Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ESTUDO CLIMATOLÓGICO DAS FRENTES FRIAS ATUANTES NO SUL DO RIO GRANDE DO SUL E NO SUL DE MINAS GERAIS ENTRE 2009 E 2021

Climatological Study of Frontal Systems Acting in the South of Rio Grande do Sul and South of Minas Gerais between 2009 and 2021

Estudio Climatológico de Frentes Fríos actuando en el sur de Rio Grande do Sul y en el sur de Minas Gerais entre 2009 y 2021

Natan Chrysostomo de Oliveira Nogueira
Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
natanchisostomo@gmail.com

Pedro Henrique Gomes Machado
Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
pedro.henrique.gm@hotmail.com

Michelle Simões Reboita
Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
reboita@unifei.edu.br

Resumo: Há diferentes formas de identificação dos sistemas frontais como, por exemplo, algoritmos que utilizam dados de reanálise para identificação objetiva desses sistemas. Porém, devido à complexidade dos sistemas frontais, a identificação objetiva pode levar a muitos erros nos resultados, sendo a análise sinótica tradicional (manual) de cartas meteorológicas o método ainda mais confiável para a identificação das frentes. Com isso, os objetivos do presente estudo são (a) identificar o número de passagens de frentes frias pelo sul do Rio Grande do Sul (SRS) e sul de Minas Gerais (SMG), entre 2009 e 2021, com base em cartas sinóticas, (b) determinar a porcentagem de sistemas que passam pelo SRS e chegam ao sul SMG, (c) calcular a contribuição das frentes frias para o total sazonal de precipitação e (d) realizar uma avaliação de como a temperatura da superfície do mar (TSM) interfere no deslocamento das frentes frias entre o SRS e SMG. As frentes frias foram identificadas nas cartas sinóticas disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Por estação do ano, considerando o verão, outono, inverno e primavera, o número médio de frentes frias registradas no SRS é de 10, 12, 13 e 14 e no SMG é de 1, 4, 7 e 5 sistemas, respectivamente. Cerca de 30% das frentes frias que passam pelo SRS também chegam ao SMG e o tempo e a

velocidade média anual de deslocamento das frentes é de dois dias e 6,8 m/s, respectivamente. As frentes frias têm maior contribuição no total sazonal de precipitação no inverno tanto no SRS quanto em SMG. Com relação à TSM, foi analisado o número de frentes frias que se deslocaram do SRS para o SMG em situação de TSM maior e menor do que um desvio-padrão e meio ($1{,}5\sigma$) em relação à climatologia. Em situação de anomalia negativa (positiva) de TSM, 70% (30%) das frentes frias conseguem chegar no SMG.

Palavras-chave: Precipitação. Análise Sinótica. Composição de variáveis atmosféricas.

Abstract: There are many ways of frontal systems identification, for example, algorithms that use reanalysis data to objective identification of these systems. However, due to the complexity of frontal systems, the objective identification includes mistakes leading to erroneous results, thus the traditional synoptic analysis (manual) of meteorological conditions is the most reliable method of identification of frontal systems. Thereby, the objectives of this study are identify (a) the number of cold fronts passing over the south of Rio Grande do Sul (SRS) and south of Minas Gerais (SMG), between 2009 and 2021, with synoptic analysis, (b) the percentage of frontal systems that passes through SRS and reaches SMG, (c) the contribution of cold fronts to the total seasonal precipitation and (d) how the sea surface temperature (SST) interfere on the displacement of cold fronts between SRS and SMG. The cold fronts were identified based on synoptic analysis of charts from Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). By season, considering austral summer, autumn, winter and spring, the average number of cold fronts registered in SRS is 10, 12, 13 and 14 and in SMG is 1, 4, 7 and 5, respectively. About 30% of cold fronts that reach through SRS also reach through SMG and the average time of cold fronts displacement is two days and 6,8 m/s, respectively. The cold fronts have a higher contribution in total seasonal precipitation in winter for both regions. Regarding the SST, it was analyzed that the number of cold fronts that reach through from SRS also reach through SMG in the condition of SST is more or less than one standard deviation and a half ($1{,}5\sigma$). In conditions of SST negative (positive) anomaly, 70% (30%) of the cold fronts reach through SMG.

Keywords: Precipitation. Synoptic Analysis. Composition of atmospheric variables.

Resumen: Hay diferentes formas de identificar los sistemas frontales, por ejemplo, algoritmos que utilizan datos de reanálisis para una identificación objetiva de estos sistemas. Sin embargo, debido a la complejidad de los sistemas frontales, la identificación objetiva puede llevar a muchos errores en los resultados, siendo el análisis sinóptico tradicional (manual) de mapas meteorológicos el método más confiable para identificar las frentes. Por lo tanto, los objetivos del presente estudio son: (a) identificar el número de pasajes de frentes frías por el sur de Rio Grande do Sul (SRS) y el sur de Minas Gerais (SMG) entre 2009 y 2021, basándose en mapas sinópticos; (b) determinar el porcentaje de sistemas que pasan por el SRS y llegan al sur de SMG; (c) calcular la contribución de las frentes frías al total de precipitación estacional; y (d) realizar una evaluación de cómo la temperatura de la superficie del mar (TSM) interfiere en el desplazamiento de las frentes frías entre el SRS y SMG. Las frentes frías fueron identificadas en los mapas sinópticos proporcionados por el Centro de Pronósticos de Tiempo y Estudios Climáticos del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (CPTEC/INPE). Por estación del año, considerando el verano, otoño, invierno y primavera, el número promedio de frentes frías registradas en el SRS es de 10, 12, 13 y 14, y en SMG es de 1, 4, 7 y 5 sistemas, respectivamente. Alrededor del 30% de las frentes frías que pasan por el SRS también llegan a SMG y el tiempo y la velocidad promedio anual de desplazamiento de las frentes son de dos días y 6,8 m/s, respectivamente. Las frentes frías tienen una mayor contribución al total de precipitación estacional en invierno tanto en el SRS como en SMG. En relación con la TSM, se analizó el número de frentes frías que se desplazaron del SRS a SMG en situaciones de TSM mayor y menor que un desvío estándar y medio ($1{,}5\sigma$) con respecto a la climatología. En situaciones de anomalía negativa (positiva) de TSM, el 70% (30%) de las frentes frías logran llegar a SMG.

Palabras clave: Precipitación. Análisis sinóptico. Composición de variables atmosféricas.

Submetido em: 04/01/2023
Aceito para publicação em: 15/02/2024
Publicado em: 26/02/2024

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas atmosféricos como as frentes é um tópico de interesse tanto para estudiosos no tema quanto para a população em geral, já que elas ocasionam mudanças na temperatura do ar, ventos fortes e, em geral, precipitação, que podem levar a problemas socioambientais. A fim de disseminar conhecimento sobre esses sistemas, aqui é apresentada uma breve introdução sobre as características básicas das frentes, os métodos (Lagrangeano e Euleriano) empregados no estudo das frentes, bem como uma visão dos estudos climatológicos iniciando por uma perspectiva hemisférica, que se afunila indo para as regiões sul e sudeste do Brasil. Por fim, os objetivos específicos do presente estudo são apresentados.

Frente é um sistema atmosférico que é definido como a zona de contato entre duas massas de ar com diferentes propriedades termodinâmicas: temperatura e densidade (PALMÉN E NEWTON, 1969). Essa definição se aplica na região de contato com a superfície terrestre, pois em termos de perfil vertical, o nome atribuído para a interface entre duas massas de ar é zona frontal. As frentes são classificadas tanto como sistemas de mesoescala, devido à largura (tamanho inferior a 50 km), quanto de escala sinótica, devido ao comprimento (tamanho superior a 1000 km) (YNOUE et al., 2017). As frentes também são classificadas em relação ao movimento em: (a) frente fria, a qual o ar frio avança a uma região dominada por ar quente; (b) frente quente, em que o ar frio perde suas propriedades numa dada região permitindo o domínio/expansão da massa de ar quente; (c) frente estacionária, quando a frente praticamente não se desloca num dado intervalo de tempo; e (d) frente oclusa, que ocorre no caso dos ciclones extratropicais, e é caracterizada pelo avanço do ar frio da região da frente fria na região da frente quente, o que força o ar quente a ascender e, portanto, descaracteriza a região de gradientes horizontais de temperatura de temperatura no sistema ciclônico (VIANELLO et al., 2001; YNOUE et al., 2017). Em outras palavras, o processo de oclusão está associado com o decaimento dos ciclones extratropicais.

As massas de ar frio que se deslocam dos polos em direção às latitudes mais baixas geram intensos gradientes horizontais de temperatura do ar levando à formação das frentes e, consequentemente, de ciclones extratropicais. Em 1922, Bjerknes já tinha desenvolvido a teoria que os ciclones extratropicais eram formados ao longo de uma linha de descontinuidade entre uma massa de ar polar mais densa e uma outra menos densa.

Entretanto, como a formação de ciclones extratropicais não é só devido às frentes, um ciclone que se forma associado a ondas viajando em níveis médios/altos da atmosfera irá, consequentemente, desenvolver as frentes fria e quente. Muitas das frentes ocorridas nos subtrópicos estão associadas aos ciclones com esse tipo de gênese. À medida que as frentes frias se deslocam para latitudes mais baixas, os gradientes horizontais de temperatura do ar enfraquecem e as frentes passam a receber a denominação de frentes subtropicais (KOUSKY, 1979; REBOITA et al., 2016; ESCOBAR et al., 2016).

As frentes frias são responsáveis por mudanças bruscas de temperatura e pressão atmosférica, que modificam as condições meteorológicas locais, causando ventanias, nebulosidade e muitas vezes precipitação, que pode ser volumosa e/ou intensa (YNOUE et al., 2017). De forma mais detalhada, quando uma frente fria se desloca para uma dada região, antes da sua passagem ocorrerá aumento das temperaturas, queda na pressão atmosférica, os ventos serão predominantemente de quadrante norte (no caso do Hemisfério Sul - HS), há desenvolvimento de nuvens do tipo Cirrus (Ci) e Cirrostratus (Cs) e pode ocorrer precipitação (AHRENS, 2015; YNOUE et al., 2017). Durante a passagem da frente fria sobre a dada região, a temperatura decresce rapidamente, a pressão atmosférica atinge seu mínimo, há ocorrência de ventos com direções variáveis e com rajadas, além do aumento na intensidade da chuva devido ao desenvolvimento de nuvens com maior extensão vertical como as Cumulus (Cu) e Cumulonimbus (Cb). Por fim, após a passagem da frente, a massa de ar frio pós-frontal faz com que a temperatura do ar continue a decrescer, aumenta a pressão atmosférica e favorece a inibição de nuvens. Nesse momento, os ventos predominantes são de quadrante sul (HS) e as nuvens são do tipo Cumulus (Cu) e Stratus (St), mas também podem ocorrer condições de céu limpo (YNOUE et al., 2017).

O conhecimento das características climatológicas de cada localidade está atrelado ao conhecimento dos seus sistemas atmosféricos precipitantes. Por isso, é importante estudar a atuação das frentes frias e a contribuição delas para alteração no tempo. As frentes podem ser estudadas através de dois referenciais: o Lagrangeano e o Euleriano. No primeiro, são utilizados algoritmos para acompanhar a trajetória das frentes e, no segundo, um determinado local é definido e é analisada a evolução temporal das variáveis atmosféricas para informar sobre a ocorrência ou não de frentes (SIMMONDS et al., 2012). Nota-se que o referencial Lagrangeano é muito mais complexo do que o Euleriano, pois envolve o

comprimento das frentes, como os campos meteorológicos representam esses sistemas e o deslocamento no tempo.

Considerando o referencial Lagrangeano, o estudo de Simmonds et al. (2012) para o HS é um dos que utilizam o método automático para a identificação e rastreamento de frentes. Os autores mostraram que a região de maior frequência de frentes no HS é a faixa entre as latitudes de 40° a 60°S tanto no verão quanto no inverno. Para o Hemisfério Norte (HN), Bitsa et al. (2019) adaptaram o algoritmo de Simmonds et al. (2012) a fim de obterem um método objetivo adequado para a região do Mediterrâneo. O algoritmo foi validado com dados observados e mostrou boa performance. Os autores destacaram que a mudança na direção do vento é um pré-requisito essencial na identificação das frentes frias. Berry et al. (2011) também utilizaram um algoritmo para identificar a localização e extensão das frentes no globo. Ao separarem as frentes em frias, quentes e estacionárias encontraram que as frentes estacionárias tendem a ser menos comuns no oceano e são localizadas mais próximas ao equador do que as frentes frias, além de possuírem menor escala e maior frequência em localidades específicas como ao longo da Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS). A variabilidade sazonal da frequência dos sistemas frontais é maior no HN se comparado ao HS devido, provavelmente, à distribuição assimétrica das áreas continentais e oceânicas. Há uma diferença positiva de 27% no número de frentes frias e de 23% no número de frentes quentes entre os trimestres mais e menos ativos, JJA e DJF, respectivamente (BERRY et al., 2011). Já Sanders et al. (2002) utilizaram em seu algoritmo a busca por regiões de contrastes térmicos e mostram que as zonas baroclínicas (regiões de gradiente horizontal de temperatura) nos Estados Unidos são melhor configuradas no inverno-outono do que na verão-primavera, fato associado com a própria evolução das estações do ano. Na literatura não se encontram estudos aplicando algoritmos, com base no referencial Lagrangeano, para a identificação de frentes somente na América do Sul (AS). Entretanto, há estudos que usam a subjetividade, isto é, acompanham o deslocamento dos sistemas frontais em cartas sinóticas ao longo do tempo (o que também é método Lagrangeano). A maioria dos estudos que serão elencados na sequência usa o referencial Euleriano, em que as frentes são identificadas numa dada localidade com base nas mudanças registradas nas variáveis atmosféricas.

A AS é afetada por massas de ar de origem polar e quando essas massas encontram o ar mais quente das menores latitudes, as frentes frias (FFs) se formam e contribuem para o

regime de chuvas nas regiões em que passam (CARDOZO; REBOITA; GARCIA, 2015). A literatura sobre sistemas frontais atuantes na AS não é muito extensa e a maioria dos trabalhos existentes é elencada no Quadro 1, seguindo a cronologia, e alguns dos estudos são aqui descritos. Oliveira (1986) foi um dos primeiros trabalhos a mostrar a interação das frentes frias com a convecção tropical na AS. Quando os sistemas frontais possuem características estacionárias no sul-sudeste do Brasil por mais de 3 dias, há uma interação com a convecção tropical. Já Kousky (1988) acrescenta que essa interação contribui para a ocorrência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), uma banda de nebulosidade no sentido noroeste-sudeste que se estende do sul da Amazônia ao sudeste do Brasil. Kousky (1979) também mostra que as frentes frias quando chegam à costa da região nordeste do Brasil possuem gradientes horizontais de temperatura do ar fracos e podem ganhar o nome de frentes subtropicais.

Quadro 1- Estudos sobre frentes referentes à AS.

Ano	Autor	Ano	Autor
1979	Kousky, V. E.	2015	Pampuch e Ambrizzi
1986	Oliveira, A. S.	2016	Escobar et. al.
1989	Satyamurty e Mattos	2016	De Jesus et. al.
1996	Lemos e Calbete	2016	Foss et al.
2000	Justi da Silva e Silva Dias	2016	Pampuch e Ambrizzi
2002	Justi da Silva et. al.	2017	Andrade, K. M.
2004	Rodrigues et. al.	2017	Blázquez e Solman
2005	Andrade, K. M.	2017	Parfitt, R; Czaja, A; Seo H.
2006	Dametto e Da Rocha	2017	Seluchi et. al.
2009	Reboita et. al.	2018	Andrade e Cavalcanti
2011	Berry et al.	2018	Blázquez e Solman
2011	Blázquez J.	2018	Thomas e Schultz
2011	Fedorova e Carvalho	2018	Thomas e Schultz
2012	Simmonds et al.	2019	Blázquez e Solman
2012	Catto et. al.	2019	Escobar et. al.
2013	Penna, A. C.	2021	Solari et al.
2013	Amorim Neto et al.	2022	Carmo et al.
2014	Silva, L. et al.	2022	Cavalcanti et. al.
2015	Blázquez e Solman	2022	Solari, Blázquez e Solman

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Andrade (2005) e Cardozo et al. (2015) mostram que a frequência anual das FFs na costa leste da AS diminui do sul da Argentina em direção às latitudes mais baixas. Enquanto, no sul do Rio Grande do Sul (SRS), a média anual é de 52 sistemas e no sul de Minas Gerais (SMG) é de 18 sistemas. No sul do Brasil, há pouca variação mensal e sazonal do número de FFs atuantes (CARDOZO et al., 2015; DE JESUS et al. 2016). Já no sul de Minas Gerais, as FFs ocorrem com maior frequência no inverno, quando o estudo é baseado em análise visual de

cartas sinóticas (CARDOZO et al., 2015). Já com o uso de algoritmos, há estudos que apontam frequência similar no inverno e primavera (SILVA et al., 2014).

Devido às peculiaridades das FFs como (a) ser um sistema de escala sinótica em comprimento e de mesoescala em largura, (b) apresentar deslocamento e (c) ser uma região em que a vorticidade relativa não é uma única banda, é fragmentada em núcleos com diferentes intensidades que se conectam, a identificação desses sistemas através de algoritmos baseados no método Lagrangeano (e até mesmo Euleriano quando usada as variáveis atmosféricas como temperatura do ar e direção do vento) é muito complexa, o que inclui erros de identificação. Para um estudo regionalizado, pode-se aplicar a análise sinótica tradicional (manual) de cartas sinóticas, que embora ainda seja um método subjetivo é menos propenso a erros na identificação das frentes. Uma vez que os sistemas atmosféricos estão identificados numa sequência de cartas, se pode realizar tanto uma análise Lagrangeana, acompanhando o deslocamento individual de cada sistema, quanto Euleriano, em que num dado local se identifica a passagem das frentes. Os pontos negativos no uso da análise manual de cartas sinóticas é (a) o tempo necessário para fazer as análises, por isso, essa metodologia não é recomendada para estudos com grande extensão temporal, (b) a subjetividade intrínseca ao pesquisador que faz a análise das cartas e (c) dados limitados de observações meteorológicas sobre o continente (rede de estações pouco densa), o que dificulta a localização precisa das frentes sobre o continente.

A maioria dos estudos elencados no Quadro 1 focam na frequência das frentes frias. Pouco se conhece sobre os sistemas que estão no sul do país e chegam na região sudeste. Quanto tempo uma frente que está no Rio Grande do Sul necessita para chegar no sul de Minas Gerais, qual a velocidade de deslocamento etc.? Essas informações são extremamente úteis para a previsão operacional de tempo.

Diante do contexto apresentado, o objetivo principal do estudo é complementar o conhecimento sobre FFs no Brasil provendo uma análise da passagem de FFs em dois locais do leste do país (sul do Rio Grande do Sul e sul de Minas Gerais), entre 2009 e 2021, com base na análise de cartas sinóticas de superfície. Portanto, constituem objetivos específicos do estudo: (a) a identificação do número de passagens de FFs sobre o sul do Rio Grande do Sul e sul de Minas Gerais (referencial Euleriano), entre 2009 e 2021, com base em cartas sinóticas, (b) a porcentagem de sistemas que passam pelo Rio Grande do Sul e chegam ao sul de Minas

Gerais (referencial Lagrangeano) e o tempo de deslocamento desses sistemas, (c) a contribuição das FFs para o total sazonal de precipitação e (d) como a temperatura da superfície do mar (TSM) interfere na frequência das FFs; para esse último, duas situações são investigadas: a primeira é se meses em que predominam anomalias quentes de TSM na costa da Argentina apresentam menor número de sistemas frontais no sul do Brasil e, a segunda, é se a ocorrência de águas quentes entre o Rio Grande do Sul e Minas Gerais afeta o número de FFs em Minas Gerais. Essas duas situações/hipóteses são baseadas em observações mensais das reuniões climáticas do Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GrEC-USP) (BUENO et al, 2023).

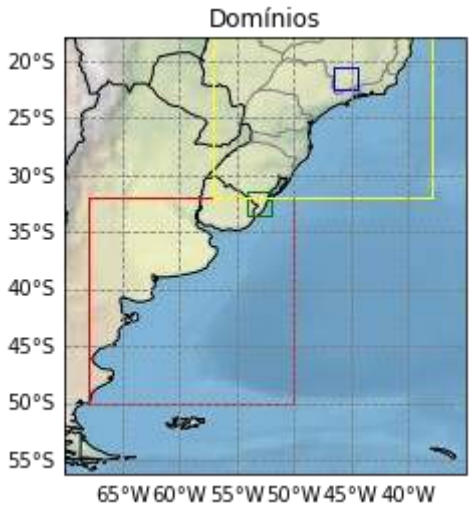
2. METODOLOGIA

2.1. Região de Estudo

A região de estudo é apresentada na Figura 1. Há dois subdomínios pequenos, que representam as regiões de identificação das FFs: um no sul do Rio Grande do Sul e outro no sul de Minas Gerais. Os dois domínios maiores indicam a área usada no cálculo das anomalias de TSM.

O sul do Rio Grande do Sul caracteriza-se por ser uma planície e possuir clima do tipo subtropical (Cfa), segundo a classificação climática de Köppen (REISSER JUNIOR, 2012). Já o sul de Minas Gerais é dominado pela Serra da Mantiqueira e possui clima tipo monção (Cwa), com inverno seco e verão chuvoso (REBOITA et al., 2015), também pela classificação de Köppen. Detalhes sobre o ciclo anual dessas regiões bem como dos sistemas precipitantes são apresentados em Reboita et al. (2010) e Ferreira e Reboita (2022).

Figura 1 -Domínios usados no estudo: sul do Rio Grande do Sul (quadro em verde), sul de Minas Gerais (quadro em azul) e regiões para o cálculo da TSM (quadro em vermelho e quadro em amarelo).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

2.2. Dados

Para atender os diferentes objetivos do estudo, os dados utilizados provêm de diferentes fontes. Para a identificação das FFs, são utilizadas cartas sinóticas de superfície nos horários sinóticos padrão (0000, 0600, 1200 e 1800 Z), entre janeiro de 2009 e dezembro de 2021, disponibilizadas pelo Grupo de Previsão de Tempo (GPT) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, http://tempo.cptec.inpe.br/cartas.php?tipo=Superficie). O ano de 2022 não foi incluído nas análises, pois o CPTEC teve suas atividades de traçado de cartas sinóticas encerradas em 30 de abril de 2022, após quase 15 anos de serviço prestado à comunidade científica.

Para caracterização espacial das FFs é utilizada a reanálise ERA5 (HERSBACH et al., 2018). As variáveis obtidas, considerando o horário das 1200 Z, horário em que há um maior registro de dados observados (CAPUCIN et al., 2022), e com resolução horizontal de 0,25° x 0,25°, são a componente zonal (u) e meridional (v) do vento a 10 metros de altura (m s^{-1}). O *download* dos dados é realizado pela plataforma do *Climate Data Store* (CDS) em: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview.

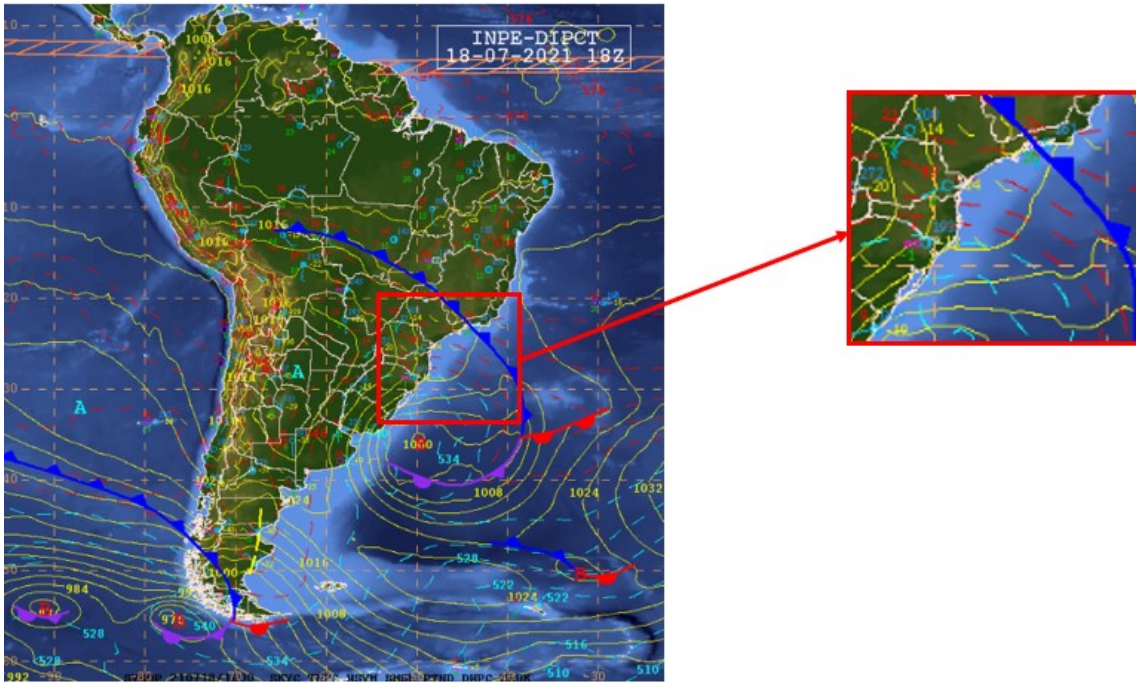
Para a precipitação, são utilizados dados diários das análises do *Climate Prediction Center* (CPC; CHEN et al., 2008), com resolução horizontal de 0,5° x 0,5°. Os dados podem ser

obtidos em: https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html. Desse mesmo centro, foram obtidos dados de TSM, denominados de *Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature* (DOISST; HUANG et al., 2021), com resolução espacial de 0,25° x 0,25°, podendo ser obtidos em: https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html.

2.3. Procedimento para a Identificação das Frentes Frias

Após a delimitação dos domínios de estudo (Figura 1), a identificação das frentes é realizada visualmente nas cartas sinóticas de superfície fornecidas pelo CPTEC. Nas cartas sinóticas, as linhas azuis com triângulos preenchidos indicam a localização das FFs. A Figura 2 é usada para exemplificar a metodologia.

Figura 2 -Exemplo de uma carta sinótica utilizada para identificar, no caso, uma frente fria no SMG. As linhas amarelas contínuas indicam a pressão ao nível médio do mar (hPa), as linhas tracejadas em azul e vermelho indicam a altura geopotencial (mgp/10) com valores inferiores a 540 e superiores a 546, respectivamente, as frentes fria, quente e estacionária são representadas nas cores azul, vermelho e roxo, respectivamente, e as letras A e B indicam os centros de alta e baixa pressão, respectivamente. Fonte: INPE



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Na Figura 2 há uma frente fria atuando na região do SMG, então numa tabela é

registrada a data, o horário sinótico e o valor aproximado da espessura da camada 500/1000 hPa em dois locais: na linha mais a sul e na mais a norte da região de intenso gradiente de espessura da camada, que é uma grandeza indicativa dos gradientes horizontais de temperatura do ar e é mostrada em linhas tracejadas na carta. Além disso, as FFs recebem um dos códigos:

Código 0: Para quando a frente fria passa somente pelo Rio Grande do Sul (sem chegar a Minas Gerais);

Código 1: Para quando a frente fria passa pelo sul do Rio Grande do Sul e chega no sul de Minas Gerais;

Código 2: Para quando a frente fria passa somente por Minas Gerais (sem passar pelo Rio Grande do Sul).

Após a análise das cartas do período 01/01/2009 a 31/12/2021 se obteve uma tabela com o horário sinótico, dia, mês e ano da passagem da frente fria e a espessura da camada como exemplificado na Tabela 1.

Tabela 1 -Tabela de identificação por código das frentes para SRS e SMG. ExpLow e Esp High indicam, respectivamente, o valor da linha de espessura a sul e a norte do máximo gradiente de espessura 500/1000 hPa.

Frentes frias no sul do Rio Grande do Sul						Código	Frentes frias no sul de Minas Gerais					
Hora	Dia	Mês	Ano	esplow	esphigh		Hora	Dia	Mês	Ano	esplow	esphigh
0:00	1	1	2009	558	564	0						
						2	12:00	4	1	2009	576	582
0:00	8	1	2009	564	570	0						
12:00	18	1	2009	570	576	0						
						2	12:00	21	1	2009	570	576

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

2.4. Análises

As análises incluem o cálculo das estatísticas de frequência mensal, sazonal e anual de FFs em cada uma das regiões de estudo e considerando os códigos descritos na seção

precedente. É analisado o tempo de deslocamento das frentes entre o sul do Brasil e o SMG, a velocidade média desse deslocamento e é calculada a média dos valores registrados para a espessura da camada.

Para descrever a evolução espaço-temporal das variáveis atmosféricas indicadoras das FFs são elaboradas composições (médias). Assim, para cada caso de FF registrado, seleciona-se o intervalo temporal de dois dias antes a dois dias após a esse evento e computa-se a média das variáveis atmosféricas para cada um desses dias. Essa análise é realizada para cada estação do ano e para as variáveis vento e precipitação. Ademais, é determinada a contribuição das FFs para o total sazonal de precipitação, ou seja, é calculada a diferença entre a composição da precipitação nos casos de FFs e a climatologia da estação do ano. O valor obtido é dividido pela climatologia da estação do ano e o resultado é multiplicado por 100 para se ter a contribuição percentual das frentes para a precipitação. Os resultados são apresentados num painel com as colunas representando os dias -2, -1, 0, +1, +2, e as linhas, as estações do ano. O cálculo da diferença não foi aplicado na variável vento.

Para analisar a influência da TSM nas FFs, foram inicialmente calculadas as anomalias de TSM para os dois subdomínios grandes mostrados na Figura 1. As anomalias foram obtidas através da diferença entre o valor mensal da TSM e a climatologia do referido mês (a climatologia foi computada no período de 2009 a 2021). A primeira análise é para identificar o impacto das anomalias de TSM próximas à costa da Argentina nas FFs que chegam ao SRS (código 0). Para isso, foi calculado o desvio-padrão (σ) da série temporal de anomalias e considerado como limiar o valor de 1,5σ (0,3 °C). O uso do desvio-padrão é um método comum em estudos climatológicos (GARREAUD et al., 2009). Então, foi determinado o número de FFs acima e abaixo desses limiares. A mesma análise é aplicada para identificar o impacto das anomalias de TSM nas FFs que se deslocam do SRS para SMG (código 1) e para as que se formam próximo ao SMG (código 2). Nesse caso, o valor de 1,5σ da série temporal de anomalias é de 0,66 ^{o}C. Por fim, destaca-se que todas as análises foram implementadas pelos autores em algoritmos da linguagem Python.

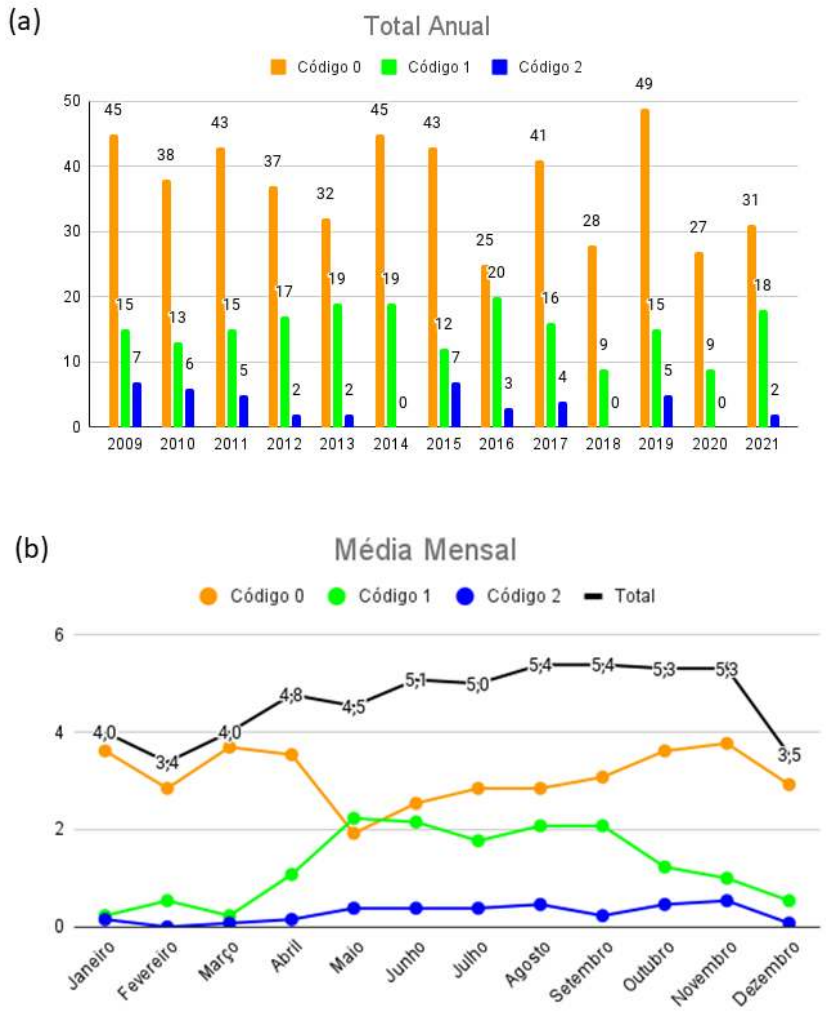
3. RESULTADOS

3.1. Climatologia das Frentes Frias

Das 724 FFs observadas entre 2009 e 2021, 484 são classificadas com código 0; 197 com código 1 e 43 com código 2, totalizando 681 FFs que passaram no SRS e 240 que passaram no SMG. Aproximadamente 30% das FFs que passam pelo SRS chegam ao SMG. Esse resultado indica que as FFs são mais recorrentes em latitudes mais altas (PENNA, 2013; CARDOZO et al., 2015). Em latitudes mais altas, há maior baroclinia e, portanto, mais sistemas frontais (SIMMONDS et al, 2012). Porém, a dificuldade desses sistemas em migrarem para norte/nordeste está ligada ao fato de que o escoamento de oeste nos subtrópicos contribui para que as frentes se desloquem para leste, enquanto que o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul dificulta a passagem de sistemas de baixa pressão para menores latitudes.

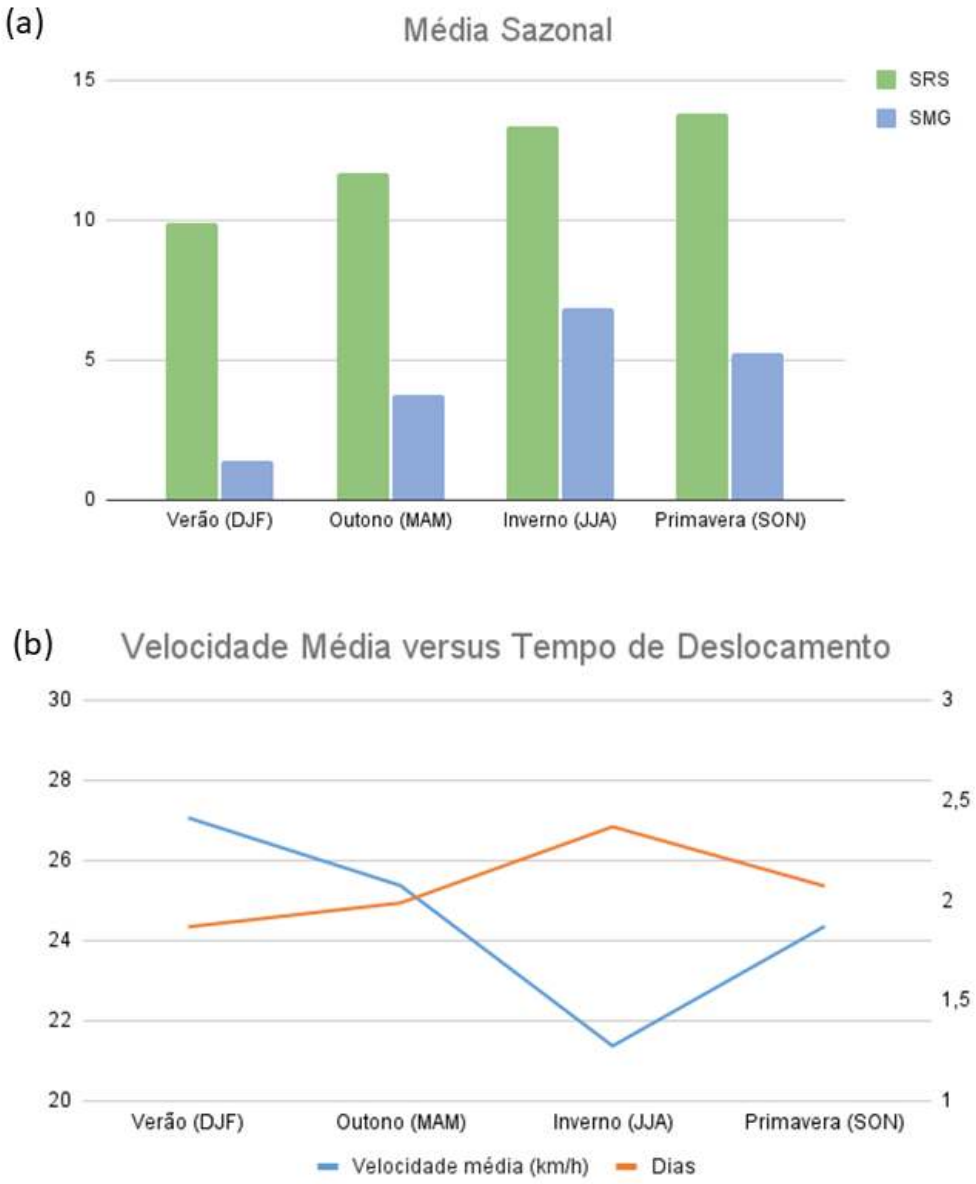
Para a média mensal por código (Figura 3b), as FFs com código 0 têm maior ocorrência do que as com códigos 1 e 2 de outubro a abril, mas nos meses de maio a setembro, a frequência das FFs com código 0 e 1 se aproxima, indicando que nesse período do ano mais FFs conseguem se deslocar do SRS para o SMG. As FFs com código 2 possuem pouca variabilidade mensal. Considerando-se todas as passagens frontais (linha preta na Figura 3b), a maior frequência de FFs tanto no SRS quanto no SMG é no inverno e na primavera e a menor, no verão. No SRS (códigos 0 e 1 juntos), do verão para a primavera, a média sazonal do número de frentes frias é de 10, 12, 13 e 14 e no SMG (códigos 1 e 2 juntos) é de 1, 4, 7 e 5 sistemas. No inverno, devido ao caminho aparente do sol em direção ao trópico de Câncer, os sistemas atmosféricos migram para norte, o que facilita a maior frequência de sistemas na região em estudo.

Figura 3 a) -Total anual de FFs por código; **b)** média mensal das FFs por código: código 0 representado pela linha laranja, código 1 representado pela linha verde e código 2 representado pela linha azul. A linha preta representa o somatório das FFs classificadas pelos três códigos.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 4 a) -Média das frentes por estação no SRS e SMG; **b)** Velocidade média (km/h) versus tempo de deslocamento (dias).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

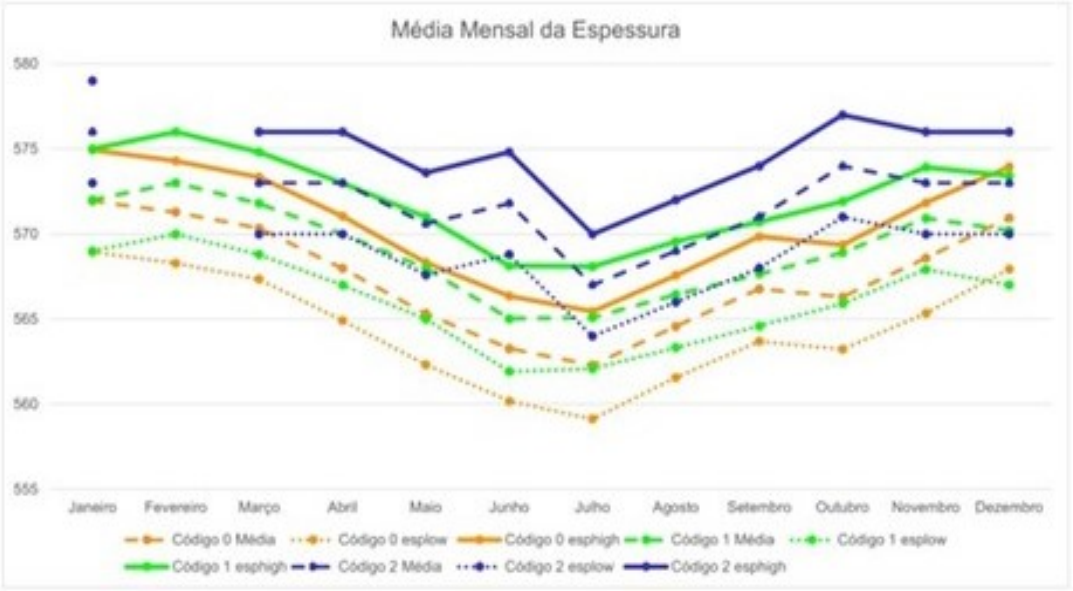
As frentes que passam pelo SRS e chegam ao SMG apresentam tempo médio de deslocamento de dois dias (Figura 4b), o que concorda com o estudo de Silva et al. (2014) que mostraram que no dia -2 a FF está no SRS, no dia -1 entre Paraná e São Paulo e no dia 0 no SMG. Conhecendo a distância entre o SRS e o SMG é possível calcular a velocidade média das FFs. No verão, as FFs se deslocam mais rápido entre os dois locais de estudo (27 km/h ou 7,5 m/s) e são mais lentas no inverno (21 km/h ou 5,8 m/s). Esses valores são ligeiramente maiores comparados com Seluchi et al (2017), que encontraram velocidade de 20 km/h no

período de estudo de 1998 a 2010. A velocidade de uma frente fria é influenciada por múltiplos fatores, sendo eles o gradiente de temperatura, a força do vento, a pressão atmosférica, a topografia local e a interação com outros sistemas meteorológicos como sistemas de alta pressão ou correntes de jato. Embora sejam necessários estudos adicionais para entender o padrão sazonal da velocidade das frentes, sugere-se que no inverno o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, que está na sua posição mais a oeste atingindo o continente, atue de forma a reduzir o gradiente de pressão entre a alta pós-frontal e a sua região, desacelerando o movimento das frentes.

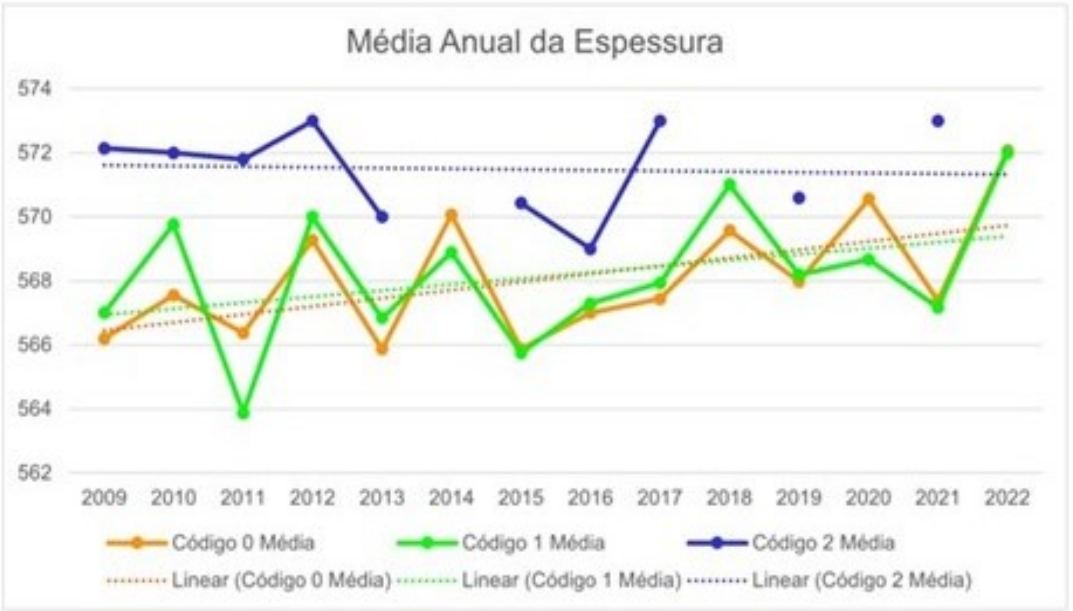
Uma informação que é difícil de encontrar na literatura é o valor da espessura 500/1000 hPa associada com as FFs. Com base nas cartas sinóticas, quando uma FF era registrada, o menor valor (mais a sul) e o maior valor (mais a norte) da espessura da camada na região de gradiente de temperatura foram registrados (Figura 2, como exemplo). A partir dessa informação, foram calculadas as médias anuais e mensais. Na Figura 5a, para cada código de classificação das FFs há três informações: a média do menor e do maior valor da espessura da camada e a média entre esses dois valores. Não são apresentadas informações para o mês de fevereiro no código 2, o qual não se observou nenhuma FFs nesse período de estudo.

Figura 5 a) -Média mensal da espessura média, máxima e mínima por tipo de código: código 0 representado pelas linhas laranjas, código 1 representado pelas linhas verdes e código 2 representado pelas linhas azuis. As linhas cheias são a espessura máxima; as tracejadas, a média e as pontilhadas, a mínima; **b)** Média anual da espessura média por tipo de código com linha de tendência pontilhada de cada código.

(a)



(b)



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

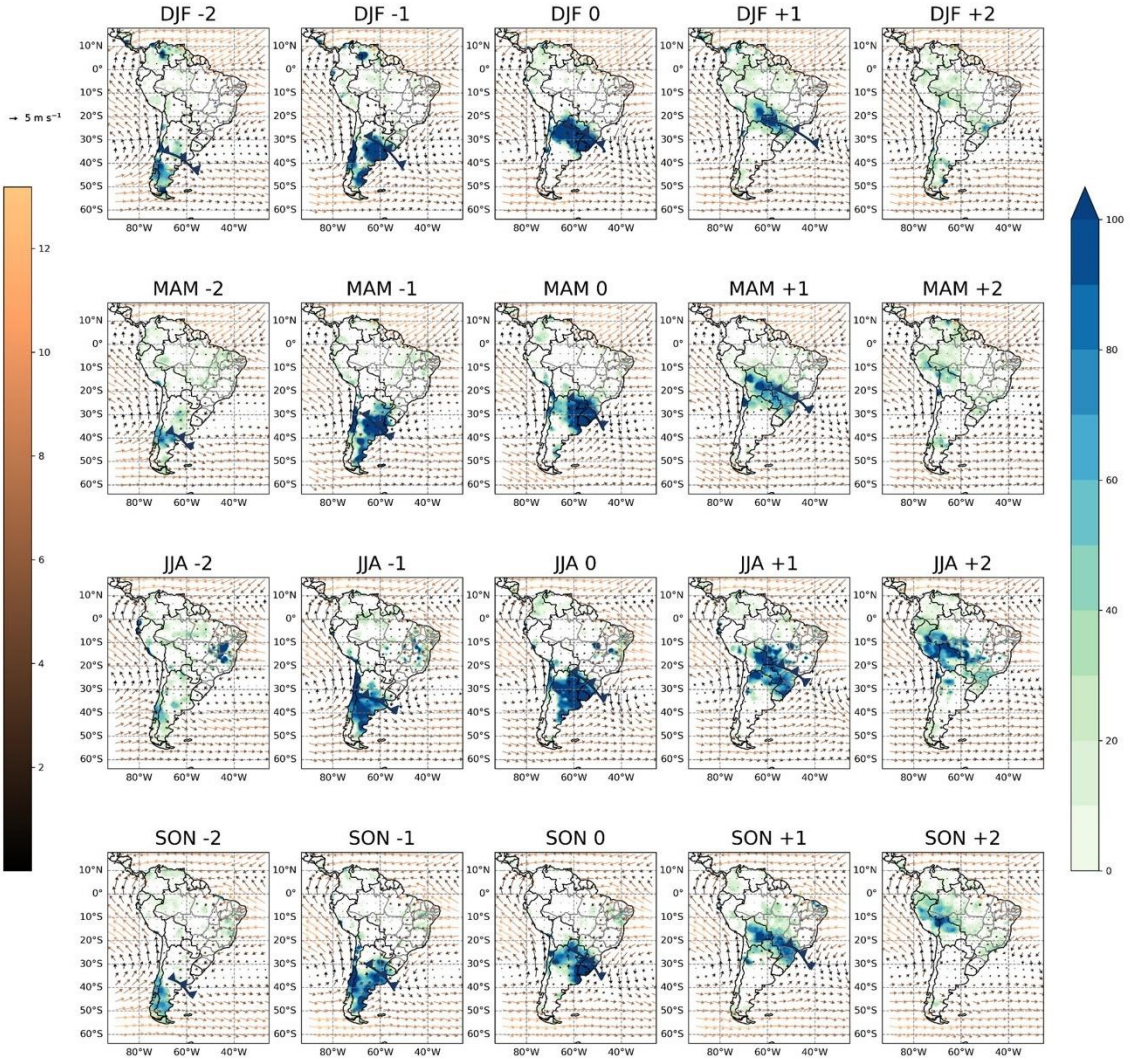
A espessura da camada apresenta um ciclo anual bem definido com menores valores no inverno e maior nos meses de primavera e verão, o que está de acordo com a variação sazonal da temperatura do ar. Em situação de ar frio, a pressão atmosférica decresce mais rápido com a altura e, logo, isso se reflete na espessura da camada (WALLACE E HOBBS, 2006).

Considerando o código 0, no inverno a média da espessura é de 563,4 dam e no verão de 571,4 dam. Já para o código 1, esses valores são de 565,5 e 571,7 dam, respectivamente, e para o código 2, 569,3 no inverno e 574,5 no verão. Considerando a média anual da espessura da camada (Figura 5b), não há informação nos anos de 2014, 2018, 2020 para o código 2 já que não foram registradas FFs. Para as FFs com código 0 e 1 há uma tendência positiva nos valores da espessura da camada, o que indica que as massas de ar estão perdendo intensidade (massas mais frias possuem menor valor de espessura da camada). Por outro lado, para as FFs com código 2, há uma ligeira tendência negativa.

3.2. Padrão Espacial das Frentes Frias e Contribuição para a Precipitação

A análise da composição da precipitação menos a média climatológica do período de estudo por estação do ano (DJF, MAM, JJA, SON), o que também é chamado de anomalia, e o padrão de vento para dois dias antes (-2), um dia antes (-1), no dia da frente (0), um dia depois (+1) e dois dias depois da frente (+2) é mostrada para o SRS na Figura 6 e para o SMG na Figura 7. O cálculo da diferença não foi aplicado na variável vento.

Figura 6 - Composição mostrando a contribuição das FFs registradas no SRS para o total sazonal de precipitação (porcentagem). Cores em azul escuro indicam de 80% a 100%, cores em verde claro indicam de 0% a 10%. A climatologia dos ventos também é apresentada. Ventos mais intensos são plotados com vetores em cores mais alaranjadas e ventos de fraco a ausente com cores mais escuras.



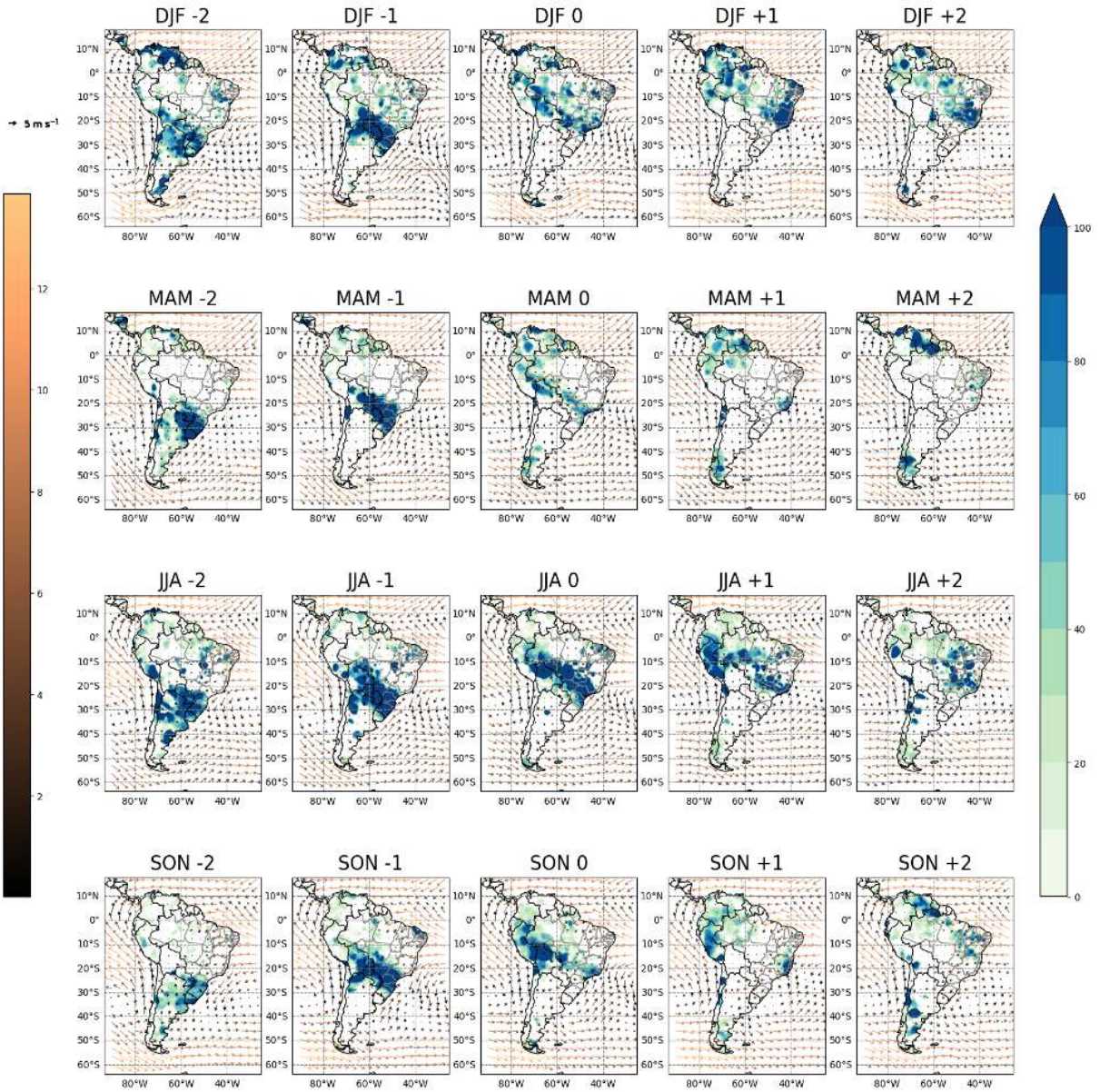
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

As frentes que se deslocam do sul da Argentina e chegam ao SRS produzem precipitação ao longo da trajetória (Figura 6). No dia 0, no SRS esses sistemas são responsáveis por quase toda a precipitação sazonal. Em geral, o máximo da chuva encontra-se na retaguarda da frente fria em superfície, pois o ar quente ascende sobre a cunha de ar frio causando precipitação atrás dela, entretanto, também pode ocorrer chuva na dianteira da frente, devido ao transporte de ar quente e úmido pelos ventos de quadrante norte. Como mencionado na introdução, as frentes são regiões de contato entre duas massas de ar com características térmicas distintas, assim, também se caracterizam por ser uma região de encontro dos ventos de quadrante sul (que transportam ar frio) com os de quadrante norte

(que transportam ar quente). Esse encontro é indicado na Figura 6 com a linha azul escuro, representando as FFs.

No SRS (Figura 6), a trajetória das FFs é bem definida do dia -2 ao dia 1 (Figura 6), devido ao maior número da amostra no período de estudo. Para o SMG (Figura 7), a trajetória das FFs é bem definida nos dias -2 a 0), pois como atingem latitudes mais baixas, acabam enfraquecendo e se desconfigurando. Dois dias antes das FFs chegarem ao SMG elas se encontram no sul do Brasil e um dia antes entre os estados do Paraná e São Paulo, o que concorda com o estudo de Silva et al. (2014).

Figura 7 - Similar à Figura 6, mas para as FFs no SMG.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

No SMG, as frentes contribuem para quase 100% da chuva sazonal no inverno, nas demais estações do ano a contribuição é de cerca de 70% a 80%. No inverno, a chuva tem pouca influência de outros sistemas (jatos de altos níveis e cavados invertidos em superfície). Em termos de ciclones, em geral, são extratropicais associados com frentes. No verão, as frentes se acoplam com a convecção tropical, como já indicado no estudo de Oliveira (1986), e, são muitas vezes importantes para a formação de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul.

3.3. Influência da Temperatura da Superfície do Mar nas Frentes Frias

Nessa seção, duas situações são investigadas: a primeira é se meses em que predominam anomalias quentes de TSM na costa da Argentina apresentam menor número de sistemas frontais no sul do Brasil e, a segunda, é se a ocorrência de águas quentes entre o Rio Grande do Sul e Minas Gerais afeta o número de FFs em Minas Gerais. Para essa análise, os casos de frentes frias foram separados com base nos valores anômalos da TSM mensal (vide metodologia na seção 2.4).

Considerando os critérios de um desvio-padrão e meio ($1{,}5\sigma$) da TSM em relação a sua climatologia no domínio que se estende pela costa da Argentina (Figura 1), obteve-se um limiar de 0,3°C. Assim, os meses de todo o período em estudo foram separados em três grupos: os que apresentaram TSM < -0,3°C, -0,3°C <TSM<0,3°C e TSM > 0,3°C. Na sequência, o número de frentes frias foi contabilizado dentro desses grupos. No grupo em que há anomalias negativas de TSM, o total de FFs foi de 43 sistemas, enquanto no de anomalias positivas, 27 sistemas. Esse resultado sugere que quando predominam águas mais frias do que a climatologia nas latitudes ao sul do RS, as frentes conseguem se deslocar mais facilmente até o SRS (código 0).

Na análise das FFs que passam pelo SRS e chegam no SMG (código 1), o limiar de TSM é de 0,66°C. Conforme mostra a Tabela 2, 15 FFs chegam até o SMG quando há anomalias negativas e 6 quando há anomalias positivas ao longo do subdomínio próximo da costa do sul e sudeste brasileiro (Figura 1). Em relação do total de frentes que chegam até o SMG (código 1 e 2), há 10 que estão acima do limiar e 23, abaixo do limiar. Ao desconsiderar as ocorrências

dentro do limiar (-0,66°C <TSM<0,66°C), 30% das FFs estão em condições de TSM com anomalias positivas e 70% em anomalias negativas.

Em síntese, quando analisadas as anomalias negativas e positivas de TSM, nos dois domínios estudados, a maior frequência de FFs ocorre quando há anomalia negativa de TSM. Isso pode estar associado a dois motivos: o primeiro é que a presença de águas frias não enfraquece a massa de ar que é a responsável pelo sistema frontal e, a segunda, é porque a situação meteorológica é distinta dos casos em que predominam anomalias positivas de TSM. De acordo com as reuniões climáticas do grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GrEC-USP), quando há anomalias positivas de TSM, há anticiclones predominando na região. Anticiclones produzem condições de céu limpo permitindo com que a radiação atmosférica aqueça a TSM de forma mais efetiva. Assim, as massas de ar frio, ao passarem sobre águas mais quentes, enfraquecem.

Tabela 2 -Tabela de identificação por código das frentes para SRS (para o código 0) e SMG (para o código 1) da TSM acima, dentro e fora dos respectivos limiares.

SRS - Código 0			SMG - Código 1		
TSM > 0,3°C	-0,3°C <TSM<0,3°C	TSM < -0,3°C	TSM > 0,66°C	-0,66°C <TSM<0,66°C	TSM < -0,66°C
27	414	43	6	176	15

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, realizou-se a análise da passagem de frentes frias entre o sul do Rio Grande do Sul e sul de Minas Gerais entre os anos de 2009 e 2021, através da análise de cartas sinóticas. Sazonalmente, considerando o verão, outono, inverno e primavera, o número médio de frentes frias registradas no SRS é de 10, 12, 13 e 14 e no SMG é de 1, 4, 7 e 5 sistemas, respectivamente. O tempo médio de deslocamento de uma frente fria que passa pelo sul do Rio Grande do Sul e chega ao sul de Minas Gerais é de aproximadamente 2 dias, o que implica numa velocidade média de 24,5 km/h. O deslocamento das frentes é mais rápido no verão (27 km/h) e mais lento no inverno (21 km/h). Do total das frentes frias analisadas, aproximadamente 30% das frentes frias que passam pelo Rio Grande do Sul também chegam ao sul de Minas Gerais.

A espessura da camada analisada, com base nos códigos definidos na metodologia, apresenta em média valores sazonais menores no período de inverno e maiores no verão e os valores anuais mostram uma tendência de aumento ao longo período de estudo para os códigos 0 e 1 e uma leve tendência de diminuição, o que pode estar relacionado a baixa quantidade de amostras no período e ausência em determinados anos.

A contribuição das frentes frias para a precipitação sazonal é de quase 100% para todas as estações do ano, no caso do sul do Rio Grande do Sul, porém, para o sul de Minas Gerais, isso ocorre apenas no inverno.

Considerando os critérios de um desvio-padrão e meio ($1{,}5\sigma$), tanto na costa da Argentina, quanto entre o sul do Rio Grande do Sul e sul de Minas Gerais, a maior frequência de FFs ocorre em casos de anomalia negativa de TSM, o que pode ser devido às águas frias não enfraquecerem a massa de ar que passa sobre o oceano.

Esse estudo é importante, pois ajuda na compreensão das características climatológicas das frentes frias podendo ser uma ferramenta auxiliar nas práticas operacionais de previsão de tempo. Por exemplo, os previsores operacionais podem usar como alerta o conhecimento de que uma frente que está no sul do RS, em 2 dias chegará no SMG, podendo causar alterações no tempo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos centros que disponibilizaram os dados usados no estudo e ao CNPq, FAPEMIG e UNIFEI pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

AHRENS, C. D. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment**. Cengage Learning Canada Inc, 2015.

AMORIM NETO, A. C; SATYAMURTY, P; CORREIA, F. W. S. **Estrutura e evolução de frentes frias intensas na região amazônica brasileira.** Tese (Doutorado em em Clima e Ambiente com ênfase na área de concentração em Interação Biosfera Atmosfera) – INPA/UEA, 2013.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul.** 2005. 187 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.

ANDRADE, K. M. **O Papel das Teleconexões e de Fatores Regionais que Influenciam a Ocorrência de Precipitação Extrema associada a Sistemas Frontais sobre o Sudeste do Brasil.** 2017. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

ANDRADE, K. M; CAVALCANTI, I. F. A. Atmospheric characteristics that induce extreme precipitation in frontal systems over Southeastern Brazil during summer: Observations and atmospheric model simulation. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 14, p. 5368-5385, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.5744.

BERRY, G; REEDER, J. M; JAKOB, C. A global climatology of atmospheric fronts. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 4, 2011. DOI: https://doi.org/10.1029/2010GL046451.

BITSA, E. et al. Development of a Front Identification Scheme for Compiling a Cold Front Climatology of the Mediterranean. **Climate and Atmospheric Dynamics and Predictability**, v. 7, n. 11, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/cli7110130.

BLÁZQUEZ, J. **Proyecciones climáticas sobre Sudamérica utilizando modelos climáticos globales. Análisis de incertidumbres**. 2011. Tese (Doctorado em Meteorologia) – Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2012.

BLÁZQUEZ, J; SOLMAN S. A. Intraseasonal variability of wintertime frontal activity and its relationship with precipitation anomalies in the vicinity of South America. **Climate Dynamics**, v. 46, p. 2327–2336, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-015-2704-0.

BLÁZQUEZ, J; SOLMAN S. A. Interannual variability of the frontal activity in the Southern Hemisphere: relationship with atmospheric circulation and precipitation over southern South America. **Climate Dynamics**, v. 48, p. 2569–2579, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-016-3223-3.

BLÁZQUEZ, J; SOLMAN S. A. Fronts and precipitation in CMIP5 models for the austral winter of the Southern Hemisphere. **Climate Dynamics**, v. 50, p. 2705–2717, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-017-3765-z.

BLÁZQUEZ, J; SOLMAN S. A. Relationship between projected changes in precipitation and fronts in the austral winter of the Southern Hemisphere from a suite of CMIP5 models. **Climate Dynamics**, v. 52, p. 5849–5860, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-018-4482-y.

BUENO, P. G. et al. Grupo de Estudos Climáticos: 25 anos de história e produção científica. **Terrae Didatica**, v. 19, p. e023013-e023013, 2023. DOI: https://doi.org/10.20396/td.v19i00.8671983.

CAPUCIN, B. C. et al. Onda de Frio Histórica no Brasil: um Estudo de Caso de Junho de 1985. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 45. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2022_45_40761.

CARDOZO, A. B; REBOITA, M. S; GARCIA, S. R. Climatologia de Frentes Frias na América do Sul e sua relação com o Modo Anular Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, n. 11, p. 9-10, 2015. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v17i0.40124.

CARMO, E. L. I.; REBOITA, M. S., MARQUES, R. Evolução Temporal das Variáveis Atmosféricas associadas a Casos de Frentes Frias Fortes em Cuiabá, MT, entre 1996 e 2015. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 145–154. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p145-154.

CARVALHO, M. H; FEDOROVA, N. Estudo sobre frentes quentes que ocorrem no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000200010.

CATTO, J. L. et al. Relating global precipitation to atmospheric fronts. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 10, 2012. DOI: https://doi.org/10.1029/2012GL051736.

CHEN, M. et al. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D4, 2008. DOI: https://doi.org/10.1029/2007JD009132.

DAMETTO, G. S.; DA ROCHA, R. P. Características climáticas dos sistemas frontais na cidade de São Paulo. **XIV CBM: Anais 1980-2006**, 2006.

DE JESUS, E. M. et al. Contribution of cold fronts to seasonal rainfall in simulations over the southern la Plata Basin. **Climate Research**, v. 68, n. 2-3, p. 243-255, 2016. DOI: https://doi.org/10.3354/cr01358.

ESCOBAR, G. C. J; SELUCHI, M. E; ANDRADE, K. M. Classificação Sinótica de Frentes Frias Associadas a Chuvas Extremas no Leste de Santa Catarina (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150156.

ESCOBAR, G. C. J; REBOITA, M. S; SOUZA, A. Climatology of surface baroclinic zones in the coast of Brazil. **Atmósfera**, v. 32, n. 2, 2019. DOI: https://doi.org/10.20937/atm.2019.32.02.04.

FERREIRA, N. J; CAVALCANTI, I. F. A. Sistemas meteorológicos atuantes no Brasil. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. A new look into the South America precipitation regimes: Observation and Forecast. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, p. 873, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos13060873.

FOSS, M; CHOU, S. C; SELUCHI, M. E. Interaction of cold fronts with the Brazilian Plateau: a climatological analysis. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 9, p. 3644-3659, 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.4945.

GARREAUD, R. D. et al. Present-day south american climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 281, n. 3-4, p. 180-195, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032.

HERSBACH, Hans et al. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. **Copernicus climate change service (c3s) climate data store (cds)**, v. 10, n. 10.24381, 2018. DOI: https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47.

HUANG, B. et al. Improvements of the daily optimum interpolation sea surface temperature (DOISST) version 2.1. **Journal of Climate**, v. 34, n. 8, p. 2923-2939, 2021. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0166.1.

KOUSKY, V. E. Frontal Influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107%3C1140:fionb%3E2.0.co;2.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n. 3, p. 217-231, 1988.

LEMOS, C. F; CALBETE, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987 a 1995. **Boletim do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), n. 14, 1996.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia**. 1986. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), INPE-4008-TDL/239, 134 p. 311-316, 1986.

PALMÉN, E. et al. **Atmospheric circulation systems: their structure and physical interpretation**. Academic press, 1969. DOI: https://doi.org/10.1016/s0074-6142(08)x6048-6.

PAMPUCH, L. A; AMBRIZZI, T. Sistemas Frontais sobre a América do Sul Parte I: Climatologia e intervalo de passagem em dados da Reanálise I do NCEP/NCAR. 2015. **Anais**[...]. IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, Santa Maria-RS, 11 a 13 de novembro de 2015.

PAMPUCH, L. A; AMBRIZZI, T. Sistemas Frontais sobre a América do Sul Parte II: monitoramento Mensal em dados da Reanálise I do NCEP/NCAR. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 105-110, 2016. DOI: https://doi.org/10.5902/2179460x19811.

PARFITT, R; CZAJA, A; SEO, H. A simple diagnostic for the detection of atmospheric fronts. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 9, p. 4351-4358, 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/2017gl073662.

PENNA, A. C. **Avaliação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais com base em Cartas Sinóticas e Método Objetivo**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Atmosféricas) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

RODRIGUES, M. L. G; FRANCO, D; SUGAHARA, S. Climatologia de Frentes Frias no Litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica,** v. 22, n. 2, p. 135-151, 2004. DOI: https://doi.org/10.1590/s0102-261x2004000200004.

REBOITA, M. S; AMBRIZZI, T; DA ROCHA, R. P. Relação entre o modo anular sul e os sistemas atmosféricos no hemisfério sul. **Revista Brasileira de Meteorologia,** v. 24, n. 1, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100005.

REBOITA, M. S; GAN, M. A; DA ROCHA, R. P; AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/s0102-77862010000200004.

REBOITA, M. S. et al. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41493.

REISSER JUNIOR, C. et al. **Atlas climático da região sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012.

SANDERS, F; HOFFMAN, E. G. A Climatology of Surface Baroclinic Zones. **Weather and Forecasting**, v. 17, n. 4, p. 774-782, 2002. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017%3C0774:ACOSBZ%3E2.0.CO;2.

SATYAMURTY, P; MATTOS, L. F. Climatological Lower Tropospheric Frontogenesis in the Midlatitudes Due to Horizontal Deformation and Divergence. **Monthly Weather Review,** v. 117, n. 6, p. 1355-1364, 1989. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117%3C1355:CLTFIT%3E2.0.CO;2.

SELUCHI, M; BEU, C. ANDRADE, K. M. Características das Frentes Frias Causadoras de Chuvas Intensas no Leste de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-778632120150095.

SILVA, L. J; REBOITA, M. S; ROCHA, R. P. Relação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais (RSMG) com a Precipitação e Eventos de Geada. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.14, n. 10, p. 234-244, 2014. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v14i1.36314.

SILVA, M. G. A. J; SILVA DIAS, M. A. F. A estatística dos transientes na América do Sul. 2000, **Anais**[...]. Rio de Janeiro: SBMET, 2000.

SILVA, M. G. A. J; SILVA DIAS, M. A. F. A Frequência de Fenômenos Meteorológicos na América do Sul: Uma Climatologia. 2002, **Anais**[...]. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Jaboticabal: Fábrica da Palavra, 2002.

SIMMONDS, I; KEAY, K; BYE, J. A. T. Identification and Climatology of Southern Hemisphere Mobile Fronts in a Modern Reanalysis. **Journal of Climate**, v. 25, n. 6, p. 1945-1962, 2012. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00100.1.

SOLARI, F. I; BLÁZQUEZ, J; SOLMAN S. A. **Análisis de la relación entre los sistemas frontales y la precipitación extrema en el sur de Sudamérica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciado en Meteorología y Ciencias de la Atmósfera) – Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, 2021.

SOLARI, F. I; BLÁZQUEZ, J; SOLMAN S. A. Relationship between frontal systems and extreme precipitation over southern South America. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 15, p. 7535-7549, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.7663.

THOMAS, C; SCHULTZ, D. M. Global Climatologies of Fronts, Airmass Boundaries, and Airstream Boundaries: Why the Definition of “Front” Matters. **Monthly Weather Review**, v. 147, n. 2, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-18-0289.1.

THOMAS, C; SCHULTZ, D. M. What are the Best Thermodynamic Quantity and Function to Define a Front in Gridded Model Output? **Bulletin of the American Meteorological Society,** v. 100, n. 5, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0137.1.

VIANELLO, R. L.; FERREIRA, N. J.; OLIVEIRA, L. L. Meteorologia Fundamental, Edifapes. **Erechin œ RS**, 2001.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: an introductory survey**. Elsevier, 2006.

YNOUE, R. Y. et al. Meteorologia: Noções Básicas. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.