



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

## **IMPACTO DO GELO MARINHO ANTÁRTICO, DO ENOS E DO SAM SOBRE OS SISTEMAS FRONTAIS NA AMÉRICA DO SUL**

Catharine Freire de Caldas

Relatório Final de Iniciação Científica do  
programa PIBIC/INPE, orientado pela Dra. Iracema  
Fonseca de Albuquerque Cavalcanti e Dra.  
Fernanda Cerqueira Vasconcellos

URL do documento original:

INPE

São José dos Campos

2023

**IMPACTO DO GELO MARINHO ANTÁRTICO, DO ENOS E DO SAM SOBRE  
OS SISTEMAS FRONTAIS NA AMÉRICA DO SUL**

Catharine Freire de Caldas

Relatório Final de Iniciação Científica do  
programa PIBIC/INPE, orientado pela Dra. Iracema  
Fonseca de Albuquerque Cavalcanti e Dra.  
Fernanda Cerqueira Vasconcellos

INPE  
São José dos Campos  
2023

## RESUMO

O gelo marinho antártico e sua extensão possuem impactos no clima e na circulação geral de todo o globo. Os padrões de teleconexão como a Oscilação Antártica (Antarctic Oscillation) ou Modo Anular do Sul (SAM - Southern Hemisphere Annular Mode) e o El Niño Oscilação Sul (ENOS), afetam o gelo marinho antártico além de impactarem o clima da América do Sul (AS). Esses padrões podem estar relacionados a variações de sistemas transientes, tais como as frentes frias. No primeiro ano de estudo, observou-se as influências conjuntas do gelo marinho no Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA) e no Mar de Weddell (MWD) durante combinações das fases do SAM e do ENOS na frequência das frentes frias na AS e no Oceano Atlântico e adjacente, durante o mês de setembro. A fim de compreender os mecanismos físicos relacionados às configurações encontradas para máxima frequência de frentes frias iniciou-se análises envolvendo compostos de diversas variáveis que pudessem justificar os resultados encontrados. Os estudos seguintes mostraram, nas combinações associadas às máximas frequências de frentes frias sobre o continente, várias características descritas a seguir. Analisando ambos os mares, houve uma anomalia ciclônica no Atlântico Sul extratropical e no sul da AS, sugerindo uma área mais propensa à atuação de sistemas transientes, enquanto nas categorias de máxima frequência de frentes frias sobre o Oceano Atlântico adjacente, foi observada uma intensificação da ASAS, favorecendo a formação de sistemas transientes mais ao sul no oceano. Trens de ondas contribuíram para essas anomalias. Também foi verificado um gradiente positivo anômalo de temperatura do ar nas regiões de maior frequência de frentes, observado em todas as configurações de máxima frequência. Além de um gradiente positivo de temperatura da superfície do mar (TSM) entre a região extratropical e subtropical do Atlântico Sul. As anomalias dos fluxos de calor latente e sensível apresentaram comportamentos opostos nas categorias de máxima frequência no continente para ambos os mares. Esse resultado indicou em geral uma maior liberação de calor latente na região. A mesma relação não foi observada para os compostos de máxima frequência de frentes frias no oceano, com exceção dos compostos relativos ao gelo no MBA. Identificou-se também regiões com aumento de nebulosidade próximas aos locais de máxima frequência de frentes frias, diminuindo a incidência de onda curta e a emissão de ondas longas em todas as categorias. Continuando as análises, através do ciclo de Lorenz, o presente estudo observou através dos perfis verticais de energia cinética da perturbação valores intensos nas latitudes há maior frequência de frentes frias. Para os compostos envolvendo a máxima frequência no continente em ambos os mares, notou-se a maior contribuição para o aumento de energia cinética da perturbação através da conversão baroclínica. Enquanto nas categorias de máxima frequência no oceano, ambas as conversões contribuíram para o aumento, possuindo menor intensidade na categoria de mínima extensão de gelo marinho para o setor do MWD.

Palavras-chaves: Ciclo de Lorenz; Gelo Marinho Antártico; Frente Fria.

## LISTA DE FIGURAS

|   | <u>Págs.</u> |
|---|--------------|
| Figura 3.1: Representação do Ciclo de Energia da atmosfera (Lorenz, 1955).....  | 13           |
| Figura 4.1: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño Máxima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t student - WILKS, 2006). .....  | 14           |
| Figura 4.2: Fase do SAM negativo, El Niño Máxima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 60°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH, $m^2 \cdot s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK, $W \cdot m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK, $W \cdot m^{-2}$ ). ..... | 16           |
| Figura 4.3: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño Mínima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student - WILKS, 2006). .....  | 17           |
| Figura 4.4: Fase do SAM negativo, El Niño Mínima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 60°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH, $m^2 \cdot s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK, $W \cdot m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK, $W \cdot m^{-2}$ ). ..... | 18           |
| Figura 4.5: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM positivo, La Niña, de Máxima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico. Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student - WILKS, 2006) .....  | 19           |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.6: Fase SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 40°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH, $m^2 \cdot s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK, $W \cdot m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK, $W \cdot m^{-2}$ ). .....  | 20 |
| Figura 4.7: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño, Máxima extensão gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t student - WILKS, 2006). .....   | 21 |
| Figura 4.8: Fase SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 60°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH, $m^2 \cdot s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK, $W \cdot m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK, $W \cdot m^{-2}$ ). .....  | 22 |
| Figura 4.9: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico). .....  | 23 |
| Figura 4.10: Fase SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 40°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH, $m^2 \cdot s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK, $W \cdot m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK, $W \cdot m^{-2}$ ). ..... | 24 |
| Figura 4.11: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase do SAM positivo, La Niña, Mínima extensão de gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico). .....  | 25 |
| Figura 4.12: Fase SAM positivo, La Niña, Mínima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 40°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH, $m^2 \cdot s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical  |    |

da Conversão Barotrópica (CK,  $W.m^{-2}$  ); C) Perfil Vertical da  
Conversão Baroclínica (PK,  $W.m^{-2}$ ). .....26

## LISTA DE TABELA

|   | <u>Págs.</u> |
|---|--------------|
| Tabela 3.1: Anos envolvendo cada categoria em que foram observadas máximas frequências de frentes frias no mês de setembro, na análise com o MBA (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020)..... | 11           |
| Tabela 3.2: Anos envolvendo cada categoria em que foram observadas máximas frequências de frentes frias no mês de setembro, na análise com o MWD (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020)..... | 11           |

## SUMÁRIO

|  | <b><u>Págs.</u></b> |
|--|---------------------|
| 1. INTRODUÇÃO .....                            | 1                   |
| 1.1 Objetivos Geral e Específicos .....        | 3                   |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                  | 4                   |
| 3. DADOS E METODOLOGIA .....                   | 9                   |
| 4. RESULTADOS .....                            | 14                  |
| 4.1 Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA) ..... | 14                  |
| 4.2 Mar de Weddell (MWD).....                  | 20                  |
| 5. CONCLUSÃO .....                             | 26                  |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....            | 27                  |



## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas frontais afetam a América do Sul (AS) durante todo o ano (COURA DA SILVA; CAVALCANTI, 2002; ANDRADE, 2005), influenciando o tempo e o clima sobre este continente e algumas vezes causando geadas e friagens (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009). Os padrões de teleconexões também possuem impactos sobre o clima deste continente tanto de leste-oeste, quanto de Norte-Sul (CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2009). O El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um importante padrão de teleconexão que tem impactos em todo planeta, inclusive na AS. Esse fenômeno ocorre através de uma alteração no sistema oceano-atmosfera na região do Pacífico tropical (TEDESCHI, 2013). Os períodos positivos do ENOS (El Niño) ocorrem quando há o aquecimento anormal na temperatura superficial e subsuperficial das águas do Pacífico equatorial central e leste, já na fase negativa (La Niña) ocorre o oposto, isto é, o resfriamento anormal dessas águas (PHILANDER, 1990). Alguns trabalhos como o de Vera et al. (2004) e Tedeschi (2013) relacionam os impactos do ENOS ao regime de precipitação na AS, considerando suas fases positivas ao valor abaixo do normal no norte e nordeste da AS, e acima no Sudeste da AS (SEAS). Na La Niña, os inversos na precipitação foram notórios. No entanto, seus impactos na precipitação no restante do continente não são evidentes. A Oscilação Antártica ou Modo Anular do Sul (*Southern Hemisphere Annular Mode - SAM*) é o principal modo de variabilidade climática que afeta a região extratropical no Hemisfério Sul (HS), sendo caracterizado como uma “gangorra” de massa entre as latitudes médias e polares (THOMPSON; WALLACE, 2000; FOGT; MARSHALL, 2020). Gillett et al. (2006) demonstraram os impactos do SAM no HS, relacionando a fase positiva do SAM a um significativo aquecimento na Argentina e secas no sul da AS. Vasconcellos et al. (2019) analisaram o impacto, mês a mês, das fases do SAM na AS. Os resultados indicam que o SEAS e parte das Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil são as regiões mais afetadas pelo SAM. Entretanto, seu impacto difere mês a mês e nem sempre há uma influência oposta entre as fases do SAM. As mudanças na extensão de gelo marinho podem afetar todo o planeta, evidenciando a complexidade nas interações no sistema

gelo-atmosfera. O gelo marinho possui inúmeros efeitos marcantes no HS (YUAN; MARTINSON, 2000). No estudo de Cavalieri e Parkinson (2008), verificou-se mensalmente as extensões e áreas médias de gelo marinho antártico, em que os resultados demonstraram o período de máxima extensão para o mês de setembro e mínima para o mês de fevereiro. Alguns trabalhos relacionam as fases de extremos de retração e expansão das extensões de gelo marinho e suas relações com os principais padrões de teleconexões. Pezza et al. (2012), verificou através de modelos as correlações de extensão de gelo marinho Antártico com o SAM e o ENOS, seus efeitos e conexões conforme a variabilidade do gelo marinho em cada um dos setores dos mares da Antártica.

No primeiro ano do projeto (CALDAS, 2020; CALDAS ET AL., 2020), mostrou-se a relação dos padrões de teleconexão em conjunto com a extensão de gelo marinho antártico para o Mar de Weddell (MWD) e o setor do Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA) na frequência de frentes frias na AS. Nessas análises, foram observadas diferenças nas atuações das frentes sobre o continente sul-americano e o Oceano Atlântico adjacente. Em geral, pode ser notada a atuação da La Niña e SAM positivo nas análises de frequências máximas sobre o Oceano Atlântico adjacente à AS, variando somente a extensão do gelo marinho em ambos os mares. A máxima extensão esteve presente para o setor do MBA e tanto a máxima quanto a mínima no setor do MWD. No continente, no entanto, foram observadas as fases opostas, ou seja, ENOS positivo, junto com a fase negativa do SAM em ambas as extensões mínima e máxima do gelo marinho no MBA. Enquanto, para o MWD, foram observadas as máximas frequências no El Niño e SAM negativo, mas somente na máxima extensão de gelo marinho no continente. No estudo posterior, envolvendo os possíveis mecanismos básicos, foi observada a intensificação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) nos compostos envolvendo máxima frequência de frente fria no oceano considerando as categorias com ambos os mares (MBA e MWD). Isso fez com que as frentes ficassem concentradas mais ao sul no oceano. Enquanto para as configurações de maior frequência de frentes frias sobre o continente, em ambos os mares, foi observada uma anomalia ciclônica no Atlântico Sul extratropical e no sul da AS, sugerindo uma área mais propensa à atuação de sistemas transientes (CALDAS,

2021). Trens de ondas contribuíram para essas anomalias. Além disso, os resultados apresentaram um gradiente positivo de TSM entre extratropicos e subtropicos do Oceano Atlântico Sul em todas as categorias. Continuando as análises envolvendo os mecanismos físicos, Caldas (2022) notou, através da divergência do Fluxo de Takaya e Nakamura (TAKAYA; NAKAMURA, 2001) regiões de fontes de ondas de Rossby coerentes com regiões de início de trens de ondas observados no estudo anterior. Enquanto nas análises do Balanço Radiativo e Cobertura de Nuvens, foi observado regiões com presença de nebulosidade próximas aos locais de máxima frequência de frentes frias, tendo como consequência a diminuição da incidência de onda curta e reduzindo a emissão de ondas longas em todas as categorias. Nos compostos de fluxo de calor latente e sensível, observou-se a comportamentos opostos nas categorias de máxima frequência no continente em ambos os mares. Os resultados indicaram em geral uma maior liberação de calor latente na região. A mesma relação não foi observada para os compostos de máximas frequência de frentes frias no Oceano Atlântico adjacente, com exceção do MBA.

## **1.1 Objetivos Geral e Específicos**

O projeto teve como objetivo principal verificar a atuação das frequências das frentes frias na AS, em conjunto com os fenômenos de teleconexões SAM e ENOS, de acordo com suas fases e os anos de extremos de gelo marinho antártico no setor do MBA e MWD. Deste modo, no presente trabalho pretendeu-se continuar as investigações dos mecanismos envolvidos iniciadas em Caldas (2021) e Caldas (2022). As análises foram realizadas para as categorias conjuntas encontradas para as maiores frequências de frente fria, no mês de setembro, resultados encontrados no primeiro ano do projeto (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020). Para o MBA foram observados no continente a fase do SAM negativo, El Niño e Máxima extensão de gelo marinho, SAM negativo, El Niño e Mínima extensão de gelo marinho; enquanto no Oceano Atlântico adjacente à AS foram observadas a fase do SAM positivo, La Niña e Máxima extensão de gelo marinho.

Enquanto no MDW, as fases SAM negativo, El Niño e Máxima extensão, no continente e SAM positivo, La Niña e Máxima extensão; SAM positivo, La Niña e Mínima extensão, ambas as categorias para o Oceano Atlântico no MWD. Assim, nesta etapa, o presente relatório teve como objetivo específico:

- I. Realizar a confecção de compostos da Energia Cinética da perturbação e das Conversão Baroclínica e Barotrópica referente ao Ciclo de Energia na atmosfera, apresentado por Lorenz (1951).

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os padrões de teleconexões impactam toda a AS, afetando o clima desse continente (CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2009). O SAM é um importante modo de teleconexão que influencia a AS (GILLET et al., 2006; VASCONCELLOS, 2012; VASCONCELLOS et al., 2019). Os Modos Anulares atuam em ambos os hemisférios. No Hemisfério Norte é nomeado de Modo Anular Norte ou Oscilação Ártica, já no HS, SAM (THOMPSON; WALLACE, 2000). Eles atuam no campo da pressão, caracterizando uma “gangorra” N-S de massa atmosférica. Em sua fase positiva, a pressão é inferior às normais nas regiões polares e superior nas latitudes médias. Na fase negativa ocorre o oposto, as latitudes médias encontram-se com pressão abaixo do normal, enquanto as polares, acima (THOMPSON; WALLACE, 2000; FOGT; MARCHALL, 2020). Reboita et al. (2009) fizeram a análise sazonal entre os sistemas ciclônicos no HS e o SAM, durante o período de 1980 a 1999. Neste trabalho foi observado, na fase negativa do SAM, a trajetória dos ciclones em todo o HS movendo-se mais para norte, comparada à fase positiva. Para a AS e Atlântico Sul, observou-se na fase negativa do SAM intensas atividades frontogênicas e anomalias positivas de precipitação na costa do SEAS em todas as estações. Em geral, na fase positiva, os autores observaram condições inversas. Vasconcellos et al. (2019) analisaram o impacto, mês a mês, das fases do SAM na AS. Os autores encontraram em diversos meses, anomalias positivas (negativas) de temperatura no SEAS e em parte das

Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil durante a fase negativa (positiva) do SAM. Entretanto, a abrangência dessas anomalias difere entre os meses. Em fevereiro e dezembro, há um dipolo de anomalia de temperatura, com anomalias positivas (negativas) no SEAS e negativas (positivas) ao norte na fase negativa (positiva) do SAM. Esse trabalho também indicou um enfraquecimento (intensificação) da Zona de Convergência do Atlântico Sul na fase negativa (positiva) do SAM. A região do SEAS mostra anomalias positivas (negativas) de precipitação na fase negativa (positiva) do SAM, durante os meses de março a junho e dezembro.

O ENOS é uma alteração no sistema oceano atmosfera, com impactos no tempo e clima de todo o globo. Na fase positiva, El Niño, ocorre o aumento anormal na temperatura das águas superficiais e subsuperficiais do Pacífico equatorial central e leste, resultando em mudanças na atmosfera próxima ao oceano; enquanto na fase negativa, La Niña, ocorre o resfriamento dessas águas (PHILANDER, 1990; TEDESCHI, 2013). Alguns estudos apontam as influências do ENOS na AS (e.g., GRIMM, 2003; VERA et al., 2004; TEDESCHI, 2013). De acordo com Grimm (2003) e Vera et al. (2004), durante o El Niño (La Niña), há precipitação abaixo do normal no norte da AS, e acima do normal na região do SEAS. Nos períodos de La Niña ocorre o oposto, isto é, acima do normal no norte da AS e abaixo no SEAS. No entanto, os efeitos desse padrão de teleconexão na precipitação ainda não são claros em todo continente. Tedeschi (2013) analisou os impactos dos El Niños Canônico e Modoki na precipitação sobre AS. Nestes resultados, destacou-se que os impactos se diferem nos dois tipos de El Niño. Por exemplo, no verão e primavera, há uma anomalia de seca caracterizada no norte/noroeste, referente ao El Niño Modoki, que não se encontra presente no Canônico. Fedorova e Carvalho (2000) analisaram a relação das frentes com ENOS. Os resultados mostram que as ocorrências das frentes frias de latitude entre 20° e 40°S foram maiores no ano de El Niño do que de La Niña. Ainda sobre o estudo de climatologia de frentes frias, Andrade (2005) buscou avaliar as frequências de frentes frias a partir de onze áreas na AS no período de 1980 a 2002. As análises se deram a partir das estações do ano, obtendo valores em torno de 3-6 frentes em média. Observou-se também que, para o mês de setembro, há maiores frequências das frentes

frias sobre a AS, quando comparado a fevereiro, sendo as maiores frequências ao sul da AS. Neste estudo também foram observados casos envolvendo o ENOS, ao analisar a variabilidade interanual, não observando padrão para um número máximo ou mínimo em eventos de El Niño e La Niña. No entanto, observa-se que para o sul e sudeste do Brasil, o máximo ocorreu em 1984, no período que se iniciou uma La Niña. Estudos apontam o vínculo entre o SAM e ENOS. Carvalho et al. (2005), por exemplo, mostraram que no verão, as fases negativas SAM são predominantes quando as anomalias de Temperatura de Superfície do Mar (TSM), convecção e circulação são semelhantes ao El Niño, ocorrendo o oposto em sua fase negativa. Cai et al. (2011) avaliaram simulações envolvendo comparações entre modelos do *Coupled Model Intercomparison Project phase 3* (CMIP3), entre outros. Nesse estudo, observou-se a influência dos padrões de 5 teleconexões mencionados, numa relação estatisticamente significativa, demonstrando a ideia de que os sinais do ENOS são direcionados e projetados para o SAM. Na maioria dos modelos, foi observado uma correlação negativa entre o SAM e o ENOS, i.e., quando o índice ENSO é positivo e o índice SAM negativo e vice-versa. Essa relação entre o ENOS e SAM ocorre por meio de variações na célula Hadley e na circulação média meridional no HS. A localização da quebra da onda de Rossby no setor do Pacífico muda acentuadamente durante os eventos ENOS, que influenciam a polaridade do SAM (FOGT; MARCHALL, 2020). As mudanças na extensão de gelo marinho têm influência em todo o globo. O gelo marinho tem impactos no clima do HS, o seu isolamento ajuda a preservar o calor dos oceanos e afetando as correntes oceânicas e o equilíbrio do clima (YUAN; MARTINSON, 2000). Alguns trabalhos têm destacado a variação espacial e temporal da extensão de gelo marinho Antártico com padrões de variabilidade, particularmente o ENOS e o SAM (PEZZA et al., 2008; PEZZA et al., 2012; CLEM; FOGT, 2013; CLEM et al., 2016, entre outros). No estudo de Pezza et al. (2012), foram verificadas as maiores correlações positivas entre o ENOS e o gelo marinho no Mar de Bellingshausen e maiores correlações negativas no Pacífico Sul/Mar de Ross. Outras áreas de correlação moderada ocorrem no MWD, positiva, e no Oceano Antártico entre os setores do Atlântico e Índico, com correlação negativa. Naquele estudo, foram

observadas correlações positivas entre o gelo marinho e o SAM para todas as áreas, com exceção do Mar de Bellingshausen/Weddell Oeste. Assim resultando, que o ENOS e o SAM atuam em união na extensão de gelo marinho antártico. Em Oliva et al. (2021), analisou-se as relações entre os padrões de teleconexões tropicais, subtropicais e extratropical em conjunto com a extensão de gelo marinho antártico no setor de MWD, utilizando as técnicas de estatísticas e análises de compostos para o extremo de gelo marinho. Assim, foi verificada que a fase negativa do SAM estaria associada às maiores extensões de gelo, enquanto a fase oposta a menores extensões. Conexões climáticas entre a variabilidade do gelo marinho na Antártica e o clima de diversas regiões da AS têm sido muito investigadas nas últimas décadas, principalmente devido à importância do continente antártico no equilíbrio do sistema climático global, bem como no controle da circulação atmosférica do HS (e.g. HALL; VISBECK, 2002; RAPHAEL et al., 2010; PEZZA et al., 2012; CARPENEDO; AMBRIZZI, 2016; PARISE et al., 2022.). O estudo de Carpenedo e Ambrizzi (2016) verificou que, para o setor do MWD, nos eventos extremos de retração (expansão), identificou-se um aquecimento (resfriamento) da temperatura da superfície do mar (TSM) neste setor e no Atlântico Sul. Também foi verificado, durante os eventos extremos de expansão um reforço do ramo descendente da célula Polar ao sul de 70° S e enfraquecimento do ramo ascendente da célula de Ferrel entre 70° e 50° S. Já para a célula de Hadley, notou-se um enfraquecimento do ramo ascendente da célula de Hadley em 10° e 20°N, enquanto o ramo descendente intensifica na região equatorial. No setor do MBA, nos extremos de retração (expansão), observou-se um aquecimento (resfriamento) da TSM neste setor e no Pacífico Sul. Para as células de circulação meridional, durante os eventos de expansão, notaram-se um fortalecimento do ramo ascendente da célula de Ferrel em toda a troposfera, enquanto houve um enfraquecimento do ramo descendente da célula Polar. Na célula de Hadley, foi visualizado na região equatorial há um fortalecimento do ramo ascendente da célula de Hadley entre 5° e 10°N. No entanto, durante os eventos extremos de retração há um fortalecimento do ramo descendente de Hadley em toda a troposfera em torno de 35° S, enquanto o ramo ascendente da célula de Ferrel, notou-se enfraquecimento em torno de

40° S, indicando um possível deslocamento para sul da célula de Ferrel. No estudo de Parise et al. (2022), foi utilizado o Modelo CM2.1 e extremos de gelo marinho positivo para avaliar os impactos no clima da AS, com foco na região com maiores índices de precipitação e em sistemas atmosféricos de cada estação do ano no HS. Os resultados mostraram mudanças significativas na sazonalidade do regime de precipitação, temperatura do ar e umidade impulsionada por mudanças de circulação do vento nos níveis inferior e superior.

No primeiro ano do projeto, realizou-se compostos com as frequências de frentes frias para cada categoria de (ex. máxima extensão de gelo em anos de El Niño e SAM negativo, máxima extensão de gelo em anos de La Niña e SAM negativo, etc), para o mês de setembro, caracterizado a máxima extensão climatológica de gelo marinho antártico (CAVALIERI; PARKINSON, 2008). Neste, foram observadas as seguintes características nas frequências das frentes com relação ao MBA: no continente, foram observadas maiores frequências nas fases do SAM negativo, El Niño e em ambos os extremos de gelo marinho; no oceano Atlântico adjacente, as maiores frequências ocorreram nas fases SAM positivo, La Niña e máxima extensão de gelo marinho. Para o MWD: no continente, as maiores frequências de frentes frias foram encontradas nas fases do SAM negativo, El Niño e máxima extensão de gelo marinho; para o oceano, as maiores frequências ocorreram no SAM positivo, La Niña e máxima e na mínima extensão de gelo marinho (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020). Em Caldas (2021), foram analisados os possíveis mecanismos físicos que explicassem esses resultados. Assim, foram observadas para a categoria dos compostos de máxima frequência de frentes frias sobre o oceano, uma intensificação da ASAS, favorecendo a formação de sistemas transientes mais ao sul no oceano. Enquanto para as máximas frequências de frentes frias sobre o continente, em ambos os mares, houve uma anomalia ciclônica no Atlântico Sul extratropical e no sul da AS, sugerindo uma área mais propensa à atuação de sistemas transientes. Trens de ondas contribuíram para essa anomalia. Também foi notória a presença de um gradiente positivo de anomalia de TSM no Atlântico Sul entre os extratropicais e subtropicais em todas as categorias. Neste mesmo estudo também foi



observada a intensificação do Jato Polar e Jato Subtropical, nas fases de máxima frequência de frentes frias no Oceano Atlântico e adjacente, sendo coerente com o SAM positivo encontrado nesta categoria, visto que esta fase intensifica o Jato Polar. Continuando as investigações dos mecanismos físicos envolvidos, Caldas (2022) analisou a divergência do Fluxo de Takaya e Nakamura (2001) para os compostos com maiores frequências de frente fria no setor do MBA e MWD. Os resultados mostraram regiões de divergência (valores positivos) do fluxo de atividade ondulatória – indicando a presença das fontes de ondas de Rossby - coerentes com as regiões de início dos trens de ondas em cada categoria. Para o balanço de energia, o mesmo estudo observou a presença de nebulosidade na região de maiores frequências de frente frias, tanto no continente quanto no Oceano Atlântico adjacente. Também foi observado que os fluxos de onda curta se mostraram coerentes com a cobertura total de nuvens, indicando uma menor incidência de radiação solar nas regiões de maior nebulosidade associadas à alta ocorrência de frentes frias. Nas análises de fluxo de calor latente e sensível para as máximas frequências de frente frias no continente notou-se comportamento similar para as categorias de ambos os mares, apresentando valores opostos entre os fluxos de calor latente e sensível. Ou seja, no fluxo de calor latente observou-se regiões com maior liberação para a atmosfera, nas regiões de máxima frequência de frente no continente, enquanto para os mesmos locais notou uma menor liberação do fluxo de calor sensível nas mesmas categorias. No entanto, para o MDW para as categorias de máxima frequência no Oceano Atlântico adjacentes, os fluxos de calor latente e sensível apresentaram características similares entre si.

### **3. DADOS E METODOLOGIA**

Neste estudo utilizou-se as saídas a cada 6 horas da Reanálise Era-Interim do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF - DEE et al., 2011), com resolução espacial de  $0,75^{\circ} \times 0,75^{\circ}$  lat/lon, para o período de 1981-2010. As variáveis utilizadas foram componentes meridional e zonal do vento ( $m s^{-1}$ ), temperatura do ar (K)

e velocidade vertical ( $\text{Pa s}^{-1}$ ), para os níveis de 1000 - 200 hPa. Foram calculadas as médias diárias para cada uma das variáveis. Na identificação dos padrões de teleconexão e a verificação de suas fases, utilizou-se o índice ENOS (região Niño 3.4, disponível em <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>) e o índice SAM usado em Vasconcellos et al. (2019), obtido por comunicação pessoal. Os dados de gelo marinho antártico da *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC COMISO, 2017), também obtidos por comunicação pessoal, foram delimitadas as seguintes longitudes para o MBA de  $-130,573^\circ$  até  $-61,249^\circ$  e para o MWD de  $-60,235^\circ$  até  $0,165^\circ$ , usados em Oliva et al. (2021) e Vasconcellos et al. (2022). Para esse estudo, focou-se o mês de setembro, o qual é caracterizado pela máxima extensão climatológica de gelo marinho antártico (CAVALIERI; PARKINSON, 2008). Os critérios estabelecidos para a identificação automática das frentes frias neste trabalho foram que houvesse, no intervalo de um dia para o outro, queda da temperatura do ar em 925 hPa de no mínimo  $2^\circ\text{C}$ , aumento da pressão a nível médio do mar maior que 2 hPa e a mudança na componente meridional do vento em 925 hPa de norte (negativo) para de sul (positivo). Para a elaboração desse método objetivo que detectasse frentes para cada ponto de grade da AS e Oceano Atlântico adjacente, foi utilizado um programa com a linguagem computacional Python. Os dados em cada ponto de grade da região ( $50^\circ\text{S}$ - $10^\circ\text{N}$  e  $85^\circ$ - $30^\circ\text{W}$ ) foram transformados em matrizes (tamanho referente a latitude e longitude) em cada saída de média diária do mês correspondente. O programa realizou uma busca em que cada ponto de grade onde os critérios da frente fria fossem obedecidos, foi somado o valor 1 ao ponto correspondente em uma matriz de mesmo tamanho. Essa matriz inicialmente continha em cada ponto o valor zero. Quando os critérios ocorreram em mais de um dia seguido no mesmo ponto de grade, foi contabilizado como a mesma frente (somado somente 1 na matriz de frequência mensal). A data da frente foi considerada como o dia em que a frente iniciou naquele ponto de grade. Ou seja, caso uma frente em um ponto de grade tenha iniciado no final de um mês e terminado no início do mês seguinte, ela foi contabilizada como do mês em que ela iniciou. O cálculo da frequência mensal de frentes frias em cada ponto de grade foi realizado para os 30 anos (1981-2010) (CALDAS, 2020; CALDAS et

al., 2020). Para identificar a máxima frequência de frentes frias em cada setor, foram realizados mapas com a frequência de frentes frias para cada composto envolvendo anomalias de gelo marinho positiva e negativa em conjunto com as fases do ENOS e SAM, para o mês de setembro. Como visto no primeiro relatório (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020), a máxima frequência de frentes frias em setembro considerando o MBA encontra-se na fase SAM negativo, El Niño, tanto na máxima quanto na mínima extensão de gelo marinho no MBA. Já para o Oceano Atlântico adjacente, a máxima frequência de frentes ocorre na fase de SAM positivo, La Niña, máxima extensão no MBA (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Anos envolvendo cada categoria em que foram observadas máximas frequências de frentes frias no mês de setembro, na análise com o MBA (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020).

|  |                        |
|--|------------------------|
| SAM negativo, El Niño, MBA Máxima extensão de gelo marinho | 1991, 2009, 1997, 1994 |
| SAM negativo, El Niño, MBA Mínima extensão de gelo marinho | 2002, 2006, 1987       |
| SAM positivo, La Niña, MBA Máxima extensão de gelo marinho | 1995, 2010             |

Considerando o MWD na tabela 3.2, também para setembro, observou-se maior frequência de frentes nas fases para a AS durante SAM negativo, El Niño, máxima extensão de gelo marinho no MWD e para o oceano SAM positivo, La Niña, tanto na máxima quanto na mínima extensão de gelo marinho (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020).

Tabela 3.2: Anos envolvendo cada categoria em que foram observadas máximas frequências de frentes frias no mês de setembro, na análise com o MWD (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020).

|  |                              |
|--|------------------------------|
| SAM negativo, El Niño, MWD Máxima extensão de gelo marinho | 2009, 1997, 2006, 1991, 1987 |
| SAM positivo, La Niña, MWD Máxima extensão de gelo marinho | 1995                         |
| SAM positivo, La Niña, MWD Mínima extensão de gelo marinho | 2010                         |

Na análise da conversão baroclínica e conversão barotrópica, envolvendo os anos das máximas frequências de frentes frias, foi utilizada a abordagem de Lorenz (1955), envolvendo o ciclo de energia da atmosfera e equações similares às apresentadas por Plumb (1983) e utilizadas em Vasconcellos (2012). Para a realização deste estudo foi utilizado a Equação 3.1, em que a mesma indica a variação da energia cinética dos distúrbios a partir das conversões de energia potencial e energia cinética além de um termo residual *Rke*. Para isso, foi realizado o cálculo das perturbações temporais diárias da componente zonal e meridional do vento, da temperatura do ar e da velocidade vertical (*Omega*). Assim, foram efetuados os cálculos para a energia cinética da perturbação (*KEH* - Equação 3.2) e para conversão da energia cinética do estado básico para a perturbação, ou seja, a conversão barotrópica (*CK* Equação 3.3), em que *u* é o vento zonal, *v* é o vento meridional. O símbolo ' indica a perturbação temporal diária e o símbolo  $\bar{\quad}$ , média temporal da variável.

$$\frac{\partial KEH}{\partial T} = PK - CK + Rke \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$KEH = \frac{u'^2 + v'^2}{2} \quad (\text{Equação 3.2})$$

$$CK = u'u' \frac{\partial u}{\partial x} + v'u' \frac{\partial u}{\partial y} + v'u' \frac{\partial v}{\partial x} + v'v' \frac{\partial v}{\partial y} \quad (\text{Equação 3.3})$$

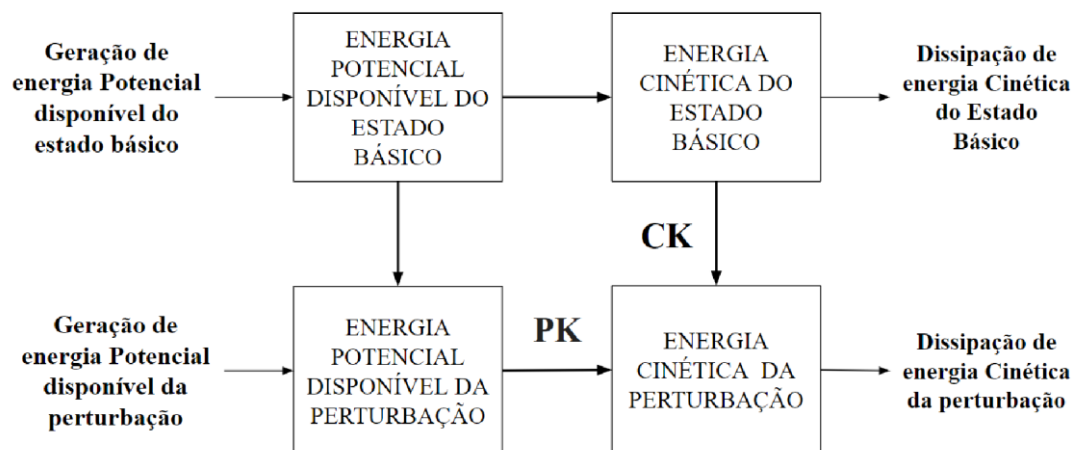
Para a conversão de energia potencial disponível da perturbação para energia cinética da perturbação, conversão baroclínica (*PK* - Equação 3.4). A variável *T'* corresponde a perturbação temporal diária da temperatura do ar e  $\omega'$  à perturbação da velocidade vertical dado em função de  $\hat{\Omega}$  (*dp/dt*), sendo *R* a constante dos gases para o ar seco e *P* a pressão correspondente ao nível.

$$PK = -R/P \omega'T' \quad (\text{Equação 3.4})$$

Na Figura 3.1, podemos notar um sistema esquemático para as transições de energia do ciclo de Lorenz, em que *CK* (Equação 3.3), representa a Energia Cinética do Estado

Básico em Energia Cinética da Perturbação, ou seja, KEH (Equação 3.2). Enquanto, para PK (Equação 3.4), nota-se a conversão da transição da Energia Potencial da Perturbação em Energia Cinética da Perturbação (Equação 3.2). A conversão Baroclínica é formada através de duas etapas, sendo a primeira a conversão de energia potencial disponível do estado básico para a perturbação e a conversão da energia potencial disponível da perturbação para energia cinética da perturbação. Neste trabalho, somente a segunda parte será considerada (Equação 3.4). No entanto, conforme Plumb (1983) apresentou, o fluxo meridional de calor é proporcional à conversão de energia potencial disponível do estado básico para a perturbação.

Figura 3.1: Representação do Ciclo de Energia da atmosfera (Lorenz, 1955).



Assim, os cálculos foram realizados para os níveis de 1000 a 200 hPa e organizados em perfis verticais, com intervalo da latitude variando de 10° N - 50° S e tendo suas longitudes definidas para o continente 60° W e oceano 40° W, a partir do ponto em que foi verificada a maior frequência de frente fria, de acordo com composto correspondente ao conjunto de fases.

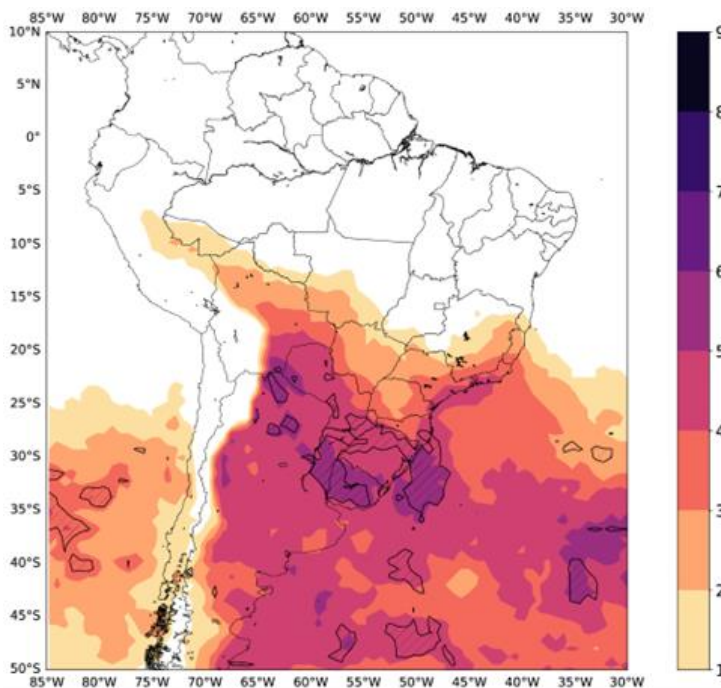
## 4. RESULTADOS

### 4.1 Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA)

#### 4.1.1 SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MBA (máxima frequência de frentes frias no continente)

Iniciando as análises através da combinação conjunta da fase do SAM negativo, El Niño para a máxima extensão de gelo marinho no MBA (Figura 4.1), observa-se regiões de máxima frequência de frentes no continente da AS (CALDAS, 2020; CALDAS et al.; 2020). Nota-se que os maiores valores de frequência de frentes (6 -7) se encontram na região de 20° - 40°S, além de conter valores significativos sobre a área em destaque.

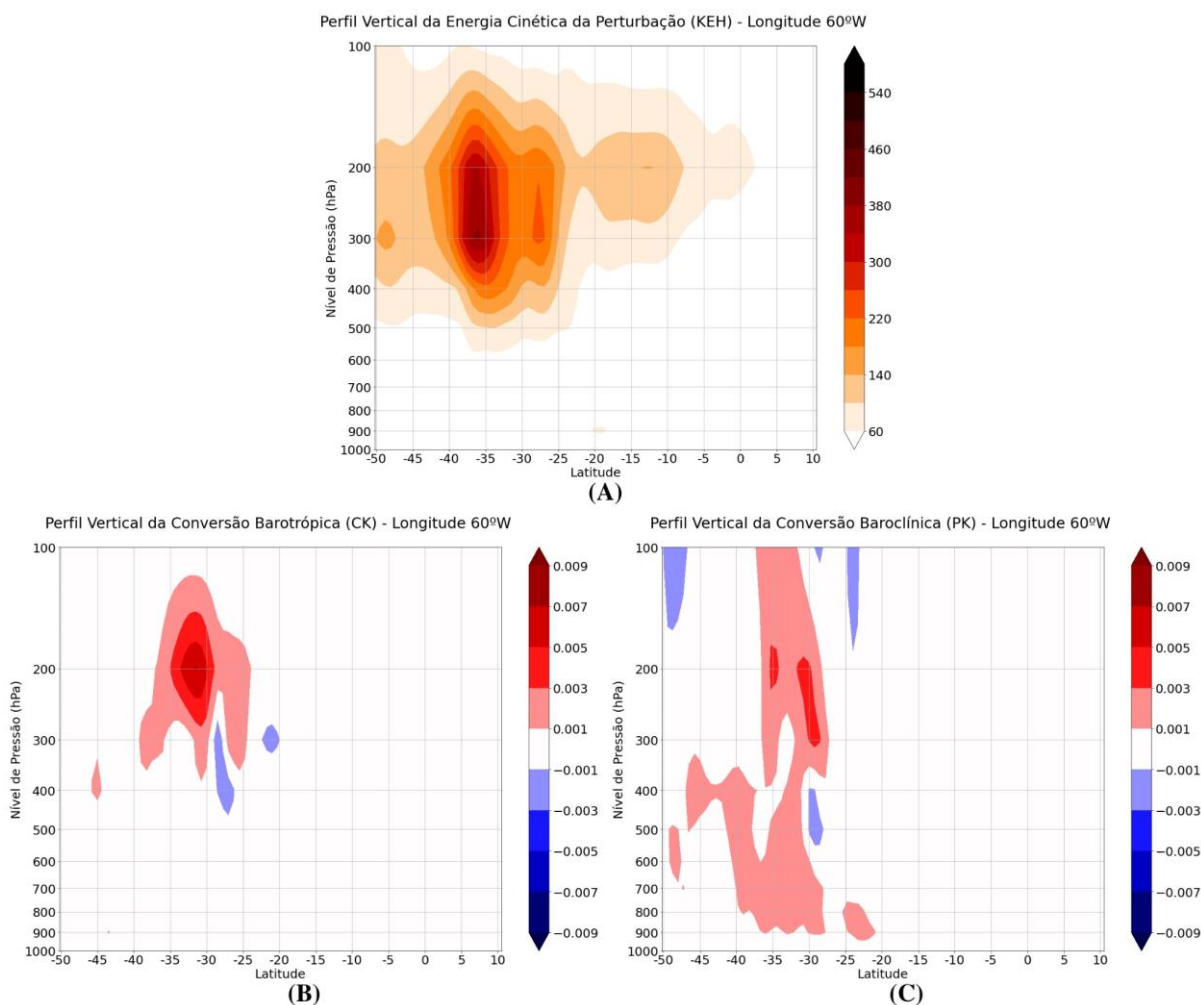
Figura 4.1: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño Máxima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t student - WILKS, 2006).



Para os compostos dos perfis verticais, utilizou-se a longitude de 60°W, região contendo maiores valores frequências de frente fria em sua extensão (Figura 4.1). Na Figura 4.2A, nota-se, em torno de 25° - 40°S, regiões com maiores valores de KEH, região onde foram

localizadas as maiores frequências de frente fria, conforme visualizado na Figura 4.1. Esses valores são relativos à movimentação da perturbação, o que nesse caso, trata-se das frentes frias. Conforme visualizado na Equação 3.1, os valores positivos de PK contribuem para o aumento da energia cinética da perturbação, enquanto nos perfis de CK, são os valores negativos que intensificam essa energia. Na Figura 4.2B, nota-se uma pequena região com valores de CK negativo, nas mesmas latitudes do máximo de KEH. No entanto, essa mesma área apresenta predominantemente valores positivos de CK. Ou seja, extraindo energia cinética da perturbação para o estado básico, desfavorecendo a formação de energia cinética da perturbação (Equação 3.1). Observando a Figura 4.2C, podemos notar nas mesmas latitudes, a presença de valores positivos de PK, sendo uma das principais contribuições para a intensificação de KEH (Equação 3.1). Ou seja, a maior energia cinética da perturbação na região de máxima frequência de frentes frias é criada principalmente através de um aumento do fluxo vertical de calor relativo à perturbação (Equação 3.4). Com isso, a conversão baroclínica mostra-se como a principal fonte de intensificação dos valores de KEH.

Figura 4.2: Fase do SAM negativo, El Niño Máxima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 60°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH,  $m^2.s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK,  $W.m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK,  $W.m^{-2}$ ).

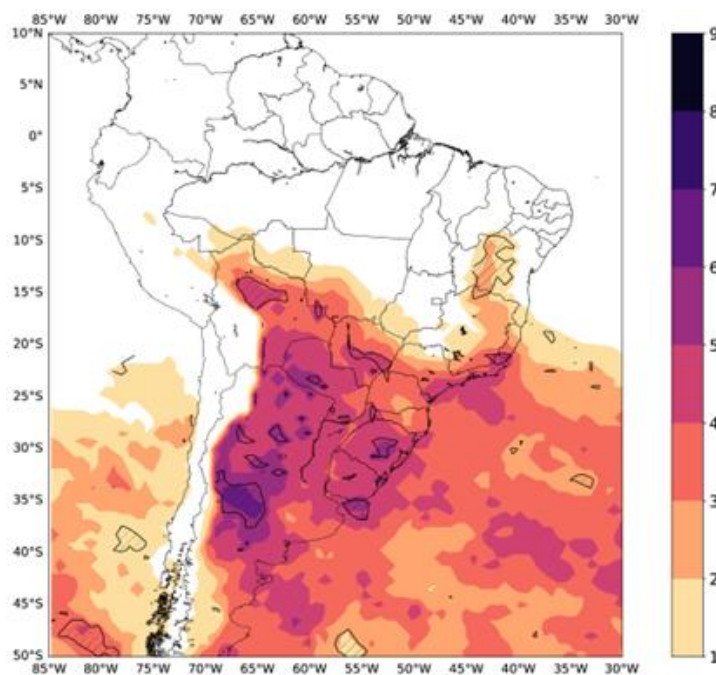


#### 4.1.2 SAM negativo, El Niño, Mínima extensão de gelo marinho no MBA (máxima frequência de frentes frias no continente)

Para o composto de SAM negativo, El Niño, mínima extensão de gelo marinho no MBA, podemos notar também no continente a máxima frequência de frentes frias (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020). Na Figura 4.3, observando a concentração das máximas frequências de frente em torno de 20°-40°S, visualizando valores de 4-7 frentes frias.

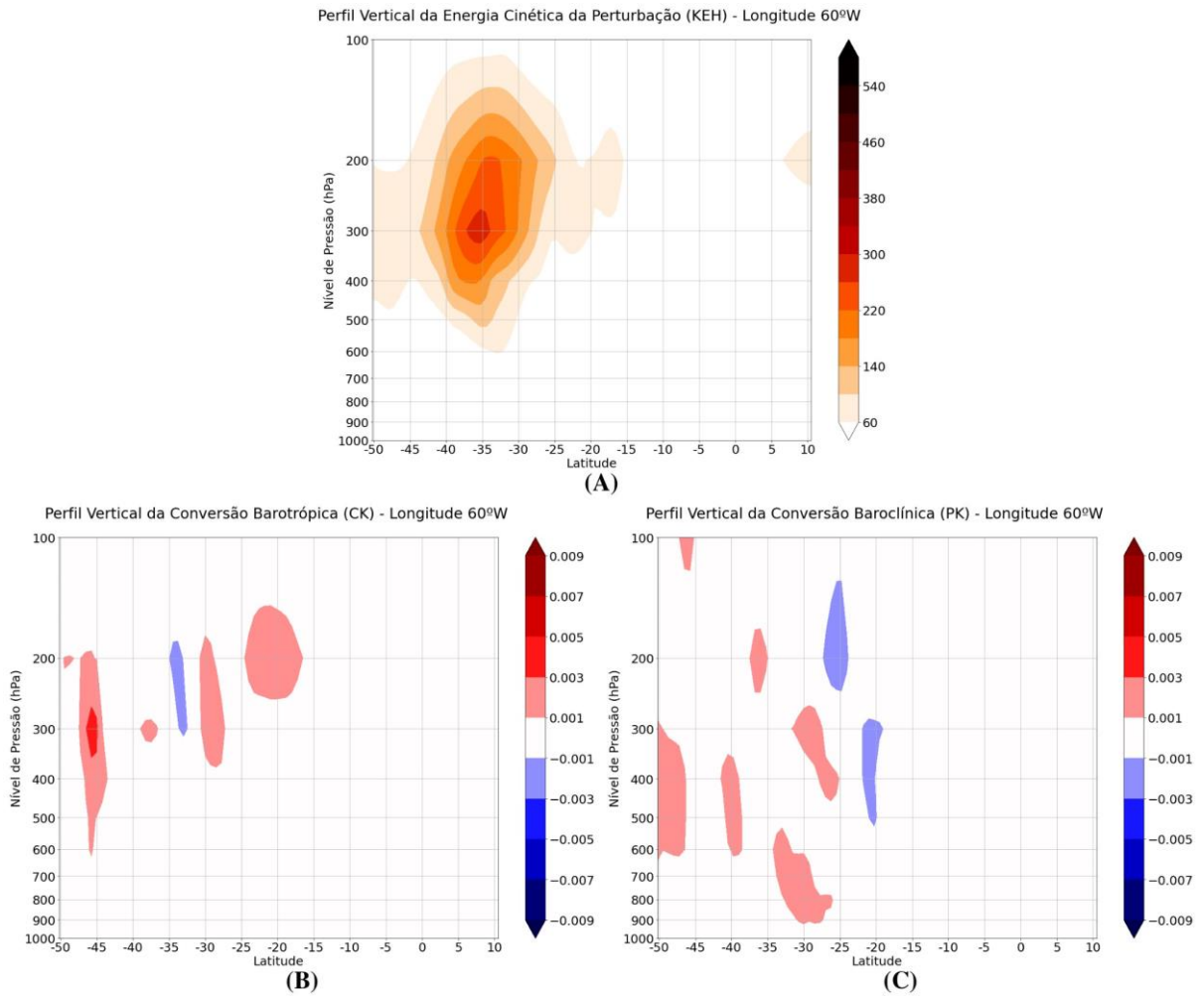


Figura 4.3: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño Mínima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student - WILKS, 2006).



Na Figura 4.4, para os perfis verticais foi selecionada a longitude de  $60^{\circ}\text{W}$ , caracterizado pela maior frequência de frente no continente (Figura 4.3). No perfil vertical de KEH (Figura 4.4A, podemos observar os maiores valores em torno de  $20^{\circ}$ - $45^{\circ}\text{S}$ , possuindo seu máximo em torno de  $35^{\circ}\text{S}$ , sendo coerente com as áreas de maiores frequências de frente, em que esses valores são relativos à movimentação da perturbação. Na Figura 4.4B, nota-se na mesma região, estão presentes em sua maioria valores positivos de CK, enfraquecendo KEH. Ou seja, o fluxo está retirando energia cinética da perturbação e transformando em energia cinética do estado básico (Equação 3.1). No entanto vale ressaltar que na latitude em torno de  $35^{\circ}\text{S}$ , podemos notar a presença de valor negativo de CK, contribuindo para o aumento de KEH (Figura 4.4A). Para o perfil PK (Figura 4.4C), nota-se áreas de valores positivos na região de  $25^{\circ}$ - $50^{\circ}\text{S}$ , onde há o aumento dos valores de KEH. Assim, PK é a principal fonte de contribuição para KEH (Equação 3.1). Vale ressaltar que, quando comparado com a categoria anterior (Figura 4.1), estes compostos apresentam valores menos intensos.

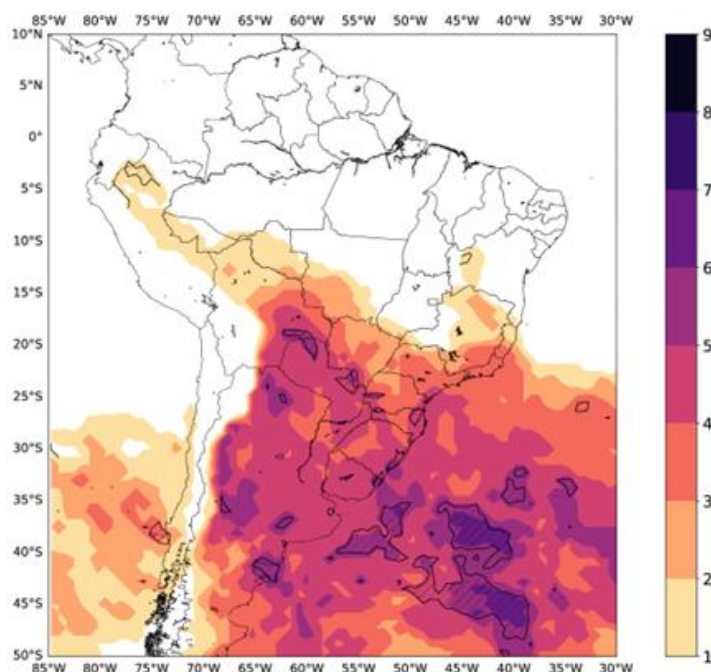
Figura 4.4: Fase do SAM negativo, El Niño, Mínima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 60°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH,  $m^2.s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK,  $W.m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK,  $W.m^{-2}$ ).



#### 4.1.3 SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MBA (máxima frequência de frentes frias no oceano)

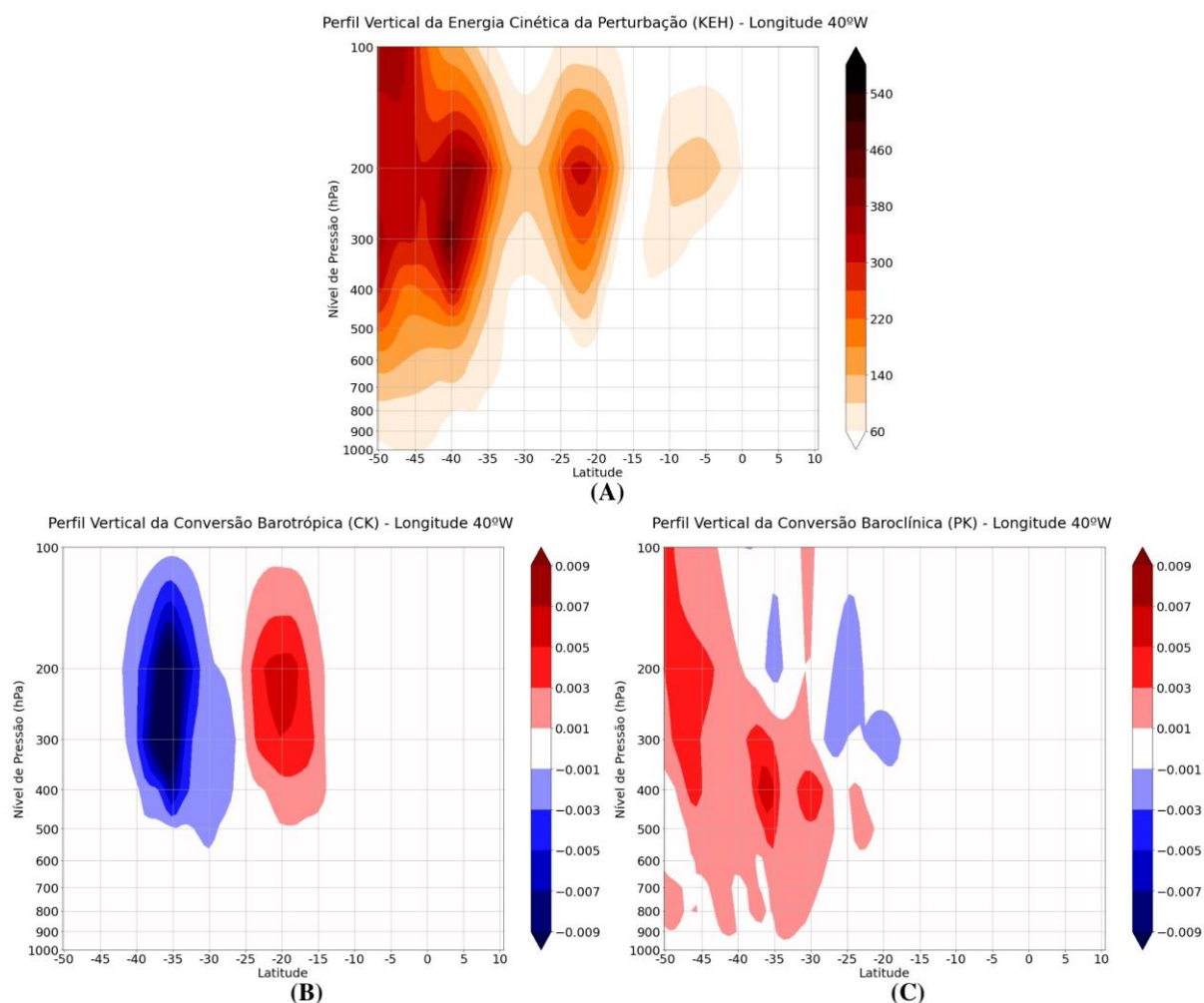
Na fase SAM positivo, La Niña e Máxima extensão de gelo marinho no MBA, observa-se a máxima frequência de frentes fria no Oceano Atlântico e adjacente (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020), apresentando valores significativos entre 5-8 frentes, na região de 35°-50°S.

Figura 4.5: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM positivo, La Niña, de Máxima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico. Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student - WILKS, 2006)



Na Figura 4.6 A, podemos observar valores de KEH nas latitudes de 20°-50°S, com maiores em torno de 40°S. Este resultado é coerente com as regiões onde são encontradas as máximas frequências de frente fria (Figura 4.5). Os maiores valores de KEH concentrados em latitudes mais altas, podem ter influência da fase positiva do positiva do SAM, com intensificação dos jatos polares (THOMPSON; WALLACE, 2000; VASCONCELLOS, 2012; FOGT; MARSHALL, 2020). Os jatos, sendo uma resposta em altos níveis ao gradiente de temperatura em superfície, explicariam a presença da concentração dos valores máximos de frente mais ao sul. Nos perfis verticais de CK e PK (Figuras 4.5B e C, respectivamente), observa-se em ambos os fluxos a contribuição para o aumento de KEH, ou seja, valores negativos de CK e valores positivos PK (Equação 3.1). No entanto, observa-se uma maior intensidade dos valores de CK, embora a presença de PK positiva abranja uma maior área. Com isso, CK se torna o principal agente de geração da energia cinética da perturbação, apesar de uma atuação considerável de PK.

Figura 4.6: Fase do SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 40°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH,  $m^2 \cdot s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK,  $W \cdot m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK,  $W \cdot m^{-2}$ ).



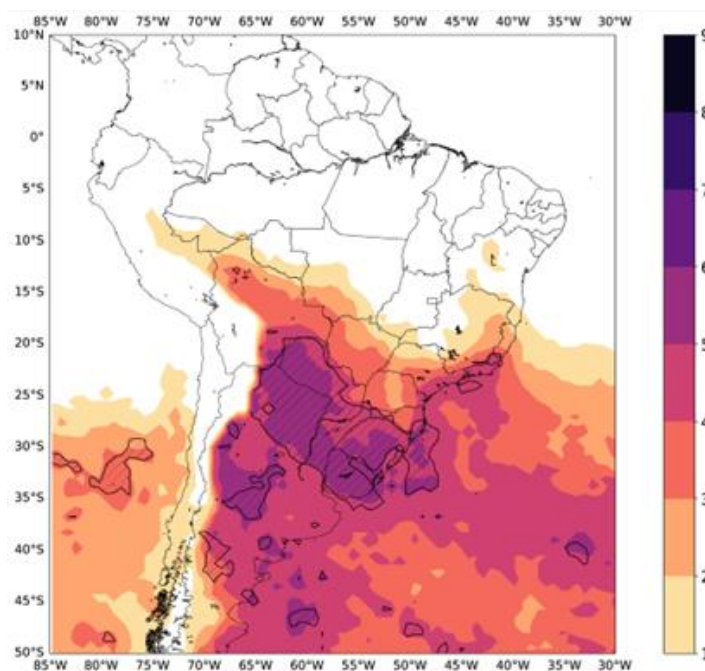
## 4.2 Mar de Weddell (MWD)

### 4.2.1 SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MWD (máxima frequência de frentes frias no continente)

Na Figura 4.7, para a fase do SAM negativo, El Niño e máxima extensão de gelo marinho no MWD, podemos notar a máxima frequência de frentes frias (4-7) no continente da AS

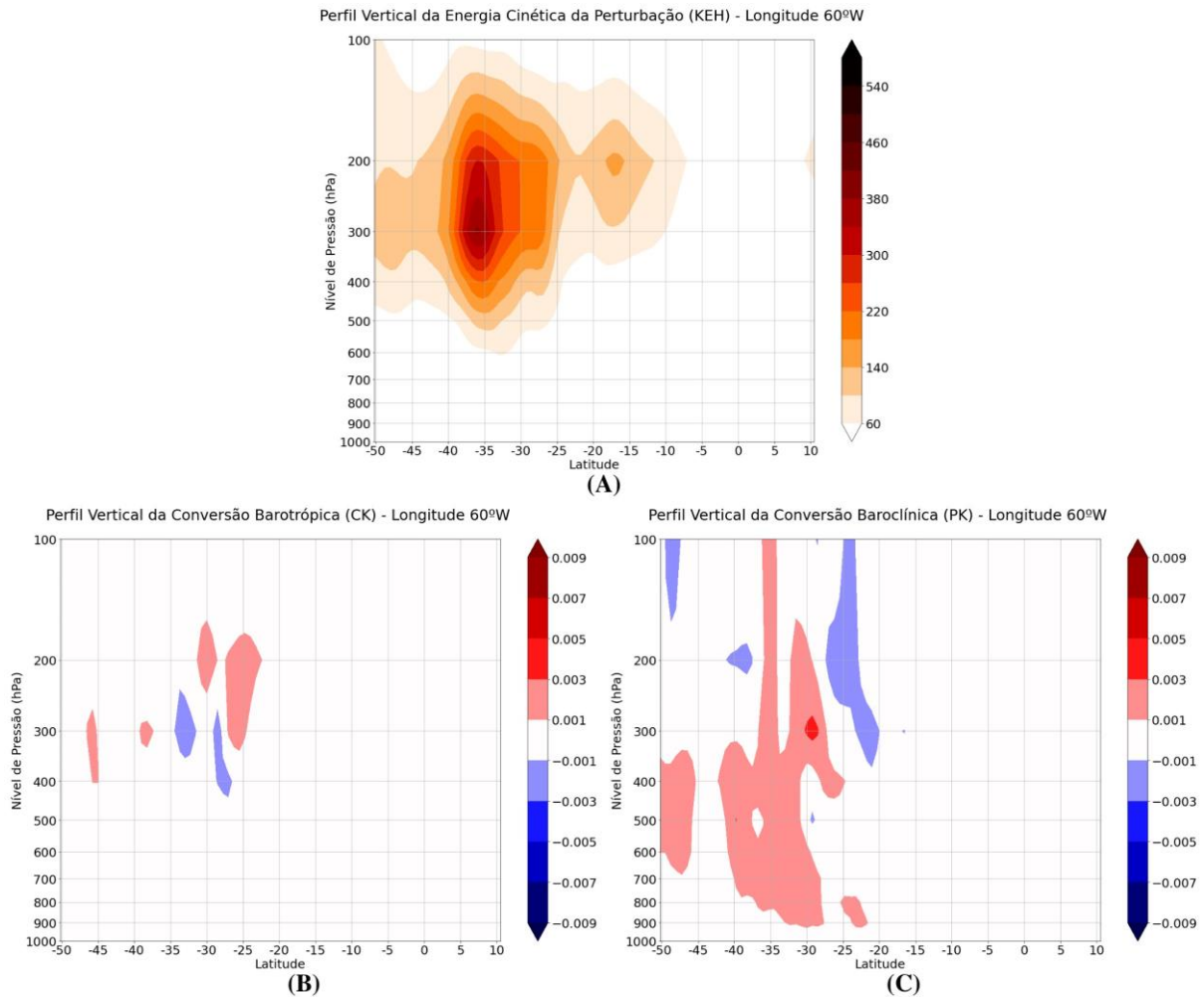
(CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020). As latitudes em que se observam os maiores valores encontram-se em torno de 20°-35°S, possuindo significância estatística em grande parte.

Figura 4.7: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño, Máxima extensão gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t student - WILKS, 2006).



Na Figura 4.8 A, podemos notar o aumento dos valores de KEH nas latitudes de 25°-40°S, sendo coerente os valores mais altos (6-7) de máximas frequências de frente frias observadas (Figura 4.7). Para CK e PK (Figuras 4.8 B e C, respectivamente), observa-se uma pequena contribuição (valores negativos de CK) em torno de 35°. No entanto, a presença também de áreas de valores positivos indica que a energia cinética da perturbação está sendo convertida em energia cinética do estado básico (Equação 3.1). Nota-se para o perfil de PK valores positivos na mesma região, sendo esta a principal fonte de geração de KEH (Equação 3.1). Vale ressaltar que, quando comparado com outras categorias no MWD, os compostos referentes a Figura 4.8 apresentam os valores menos intensos.

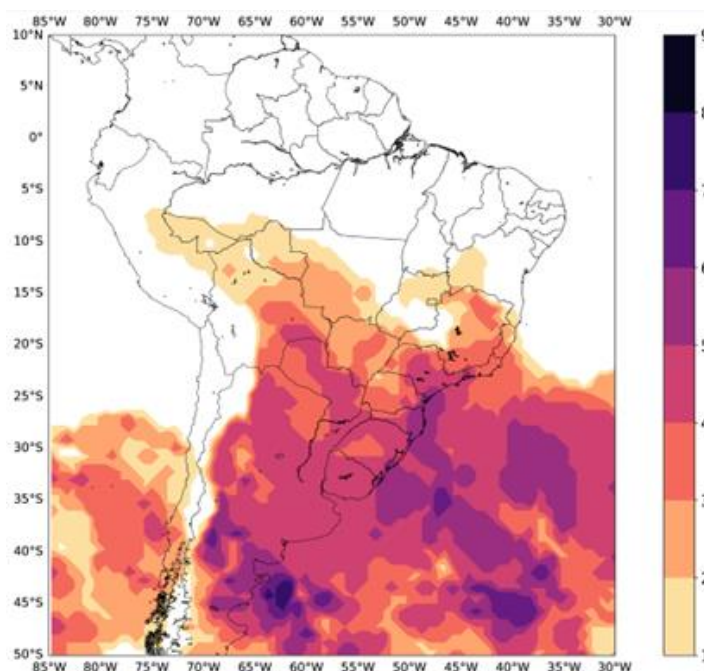
Figura 4.8: Fase SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 60°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH,  $m^2 \cdot s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK,  $W \cdot m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK,  $W \cdot m^{-2}$ ).



#### 4.2.2 SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MWD (máxima frequência de frentes frias no oceano)

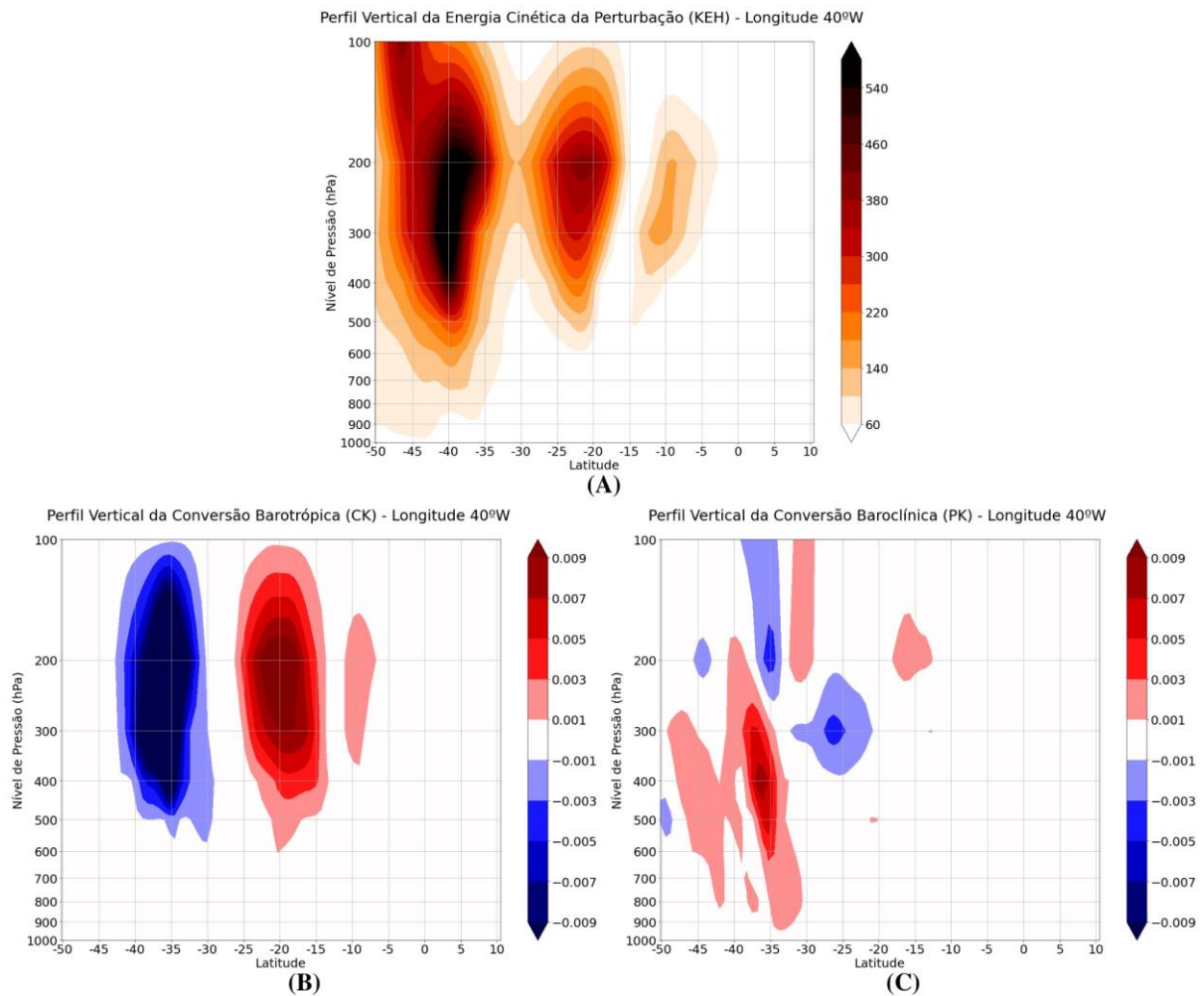
No composto de SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MWD, caracterizado pela máxima frequência de frente fria no Oceano Atlântico adjacente (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020), observa-se na região de 30°-50°S (Figura 4.9), maior concentração de frequência de frentes (6-7).

Figura 4.9: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico).



Na Figura 4.10A, podemos notar o aumento dos valores de KEH em torno de 35°-50°S, sendo coerente com a região de máxima frequência no Oceano Atlântico, além de outra região em torno de 15°-30°S, também coerente com o avanço de frequência das frentes sobre o continente. Nos compostos envolvendo CK e PK, notamos a presença de CK negativo (Figura 4.10B) na latitude de 30°-40°S, sendo uma das principais contribuições para a intensificação dos valores de KEH na região (Equação 3.1). No entanto, também notamos a contribuição de PK (Figura 4.10C) para a geração de KEH, sendo representados por valores positivos em torno de 30°-50°S. Conforme visualizado na categoria de máxima frequência de frentes frias no oceano para o MBA, também notamos o deslocamento da intensidade dos valores mais ao sul, sendo justificado pela presença da intensificação do jato polar nessas categorias (CALDAS, 2021), sendo coerente com a fase positiva do SAM (THOMPSON; WALLACE, 2000; VASCONCELLOS, 2012; FOGT; MARSHALL, 2020). Vale ressaltar que para essa categoria, somente um ano correspondeu ao conjunto de fases, justificando a intensidade dos valores de KEH e PK (Figura 4.10 A e B), quando comparados aos compostos anteriores.

Figura 4.10: Fase SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 40°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH,  $m^2 \cdot s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK,  $W \cdot m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK,  $W \cdot m^{-2}$ ).

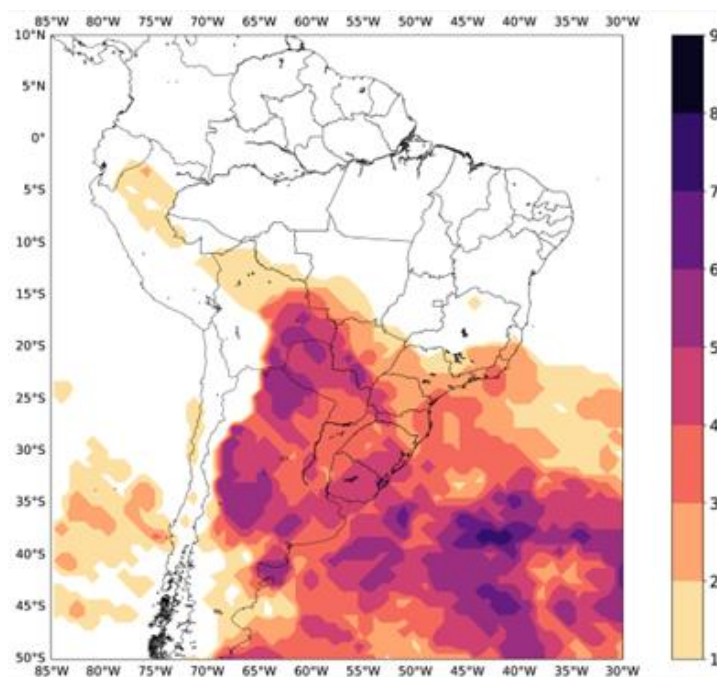


#### 4.2.3 SAM positivo, La Niña, Mínima extensão do gelo marinho no MWD (máxima frequência de frentes frias no oceano)

No composto para as fases do SAM positivo, La Niña e mínima extensão do gelo marinho no MWD, também foi observado por Caldas (2020) e Caldas et al. (2020), a máxima frequência de frentes frias no Oceano Atlântico adjacente. Na Figura 4.11, notamos que na 35°-50°S encontramos maiores valores de frequência de frentes (2-8).



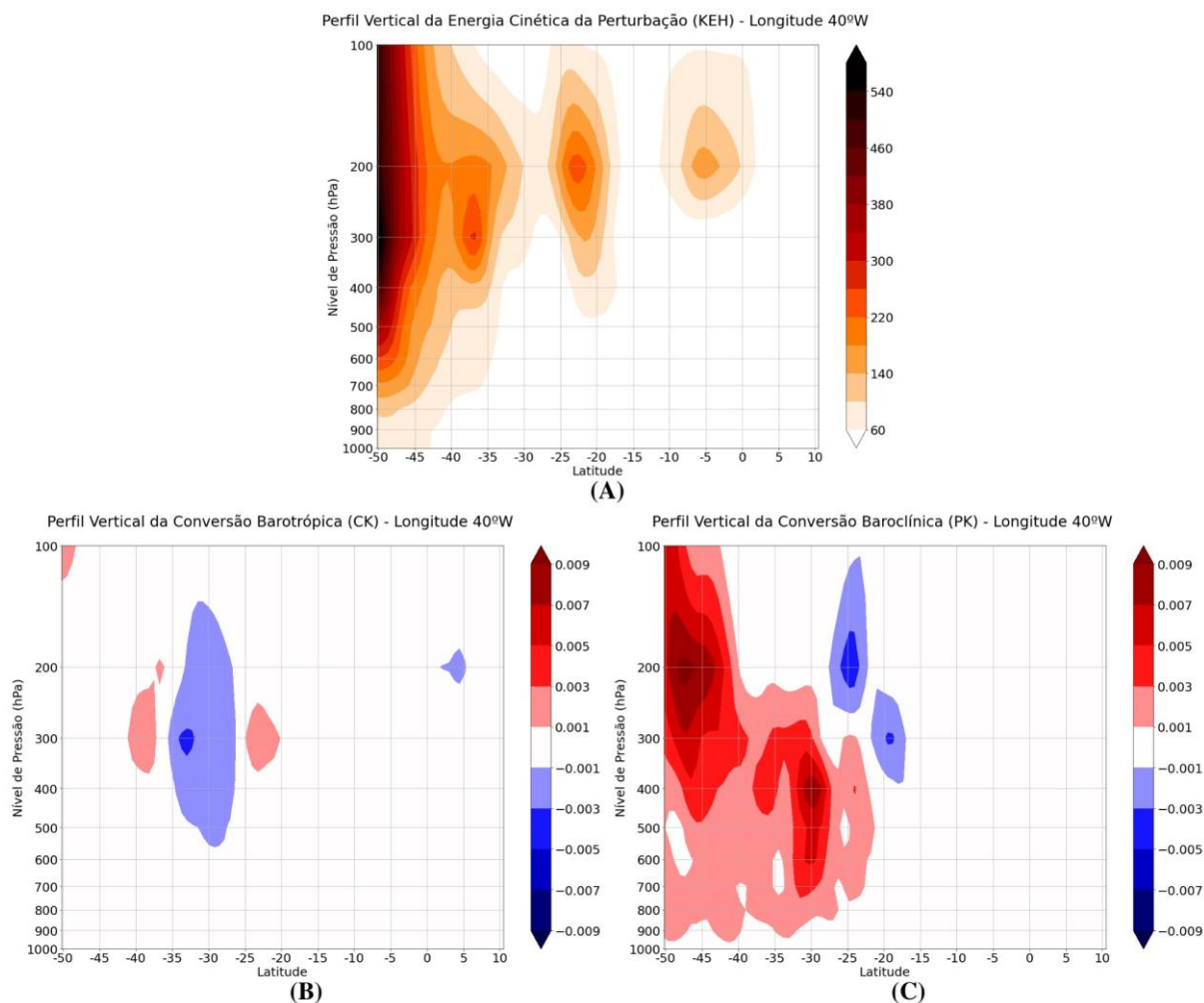
Figura 4.11: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase do SAM positivo, La Niña, Mínima extensão de gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico).



Para os perfis verticais desta categoria (Figura 4.12), selecionou-se a longitude de 40°W, em que foram observados os maiores valores de frentes. Na análise do composto de KEH (Figura 4.12A), observa-se a intensificação dos valores em torno de 35°-50°S. Em ambos os perfis de CK e PK (Figuras 4.12 B e C, respectivamente), é notória a contribuição de ambas as conversões. No entanto, o perfil de PK apresenta valores positivos em uma região mais abrangente e também possui valores mais intensos, sendo o principal contribuidor para o aumento de KEH (Equação 3.1). O mesmo comportamento observado nos compostos anteriores para a máxima frequência de frentes frias no Oceano Atlântico adjacente, também é notado para esta, onde os valores de KEH, são observados mais ao sul. Conforme as análises anteriores, este comportamento pode ser justificado pela intensificação dos jatos polares (CALDAS, 2021), devido a fase positiva do SAM (THOMPSON; WALLACE, 2000; VASCONCELLOS, 2012; FOGT; MARSHALL, 2020). Considerando o jato em altos níveis como uma resposta ao gradiente de temperatura em superfície, este fato explicaria a presença da concentração dos valores máximos de frente mais ao sul (Figura 4.11). O composto atual

apresenta perfis verticais com valores intensos, quando comparados aos das análises anteriores, sendo justificado pela presença de somente um ano na categoria.

Figura 4.12: Fase SAM positivo, La Niña, Mínima extensão de gelo marinho no MBA no mês de setembro para a longitude de 40°W: A) Perfil Vertical da Energia Cinética da Perturbação (KEH,  $m^2 \cdot s^{-2}$ ); B) Perfil Vertical da Conversão Barotrópica (CK,  $W \cdot m^{-2}$ ); C) Perfil Vertical da Conversão Baroclínica (PK,  $W \cdot m^{-2}$ ).



## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisado o Ciclo de Energia da atmosfera, apresentado por Lorenz (1955), em que o principal objetivo foi visualizar a contribuição das conversões barotrópicas (CK) e baroclínicas (PK) para a energia cinética da perturbação (KEH) para as categorias com máximas frequências de frentes frias (resultados encontrados em Caldas, 2020; Caldas et al., 2020). Assim, observou-se nos perfis verticais de KEH com maiores valores nas latitudes onde

verificou-se a maior frequência de frentes frias. Esses valores são relativos à movimentação da perturbação, o que nesse caso, trata-se das frentes frias, sendo coerente com os resultados. Nos compostos envolvendo a máxima frequência no continente em ambos os mares, notou-se PK como a principal fonte de intensificação dos valores de KEH. Ou seja, a maior parte da KEH na região de máxima frequência de frentes frias tem como origem principal um aumento do fluxo vertical de calor relativo à perturbação. Enquanto nas categorias de máximas frequências de frente fria no Oceano Atlântico adjacente, para ambos os mares, notou-se a contribuição de ambas as conversões para o aumento dos valores de KEH. Notou-se também para estas categorias, valores predominantes de CK atuando no aumento da KEH, para os compostos de máxima extensão de gelo marinho antártico. Esse resultado pode ser explicado, no oceano, pelo gradiente meridional de temperatura menor que quando comparado sobre o continente, além do cisalhamento horizontal do vento ser maior nessa região.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2005. 185 p. IBI: <6qtX3pFwXQZ3P8SECKy/Gt9nD>. (INPE-14056-TDI/1067). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) -Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3P8SECKy/Gt9nD>>.

CAI, W.; SULLIVAN, A.; COWAN, T. Interactions of ENSO, the IOS, and the SAM in CMIP3 models. **Journal of Climate**, v. 24, n. 6, p. 1688–1704, 2011.

CALDAS, C. F. Impacto do gelo marinho antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as frentes frias na América do Sul, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2020. (Relatório PIBIC/CNPq/INPE)

CALDAS, C. F. Impacto do gelo marinho antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as frentes frias na América do Sul, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2021. (Relatório PIBIC/CNPq/INPE)

CALDAS, C. F. Impacto do gelo marinho antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as frentes frias na América do Sul, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2022. (Relatório PIBIC/CNPq/INPE)

CALDAS, C.F.; VASCONCELLOS, F. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, N. O.; LOPES, I. R. Impacto do gelo marinho antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as frentes frias na América do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n.4, p. 229-237, 2020.

CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. Células de Circulação Meridional Durante os Eventos Extremos de Gelo Marinho Antártico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 251-261, 2016.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; AMBRIZZI, T. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. **Journal of Climate**, v. 18, n. 5, p. 702–718, 2005.

CAVALCANTI, I. F. A.; AMBRIZZI, T. Teleconexões e influências no Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2009. p. 463. ISBN 9788586238925.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Frentes Frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2009. p. 463. ISBN 9788586238925

CAVALIERI, D. J., PARKINSON, C. L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. 1-19. 2008.

CLEM, K. R.; FOGT, R. L. Varying roles of ENSO and SAM on the Antarctic Peninsula climate in austral spring. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 118, p. 11481-11492, 2013.

CLEM, K. R.; RENWICK, J. A.; MCGREGOR, J.; FOGT, R. L. The relative influence of ENSO and SAM on Antarctic Peninsula climate. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 121, p. 9324-9341, 2016.

COMISO JC. 2017. Bootstrap Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS, Version 3. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.

COURA DA SILVA, L. H. R.; CAVALCANTI, I. F. A. Identificação de sistemas frontais em uma simulação de 10 anos com o modelo de Circulação Geral da Atmosfera CPTEC/COLA na Região Sul e Sudeste do Brasil, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002. (Relatório PIBIC/CNPq/INPE)

DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, p. 553–597, 2011.

FEDOROVA, N., CARVALHO, M. H. Processos sinóticos em anos de La Niña e de El Niño. Parte II: Zonas frontais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 2, p. 57-72, 2000.

FOGT, R. L., MARSHALL, G. J.; The Southern Annular Mode: variability, trends, and climate impacts across the southern hemisphere. **WIREs Climate Change** v.11, p. 652, 2020.

GILLETT, N. P.; KELL, T. D.; JONES, P. D. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. L23704, p. 4, 2006.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, p. 263-280, 2003.

HALL, A.; VISBECK, M. Synchronous Variability in the Southern Hemisphere Atmosphere, Sea Ice, and Ocean Resulting from the Annular Mode. **Journal of Climate**, v. 15, p. 3043–3057, 2002.

LORENZ, E. N. Seasonal and irregular variations of the northern hemisphere. *Journal of Meteorology*, v. 8, p. 52–59, Feb. 1951.

OLIVA, F. G., VASCONCELLOS, F. C., SILVA, T. M., PIZZOCHERO, R. M. Extremos de Gelo Marinho Antártico no Mar de Weddell e Relações com Padrões de Teleconexões Climática. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 05, p. 2739-2754, 2021.

PARISE, C. K., PEZZI, L. P., CARPENEDO C. B., VASCONCELLOS F. C., BARBOSA, W. L., LIMA, L. G. Sensitivity of South America Climate to Positive Extremes of Antarctic **Sea Ice**. *Anais da Academia Brasileira de Ciências - Geosciences*, v. 94 (suppl 1), p. 1-22, 2022  
Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210706>

PEZZA A. B.; DURRANT, T. H.; SIMMONDS, I., SMITH, I. Southern Hemisphere synoptic behaviour in extreme phases of SAM, ENSO, sea ice extent and Southern Australia rainfall. **Journal of Climate**, v. 21, p. 5566-5584, 2008.

PEZZA A. B.; RASHID, H. A.; SIMMONDS, I. Climate links and recent extremes in Antarctic sea ice, high-latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 57–73, 2012.

PLUMB, R. A. **A new look at the energy cycle**. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 40, n. 7, p. 1669–1688, Jul. 1983.

PHILANDER, S. G. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. **San Diego**, California: Academic Press, 1990.

RAPHAEL, M. N.; HOBBS, W.; WAINER, I. The effect of Antarctic sea ice on the Southern Hemisphere atmosphere during the southern Summer. **Climate Dynamics**, v. 36, p. 1403–1417, 2010.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. D. Relationship between the Southern Annular Mode and the Southern Hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48–55, 2009.

TAKAYA, K.; NAKAMURA, H. A Formulation of a Phase-Independent Wave Activity Flux for Stationary and Migratory Quasigeostrophic Eddies on a Zonally Varying Basic Flow. **Journal of the Atmospheric Sciences** v.58. p. 608–627, 2001. <https://doi.org/10.1175/1520-0469>

TEDESCHI, R. G. **As influências de tipos diferentes de ENOS na precipitação e nos seus eventos extremos sobre a América do Sul - observações, simulações e projeções**. 2013. 254 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/3DTKRF2>. (sid.inpe.br/mctm19/2013/04.16.16.57-TDI). Tese

(Doutorado em Meteorologia) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DTKRF2>

THOMPSON, D. W. J; WALLACE, J. M; Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. **Journal of Climate**, v. 13, p 1000-1017, 2000.

VASCONCELLOS, F. C. A Oscilação Antártica - mecanismos físicos e a relação com **características atmosféricas sobre a América do Sul/oceanos adjacentes**. 2012. p. 192 (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/10.09.19.33-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) -Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3CPTMAL>>.

VASCONCELLOS, F. C.; OLIVA, F. G.; PIZZOCHERO, R. M.; SILVA, T. M.; PARISE, C. K., CALDAS, C. F. Combined performance of September's Weddell sea ice extent, Southern Annular Mode, and Atlantic SST anomalies over the South American temperature and precipitation. *GEOSCIENCES An. Acad. Bras. Ciênc.*, 94 (suppl 1), 2022

VASCONCELLOS, F. C.; PIZZOCHERO, R. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Month to month impacts of Southern Annular Mode over South America climate. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 41, p. 783-792, 2019.

VERA, C.; SILVESTRI, G.; BARROS, V; CARRIL, A. differences in El Niño response over the Southern Hemisphere. **Journal of Climate**, v. 17, p. 1741–1753, 2004.

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

YUAN X. J.; MARTINSON D. G. Antarctic Sea Ice Extent Variability and Its Global Connectivity. **Journal of Climate**, v. 13, p.1697–1717, 2000.