantic Convergence Zone events on intraseasonal timescales. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 152, n. 1–2, p. 75–96, abr. 2023.

GRIMM, A. M. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? **Climate Dynamics**, v. 22, n. 2–3, p. 123–138, 1 mar. 2004.

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and Extreme Rainfall Events in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1589–1609, 1 abr. 2009.

HAM, Y. et al. Inter-Basin Interaction Between Variability in the South Atlantic Ocean and the El Niño/Southern Oscillation. **Geophysical Research Letters**, v. 48, n. 15, 5 ago. 2021.

IPCC. **Climate Change 2021: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge e New York: [s.n.].

JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. Climate Change in the South American Monsoon System: Present Climate and CMIP5 Projections. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6660–6678, 1 set. 2013.

KODAMA, Y.-M. **Large-Scale Common Features of Sub-Tropical Convergence Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part II: Conditions of the Circulations for Generating the STCZs.** Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, v. 71, n. 5, p. 581–610, 1993.

KODAMA, Y. **Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones.** Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, v. 70, n. 4, p. 813–836, 1992.

LIN, J.; QIAN, T. A New Picture of the Global Impacts of El Niño-Southern Oscillation. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 17543, 2019.

LYRA, M. J. A.; ARRAUT, J. M. Estudo Sinótico e da Estrutura Vertical de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis Ocorrido em Janeiro de 2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 38, 2023.

MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31, 2 set. 2015.

MCPHADEN, M. J. El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences. **Encyclopedia of Global Environmental Change**, v. 1, 2002.

MONTINI, T. L.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. The South American Low-Level Jet: A New Climatology, Variability, and Changes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 3, p. 1200–1218, 16 fev. 2019.

NIELSEN, D. M. et al. Dynamics-based regression models for the South Atlantic Convergence Zone. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 9–10, p. 5527–5553, 2019.

OLIVEIRA, K. S. S.; QUARESMA, V. D. S. Condições típicas de vento sobre a região marinha adjacente à costa do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 25 jun. 2018.

POUR, S. H. et al. Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, p. 102373, 2020.

REBOITA, M. S. et al. Ciclo de Vida do Sistema de Monção da América do Sul: Clima Presente e Futuro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, p. 343–358, 2022a.

REBOITA, M. S. et al. Ciclo de Vida do Sistema de Monção da América do Sul: Clima Presente e Futuro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 1, p. 343–358, 23 mar. 2022b.

ROSA, E. B. et al. Automated Detection Algorithm for SACZ, Oceanic SACZ, and Their Climatological Features. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 25 fev. 2020.

- SATYAMURTY, P.; ROSA, M. B. Synoptic climatology of tropical and subtropical South America and adjoining seas as inferred from Geostationary Operational Environmental Satellite imagery. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 1, p. 378–399, 21 jan. 2020.
- SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Campos Atmosféricos Recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, n. 2237–8642, 9 set. 2019.
- SILVA, J. P. R.; YNOUE, R. Y. Mesoscale Cyclonic Vortices Embedded in the South Atlantic Convergence Zone Associated with Natural Disasters in the State of São Paulo, Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 46, 2023.
- SILVA, P. N.; ESCOBAR, G. C. J.; REBOITA, M. S. Eventos extremos de precipitação no Estado de Minas Gerais associados com a ocorrência de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1013–1023, 2020.
- TEDESCHI, R. G.; CAVALCANTI, I. F. A.; GRIMM, A. M. Influences of two types of ENSO on South American precipitation. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 6, p. 1382–1400, 30 maio 2013.
- TEODORO, T. A. et al. Climate Change Impacts on the South American Monsoon System and Its Surface–Atmosphere Processes Through RegCM4 CORDEX-CORE Projections. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 4, p. 825–847, 27 dez. 2021.
- VERDAN, I.; OSCAR JÚNIOR, A. C. DA S. Análise Episódica do Downburst do dia quatorze de fevereiro de 2018, no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 441–462, 6 mar. 2023.
- VERDAN, I.; SILVA, M. E. S. **Variabilidade da Zona de Convergência do Atlântico Sul em relação a eventos ENOS de 2000 a 2021**. Geography Department University of São Paulo, v. 42, p. e193110, 18 out. 2022.
- VIEGAS, J. et al. Caracterização dos Diferentes Tipos de El Niño e seus Impactos na América do Sul a Partir de Dados Observados e Modelados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 43–67, 2019.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **El Niño/ Southern Oscillation**. Geneva: World Meteorological Organization, 2014.
- YANG, S. et al. El Niño–Southern Oscillation and its impact in the changing climate. **National Science Review**, v. 5, n. 6, p. 840–857, 1 nov. 2018.
- ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LINTNER, B. R. The poleward shift of South Atlantic Convergence Zone in recent decades. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 5–6, p. 2545–2563, 30 mar. 2019.