

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

ROSELI DE OLIVEIRA

**SISTEMA DE DETECÇÃO DE FRENTES FRIAS ASSOCIADAS A EVENTOS
METEOROLÓGICOS DE MÉDIO E ALTO IMPACTO NO CENTRO SUL DA
AMÉRICA DO SUL**

Florianópolis-SC

Maio de 2022

ROSELI DE OLIVEIRA

**SISTEMA DE DETECÇÃO DE FRENTES FRIAS ASSOCIADAS A EVENTOS
METEOROLÓGICOS DE MÉDIO E ALTO IMPACTO NO CENTRO SUL DA
AMÉRICA DO SUL**

Dissertação
apresentada ao
Mestrado Profissional
em Clima e Ambiente do
Campus Florianópolis
do Instituto Federal de
Santa Catarina para a
obtenção do diploma de
Mestre em Clima e
Ambiente.

Orientador: Prof. Dr.
Mário Francisco Leal de
Quadro

Florianópolis-SC


Maio de 2022

Aluno (a): **ROSELI DE OLIVEIRA**

Título:	SISTEMA DE DETECCAO DE FRENTES FRIAS ASSOCIADAS A EVENTOS METEOROLOGICOS DE MEDIO E ALTO IMPACTO NO CENTRO SUL DA AMERICA DO SUL
----------------	---


Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente

Dr(a). MARIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO

Documento assinado digitalmente
 MARIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO
Data: 22/06/2022 11:05:37-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Orientador(a) / Presidente / IFSC / Fpolis – SC

Participação: (X) Presencial () Videoconferência
(X) *Aprovado* () *Reprovado*

 Documento assinado digitalmente
MICHEL NOBRE MUZA
Data: 22/06/2022 10:51:21-0300
CPF: 977.090.260-87
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Dr(a). MICHEL NOBRE MUZA

Avaliador(a) Interno / IFSC / Fpolis - SC

Participação: (X) Presencial () Videoconferência
(X) *Aprovado* () *Reprovado*


Dr(a). WALTER MARTIN WIDMER



Avaliador(a) Interno / IFSC / Fpolis - SC

Participação: (X) Presencial () Videoconferência
(X) *Aprovado* () *Reprovado*

Dr(a). TERCIO AMBRIZZI



Avaliador(a) Externo / USP / São Paulo - SP

Participação: () Presencial (X) Videoconferência
(X) *Aprovado* () *Reprovado*

Este trabalho foi aprovado por:

- () maioria simples
(X) unanimidade

CDD 551.5
O482s

Oliveira, Roseli de
Sistema de detecção de frentes frias associadas a eventos meteorológicos de médio e alto impacto no centro sul da América do Sul - [DIS] / Roseli de Oliveira; orientação de Mário Francisco Leal de Quadro – Florianópolis, 2022.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Sistema frontal. 2. Algoritmo. 3. Índice de frente fria. 4. Climatologia. I. Quadro, Mário Francisco Leal de. II. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues - CRB 14/1117

Dedico este trabalho ao meu Marido, amigo e companheiro,
Roberto de Oliveira, que tanto me incentiva
na busca do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Professor Mário Francisco Leal de Quadro, pela excelente orientação, competente e profissional, pela compreensão de minhas limitações e pelo incentivo incondicional ao olhar científico.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina, por meio do Programa de Mestrado Profissional em Clima e Ambiente (PCAM) pela infraestrutura oferecida e ao corpo docente do PCAM, excelentes profissionais que, com todo conhecimento repassado favoreceu para meu crescimento profissional.

Ao PCAM, por meio do Professor Michel Muza, pela oportunidade em participar do Projeto de Pesquisa - Monitoramento climático e gestão ambiental de eventos meteorológicos extremos em Santa Catarina.

Aos membros da banca examinadora de qualificação; à Meteorologista Dra. Maria Laura Rodrigues e aos Professores Adriano Vitor e Michel Muza, pelas críticas e sugestões.

Ao Professor Adriano Vitor por todo apoio no desenvolvimento estatístico ao longo da pesquisa.

Ao meu marido Roberto de Oliveira, pelo incentivo na busca do conhecimento e pelo apoio em iniciar o mestrado. E aos meus filhos, pela compreensão de muitas vezes da minha ausência em prol do desenvolvimento da pesquisa e da ciência.

Aos colegas Ana Paula Fagiane e Gabriel Luan Rodrigues por todo apoio computacional. À Yanca Lopes, bolsista do DASS - Departamento Acadêmico de Saúde - por todo apoio no desenvolvimento de *design* digital do trabalho.

Aos colegas e amigos que estiveram comigo durante este período e que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado,
bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida,
impondo-se ao Poder Público e à coletividade
o dever de defendê-lo e preservá-lo
às presentes e futuras gerações.

(Artigo 225 da Constituição Federal, 1988)

RESUMO

Os Sistemas Frontais (SFs) atuantes no sul e centro-sul da América do Sul (AS) se caracterizam como causadores de eventos de médio e alto impacto. Este trabalho objetiva avaliar os efeitos da passagem de frentes frias (FF) por estas regiões por meio de um método automatizado de detecção. Nesta região se delimitaram 10 áreas, sendo 5 litorâneas e 5 continentais. Como procedimento metodológico, desenvolveu-se um algoritmo computacional, denominado de Índice de Detecção de Frentes Frias (IFF), para detecção e caracterização das FFs por meio dos dados da reanálise do CFSR e CFSRv2, a cada 6 horas, da componente meridional do vento a 10 m e da temperatura do ar a 2 m. O IFF normalizado possibilitou avaliar a taxa de detecção e a intensidade de cada FF entre 1991 e 2020. A taxa de detecção adequou-se em 17%, considerado como o percentual mínimo do IFF que representasse a atuação de uma FF. O algoritmo, denominado de método objetivo (MOBJ), foi validado da seguinte maneira: a partir de 51 casos pré-selecionados de FFs que impactaram a região que compreende o Estado de Santa Catarina e arredores (AL4) entre 2015 e 2020, denominado de método observacional (MOBS) e pela comparação com as FFs catalogadas do Boletim Climanálise (MCLN) de 1996 a 2013. Os principais resultados mostram que: (1) o MOBJ se apresenta coerente na representação dos 51 casos e com as FFs do MCLN; (2) a climatologia de FFs apresenta uma frequência média anual em torno de 70 sistemas; na variabilidade sazonal verifica-se uma maior frequência no inverno, onde esses sistemas são mais intensos, com uma média de 20 FFs por ano; os padrões de deslocamento e intensidade mostram a diminuição de FFs conforme estas avançam em direção à latitudes menores e a maior frequência mensal de FFs ocorre entre junho e novembro. E por fim, com o modelo conceitual construído, classificou-se 4 principais trajetórias das FFs denominadas de oceânicas, litorâneas-oceânicas, continentais-litorâneas e as continentais.

Palavras-Chave: Sistema Frontal. Algoritmo. Índice de Frente Fria. Climatologia.

ABSTRACT

The Frontal Systems (SFs) operating in the South and Center-south of South America (AS) characterize events as causing medium and high impact. This work aims to evaluate the effects of cold fronts (FF) passage through these regions by using an automated detection method. In this region, 10 areas were delimited, being 5 coastal and 5 continental. A methodological procedure generates a computational algorithm called Cold Front Detection Index (IFF), for detection and characterization of FFs through data from the reanalysis of CFSR and CFSRv2, every 6 hours, of the meridional component wind at 10 m, and the air temperature at 2 m. The normalized IFF made it possible to evaluate the detection rate and intensity of each FF between 1991 and 2020. The detection rate was adjusted to 17%, considered as the minimum percentage of the IFF that represents the performance of an FF. The algorithm, called objective method (MOBJ), was validated as follows: from 51 pre-selected cases of FFs that impacted the region comprising the State of Santa Catarina and surroundings (AL4) between 2015 and 2020, called observational method (MOBS) and by comparison with the FFs cataloged from the Boletim Climanálise (MCLN) from 1996 to 2013. The main results show that: (1) the MOBJ is coherent in the representation of the 51 cases and with the FFs of the MCLN; (2) the climatology of FFs has an average annual frequency of around seventy systems; in seasonal variability, there is a higher frequency in winter, when these systems are more intense, with an average of 20 FFs per year; the displacement and intensity patterns show the decrease of FFs as they advance towards lower latitudes and the highest monthly frequency of FFs occurs between June and November. And, finally, basing on the built conceptual model, 4 main trajectories of the FFs called Oceanic, Coastal-oceanic, Continental-coastal and Continental were classified.

Keywords: Frontal Systems. Algorithm. Cold Front Index. Climatology

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Ciclo de vida dos ciclones extratropicais considerando o Hemisfério Sul: a) escoamento estacionário, b) perturbação inicial do escoamento, c-d) crescimento do ciclone, e) início da oclusão e, f) oclusão atinge máxima intensidade, g) ciclone totalmente ocluído e h) decaimento do sistema.24
- Figura 2:** Densidade de ciclogêneses subtropical obtida da reanálise 1 do NCEP.25
- Figura 3:** Sistema frontal clássico. Linhas inteiras isóbaras.26
- Figura 4:** Circulação nos níveis baixos, médios e altos da atmosfera; a) climatologia de verão e b) em eventos de ZCAS.37
- Figura 5:** Variabilidade das Correntes de Jato Subtropical (JST) (a) e Polar (JP) (b). Linhas em vermelho: posição média do JST no inverno e verão. Linhas em azul: posição média do JP no inverno e verão. Linhas em amarelo: posição extrema de ambos os jatos para as duas estações do ano38
- Figura 6:** Mapa global das regiões de ocorrência dos JBNs, com base em dados horários de um período de 21 anos do Mesoscale Model 5.40
- Figura 7:** Número médio de dias por ano com condições favoráveis para formação de tempestades severas e tornados para todo o globo.47
- Figura 8:** As áreas de estudos, 5 áreas litorâneas (ALs) e 5 áreas continentais (ACs) são delimitadas pelo retângulo em cor preta e a escala de cores mostra a topografia do cone sul da AS. A escala varia de 0 metros, que se refere ao nível do mar (os oceanos), e em torno de 6 mil metros indicando a cordilheira dos Andes no lado ocidental da AS.51
- Figura 9:** Mapa da região de estudo destacando as áreas selecionadas pelo algoritmo; Áreas de vento norte (linhas pretas); Áreas de vento sul (linhas azuis); Áreas com redução de temperatura (t+24h) (linhas verdes); Área da avaliação do método (AL4) e o Índice de detecção de FF (sombreado). E ainda a delimitação das 5 ALs e 5 ACs.59
- Figura 10:** Áreas de detecção da passagem de uma frente fria pelos 18Z do dia 25/06/2020. O sombreado indica os números de pontos de grade total (NPTOT), o número de pontos de grade detectados (NPVAL) e a porcentagem de detecção (PERPO) para a AL4.61
- Figura 11:** Localidades no litoral do Brasil utilizadas para classificação de episódios de frentes frias no Boletim Climanálise.62
- Figura 12:** Valores de porcentagens de detecção P30 (a), P25 (b), P20 (c), P17 (d) e P15 (e) usados nos 51 episódios que atuaram na AL4 entre os anos de 2015 a 2020. .71

Figura 13: Valores de índice máximo e médio de detecção normalizados dos 51 casos de Frentes Frias que atuaram na AL4 entre os anos de 2015 a 2020.....	72
Figura 14: Comparação entre o número médio mensal de frentes Frias detectadas pelo método objetivo, considerando um mínimo de 3, 4, 5 e 6 áreas de atuação e o método observacional, calculados entre os anos de 1991 e 2020.....	73
Figura 15: Frequência Anual de Frentes Frias pelo Algoritmo (MOBJ e MOBS - 1991 a 2020) e pelo Climanálise (MCLN) período de 1996 a 2013.	77
Figura 16: Frequência Sazonal de Frentes Frias obtidas pelo Algoritmo (MOBJ e MOBS) e pelo Climanálise (MCLN) período de 1996 a 2013.	78
Figura 17: Número médio Mensal de Frentes Frias obtidas pelo Algoritmo (MOBJ e MOBS) e pelo Climanálise (MCLN) período de 1996 a 2013.	79
Figura 18: Box plot do Número mensal de Frentes Frias com MOBJ, MOBS e MCLN. A cor de cada caixa se refere ao um mês específico. Como exemplo; mês de fevereiro cor laranja.	79
Figura 19: Frequência Anual de Frentes Frias detectadas pelo Algoritmo período de 1991 a 2020.	82
Figura 20: Número médio sazonal de Frentes Frias pelo MOBJ e MOBS no período de 1991 a 2020.	83
Figura 21: Número Médio Sazonal de Frentes Frias e do Valor Médio Sazonal do Índice de Frente Fria Normalizado nas Áreas Litorâneas e Continentais (1991-2020).	85
Figura 22: Número médio Mensal de Frentes Frias pelo MOBJ e MOBS no período de 1991 a 2020.	86
Figura 23: Número Médio Mensal de Frentes Frias nas Áreas Litorâneas e Continentais (1991-2020).....	87
Figura 24: Valor Médio Mensal do Índice de Frente Fria Normalizado referente a cada uma das Áreas Litorâneas e Continentais (1991-2020).	88
Figura 25: Decretos Municipais referentes a eventos de enxurradas ocorridos entre 2000 e 2020 em SC.....	91
Figura 26: Percentis P99, P95 e P90 da precipitação diária máxima (a) e média (b) mensal, calculada para cada mês do ano, no período de 2000 a 2020.	92
Figura 27: Distribuição dos casos ocorrido (círculo em cor azul vazado) em cada mês do ano e a classificação quanto ao impacto, casos de baixo impacto (hexágono em cor verde), de médio (símbolo estrela em cor preta) e de alto impacto (quadrado em vermelho).	93

Figura 28: Precipitação acumulada (mm/dia) do MERGE referente às datas detectadas dos episódios de Frentes Frias nas quatro estações do ano - a) 13 episódios na primavera, b) 8 episódios no verão, c) 6 episódios no outono e d) 10 episódios no inverno - datas estas baseadas nos 51 casos levantados entre os anos de 2015 e 2020.95

Figura 29 : IFFN detectado pelo algoritmo referente a quatro casos de FFs que impactaram SC, em cada estação do ano: a) Primavera - caso 014 - entre 01/11 e 04/11/2016; b) Verão - caso 040 - 25/02 a 28/02/2020; c) Outono - caso 043 - 1006 a 13/06/2020 c) Inverno - caso 002 - 13/07 a 16/07/2015.....97

Figura 30: Parte principal do Algoritmo automatizado de Detecção de Frentes Frias - IFF..... 102

Figura 31: Modelo conceitual das trajetórias das FFs sobre as áreas de estudos, sendo 5 áreas litorâneas (ALs) e 5 áreas continentais (ACs), delimitadas pelos retângulos em cor vermelha..... 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição das cinco áreas litorâneas (ALs) e cinco continentais (ACs) selecionadas na região de estudo destacando os principais sistemas meteorológicos atuantes.	52
Tabela 2: Casos de Frentes Frias que impactaram SC entre 2015 e 2020 no verão.....	66
Tabela 3 : Casos de Frentes Frias que impactaram SC entre 2015 e 2020 no outono..	67
Tabela 4: Casos de Frentes Frias que impactaram SC entre 2015 e 2020 no inverno. .	68
Tabela 5 : Casos de Frentes Frias que impactaram SC entre 2015 e 2020 na primavera.	69
Tabela 6: Número mensal de FFs detectado pelo Algoritmo, pelo MOBJ (a), MOBS (b), do período de 1991 a 2020. Os números em cor azul, vermelho e preto correspondem a quantidade menor, maior e igual, respectivamente, em relação ao número de FFs da tabela 7 MCLN.	75
Tabela 7: Número mensal de FFs levantados do boletim Climanálise (MCLN) entre 1996 e 013.	76
Tabela 8: Comparação dos casos ocorridos e dos detectados entre 2015 e 2020. (A) Casos ocorridos e detectados e (B) Casos ocorridos e não detectados	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACs - Áreas Continentais

ALs - Áreas Litorâneas

AS - América do Sul

ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

ASE - Alísios de Sudeste

ASPS - Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul

BCH - Baixa do Chaco

CIRAM - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina

CCM - Complexos Convectivos de Mesoescala

CE - Ciclone Extratropical

CFSR - *Climate Forecast System Reanalysis*)

CFSv2 - *Climate Forecast System Reanalysis version 2*

CGA - Circulação Geral da Atmosfera

CLA - Camada Limite Atmosférica

COLA - *Ocean-Land-Atmosphere Interactions*

CPC/NCEP- *Climate Prediction Center/National Centers for Environmental Prediction*

CT - Ciclone Tropical

CS - Ciclone Subtropical

CSI - Ampliação dos serviços climáticos para Investimentos em infraestrutura

ECMWF - *ERA-Interim do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

EMA - Estação Meteorológica Automática

EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura

GIZ - *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*

GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite

GFS - Global Forecast System

HN - Hemisfério Norte

HS - Hemisfério Sul
IAH - Itens de Assistência Humanitária
IFF - Índice de Frente Fria
IFFN - Índice de Frente Fria Normalizado
IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
JBN - Jato de Baixos Níveis
JBNAS - JBN da América do Sul
LI - Linha de Instabilidades
MAS - Modo Anular Sul
MOBJ - Método Objetivo
MOBS - Método Observacional
MCLN - Método Climanálise
MMA - Ministério do Meio Ambiente
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration
NCEP - National Center for Environmental Prediction
NPTOT - Número de Pontos de grade Total
NPVAL - Número de Pontos de grade detectados
PTT - Produto Técnico-Tecnológico
OMS - Organização Mundial de Saúde
OMM - Organização Mundial de Meteorologia
PECS - Sistemas Convectivos alongados persistentes
PERPO - Porcentagem de detecção de Pontos
RMSP - Região Metropolitana de São Paulo
RS - Rio Grande do Sul
TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission
UICN - União Internacional para a Conservação da Natureza
VCAN - Vórtice Ciclônico de altos Níveis
ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul
WMO - World Meteorological Organization.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivos	19
1.2. Organização do Trabalho	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. Sistemas de Escala Sinótica	21
2.1.1. Ciclones	21
2.1.2. Sistemas Frontais	26
2.1.3. Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e Pacífico Sul (ASPS)	33
2.1.4. Zona de Convergência do Atlântico Sul	36
2.1.5. Jato de Altos Níveis	37
2.1.6. Jato de Baixos Níveis	39
2.2. Sistemas de Mesoescala	42
2.2.1. Sistemas Convectivos de Mesoescala	42
2.2.2. Circulação Marítima e Chuvas Intensas no Vale do Itajaí e Litoral de Santa Catarina	44
2.2.3. Tempestades	46
2.3. Estudos de Extremos de Precipitação	47
3. DADOS E METODOLOGIA	50
3.1. Área de Estudo	50
3.2. Dados	53
3.3. Metodologia	54
3.3.1. Levantamento de episódios de Frentes Frias de 2015 a 2020 sobre a região AL4	55
3.3.2. Índice de detecção de Frente Fria (IFF)	56
3.3.3. Validação do IFF e Limiar de Classificação de Frente Frias	60
3.3.4. Climatologia de Frente Frias	61
3.3.5. Categorização do grau de impacto das FFs	63
4. RESULTADOS	65
4.1. Levantamento Observacional dos casos de FF	65
4.2. Índice de Detecção de Frentes Frias e Validação na AL4	70
4.3. Validação Climatológica do Algoritmo	73
4.3.1. Comparação com as FFs registradas pelo algoritmo com o Boletim Climanálise - 1996 a 2013	73
4.4. Climatologia de FFs detectadas pelo método objetivo	81
4.4.1. Variabilidade Anual	82

4.4.2. Variabilidade Sazonal	82
4.4.3. Variabilidade Mensal	86
4.5. Episódios Extremos	90
5. PRODUTO(S) DESENVOLVIDO(S)	100
5.1 Artigos(s) Desenvolvido(s)	100
5.2 Produtos Técnicos-Tecnológicos	100
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
APÊNDICE A - LISTA DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS (EMAs) UTILIZADAS	122
APÊNDICE B - PRODUTO DE PRECIPITAÇÃO MERGE DO CPTEC/INPE	123
APÊNDICE C - LISTA DE EPISÓDIOS DE FRENTES FRIAS DETECTADAS PELO IFF EM 1991	124
APÊNDICE D - ALGUNS CAMPOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS NA ANÁLISE SINÓTICA DOS CASOS 02, 14, 40 E 43.	129

1. INTRODUÇÃO

As geociências possuem importante papel perante aos desafios impostos pelas demandas do desenvolvimento socioambiental e da tecnologia; assim o equilíbrio ambiental se torna um dos principais desafios da atualidade. Entidades como a União Internacional para a Conservação da Natureza (UICN), a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), a Organização Mundial de Saúde (OMS), a Organização Mundial de Meteorologia (OMM), entre outras, buscam soluções/mitigações aos problemas ambientais antropogênicos e naturais.

Para tal, a OMM tem em sua missão, princípios que ladeiam a Meteorologia (*di per si*), Clima, Água e Ambiente, e exemplifica uma larga cobertura interdisciplinar sobre este assunto. A OMM se orienta aos problemas ambientais ligados à variabilidade climática por meio de redes conectadas à observação, coleta, transmissão, colaborando com sistemas de previsão no compartilhamento de dados climáticos e favorecendo os formuladores de políticas de mitigação e/ou prevenção (WMO, 2022).

Neste contexto, se torna fundamental a busca pela compreensão e conhecimento dos fenômenos meteorológicos e hidrometeorológicos que modificam o ambiente, causando eventos de médio e alto impacto socioeconômicos . As Frentes Frias (FFs) são um dos principais sistemas meteorológicos que provocam mudanças significativas no tempo e clima em diversas partes do globo. Na região sul e centro-sul da América do Sul (AS) a atuação destes sistemas pode causar chuvas intensas, temporais com ventos fortes, queda acentuada da temperatura com impactos na agricultura e nos setores econômico e social.

As frentes frias (FFs) são definidas como uma zona de transição entre duas massas de ar com densidades e temperaturas diferentes, influenciando assim nas demais variáveis meteorológicas (BJERKNES, 1919). Estes sistemas são transientes, atuam principalmente em latitudes médias e, geralmente, estão

associados aos distúrbios de escala global (WALLACE & HOBBS, 1977; RODRIGUES et al., 2004).

Estudos de Justi da Silva e Silva Dias (2002), Andrade (2005) e Reboita et al. (2009) mostraram que as FFs que percorrem o litoral sulamericano atingem, em geral, latitudes em torno de 20°S, onde inicia seu processo de dissipação, conhecido como frontólise; já o máximo da frequência frontal ocorre no sul da Argentina na estação verão, em torno de 45°S, e a diminuição do número de frentes frias ocorre com o decréscimo da latitude.

Com relação a detecção de FFs, muitos autores têm estudado os sistemas frontais aplicando métodos de detecção, visando melhorar a previsibilidade da atuação destes sistemas em diversos lugares do globo. Autores como Renard e Clarke (1965); Clarke e Renard (1966), e Hewson (1998) foram os pioneiros em desenvolver métodos automatizados de identificação de FFs, com foco na melhoria da qualidade na previsão do tempo. Atualmente, com a ampliação da disponibilidade dos dados meteorológicos, os autores aplicam seus algoritmos automatizados em conjunto de reanálises, a fim de desenvolver climatologias de FFs, como os trabalhos de Berry et al. (2011) para o globo e Simmonds et al. (2012) para o Hemisfério Sul.

Na América do Sul (AS) e no Brasil, autores como Kousky (1979), Justi da Silva e Silva Dias (2002), Rodrigues et al. (2004), Andrade (2005), Cavalcanti e Kousky (2009), Morais et al. (2010), Silva et al. (2014), Cardozo et al. (2015), Escobar et al. (2016), utilizaram métodos de detecção de FFs para avaliar a frequência temporal e espacial da passagem das frentes na AS. Os principais resultados encontrados por estes autores foram: i) a frequência de atuação das FFs diminui em direção às baixas latitudes e; ii) nas estações de inverno e primavera austral estes sistemas são mais frequentes. No entanto, tais estudos não quantificaram as FFs quanto a intensidade das mesmas nas regiões estudadas.

Baseado neste contexto, este trabalho possui como hipótese principal que é possível identificar a atuação, o deslocamento e intensidade das FFs por meio

de um sistema computacional automatizado. Nesse sentido, a utilização de um método de detecção de frentes frias pode contribuir para melhorar a previsibilidade desses sistemas e, conseqüentemente, fornecer alerta sobre os possíveis impactos desses fenômenos em diversos setores da sociedade (PENNA, 2013).

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os efeitos da passagem de frentes frias pelo sul e centro-sul da América do Sul, entre 1991 e 2020, por meio de um método automatizado de detecção, visando auxiliar a previsão de eventos meteorológicos de alto impacto que atuam na região.

Especificamente, neste projeto se propõe a:

1. Levantar casos de sistemas frontais que causam alto impacto associados a eventos extremos de precipitação ocorridos em SC entre 2015 e 2020;
2. Elaborar um algoritmo computacional para detecção e caracterização de frentes frias que atuaram sobre o cone sul da América do Sul entre os anos de 1991 e 2020;
3. Determinar uma climatologia dos padrões de deslocamento e da intensidade das frentes frias no cone sul da América do Sul.
4. Classificar o impacto (baixo, médio ou alto) da precipitação associada à atuação das frentes frias;
5. Propor um modelo conceitual baseado nos padrões de deslocamento das frentes frias detectadas sobre as regiões litorâneas e continentais que possam subsidiar medidas de mitigação dos eventos extremos.

1.2. Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. No Capítulo 1 consta a introdução e objetivos da pesquisa, no Capítulo 2 apresenta-se uma revisão

bibliográfica sobre os sistemas meteorológicos que influenciam a região de estudo, com foco no sistema central do trabalho. No Capítulo 3 são detalhados os dados, a área de estudo e a metodologia aplicada. No Capítulo 4 consta os resultados encontrados referente a validação do algoritmo e a climatologia das Frentes Frias para toda área de estudo e também para cada área delimitada (litorâneas e continentais). Ainda neste capítulo são mostradas as análises da variabilidade anual, sazonal e mensal dos sistemas frontais e ainda, uma análise dos episódios extremos. No Capítulo 5 faz-se uma exposição dos produtos desenvolvidos durante o trabalho. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Sul e Centro-Sul da América do Sul (AS) atuam sistemas meteorológicos, principalmente nas escalas espaciais sinótica e de mesoescala, que influenciam as condições do tempo e clima na região, além de alguns destes modificarem o ambiente. Na escala sinótica, associados com comprimentos de onda superiores a 2000 km e que normalmente podem persistir por dias ou semanas (ORLANSKI, 1975), pode-se citar os Sistemas Frontais, os Ciclones Extratropicais (CE), o Jato de Baixos Níveis (JBN), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e os Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico Sul (ASPS). Já os sistemas meteorológicos de mesoescala possuem comprimento de onda entre 2 e 2000 km e escala temporal da ordem de horas a um dia Orlandi (1975). Tornados, *Downburst*, Linha de Instabilidades (LI), Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), tempestades convectivas isoladas e circulação marítima, são exemplos de sistemas meteorológicos de mesoescala. Neste capítulo apresenta-se uma descrição resumida dos sistemas meteorológicos que mais influenciam no regime de precipitação e de eventos meteorológicos extremos (temporais, vendavais, granizo, enchentes) na região do estudo, principalmente em Santa Catarina.

2.1. Sistemas de Escala Sinótica

Os principais sistemas meteorológicos de escala sinótica que influenciam o tempo na região centro-sul da AS são: CE, FF, ASAS, ASPS, ZCAS, JST e JBN (Reboita et al, 2010). Nesta seção são descritos os principais sistemas que afetam principalmente a região de estudo.

2.1.1 Ciclones

Os ciclones são um dos fenômenos mais severos da escala sinótica e desempenham um papel fundamental nas condições atmosféricas. Como afirmou Hakim (2003), os ciclones são reguladores dos contrastes de temperatura entre os pólos e o equador e mantém os ventos de oeste em latitudes médias contra a

dissipação friccional, portanto são um dos fenômenos responsáveis pelo balanço de energia e vapor d'água na atmosfera. Estes fenômenos são definidos como sistemas de baixa pressão atmosférica à superfície em relação ao seu entorno e com rotação no sentido horário no Hemisfério Sul (HS). Eles têm seu processo de formação ou intensificação denominado de ciclogênese, o qual ocorre principalmente através da advecção de temperatura em baixos e médios níveis da troposfera, que amplificam as ondas em altos níveis e conseqüentemente o gradiente vertical de vorticidade ciclônica (Sutcliffe, 1947). Enquanto que sua dissipação, denominado ciclólise, os gradientes horizontais de temperatura enfraquecem e o sistema perde intensidade.

Na AS, mais precisamente na região do Atlântico Sul existem duas regiões preferenciais à formação de ciclones. Gan e Rao (1991) destacaram a região da Patagônia Argentina (45° S) como sendo a região de maiores densidades na formação de ciclones e Guia (2010) mostrou que a região da Bacia do Prata também é uma região de alta densidade de ciclones e principalmente no inverno. Ambos estudos associaram à uma maior instabilidade baroclínica nessas regiões, com fortes gradientes de temperatura e de umidade, além da presença do jato polar e subtropical. Além disso, na região da Bacia do Prata há grande influência da orografia, por se encontrar a sotavento da Cordilheira dos Andes. Outras regiões ciclogênicas são a costa do Uruguai (35° S) com maior densidade no inverno e sul/sudeste (25° S) e leste brasileira, sobre o oceano atlântico (Hoskins e Hodges, 2005; GUIA, 2010; REBOITA *et al.*, 2009). Conforme Guia (2011) ocorre uma densidade de ciclogêneses menor comparada às outras regiões, mas com um aumento na estação verão e com deslocamento para o sul/sudeste no inverno. Já Reboita *et al.* (2009) destaca a importância da presença de umidade à formação dos ciclones, no entanto salienta que os ciclones se deslocam mais para leste e sudeste com velocidade média de 9 m/s, percorrendo 2700 km de distância aproximadamente e possuem tempo de vida médio de 3 dias.

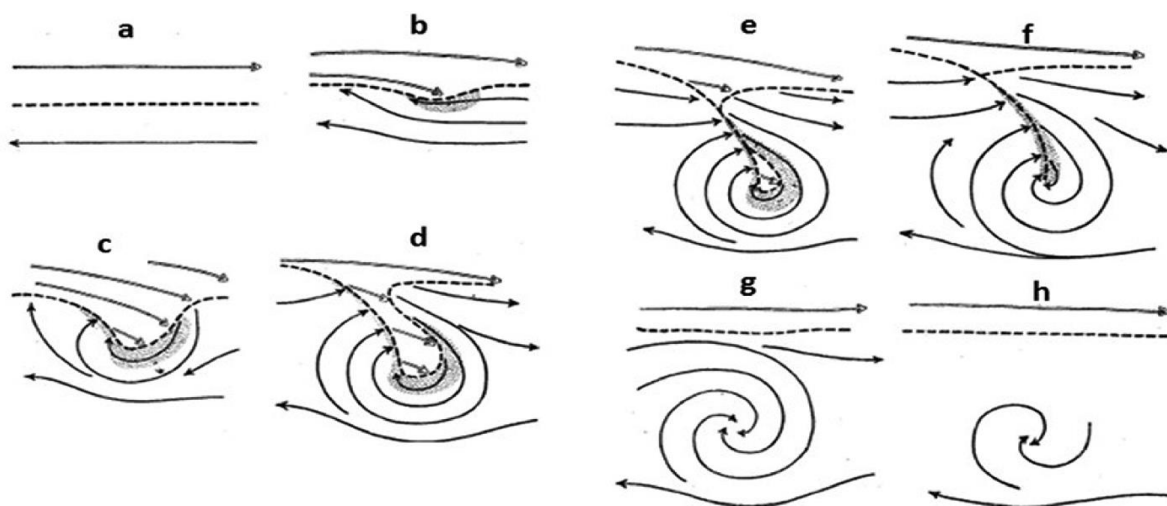
Existem três classificações de ciclones, conforme a origem, ciclo de vida, trajetórias, fonte de energia, entre outros. São eles: os ciclones extratropicais (CE), tropicais (CT), híbridos ou subtropicais (CS). Esta terceira classificação foi descoberta por Beven (1997), o qual verificou sistemas de baixa pressão não-

frontais que passavam por processos de transição apresentando uma estrutura híbrida entre dois ciclones já existentes.

Os ciclones extratropicais (CE) se formam em latitudes médias segundo a Teoria da Frente Polar (interação entre a massa de origem polar com a de origem tropical) proposta por Bjerknes e Solberg, (1922). Além disso, muitos estudos, por exemplo de Gan; Rao (1991), Reboita et al., (2009), Cavalcanti et al (2009) e Guia (2010) mostraram a região de latitudes médias sendo favorável à ciclogênese. Conforme Dutra (2012) os ciclones na AS atuam praticamente o ano todo com variação sazonal e latitudinal. São assimétricos termicamente (presença de frentes), se formam devido a grande instabilidade baroclínica, onde há a presença de forte cisalhamento vertical do vento horizontal associado aos gradientes horizontais de temperatura, além disso possuem núcleo frio que se inclina para oeste com a altura (Charney, 1947).

A figura 1 ilustra a formação, desenvolvimento e enfraquecimento de um CE no HS. O CE se forma em uma pequena onda que surge ao longo de uma frente (encontro de duas massas de ar distintas) em superfície (Fig. 1b). No HS, o vento de oeste vira de noroeste, formando frente quente (deslocando parte leste da frente para o sul) e a parte oeste da onda desloca-se para o norte/nordeste como frente fria (Fig. 1c). Como a frente fria se propaga mais rapidamente do que a frente quente (Fig. 1d) à medida que essa se move ao redor do centro do ciclone, começa a se aproximar da frente quente e isso influencia o campo de pressão que resulta em isóbaras quase circulares, com um sistema de baixa pressão centrado no vértice da onda. Quando parte da frente fria alcança o ar frio na retaguarda da frente quente (Fig. 1e) ocorre o aprisionamento do ar quente no centro do ciclone e a medida que o ar frio avança ele toma espaço do ar quente, fazendo-o ascender para níveis mais altos da atmosfera de forma que fique somente o ar frio no centro do ciclone em superfície (Fig. 1f), neste estágio ele alcança sua intensidade máxima e é denominada oclusão. Na figura 1g o ciclone se torna um vórtice frio e simétrico e como não há mais fonte de energia disponível, ele tende a desaparecer (Fig. 1h), (REBOITA *et al*, 2017).

Figura 1: Ciclo de vida dos ciclones extratropicais considerando o Hemisfério Sul: a) escoamento estacionário, b) perturbação inicial do escoamento, c-d) crescimento do ciclone, e) início da oclusão e, f) oclusão atinge máxima intensidade, g) ciclone totalmente ocluído e h) decaimento do sistema.



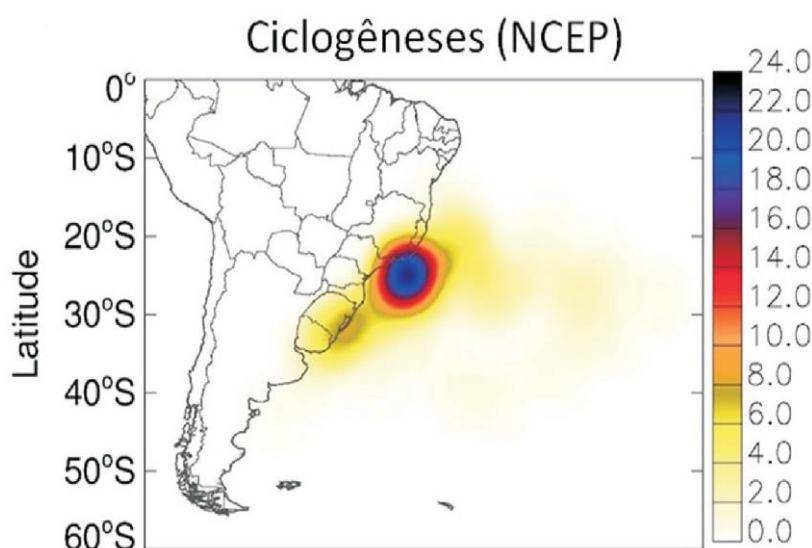
Fonte: Reboita et al, 2017 adaptado de Bjerknes e Solberg, 1922.

Os ciclones tropicais (CTs), são também denominados de tufões, furacões e isso é devido a localização que atuam. Eles são caracterizados por possuir um núcleo quente, barotrópico e muito profundo, se estendendo da superfície à tropopausa, onde o maior aquecimento ocorre nas camadas superiores da troposfera (GOZZO *et al.* (2014). Os CTs são sistemas de baixa pressão sem sistemas frontais associados, se originam nas regiões equatoriais do globo e se intensificam por meio da convecção intensa e organizada, alimentada pela transferência de calor latente do oceano para a atmosfera. Muitos estudos como de Gray (1968) e Galvin (2008), mostraram que, quanto maior for a temperatura da superfície do mar, maior será esta transferência, então temperaturas acima de 26,5 °C são ideais para formação de CT, além disso, um fraco gradiente horizontal de temperatura em baixos níveis e um fraco cisalhamento vertical dos ventos também são condições para formação de CT, (ROCHA *et al*, 2016). Já Marks (2002), afirma que uma camada de mistura oceânica com águas quentes com uma profundidade aproximadamente de 50 metros também é fundamental para a formação e desenvolvimento de ciclones tropicais. No entanto, estudos recentes mostram para a ocorrência de ciclones tropicais sobre águas com temperaturas inferiores a 26,5 °C, Dare e McBride (2011) encontram um total de 7% dos ciclones tropicais com essa característica no período de 1981 a 2008, em uma climatologia

entre 35° S e 35° N. Um exemplo de ciclone tropical ocorrido na costa Sul da AS foi o furacão Catarina, este ciclone iniciou sua gênese numa categoria e evoluiu para outras, ou seja, se originou como extratropical, passou pela fase subtropical e decaiu como tropical, este ciclone ocorreu em 2004 no sudoeste do oceano Atlântico Sul.

Os ciclones subtropicais, conforme Hart (2003) são também chamados de híbridos, pois são centros de baixa pressão não-frontais que apresentam características tanto dos CT quanto dos CE. Eles apresentam núcleo quente em baixos níveis da atmosfera, como os CT, e frio em altos níveis, como os CE. Esses ciclones ocorrem em diferentes lugares do globo como no mar Mediterrâneo, próximo da Austrália na bacia do Atlântico Norte e Sul (REBOITA et al, 2017). Na bacia do Atlântico Sul, Gozzo *et al.* (2014), utilizando dados da reanálise do NCEP e do ECMWF, obtiveram uma frequência de ~7,2 sistemas por ano. Esta frequência média anual encontrada por Gozzo *et al.* (2014) deve-se ao fato de que esses autores usaram limiares menos rígidos para a climatologia, como: inclusão de sistemas que não apresentavam baixa fechada na média troposfera e/ou cujo vento máximo em 925 hPa não atingia 17 m s⁻¹. Entretanto, autores, como Gozzo *et al.* (2014), mostraram a região oceânica próxima da costa sul/sudeste do Brasil como a de maior ocorrência desses sistemas (figura 2).

Figura 2: Densidade de ciclogêneses subtropical obtida da reanálise 1 do NCEP.



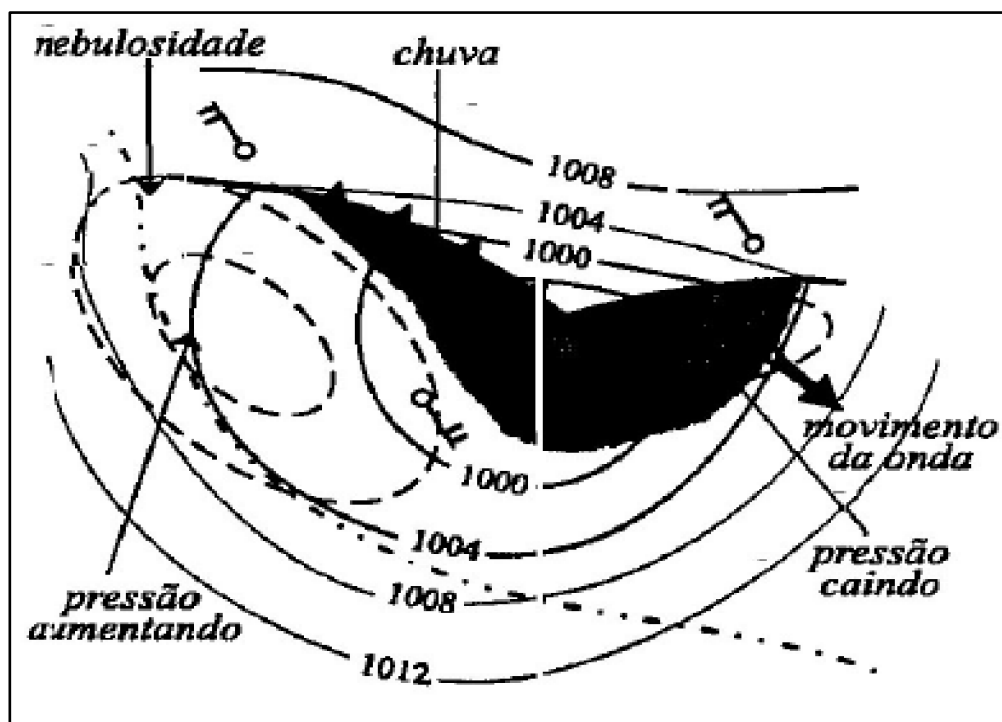
Fonte: Adaptada de Gozzo *et al.* (2014).

Com relação à variabilidade sazonal, os ciclones subtropicais no sudoeste do oceano Atlântico Sul ocorrem preferencialmente no verão. Outras características encontradas por Gozzo *et al.* (2014) são que os ciclones subtropicais percorrem distâncias menores do que os extratropicais, e com menor velocidade.

2.1.2. Sistemas Frontais

A região centro-sul da AS, foi identificada como uma região frontogenética, a qual é favorável à formação e intensificação de sistemas frontais, (SATYAMURTY E MATTOS, 1989 e REBOITA *et al.*, 2009). Um sistema frontal é composto por um centro de baixa pressão em superfície (ciclone), uma frente fria e uma frente quente (figura 3). Quando uma frente ultrapassa a outra, ocorre a oclusão destas frentes e neste caso, o sistema frontal é caracterizado por um ciclone e uma frente oclusa. No entanto, quando há pouco ou nenhum avanço das massas de ar, forma-se então, uma frente estacionária e o sistema frontal passa a ser composto por um ciclone e uma frente estacionária (ANDRADE, 2005).

Figura 3: Sistema frontal clássico. Linhas inteiras isóbaras.



Fonte: Adaptada de Andrade (2005).

Segundo Bjerknes (1919) uma Frente foi definida como uma zona de transição (zona frontal) entre duas massas de ar com densidades e temperaturas diferentes, influenciando assim nas demais variáveis meteorológicas. A passagem de uma FF pode ser notada através do decréscimo rápido da temperatura, diminuição da pressão atmosférica quando está se aproximando de um certo local seguida de aumento (quando já está se afastando), mudança nos ventos de quadrante norte para quadrante sul no Hemisfério Sul e variação na nebulosidade, muitas vezes acompanhadas de precipitação e temporais (Fedorova, 1999; Cavalcanti e Kousky (2009).

Estudos de Justi da Silva e Silva Dias (2002), Andrade (2005) e Reboita et al. (2009) mostraram que as FFs que percorrem o litoral sul-americano atingem, em geral, latitudes em torno de 20°S, onde tem início seu processo de dissipação, conhecido como frontólise, já o máximo da frequência frontal ocorre no sul da Argentina na estação verão, em torno de 45°S e a diminuição do número de frentes frias ocorre com o decréscimo da latitude.

As FFs, como a maioria dos fenômenos sinóticos, sofrem influência de fenômenos de grande escala (escala global). Os fenômenos La Niña e El Niño influenciam na quantidade de dias com frentes frias na faixa de latitude entre 20 e 40 °S. Fedorova e Carvalho (2000) mostraram que nos meses de atuação de El Niño há uma maior frequência dos sistemas frontais atingindo 90,3% dos dias analisados, já em anos de La Niña, diminui para 56,7%.

Com relação a detecção de frentes frias, muitos autores têm estudado tais sistemas aplicando métodos de detecção a fim de melhorar a previsibilidade da passagem destes em diversos lugares do globo. Autores como (Renard e Clarke 1965; Clarke e Renard 1966 e Hewson 1998) foram os pioneiros em desenvolver métodos automatizados para identificar frentes com foco na melhoria da previsão do tempo. Hoje com a disponibilidade dos dados de reanálises, os quais oferecerem campos em grande escala, alguns autores aplicam nos algoritmos estas reanálises, a fim de fazer climatologias de frentes como Berry et al. (2011) para o globo e Simmonds et al. (2012) para o Hemisfério Sul.

Sendo assim, Barri et al. (2011) por meio de um algoritmo de detecção automática de frentes identificaram as regiões do globo com maior frequência de frentes frias, frentes quentes e estacionárias. Utilizaram dados de reanálise ERA-40 do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) no período de janeiro de 1958 a dezembro de 2001. Esses algoritmos geralmente são projetados para traçar frentes automaticamente em um quadro sinótico por meio do uso de máscaras gráficas. Os autores usaram a mesma metodologia, exceto que o mascaramento foi feito numericamente e um algoritmo de junção de linha foi empregado para agrupar pontos contínuos em frentes individuais. O algoritmo unia pontos frontais ao vizinho mais próximo se os dois pontos estivessem separados por menos de cinco graus. Frentes com menos de três pontos eram removidas. Os autores usaram valores limites para a intensidade mínima do parâmetro da frente térmica para definir frentes e a velocidade frontal para diferenciar os tipos de frente. Com uma análise preliminar sugeriram que existem regiões do globo onde frentes com movimento lento são comuns. Para uma melhor análise, foi escolhido usar dois limiares de velocidades para separar as frentes em três tipos. As frentes quentes foram definidas onde o parâmetro de velocidade frontal excedia 1,5 m/s, frentes frias onde o parâmetro foi menos de -1,5 m/s, caso contrário, as frentes foram definidas como quase estacionárias. Como resultados, as maiores frequências dos tipos de frentes ocorrem na região entre 40° e 60° de latitude em ambos os hemisférios, região dos *storm tracks*. No HS os máximos estão localizados na região de Frontogênese máxima encontrada por Satyamurty e De Mattos (1989). Sobre as frentes quase estacionárias, elas tendem a ser menos comuns nas trilhas de tempestades de latitude média sobre os oceanos e estão localizadas mais em direção ao equador.

Simmonds et al. (2012) utilizaram um algoritmo de rastreamento de Frentes Móveis no Hemisfério Sul com dados da reanálise ERA-Interim do ECMWF, cobrindo o período de 21 anos (1989 a 2009). Aplicaram seu algoritmo ao vento a 10 m e ao nível de 850 hPa com critérios de mudança do vento de quadrante noroeste ao sudoeste, e que a intensidade na componente do vento meridional (sinalizado) excedesse 2 m/s. A climatologia resultante revelou que a maior frequência de pontos frontais é encontrada no cinturão de latitude 40° e 60°S tanto

no inverno quanto no verão, embora haja uma série de assimetrias zonais no oceano, regiões nas proximidades da Patagônia, sul da África, e sudoeste da Austrália. Os resultados mostraram que as frentes mais longas estão no Oceano Índico, onde os comprimentos médios excedem 2.000 km. A intensidade frontal média sobre o hemisfério tende a ser maior a 850 hPa do que a 10 m, e maior no inverno do que no verão. A intensidade frontal também mostra sua máxima no Oceano Índico. Na média, a inclinação meridional dessas frentes é noroeste - sudeste sobre grande parte das latitudes médias e subtropicais, e aumenta com a latitude em direção ao equador. Em termos gerais, o número de frentes e seu comprimento médio e intensidade média exhibe máximos no inverno nas latitudes médias (30° - 50°S), mas mostram uma variação semestral considerável (máximas no outono e na primavera) durante o ano em latitudes mais altas.

Schemm et al. (2015) analisaram o desempenho e as diferenças entre dois métodos de detecção automatizados para frentes de superfície atmosférica. O primeiro método é baseado nas mudanças do vento de 10 m, enquanto o segundo método é uma abordagem térmica baseada na avaliação do parâmetro da frente térmica em 850 hPa que é capaz de identificar as frentes frias e quentes. O método do vento baseou-se na análise de mudanças de 6h do vento de 10 m em pontos individuais da grade. A versão original do vento identifica uma frente quando o vento horizontal muda de noroeste a sudoeste no HS, combinado com uma intensificação do vento meridional maior que 2 m.s⁻¹ mais de 6 h. Para aplicar este método ao Hemisfério Norte (HN) os autores consideraram por simetria, que o vento horizontal muda do sudoeste ao noroeste, enquanto o critério da intensificação do vento meridional permanece inalterado. No entanto, frentes orientadas mais sazonalmente podem não serem detectadas usando esta técnica. Baseado em simulação de casos idealizados e no estudo de dois casos reais, os autores obtiveram que o método térmico parece ter maior habilidade em identificar frentes em casos baroclínicos fortes, já o método do vento teve um bom desempenho na detecção de frentes em situações sinóticas menos baroclínicas. Por exemplo, frentes que são induzidas por forte cisalhamento do vento e a convergência entre dois anticiclones. Outro resultado é que a orientação das frentes nos dois métodos se mostrou diferente. O método do vento identifica frentes com uma orientação mais meridional, enquanto o método térmico muitas

vezes tem uma componente zonal maior. O método do vento tende a identificar apenas frentes frias, e seria apenas capaz de encontrar uma frente quente no caso de uma situação sinótica incomum, por exemplo em um ciclone girando quando uma frente quente se torna meridionalmente orientada.

Na AS e no Brasil, além da busca em detectar a FF, o foco de muitos autores têm sido determinar uma climatologia deste sistema para avaliar a frequência temporal e espacial da passagem das frentes em diversos lugares da AS. Kousky (1979) analisou a ocorrência de frentes frias que atingiram o nordeste do Brasil num período de 10 anos (1961 a 1970), tendo identificado uma maior frequência de passagem desses sistemas nas estações de inverno e primavera e relacionado a esta frequência estão os maiores totais pluviométricos na região. Uma climatologia de FF utilizando imagens de satélites foi feita por Oliveira (1986) com o objetivo de avaliar a interação com a Amazônia, como resultado observou-se que as FFs diminuem em direção às baixas latitudes.

Justi da Silva e Silva Dias (2002) determinaram uma climatologia de frentes frias com base em pontos de grade, delimitados pelas latitudes entre 10° e 60° S e pelas longitudes entre 30° e 90° W, com dados de reanálise do NCEP no período de 1981 a 1999. As autoras definiram ocorrência de uma FF quando detectada a reversão no sinal da componente meridional do vento, ventos de norte para ventos de sul. Como resultado mostraram maior frequência de sistemas frontais no litoral que no continente em torno da latitude de 35° S.

Rodrigues et al. (2004), utilizaram um algoritmo numérico e dados de reanálises do NCEP-NCAR e fizeram uma climatologia da frequência das FFs no litoral catarinense. Os critérios usados pela autora foram: giro do vento de quadrante norte para quadrante sul, o que representa uma inversão no sinal do vento meridional de negativo para positivo; permanência do vento sul por pelo menos mais de um dia; queda de temperatura no momento do giro do vento, ou até dois dias depois, de pelo menos 0.5 grau Celsius. Os autores identificaram 429 sistemas num período de 10 anos e mostraram que passam em média de 3 a 4 FFs pelo litoral em todos os meses do ano e que a frequência maior da passagem das FFs se dá na primavera.

Andrade (2005) estudou os sistemas frontais durante o período de 1980-2002, sobre o sul da América do Sul. Os critérios utilizados para detecção das FFs no estudo foram; a queda de temperatura em 925 hPa, o aumento da pressão ao nível médio do mar e a mudança da componente meridional do vento em 925 hPa de um dia para o outro. O estudo mostrou que há uma diminuição da ocorrência de sistemas frontais da Argentina em direção a latitudes mais baixas. O estudo também mostrou que nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, a primavera é a estação de maior ocorrência de frentes frias. A autora notou que no verão os sistemas não conseguem penetrar no interior, com tanta frequência, sendo esta estação a que apresenta menor número de sistemas frontais em todas as áreas estudadas.

Cavalcanti e Kousky (2009) analisaram a passagem de FFs de 1979 a 2005, usando como parâmetros a presença de ventos de sul com pelo menos 2 m/s, queda na temperatura de no mínimo 2° C e aumento da pressão ao nível médio do mar de pelo menos 2 hPa. Como resultado obtiveram um número médio anual de 45 passagens de frentes frias na costa leste do extremo sul da América do Sul e 30 passagens de frentes na costa leste da região sudeste do Brasil. Além disso, as maiores ocorrências de frentes durante todo ano, estão entre as latitudes entre 25° S e 30° S, e à medida que as latitudes diminuem, a frequência desses sistemas também diminui.

Morais et al. (2010) apresentaram uma análise da climatologia de frentes frias e do regime de ventos induzido por esses fenômenos sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), no período de 21 anos (1987 a 2007). Foram utilizados dados de vento da estação meteorológica do IAG/USP, localizada no bairro da Água Funda - São Paulo - SP. A metodologia central utilizada pelos autores foi similar a de Rodrigues et al (2004). Eles utilizaram critérios como a virada do vento meridional de norte para sul e a persistência do vento de sul por no mínimo dois dias. Os resultados mostraram que três frentes, em média, chegam a RMSP mensalmente, sendo que sua frequência é maior nos meses de março a maio, e de agosto a dezembro. Com relação ao vento, se mostrou mais intenso nos dias anteriores à passagem da frente fria, com valor mínimo na chegada, aumentando gradativamente nos dias seguintes. As correlações feitas

entre frentes frias e a dinâmica nos reservatórios mostraram que, em média, o tempo de resposta de um evento para outro foi de 2 a 3 dias na represa Guarapiranga, e 3 a 4 dias na represa Billings. Os parâmetros físico-químicos medidos nas represas foram temperatura (C), pH e Turbidez (NTU).

Silva et al. (2014), quantificaram a passagem de frentes frias pela Região Sul de Minas Gerais (RSMG) no período de 2004 a 2010. Na detecção das FFs utilizaram as variáveis atmosféricas temperatura do ar a 2 m de altura, pressão ao nível médio do mar e a componente meridional do vento a 10 metros de altura da reanálise ERA-Interim do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) e um esquema objetivo para identificação das frentes. Como resultado obtiveram que na média anual passa um total de 27 frentes pela RSMG, sendo a primavera e o inverno as estações com maior ocorrência de frentes frias.

Cardozo et al. (2015) avaliaram a ocorrência de FFs em oito localidades na costa leste da AS. Este trabalho aplicou um método automático similar a de Rodrigues et. al. (2004) e Silva et al. (2014), com objetivos de quantificar a ocorrência das FFs, mostrando a necessidade de estudos pontuais para definição de limiares quando usado algoritmos automáticos e relacionar a ocorrência de FFs com as diferentes fases do Modo Anular Sul (MAS). Na Argentina a ocorrência de FFs praticamente não apresenta variabilidade sazonal, diferentemente no Brasil, onde todas as cidades estudadas mostraram maior ocorrência de FFs no inverno e menor no verão. A relação da ocorrência de FFs com as fases do MAS mostrou uma preferência pela ocorrência de FFs na fase positiva do MAS na estação de verão e na fase negativa nas estações de inverno e primavera, para quase todas as cidades do estudo.

Escobar et al. (2016), identificaram os principais padrões sinóticos associados com chuvas extremas na região do Vale do Itajaí/SC, por meio de uma classificação sinótica de frentes frias sobre o leste do Estado de Santa Catarina (SC). A metodologia utilizada foi a técnica de Análise de Componentes Principais aplicada à série de reanálises do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) (NCEP) para o período 1979-2010. Para selecionar os sistemas frontais associados a eventos extremos de chuva, os autores utilizaram dados de

precipitação no período 1998-2010, obtidos através do produto MERGE (Rozante et al. (2010)), que resulta da combinação de dados observados e estimativas de precipitação derivadas do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Para a identificação dos sistemas frontais foram utilizados os seguintes critérios objetivos para a área de estudo: aumento da pressão ao nível médio do mar maior que 2 hPa; queda da temperatura maior que 2 °C e mudança na direção do vento de quadrante norte para quadrante sul em 925 hPa. Essas mudanças são médias na área e devem ser observadas simultaneamente entre o dia e o próximo consecutivo. Um critério semelhante foi utilizado por Andrade (2005) em análises climatológicas. Os limiares de 2 hPa e 2 °C foram encontrados a partir da média mensal de queda de temperatura e aumento da pressão na área de estudo. Sobre a climatologia os resultados mostram uma maior frequência de frentes frias associadas a chuvas extremas no Vale do Itajaí durante a primavera. Os resultados fornecem cinco padrões sinóticos principais que representam 83,4% dos casos de frentes frias com chuvas extremas no Vale do Itajaí. O padrão sinótico mais frequente mostra um intenso fluxo de quadrante sudeste sobre a região de estudo, determinado pela presença de um forte anticiclone pós-frontal observado sobre o sul da Província de Buenos Aires, cuja frente fria associada encontra-se no extremo nordeste catarinense. Por último, há dois padrões sinóticos típicos de verão relacionados com chuvas extremas no Vale do Itajaí; um relacionado com episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e outro associado com a Baixa do Chaco (BCH).

O método de detecção e a climatologia de frentes frias favorecem uma melhor previsão desses sistemas e conseqüentemente fornecem um alerta sobre os possíveis impactos desses fenômenos, em diversos setores da sociedade, (PENNA, 2013).

2.1.3. Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e Pacífico Sul (ASPS)

Os anticiclones são sistemas definidos como centros de alta pressão atmosférica e sua formação está associada à circulação geral da atmosfera (CGA). O sol é a fonte de energia que controla a CGA. A distribuição da energia solar na terra consiste em um conjunto de movimentos atmosféricos que

determinam as zonas climáticas na escala planetária definindo diversos estados temporais em diferentes lugares (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007). A CGA compõe sete células ao redor do globo (CARDOSO, 2019). A célula de Hadley, uma circulação meridional, localizada em torno de 30° de latitude (Norte e Sul) é responsável por originar os Anticiclones Subtropicais. Estes sistemas são formados pelo ramo subsidente da célula presente na coluna atmosférica, apresentando um campo de divergência do ar na superfície e convergência em altos níveis, (ITO & AMBRIZZI, 1999).

Na região subtropical os anticiclones apresentam grande variabilidade sazonal, o ASAS é mais intenso no inverno e se aproxima mais do continente com deslocamento para norte, já no verão ele se afasta do continente e se desloca mais para o sul. Este deslocamento se deve ao aquecimento e a formação de uma baixa térmica continental. (SATYAMURTY et al., 1998).

Na América do Sul o ASAS é responsável por grande parte das condições de tempo, posição deste sistema e seu deslocamento zonal descreve e influencia o regime de precipitação e de eventos meteorológicos nesta região, (REBOITA et al., 2010). No Brasil, as regiões Sudeste, Centro-Oeste e parte do Nordeste são fortemente influenciadas pela circulação do ASAS durante o inverno, estação na qual o sistema é mais intenso e possui posição mais para oeste. No entanto, Quadro et al. (2012) afirma a importância do ASAS para o Sul e Sudeste do Brasil, na estação verão, ao mencionar que somente o transporte de umidade da região Amazônica não seria suficiente para compor toda a umidade observada nestas regiões nos meses mais quentes.

Em Santa Catarina o ASAS é o principal responsável por ventos significativos de quadrante leste, Rodrigues (2011) verificou a atuação de um fluxo de leste na costa catarinense e mostrou que tal sistema favorece altos volumes de precipitação para a região.

Estudos sobre os anticiclones ou centros de ação atmosféricos iniciaram em 1883 por Teisserreng de Bort citado por Cardoso, (2019). Em sequência, outros foram realizados (HASTENRATH, 1985; ITO & AMBRIZZI, 1999). Um

estudo climatológico sobre o ASAS para o período de 1977 a 1996 foi realizado por Ito & Ambrizzi (1999). Os autores usaram dados de reanálises do NCEP com foco para os meses de junho, julho e agosto, e mostraram que os maiores deslocamentos longitudinais ocorreram durante todo o mês de julho e em alguns dias do início e fim do mês de agosto. Um deslocamento latitudinal levemente maior dentre os três meses foi constatado no mês de agosto.

Degola, (2013) usou um algoritmo que identificou mês-a-mês a localização do ASAS nos dados do Era-Interim ECMWF no período de 1989-2010. Resultados mostraram que a variação latitudinal e a pressão central do ASAS apresentaram um comportamento sazonal atingindo latitudes mais ao norte e maiores pressões nos meses de inverno e latitudes mais ao sul e menores pressões nos meses de verão. Nos meses de março a setembro, o anticiclone demonstrou uma grande variabilidade da sua posição longitudinal, enquanto de outubro até fevereiro, o ASAS esteve sempre próximo a uma região fixa no oceano Atlântico Sul na longitude próxima de 5° W. O autor ainda afirmou que quando o ASAS se encontra deslocado para oeste (leste) da sua posição climatológica, são observados ventos mais intensos (fracos) em todo o nordeste do Brasil e temperaturas mais elevadas (baixas) na Região Sul e na parte sul da Região Sudeste do Brasil.

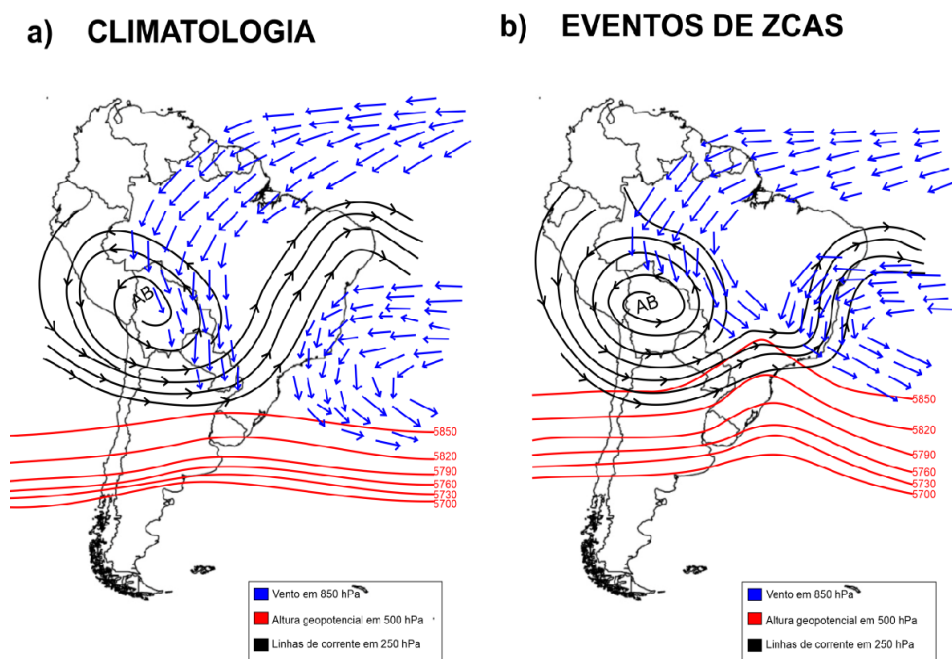
De acordo com Reboita et al. (2010) e Reboita et al. (2012), o anticiclone subtropical do Pacífico Sul (ASPS) é o principal sistema atmosférico que influencia o regime de precipitação sobre as regiões sul e sudoeste da AS. A precipitação máxima anual na região sudoeste ocorre no inverno e a mínima no verão, já na parte mais ao sul a precipitação se apresenta homogênea ao longo do ano. No inverno, o ASPS atinge sua posição mais ao norte, fazendo com que os ventos de oeste alcancem os Andes e ao cruzá-lo, favoreçam a ocorrência de chuva a barlavento das montanhas. No verão, o ASPS desloca-se para o sul e o predomínio de movimento descendente neste sistema inibe a formação de nuvens e, conseqüentemente, a precipitação.

2.1.4. Zona de Convergência do Atlântico Sul

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é definida por uma banda estacionária de nebulosidade e precipitação orientada no sentido noroeste-sudeste desde a região Amazônica até o Sudoeste do oceano Atlântico Sul, e que altera o regime de chuva da região de atuação (KOUSKY, 1988; QUADRO, 1994; CARVALHO et al., 2004). Diversos sistemas meteorológicos como o aquecimento diferencial entre continente-oceano, os JBNs que transportam umidade da Amazônia para região Sudeste e Sul, a umidade transportada do oceano Atlântico Sul pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), entre outros favorecem a formação da ZCAS.

Silva et al (2019), mostraram as diferenças da circulação atmosférica em eventos de ZCAS em relação à climatologia do verão (figura 4), usando dados de reanálise ERA-Interim entre 2006 e 2017. O estudo também mostrou os eventos de ZCAS associados às fontes de umidade dos sistemas de baixa pressão no oceano Atlântico Sul. Os autores ainda verificaram que o padrão atmosférico em episódios de ZCAS se distingue da climatologia do verão devido à circulação em altos níveis mostrar um cavado entre o Sul do Brasil e oceano Atlântico, que auxilia os movimentos ascendentes na região do ramo oceânico da ZCAS, e uma crista mais configurada sobre o Sudeste do país. Cerca de 30% dos eventos de ZCAS ocorrem acoplados a um ciclone no oceano Atlântico Sul, fato que contribui para a manutenção da ZCAS. Esses ciclones têm como fonte de umidade a Amazônia e o setor tropical do oceano Atlântico Sul. Portanto, o estudo mostra que os ciclones são importantes para a manutenção da ZCAS.

Figura 4: Circulação nos níveis baixos, médios e altos da atmosfera; a) climatologia de verão e b) em eventos de ZCAS.



Fonte: SILVA *et al*, 2019.

2.1.5. Jato de Altos Níveis

O Jato de Altos Níveis foi descoberto durante a segunda Guerra Mundial, quando aviões bombardeiros norte-americanos sobrevoavam as Ilhas Japonesas a uma altura aproximadamente de 10 km e os mesmos perdiam potência. Eles sobrevoavam de leste a oeste e certas vezes permaneciam praticamente parados em relação ao solo, devido à existência e influência de ventos fortes de oeste, (RIEHL, 1969). Uma corrente de jato define-se como uma corrente forte, estreita, concentrada ao longo de um eixo quase horizontal na troposfera superior caracterizada por forte cisalhamento do vento e apresentando um núcleo com velocidade máxima (Organização Mundial Meteorológica – OMM). O núcleo da corrente de jato é representado pela região na qual as velocidades do vento são máximas, variando entre 140 a 300 km/h. Esta corrente de jato se localiza entre 9 e 13 km de altitude.

Existem dois tipos de correntes de jato: Jato Subtropical (JST) e Jato Polar (JP). O jato subtropical é uma faixa estreita de vento de oeste intenso, normalmente observado em torno de 200 hPa em ambos os lados do equador. Esta corrente de jato está associada à circulação da Célula de Hadley e geralmente fica localizada entre as latitudes de 20 a 35 °S. A variabilidade sazonal do JST é descrita pela intensidade e a posição latitudinal do vento que estão relacionadas às intensidades dos ventos zonais e dos campos de temperatura através da relação do vento térmico. Em cada hemisfério, o JST é mais intenso e mais próximo do equador durante o inverno, quando comparado ao verão, (ZIMMERMANN et al, 2017).

A corrente do Jato Polar é irregular e localiza-se entre as latitudes de 35 a 70 °S e está associada ao forte gradiente horizontal de temperatura que ocorre nas estreitas zonas frontais. O JP apresenta maior variabilidade que o JST e isso se deve ao fato que o JP depende da posição de atuação dos sistemas frontais. Durante o inverno as frentes frias atuam com mais frequência comparado ao verão e atingem latitudes mais baixas, por isso sua posição é mais próxima ao equador durante o inverno do que no verão. A Figura 5, mostra a variabilidade sazonal do JST e JP, e percebe-se que no verão o Jato Polar oscila tipicamente entre 30 °S e 70 °S, e o JST encontra-se em aproximadamente entre 20 °S e 30 °S, (GUIA, 2011).

Figura 5: Variabilidade das Correntes de Jato Subtropical (JST) (a) e Polar (JP) (b). Linhas em vermelho: posição média do JST no inverno e verão. Linhas em azul: posição média do JP no inverno e verão. Linhas em amarelo: posição extrema de ambos os jatos para as duas estações do ano

a)



b)



Fonte: adaptada de GUIA, (2011).

Muitos estudos existem sobre a Corrente de Jato de Altos Níveis como exemplo de Riehl (1969); Browing (1985); Kousky e Cavalcanti (1984). Já Pezzi e Cavalcanti (1994) identificaram os principais padrões de circulação em altos níveis associados a Correntes de Jatos. Por um período de 10 anos, com dados do ECMWF e com foco na estação inverno, eles verificaram que o maior número de casos com anomalias positivas, durante todo o inverno, ocorreu nas latitudes de 30S a 20S e o máximo ocorreu no mês de agosto, com 172 casos para os desvios (anomalias) maiores que 0 m/s.

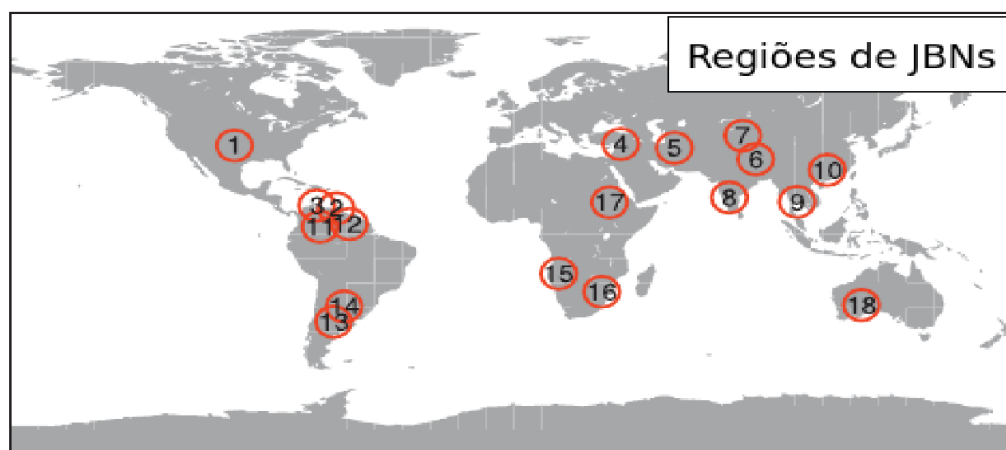
Outro estudo com foco ao JST foi feito por Zimmermann et al, 2017, durante um período de 30 anos para o Hemisfério Sul, entre 100° e 30° W e 10° e 40° S, utilizando dados de reanálise do ERA-INTERIM. Para identificar o núcleo do JST, foram consideradas a altitude, localização, temperatura e forma, resultando na identificação da latitude JST para cada 10° de longitude na área de estudo. O JST obtido por este método não só mostrou ser consistente quando comparado com imagens de satélite de vapor de água, mas também mostrou um fluxo adequado ao longo dos dias de cada mês, reproduzindo a variação sazonal de intensidade e movimento em direção ao Equador. Após a obtenção da posição diária de JS no período de 30 anos estudado, foi obtido uma climatologia mensal. O JS varia de 16 ° a 35 °S, 330 K e 40 m/s, durante o verão, de 18° a 29 °S, 340 K e 60 m/s, durante o inverno. Por fim, os autores determinaram a correlação entre aos anos de El Niño Oscilação Sul (ENSO) e verificaram que o comportamento do JST foi diferente em meses específicos, em geral em eventos de La Niña enfraquecem o JST durante o inverno, e eventos de El Niño o intensificam durante o verão.

2.1.6. Jato de Baixos Níveis

O Jato de baixos níveis (JBN) caracteriza-se por um máximo relativo no perfil vertical do vento na baixa troposfera, com velocidades máximas médias acima de 10 m/s, localizado em torno de 850 hPa, com um cisalhamento do vento até 700 hPa (DE CAMPOS & DOS SANTOS, 2007). Os JBNs atuam em todos os continentes como mostra a figura 6 e normalmente ocorrem a leste de grandes cadeias de montanhas (STENSRUD, 1996). Estes fluxos de vento de grande extensão meridional desempenham um papel muito importante na circulação

atmosférica global, são responsáveis pela advecção de calor e umidade dos trópicos para regiões de latitudes médias, (VERA et al., 2006).

Figura 6: Mapa global das regiões de ocorrência dos JBNs, com base em dados horários de um período de 21 anos do Mesoscale Model 5.



Fonte: Rife et al. (2010).

A formação dos JBNs está associada a processos de camada limite atmosférica (CLA) ou de escala sinótica. O JBN da CLA apresenta uma forte oscilação diurna e está relacionado à variação diurna do gradiente horizontal de temperatura produzido por terrenos inclinados. Já os JBNs sinóticos estão associados à intensificação de gradientes horizontais de pressão induzidos por sistemas baroclínicos migratórios, podendo estar também acoplados a correntes de jatos de altos níveis devido a uma circulação ageostrófica transversa, (KANNENBERG, 2019).

Na América do Sul, ocorre um JBN de norte-noroeste a leste da Cordilheira dos Andes e é conhecido como JBN da América do Sul (JBNAS), (VERA et al., 2006). A posição climatológica do núcleo do JBNAS é observada no setor entre a Bolívia e o Paraguai. Este fluxo de ar úmido dos ventos alísios do Oceano Atlântico Tropical, ao passar sobre a região Amazônica adquire maior quantidade de umidade devido à forte evapotranspiração desta região. Este ar úmido e quente é canalizado pelos Andes adquirindo uma aceleração da componente meridional do vento de norte (MARENGO et al., 2004). O JBNAS transporta umidade, conforme descrito acima, da Bacia Amazônica e do Atlântico tropical para a região sul do Brasil, Uruguai, Paraguai e parte da Argentina, afetando o tempo e o clima

nessas regiões, (DE CAMPOS et al, 2007). Também são um dos reguladores do regime de chuva na região, pois influenciam na desestabilização da atmosfera e de disparo de convecção profunda ao interagir com os sistemas transientes e com a topografia local, além disso são fundamentais na formação e desenvolvimento de tempestades severas que se desenvolvem na região de saída do Jato (MARENGO & Soares, 2002; DOSWELL, 1991).

O JBNAS para ser caracterizado deve ser respeitado alguns critérios para tal classificação. Para se identificar um episódio de JBN, segundo os critérios de Whiteman et al (1997) adaptado de Bonner (1968), especificam que nas categorias JBN0, JBN1, JBN2 e JBN3, os perfis de velocidade do vento têm que apresentar um máximo de pelo menos 10, 12, 16 e 20 m/s, respectivamente, abaixo de 1,5 km de altitude e que deve existir um decréscimo na velocidade do vento de pelo menos 5, 6, 8 e 10 m/s, respectivamente, desde o nível onde se encontra o vento máximo (JBN) até o nível de 3 km. Além disso, o cisalhamento vertical do vento entre os níveis de 850 e 700 hPa deve ser maior ou igual a 6m/s e o vento meridional deve ser igual ou predominar sobre o vento zonal.

Desde então, diversas versões modificadas de Bonner (1968) surgiram em muitos estudos abordando a climatologia do JBNAS, no entanto muitos destes critérios falham em detectar um importante número de situações em que há um JBN bem definido no perfil de vento, principalmente aqueles mais intensos (KANNENBERG, 2019). A versão mais recente foi implementada por Oliveira et al, (2018) Os autores propuseram algumas mudanças nos critérios de detecção dos JBNs, como o aprofundamento da camada em que são rastreados e a remoção de qualquer restrição quanto à direção do vento. Fazendo uso de observações de radiossondagens localizadas na Bacia do Prata e perfis de vento extraídos do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), os autores mostraram que estas alterações são capazes não só de detectar um espectro mais amplo de JBNs como também fornecer informações adicionais a respeito dos JBNs identificados com as abordagens tradicionais, o que inclui o JBNAS. Além da fronteira Bolívia-Paraguai, Oliveira et al, (2018) ressaltaram a presença frequente de JBNs em outros setores chaves da América do Sul, como as Serras de Córdoba no centro da Argentina e no sul e sudeste do Brasil.

2.2. Sistemas de Mesoescala

A dinâmica da atmosfera faz com que haja interação dos sistemas meteorológicos de diferentes escalas, como exemplo; fenômenos da grande escala influenciam nos sistemas de escala sinótica (SFS, ASPS, ASAS, JBN, ZCAS, JAN, VCANS, etc.), estes por sua vez interagem com os da mesoescala. Os sistemas da escala sinótica como os SFs são intensificados pelos da mesoescala e até mesmo contribuem para a formação de sistemas como os SCMs, LIs, Circulação de Brisas e tempestades tornádicas. Devido à relação dos SFs com sistemas da mesoescala, a seguir consta uma breve descrição dos principais sistemas que influenciam a região de estudo, principalmente o estado de Santa Catarina.

2.2.1. Sistemas Convectivos de Mesoescala

Os SCM são constituídos por um aglomerado de nuvens convectivas e apresentam área com contínua precipitação que pode ser parcialmente estratiforme e parcialmente convectiva, e são sistemas que possuem formas variadas (HOUZE, 1993; MACHADO & ROSSOW, 1993). Estes sistemas podem ser classificados como: Linhas de Instabilidade (LI), os que possuem forma de linha, (Houze, 1977); Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), os que apresentam um formato circular (MADDOX, 1980) ou simplesmente, SCM, os de formas irregulares (HOUZE, 1993).

Na região Sul do Brasil, os SCMs produzem grande parte da precipitação observada na superfície e que conseqüentemente são importantes para o regime climático da região. Em geral estes sistemas possuem um deslocamento para leste no inverno e de sudoeste a nordeste na estação verão e o tempo médio de vida destes sistemas varia de 6 a 36 horas, (ANABOR, 2004).

Campos et al (2011), estudaram entre 2004 e 2008 as características físicas sazonais dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) cuja gênese e manutenção ocorreram ao sul de 20 °S e apresentaram ciclo de vida de 6 horas.

Foram utilizadas as imagens de satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) que serviram como base de dados para a utilização da técnica ForTraCC. Os resultados encontrados foram: i) a maioria ocorreu nos trimestres mais quentes do ano e apresentou tempo de vida entre 6 e 12 h; ii) aqueles com maior tempo de vida cobriram áreas maiores; iii) os maiores e mais longos foram observados em julho, agosto e setembro, devido à maior ocorrência de frentes frias neste trimestre o que favorece a maior atividade convectiva; iv) apresentaram as 3 fases do ciclo de vida distribuídas ao longo do dia; v) tiveram seus nascimentos dentro e em torno da grade que cobre o RS, com iniciação preferencial sobre o continente; e vi) apresentaram trajetória média preferencial de oeste para leste.

Ferreira e Anabor (2015) identificaram SCMS ocorridos no Sul da AS entre 2005-2006 e documentaram sua frequência e morfologia. A análise mostra que 75% dos SCMs alongados e 85% dos CCMs ocorrem na estação de maior aquecimento (de outubro a março), e são sistemas de longa duração, onde os SCMs têm duração média de 44 horas e os CCMs de 26 horas. Os autores também concluíram que os SCMs alongados atingem áreas máximas maiores e possuem duração maior que os CCMs.

Os CCMs são definidos como o conjunto de nuvens do tipo cumulonimbus (Cb) e cobertos por uma espessa camada de nuvens cirrus (Ci), sua identificação mais usual se faz por meio de observação de imagens de satélite devido seu formato aproximadamente circular e seu rápido desenvolvimento vertical que permite classificá-lo (MADDOX, 1980). Na AS, os CCMs costumam ser um pouco mais duradouros, entre 10 e 20h e se desenvolvem um pouco mais tarde, sendo maiores com um raio médio de 240 km e mais frequentes do que nos EUA, (VELASCO e FRITSCH, 1987; MACHADO et al. (1994); DURKEE e MOTE, 2009); e estão diretamente associados a eventos com precipitação intensa e fortes rajadas de vento e por vezes tornados (SILVA DIAS, 1996). As trajetórias preferenciais de ocorrência dos CCMs na AS foram descobertas por Velasco e Fritsch (1987), os quais mostraram uma tendência mais zonal na primavera e no início do outono e mais meridional no verão. Os CCMs iniciam sua formação a leste dos Andes e sobre os vales dos rios Paraná e Paraguai, partindo para atingir

a região Sul do Brasil, o Uruguai e a Argentina e principalmente nas estações primavera e verão. Sua formação ocorre durante a noite, com um ciclo de vida entre 10 e 20h, sendo que as primeiras células que antecedem a classificação do evento como CCM podem aparecer já no início da tarde. Sua máxima extensão acontece durante a madrugada e a dissipação por volta das 12h (meio-dia) do dia seguinte (VELASCO e FRITSCH, 1987; SILVA DIAS, 1987).

Apesar dos CCMs atuarem na mesoescala, eles são fortemente influenciados por sistemas da escala sinótica (BROWNING, 1986; SAULO et al, 2007), tais como JBN, JANs, e pela aproximação de frentes frias. Dos sistemas citados, os JBN, são os que mais influenciam na formação de CCM (SAULO et al, 2007).

2.2.2. Circulação Marítima e Chuvas Intensas no Vale do Itajaí e Litoral de Santa Catarina

Santa Catarina, já registrou muitos desastres naturais, alguns deles ligados à Circulação Marítima (Lestadas). Segundo Haas (2002) a grande enchente de Tubarão em março de 1974, a enchente de dezembro de 1995 na Grande Florianópolis e a enchente de 2008 no litoral Norte e Baixo Vale do Itajaí foram causados pelas chuvas com ventos do quadrante leste. O efeito da circulação marítima favorece o transporte de umidade do mar para o continente e atuação de vento de leste, que resulta na formação de nuvens baixas e médias nas regiões litorâneas, algumas vezes com chuva associada e sem descarga elétrica. Esta condição de tempo pode variar de algumas horas até uma semana, mas dura em média de 2 a 3 dias e é caracterizada como “Lestada”. Haas (2012), afirmou que as “Lestadas” são geralmente muito fortes, com nuvens quentes e rasas, de longa duração e moduladas pelo relevo e/ou circulação local. A intensidade da chuva varia de fraca a forte, dependendo das condições da circulação marítima e de outros sistemas atmosféricos também atuantes. A orografia da região é determinante para intensificar as condições de chuva associada ao fluxo de ventos provenientes da circulação marítima, ao encontrar os paredões da Serra Geral, a barreira orográfica faz o ar úmido elevar-se, favorecendo precipitação estratiforme e volumosa.

Rodrigues (2011) analisou casos de chuva acumulada com mais de 200 mm em 3 dias consecutivo para a grande Florianópolis/SC, entre 1979 e 2010, e verificou a atuação de um fluxo de leste na costa, confirmando a configuração de “Lestada” associado ao anticiclone do Atlântico Sul e algumas vezes acompanhado de um Vórtice Ciclônico de altos Níveis (VCAN). Santos (2010) relatou que a primeira enchente no vale do Itajaí ocorreu em 1848 e depois disso outros relatos indicam mais duas enchentes, uma em 1851 e outra em 1852. Mas, só em 1855 que se obteve registros de enchentes do Itajaí-Açú, comprovando o evento. E assim, foram várias ocorrências ao longo do litoral; 1880, 1911, 1957(quatro enchentes), 1961, 1983, 1984, 2005, até chegar ao ano de 2008, onde novamente uma grande enchente, impacta a região.

Estes eventos de enchentes na região litorânea e Vale do Itajaí influenciam na indústria pesqueira, turística, tecnológica e estruturas portuárias, além de diversos modais que integram a cadeia logística fora de operação por horas ou até dias. Também causam a sedimentação das vias navegáveis, exigindo mais obras de dragagem para conter a limitação do calado operacional (SANTOS, 2010; MMA E GIZ, 2018). Em 1983 ocorreu uma enchente que entrou para a história de SC. No trimestre de junho/julho/agosto de 1983 as chuvas ficaram muito acima da média e causaram prejuízos em muitos setores econômicos, principalmente do setor portuário. No ano de 1983, a cidade se encontrava bem desenvolvida com população de cerca de 50 mil habitantes e então, vem uma enchente com uma cota máxima de 15,34m, causando enormes prejuízos. Segundo, Silva Dias (2009), as perdas durante a enchente foram estimadas em aproximadamente U\$ 1,1 bilhão em todo Estado de Santa Catarina. Em 1984, a enchente se repetiu no Estado, os moradores da região ainda estavam se recuperando da ocorrência em 83. A ocorrência de enchentes em sequência, fato que contribuiu para que muitos chamassem a década de 80 como sendo a década de grandes enchentes no Vale do Itajaí, ainda mais porque o Rio Itajaí-Açú acabou atingindo um pico de 15,46 metros (SANTOS, 2010). O evento ocorreu a partir de 6 de agosto, ficando área da bacia do Itajaí-Açú e Itajaí Mirim submersa por mais 3 dias e a do Iguaçú por 6 dias. Dos 199 municípios do Estado, 82 foram castigados pelas enchentes, equivalente a 38% do território catarinense. A

enchente deixou 255,88 mil desabrigados e matou 19 pessoas. Em 2008, mais precisamente em novembro, SC sofre mais uma nova grande enchente. Enchente que impressionou devido aos registros de cotas do Rio e das perdas materiais e humanas, que a cada dia de evento era atualizado e aumentava constantemente. A cidade de Blumenau, Itajaí e Ilhota foram as mais atingidas. Em Itajaí (163.218 habitantes) toda a população foi afetada, 100 mil pessoas foram deslocadas, 18.208 desabrigadas, 1.929 desalojadas, 1.800 feridas e cinco mortas. Foram danificadas 28.400 residências, alagadas vinte unidades de saúde pública e 92 de ensino. O porto de Itajaí e centenas de quilômetros de rodovias e suas pavimentações foram danificados pela inundação (SILVA DIAS et al, 2009).

2.2.3. *Tempestades*

As tempestades em geral, estão entre os fenômenos meteorológicos que mais causam eventos de alto impacto para a sociedade, como chuva intensa, vendaval e queda de granizo. As estatísticas oficiais dos desastres feitas por diversos órgão das Defesas Civas do Brasil, no período 1991 a 2012 mostram que 77% das tempestades associadas a vendavais ocorreram na região Sul, sendo que mais de 4 milhões de pessoas foram afetados direta ou indiretamente por tempestades com vendavais neste período (ATLAS, 2013).

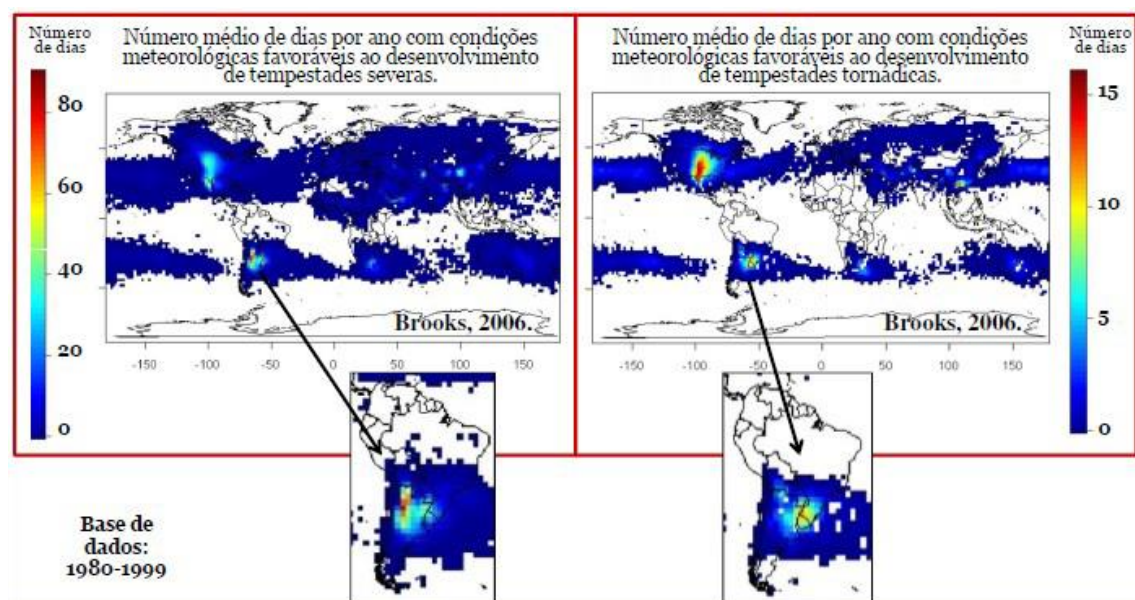
Na AS, a região da Bacia do Prata que engloba a região Sul do Brasil foi identificada como uma zona favorável à ocorrência de tempestades severas (DYER, 1986; BROOKS, 2006; NASCIMENTO; DOSWELL III 2006). Os padrões sinóticos encontrados nesta região da AS são similares aos existentes na região dos EUA, chamada "*Tornado Alley*" (BROOKS; DOSWELL III; KAY, 2003; NASCIMENTO; DOSWELL III, 2006).

O padrão sinótico identificado por Nascimento (2005) e Nascimento e Foss, (2009) mostra que a cordilheira dos Andes favorece o direcionamento o ar quente e úmido transportado pelo JBN para a região Sul, além disso, ela também é um agente de advecção do ar polar e seco, trazido pelo JAN influenciado pelo ASAS, a junção destes fluxos resulta em alto cisalhamento de vento delineando a

condição atmosférica favorável a atividade convectiva e conseqüentemente a formação de tempo severo no Sul do Brasil.

Estudos de Brooks (2006) mostrou o número médio de dias por ano com condições favoráveis para formação de tempestades severas e tornados para todo o globo, (Figura 7).

Figura 7: Número médio de dias por ano com condições favoráveis para formação de tempestades severas e tornados para todo o globo.



Fonte: Curso ReVOT, Nascimento, (2010) adaptada de (Brooks, 2006).

O autor usou dados levantados a partir da análise de radiossondagens atmosféricas do mundo e dados de reanálise do NCAR/NCEP no período de 1980 a 1999 e mostrou que a região compreendendo o norte da Argentina, Paraguai, Uruguai, e a região sul do Brasil, está inserida no contexto de desenvolvimento de tempestades severas e tornados.

2.3. Estudos de Extremos de Precipitação

O uso de técnicas estatísticas de percentis para o estudo de precipitação tem sido muito utilizado para a classificação de eventos extremos de chuva. Estudos de Dereczynski et al. (2008), Barcellos (2009) e de Polifke da Silva & Justa da Silva (2010) utilizaram a técnica dos percentis, em todas as estações

pluviométricas do sistema Alerta-Rio no Rio de Janeiro. Dereczynski et al. (2008) verificaram que os totais pluviométricos diários correspondentes ao percentil de 99% eram superiores a 30,0 mm, este valor foi considerado o limiar de eventos de chuva intensa no município. Barcellos (2009) encontrou um total de 169 eventos de chuvas intensas no período entre 1998 e 2005, com valores superiores ao percentil de 99% para cada uma das 30 estações pluviométricas. E Polifke da Silva & Justi da Silva (2010) consideraram casos de chuvas intensas, aqueles que ultrapassassem o limiar correspondente ao percentil de 99% do acumulado de chuva em 24 horas.

Teixeira e Satyamurty (2007) estudaram 170 eventos de chuva intensa para o Sul do Brasil em um período de 11 anos, de 1991 a 2001, e baseados nas características dinâmicas e sinóticas dos casos, definiram como episódio de chuva intensa aquele em que a isoietas de 50 mm/dia abrangesse uma área de no mínimo 10.000 km².

Teixeira e Satyamurty (2010), estudaram a tendência da frequência de eventos de chuva intensa no Sul e Sudeste do Brasil entre 1960 e 2004. Para analisar as características de episódios de chuvas fortes e de chuvas extremas nessas duas regiões, os autores utilizaram um método de agrupamento (cluster) formado com séries de precipitação das estações pluviométricas disponíveis. Para cada grupo destas séries temporais foram obtidos os quantis de 99% e 99,9% para cada mês do ano. Como resultado, os eventos estudados no período de 45 anos, mostraram uma tendência linear positiva, principalmente na região Sul, onde foram estatisticamente significativos.

Em Santa Catarina, Rodrigues (2015) selecionou 18 casos a partir de dados observacionais e analisou os eventos persistentes oriundos de chuvas orográficas para o Litoral do estado, considerando os extremos no quantil 99,5% definiu como evento extremo de chuva os casos em que a chuva acumulada de 5 dias consecutivos fosse maior que 99,5%.

Outro trabalho que analisou eventos extremos de precipitação para a região Sul baseado em critérios estatísticos foi de Cardoso et al 2020. Estes

autores utilizaram séries de precipitação diária CPC/NCEP (Climate Prediction Center/National Centers for Environmental Prediction) para o período de 1979 a 2015; e caracterizaram os eventos conforme sua persistência e abrangência e sua relação aos padrões atmosféricos. Critérios estatísticos como o quantil 99% foram aplicados às séries de precipitação diária. Sendo assim, obtiveram que o verão é a estação preferencial para ocorrência de eventos extremos em todas categorias analisadas.

3. DADOS E METODOLOGIA

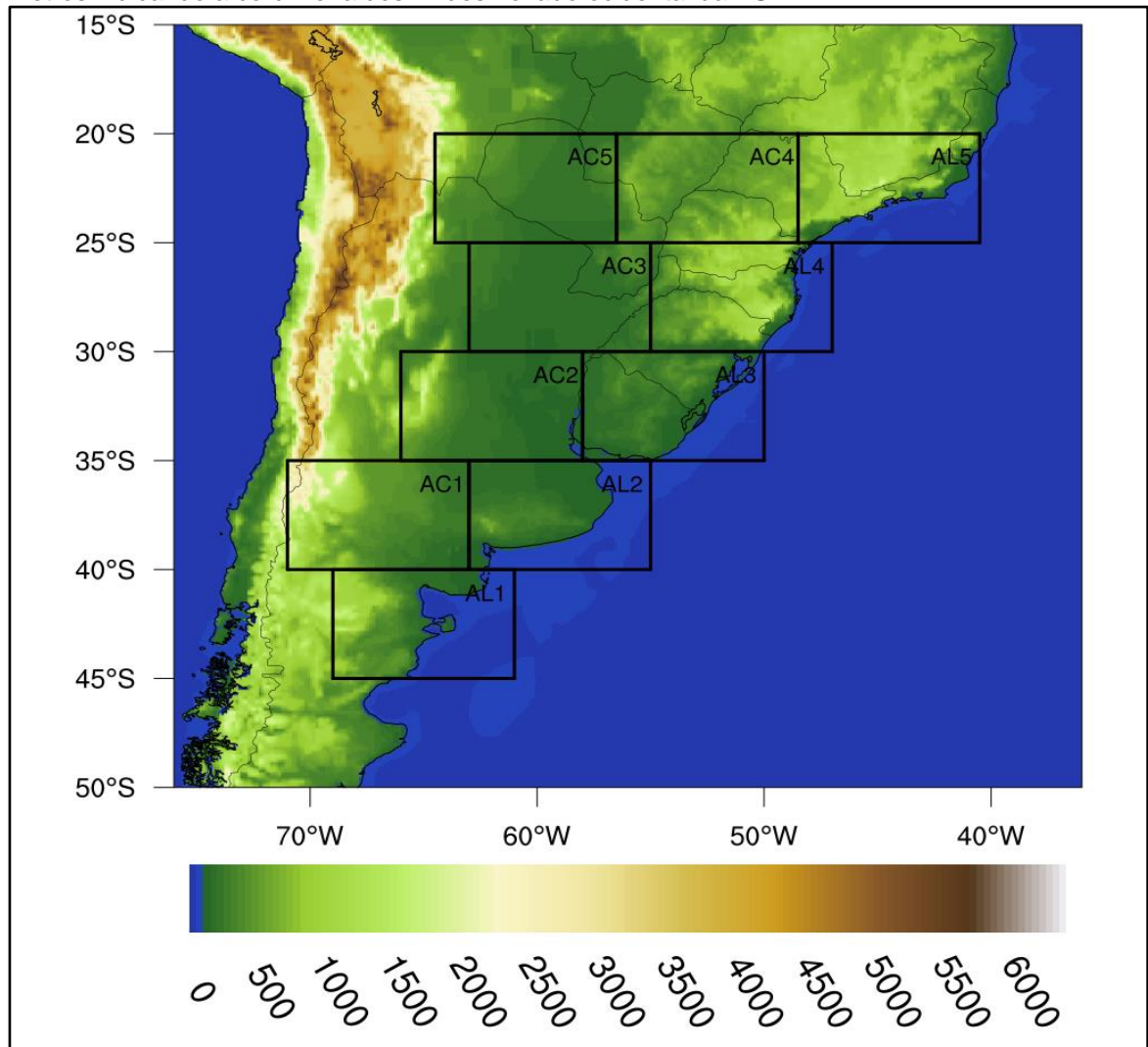
A área de estudo, os dados, ferramentas, métodos aplicados e critérios utilizados no desenvolvimento deste trabalho são descritos nesta seção.

3.1 Área de Estudo

A área de estudo abrange as latitudes 45° e 20° S e longitudes 72° e 40° W, que delimita parte do sul e centro-sul da América do Sul. Esta região sofre influência de diversos sistemas meteorológicos e possui diversidades de relevo, com destaque à Cordilheira dos Andes e a influência dos oceanos Pacíficos e Atlântico. Na figura 8, consta a delimitação das 10 áreas selecionadas para este estudo, sendo 5 destas localizadas na região litorânea (AL) e 5 em áreas continentais (AC). Ressalta-se que essas subdivisões foram feitas para avaliar o comportamento da formação (ciclogênese seguida de frontogênese) e deslocamento dos sistemas frontais sobre o cone sul da AS. A seguir são descritos os principais sistemas meteorológicos que atuam na área de estudo.

Como destacado na revisão bibliográfica, o ASPS é o principal sistema atmosférico que influencia o regime de precipitação sobre as regiões sul e sudoeste da AS (REBOITA et al., 2010 e REBOITA et al., 2012). A região ao norte do Chile, noroeste e centro-sul da Argentina, onde se encontram as áreas AL1 e AC1, sofre influência do ASPS, no qual seus movimentos descendentes a sotavento dos Andes inibe a formação de chuva, influenciando em volumes baixos de precipitação em toda esta área. Na faixa que engloba o oeste do Peru, oeste e sul da Bolívia, norte e centro-leste da Argentina e centro-norte do Paraguai (AL2, AC2, AC3, AC5) os maiores volumes de chuva ocorrem no verão, já os menores no inverno. No verão, o intenso aquecimento da superfície terrestre, conjuntamente com a advecção de ar úmido e quente da Amazônia para esta região, via JBNAS, favorece a precipitação afetando o tempo e o clima na região.

Figura 8: As áreas de estudos, 5 áreas litorâneas (ALs) e 5 áreas continentais (ACs) são delimitadas pelo retângulo em cor preta e a escala de cores mostra a topografia do cone sul da AS. A escala varia de 0 metros, que se refere ao nível do mar (os oceanos), e em torno de 6 mil metros indicando a cordilheira dos Andes no lado ocidental da AS.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Outros sistemas atmosféricos que interagem com as FFs e influenciam a região são os SCMs, CCMs e LIs, que se formam geralmente no norte da Argentina e sul do Paraguai, região preferida de atuação do JBNAS, o qual favorece à formação dos SCMs. Na região que compreende o sul do Brasil, sul do Paraguai e Uruguai (áreas AL3, AL4, AC3 e AC4), a precipitação é bem distribuída ao longo do ano e apresenta totais pluviométricos elevados. Estes totais elevados ocorrem sobre a influência de SFs, CEs e CSs, CCMs, LIs, sistemas convectivos alongados persistentes (PECS), VCANs e as circulações de brisa. Dentre os sistemas citados, as frentes frias, os CCMs e os ciclones são os sistemas que

mais afetam causando ventos fortes, chuva intensa e redução de temperatura nestas áreas. Por fim, a região sudeste e centro-oeste do Brasil, referente às áreas AL5 e parte da AC4, sofre durante todo ano a influência de FFs, ciclones costeiros, LIs tropicais e pré-frontais, além da circulação de brisa. Especificamente durante o verão austral, sistemas específicos, como os Alísios de Sudeste (ASE), o ASAS (com o transporte de umidade do mar para o continente), os CCMs, o JBN, e a ZCAS, contribuem para que os totais pluviométricos sejam máximos nesta estação, já os mínimos ocorrem no inverno MARENGO & Soares, 2002; REBOITA et al., 2010, ANABOR, 2004). A tabela 1 apresenta uma síntese dos principais sistemas meteorológicos que atuam nas ALs e ACs.

Tabela 1: Descrição das cinco áreas litorâneas (ALs) e cinco continentais (ACs) selecionadas na região de estudo destacando os principais sistemas meteorológicos atuantes.

Área	Faixa de Latitude	Faixa de Longitude	Sistemas Atuantes
AL1	45°S a 40°S	69°W a 63°W	ASPS, FFs
AC1	40°S a 35°S	71°W a 66°W	ASPS, FFs
AL2	40°S a 35°S	63°W a 55°W	JBNAS, SCMs, LIs, CCMs, FFs
AC2	33°S a 30°S	66°W a 58°W	JBNAS, SCMs, LIs, CCMs, FFs
AL3	33°S a 30°S	58°W a 55°W	JBNAS, SFs, CEe e CSs, CCMs, LIs, PECS, VCANs, circulação de Brisa, FFs
AC3	35°S a 30°S	63°W a 55°W	JBNAS, SCMs, LIs, CCMs, FFs
AL4	30°S a 25°S	55°W a 47°W	JBNAS, SFs, CEe e CSs, CCMs, LIs, PECS, VCANs, circulação de Brisa, FFs
AC4	25°S a 20°S	63°W a 57°W	JBNAS, SFs, CEe e CSs, CCMs, LIs, PECS, VCANs, circulação de Brisa, FFs
AL5	25°S a 20°S	48°W a 41°W	JBNAS, SFs, CEe e CSs, CCMs, LIs, PECS, VCANs, ASE, ASAs, ZCAS, circulação de Brisa, FFs
AC5	25°S a 20°S	64°W a 57°W	JBNAS, SCMs, LIs, CCMs, FFs

Fonte: Elaboração própria (2022).

Para a detecção das FFs dos casos levantados foi delimitada uma área de interesse no código automático, descrito na seção [3.3](#), representada pelas latitudes entre 30° e 25°S e longitudes entre 56° e 47° W (AL4). Esta área de interesse permitiu ao algoritmo detectar o avanço das FFs sobre o estado de Santa Catarina (SC), que pertence à região Sul do Brasil e faz divisa com os estados do Paraná e Rio Grande do Sul, com a Argentina e o oceano Atlântico.

Na AL4 predominam dois tipos climáticos, Cfa e Cfb, segundo a classificação de Koppen-Geiger (WREGE, 2012). Conforme Nery (2005), o regime térmico na AL4 varia por conta do relevo, no inverno austral a média anual climatológica apresenta temperaturas com variação entre 14° e 22° C. Durante o verão austral, nas regiões mais baixas, a média máxima varia entre 30° a 32° C e nas áreas mais elevadas fica entre 24° e 27° C. Ainda, o autor afirma que no inverno e em zonas mais elevadas, as temperaturas chegam a ser negativas e com ocorrência de neve. A precipitação na AL4 apresenta índices pluviométricos relativamente elevados (1100 a 2900 mm) e bem distribuídos ao longo do ano.

3.2. Dados

Neste estudo foram utilizadas duas séries de dados de 6 em 6 horas, em horários sinóticos (00Z, 06Z, 12Z e 18Z) dos sistemas de reanálise CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) e CFSv2 (*Climate Forecast System Reanalysis version 2*), ambos pertencentes ao NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*). Dados de reanálise são séries de dados meteorológicos obtidos pela combinação de um processo de assimilação de dados (observados em todo o globo) com modelo de previsão. Como as observações possuem uma distribuição irregular no espaço e no tempo, a assimilação combina essas informações disponíveis com o modelo de previsão para gerar uma nova análise (QUADRO et al., 2012). Também foram utilizadas imagens de satélite do CPTEC, dados observados pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o produto de precipitação MERGE (ROZANTE et al., 2010), além de informações dos Boletins Ambiental Trimestral da EPAGRI/CIRAM (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e Hidrometeorologia de Santa Catarina) e Boletim Climanálise do CPTEC/INPE.

Para executar o algoritmo operacional de detecção de FFs, descrito na seção [3.3.2](#), foram utilizados dados de 1 hora de previsão de componente meridional do vento (m/s) a 10 m e temperatura do ar (C) a 2 m, a partir do conjunto de dados: (i) da reanálise do CFSR, disponível no período de 1979 até março de 2011 (Saha S. et al., 2010; Decker et al., 2012) e (ii) do CFSv2 que se trata de

uma atualização da versão CFSR (Saha et al., 2014) e está disponível de abril de 2011 até o presente (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/>). As duas versões da reanálise são disponibilizadas no formato grib2, com resolução horizontal de 0.50° x 0.50°, com resolução temporal de 6 horas, no período total de 30 anos (1991 a 2020). Esta última série também foi aplicada aos casos levantados de FFs (seção [3.3.1](#)), a fim de validar o algoritmo de detecção.

Durante a primeira parte do estudo (2015 a 2020), foi utilizado o conjunto de dados observados do INMET (<https://bdmep.inmet.gov.br/>), referente a precipitação diária de 22 estações meteorológicas automáticas (EMAs) e o produto de precipitação MERGE do CPTEC/INPE. Mais informações sobre as EMAs e o e o produto de precipitação MERGE são descritos no APÊNDICE A e B. Em uma análise complementar da validação dos episódios analisados, foram utilizadas imagens de Satélite, cartas sinóticas e boletins técnicos:

- Imagens de satélites do GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) do canal infravermelho, banda 13 com comprimento de onda de 10.3 μm (<http://satellite.cptec.inpe.br/home/index.jsp>).
- Cartas sinóticas de superfície nos horários das, 1200 e 1800 Z, disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), (<http://tempo.cptec.inpe.br/cartas.php?tipo=Superficie>).
- Boletins Ambiental Trimestral EPAGRI/CIRAM, Relatórios do Projeto - Ampliação dos serviços climáticos para Investimentos em infraestrutura (CSI) (Ministério do Meio Ambiente (MMA) e *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), 2018) e Boletim Climanálise do CPTEC/INPE.

3.3. Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido em cinco etapas. A primeira etapa consiste do levantamento dos casos de sistemas meteorológicos que causam impacto (FFs), associados aos eventos extremos ocorridos em uma região específica da

área de estudo (AL4). Na segunda etapa, desenvolveu-se um algoritmo computacional de detecção de FFs e criou-se o Índice de Detecção de Frentes Frias. Na terceira etapa com a aplicação do algoritmo nos casos levantados de FFs foi possível determinar a taxa de detecção e validar o IFF de cada FF. Na quarta etapa elaborou-se uma climatologia das FFs, a fim de determinar o padrão de deslocamento e intensidade destes sistemas ao longo da área de estudo. Por fim, a quinta etapa se refere à classificação do impacto (baixo, médio ou alto) causado pelo registro da precipitação associada à atuação dos FFs sobre o cone sul da AS.

3.3.1. Levantamento de episódios de Frentes Frias de 2015 a 2020 sobre a região AL4

Nesta etapa realizou-se um levantamento de eventos meteorológicos extremos causados por FFs e SCMs, com base em informações dos dados da reanálise do CFSv2, do Relatórios 02 e 04 do MMA e GIZ (2018), do Boletim Climanálise do CPTEC e consulta aos Boletins Ambientais Trimestrais da EPAGRI/CIRAM. Além disso, baseado nos dados de registros de ocorrência e decretos municipais da Defesa Civil de SC (DC/SC) (<https://www.defesacivil.sc.gov.br/municipios/decretacao-se-ecp/>), verificou-se casos que mais afetaram efetivamente causando enxurradas, alagamentos, destelhamento, interdição de ruas, queda de muros e árvores, entre outros, e que necessitaram ações de defesa civil para com os municípios afetados.

Este levantamento, denominado de Método Observacional (MOBS), foi baseado em uma análise observacional de registro de atuação de FFs na região AL4, visando a validação do algoritmo de detecção e a comparação com os registros de sistemas frontais obtidos através do Boletim Climanálise, denominado de Método Climanálise (MCLN).

Como critério de observação de FFs foram aplicados os limiares nas seguintes variáveis meteorológicas específicas do CFSv2: Para detecção foram usados a componente meridional do vento a 10 m e a temperatura do ar a 2 m. Para análise do sistema foi avaliado a condição de pré-frontal com vento de

noroeste acima de 40 km/h e rajadas de vento acima de 60 km/h, o que indica ocorrência de temporais causados por FF. A atuação do JBN, em 850 hPa, por meio da velocidade do vento acima de 12 m/s; umidade específica acima de 12 g/kg; temperatura acima de 14°C, perfil vertical da atmosfera e outros critérios presentes em Rodrigues et. al. (2004) e Silva et al. (2014).

O MOBS foi feito por meio de consultas nos boletins técnicos citados e artigos científicos. A verificação de cada caso se deu pela análise de variáveis meteorológicas do CFSv2. A análise de tais variáveis meteorológicas permitiu verificar alguns casos levantados se realmente eram de FF. Para a plotagem de cada campo das variáveis do CFSv2 considerou-se um período médio de quatro dias, período no qual uma FF influencia a região de atuação.


3.3.2. Índice de detecção de Frente Fria (IFF)

A segunda etapa corresponde à classificação e validação de frentes frias. A fim de quantificar os sistemas, foi desenvolvido um aplicativo computacional (*software*), para a detecção de FFs, aplicado automaticamente nos dados de reanálise de alta resolução espacial. Ressalta-se que, para critérios de comparação com os demais métodos utilizados neste estudo, este método de classificação foi denominado de Método Objetivo (MOBJ).

Nesse sentido, para a detecção de FFs desenvolveu-se um algoritmo automatizado baseado na metodologia usada por Rodrigues et. al. (2004), Silva et al. (2014) e Cardozo et al. (2015), desenvolvido no software GRADS (*Grid Analysis and Display System*) fornecido pelo *Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions* (COLA). Como descrito na seção [3.2](#), os dados a cada 6 horas (disponibilizados em arquivos diários) da componente meridional do vento a 10 m e temperatura do ar a 2 m, utilizados no código para identificação do sistema, foram extraídos da reanálise CFSR no período de janeiro de 1979 a março de 2011, e da nova versão, CFSv2 de abril de 2011 até o presente. Ressalta-se que, na versão anterior a 2011 os dados são disponibilizados em pêntadas, portanto foi preciso, inicialmente, extrair os dados diários a partir do conjunto das mesmas.

No código automático foram delimitadas 10 áreas para a detecção das frentes frias (Figura 9), sendo 5 áreas litorâneas (AL) e 5 áreas continentais (AC). Considerando uma varredura temporal desde o início ao final da série climatológica de dados, a passagem de uma frente fria é sinalizada quando o algoritmo computa as seguintes condições simultaneamente em cada ponto de grade do domínio de cada área: i) vento no quadrante norte no tempo t-1 (6 horas antes); ii) vento no quadrante sul do tempo t até t+3 indicando o giro do vento norte (valores negativos da componente meridional do vento) para o quadrante sul (valores positivos da componente meridional do vento) e persistência até 24 horas e iii) diminuição da temperatura do ar a 2 m até 24 horas após a passagem da FF, considerando o tempo t-1 a t+3.

A equação 1 descreve a fórmula desenvolvida neste trabalho para os pontos de grade detectados pelo código automático, denominado Índice de Detecção de Frente Fria (IFF). Este índice é o resultado da multiplicação da variável do vento norte (horário) com a variável do vento sul (t+6h) e ainda com áreas onde houve redução da temperatura de um período para outro e variação da mesma em 24h.

$$IFF = |v_{grd10m(\downarrow)}(t - 1)| * v_{grd10m(\uparrow)}(t = 1,3) * |(temp_{2m}(t - 1) - temp_{2m}(t + 3))| \quad (1)$$


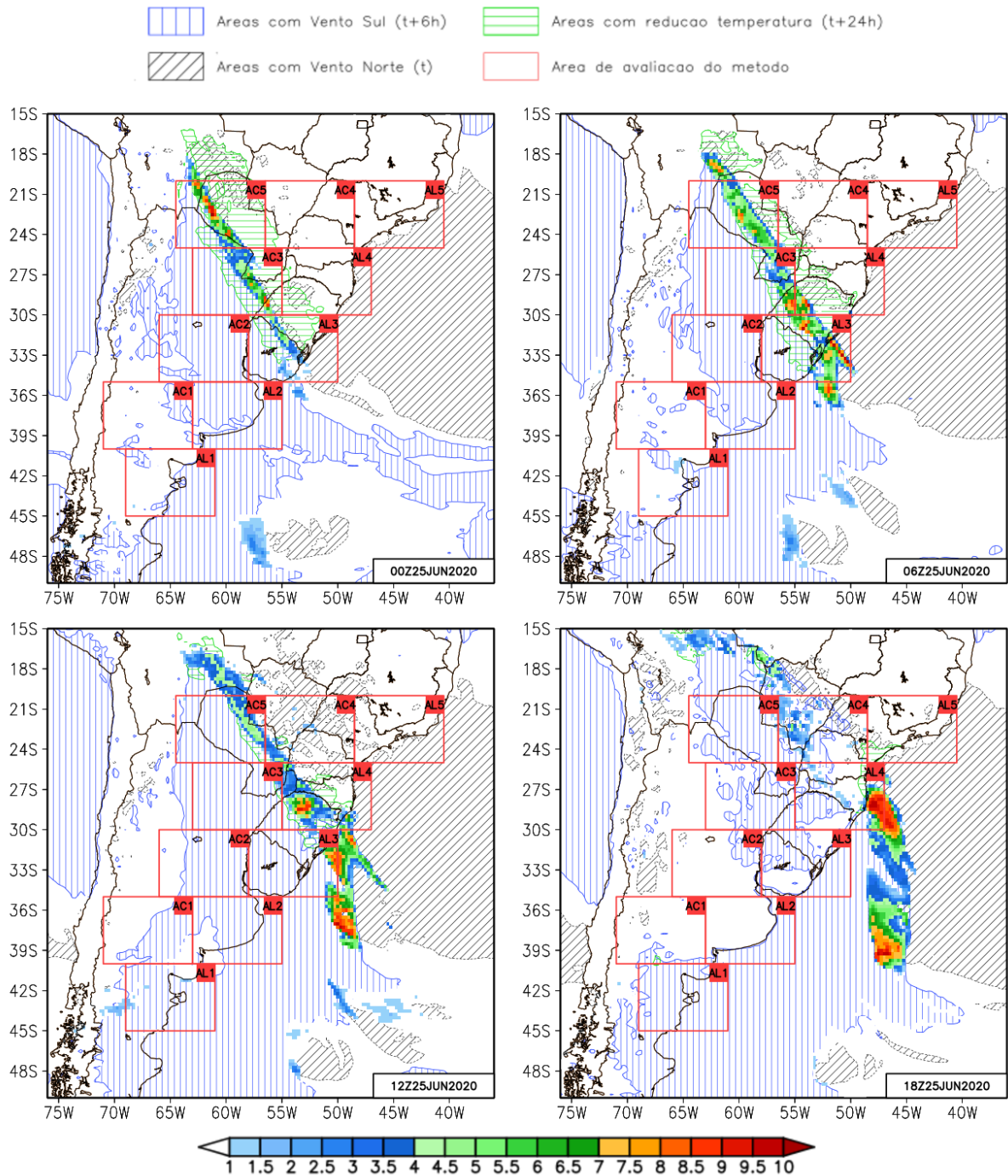
sendo que: o termo “a” representa a seleção, em módulo, de áreas de vento norte 6 horas antes; o termo “b” a seleção de áreas de vento sul no horário t=1,3 e o termo “c” as áreas com redução da temperatura do ar a 2 m no tempo t=-1,3.

Posteriormente o IFF foi normalizado, em função do máximo valor do domínio para torná-lo adimensional (Equação 2). Dessa forma, se obteve o índice IFFN (IFF normalizado) em uma escala com variação de 0 a 10, na qual mostra a intensidade das FFs pelo algoritmo.

$$IFFN = [IFF_{(t)} / MAX\{[IFF_{(t)}]\}] * 10 \quad (2)$$

A figura 9 ilustra a evolução de uma FF ocorrida dia 25/06/2020 detectada pelo algoritmo a partir de 00Z do dia 25 até às 18Z do mesmo dia. Observa-se que às 00Z do 25/06 a FF se encontrava nas áreas AL3, AC3 e AC5, com deslocamento de sudoeste para nordeste, influenciando as regiões, de divisa entre o Uruguai e o Rio Grande do Sul (RS/BR) e também do leste da Argentina até parte do oeste do Paraguai. No horário das 06Z, o sistema avançou influenciando a AL4, além da AL3, AC3 e AC5, no entanto sua maior atuação ficou sobre o RS e o Paraguai. Às 12Z a FF avançou mais para nordeste e influenciou SC, parte da Argentina, centro-leste e norte do Paraguai. No horário das 18Z, observa-se que a FF se desloca em direção ao oceano, mas ainda têm influência sobre a AL4. Além do deslocamento da FF, também se observa na figura 9 a intensidade da mesma, por meio do sombreado que indica o valor do IFFN. As cores com tons azuis correspondem ao menor valor de IFFN que estão associadas a uma FF de fraca intensidade, já as cores em tons avermelhados indicam uma FF mais intensa.

Figura 9: Mapa da região de estudo destacando as áreas selecionadas pelo algoritmo; Áreas de vento norte (linhas pretas); Áreas de vento sul (linhas azuis); Áreas com redução de temperatura (t+24h) (linhas verdes); Área da avaliação do método (AL4) e o Índice de detecção de FF (sombreado). E ainda a delimitação das 5 ALs e 5 ACs.



Fonte: Elaboração própria (2022).

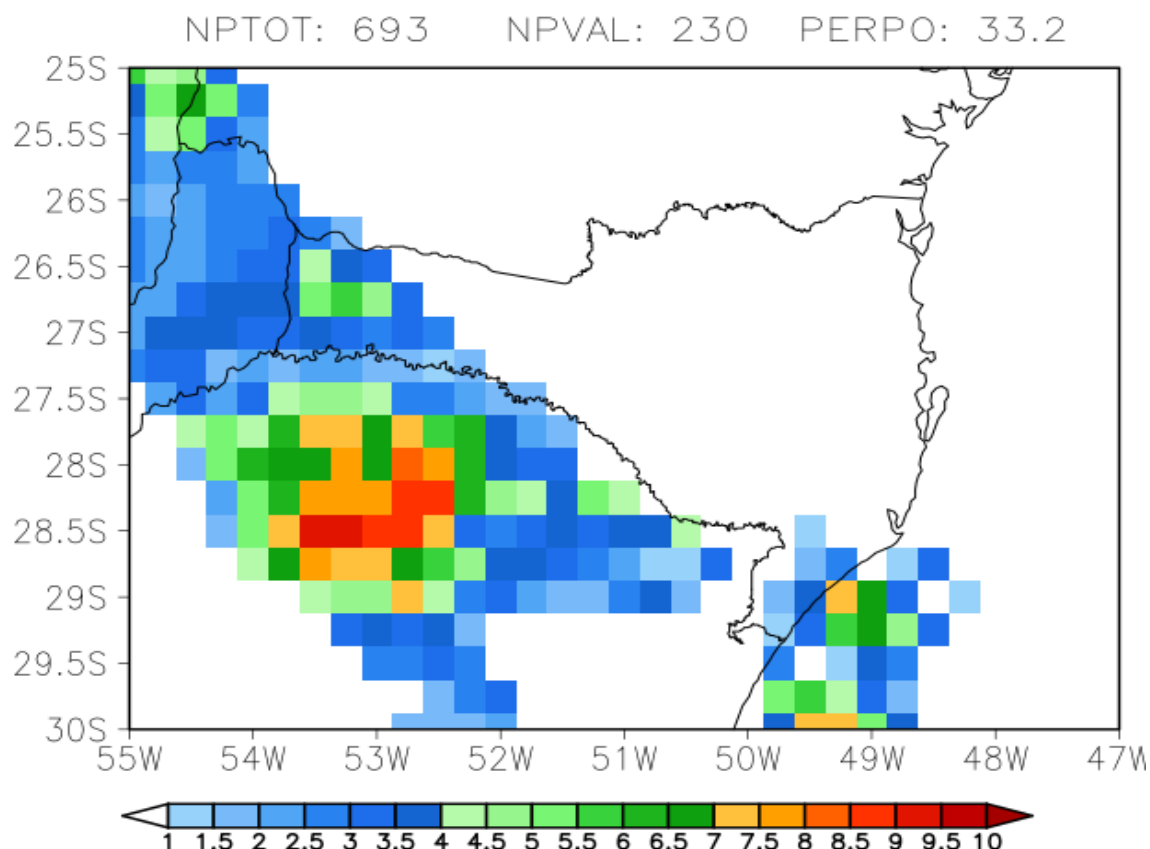
A partir do cálculo do IFFN, foram categorizados os eventos de FFs detectados pelo MOBJ da seguinte maneira: i. Evento Fraco: $0.1 \leq IFFN < 4.0$, ii. Evento moderado: $4.0 \leq IFFN < 7.0$, iii. Evento Forte: $7.0 \leq IFFN \leq 10.0$

3.3.3. Validação do IFF e Limiar de Classificação de Frente Frias

A partir dos casos de FFs levantados (seção [3.3.1](#)) foi possível validar o IFF na AL4, área que engloba o estado catarinense e regiões vizinhas, delimitada no código automático (Tabela 1). Para testar o IFF em cada caso avaliado, foi considerado um período de quatro dias: um dia antes (-1) da chegada do sistema, o dia da passagem (0) da FF por SC e os dias posteriores (+1, +2) que a FF influenciou a AL4. Esta análise observacional indicou, para os casos levantados, se o IFF representou as áreas de atuação das respectivas frentes frias.

Com base nestas análises foi possível indicar qual porcentagem de pixels, em relação a área delimitada, o código efetivamente é capaz de detectar a passagem de uma determinada frente fria. Com estes registros foi possível identificar quais casos mostraram maior/menor porcentagem de pontos para detectar a passagem das FFs e quais casos pré-determinados foram mais/menos intensos. Para encontrar um limiar de detecção foram testadas no algoritmo as porcentagens de 10, 15, 17, 20, 25 e 30 % de pontos para detecção num período de 4 dias, período médio que normalmente uma frente fria influencia a AL4 (Rodrigues et al, 2004). Estes testes foram denominados de P10, P15, P17, P20, P25 e P30. A figura 10 apresenta os valores de IFFN para 18Z do dia 25/06/2020. Os valores ilustrados na figura indicam o número de pontos de grade detectados (NPVAL), o número de pontos de grade total (NPTOT) e a porcentagem de detecção (PERPO) para a AL4. O objetivo desta etapa é definir a porcentagem que melhor detectou a maioria dos casos registrados e implantar para os demais períodos selecionados.

Figura 10: Áreas de detecção da passagem de uma frente fria pelos 18Z do dia 25/06/2020. O sombreado indica os números de pontos de grade total (NPTOT), o número de pontos de grade detectados (NPVAL) e a porcentagem de detecção (PERPO) para a AL4.



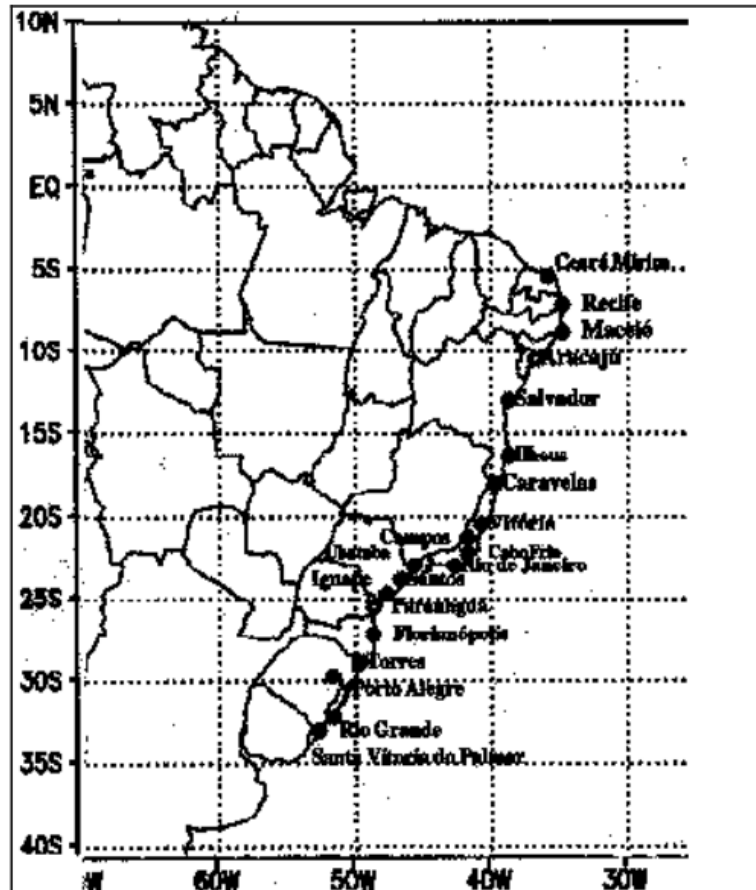
Fonte: Elaboração própria (2022).

3.3.4. Climatologia de Frente Frias

Após a definição do melhor limiar de classificação, a partir das porcentagens de detecção, o levantamento observacional descrito na seção [3.3.1](#) foi estendido para todo o período de estudo visando a obtenção da climatologia mensal e sazonal da passagem das FFs nas 10 áreas delimitadas. Com isso, obteve-se um primeiro conjunto de referência contendo a climatologia de FFs elaborada a partir do levantamento observacional. Este levantamento foi corroborado a partir dos casos descritos no Boletim Climanálise (<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman/>) do CPTEC-INPE, no período de 1996 a 2013, com artigos de Andrade et al. (2007) e Cardoso (2015) e com as informações contidas nos Boletins Ambiental Trimestral da EPAGRI/CIRAM e Relatórios do CSI (MMA e GIZ, 2018). A Figura 11 apresenta a área de estudo

usada para a comparação do número de sistemas encontrados com o algoritmo e obtidos a partir do Boletim Climanálise. Ressalta-se que este boletim foi publicado mensalmente pelo CPTEC/INPE entre o período de 1996 até setembro de 2014.

Figura 11: Localidades no litoral do Brasil utilizadas para classificação de episódios de frentes frias no Boletim Climanálise



Fonte: Andrade, 2005.

Por fim, o MOBS foi utilizado para determinar a última etapa para a definição da climatologia de FFs detectadas pelo algoritmo. Para tal, foram realizados testes de sensibilidade, onde o programa de detecção foi executado durante os 30 anos de estudo, variando a área de atuação e o tempo de duração. Os testes foram os seguintes:

- número de áreas continentais ou litorâneas (entre 3 a 6) onde o percentual mínimo, descrito na seção 3.3.3, de classificação foi estabelecido e;
- quantidade de horários sinóticos (mínimo 2) onde a FF se configurou nas respectivas áreas continentais ou litorâneas.

Como resultado dos testes as FFs foram classificadas pelo MOBJ considerando os seguintes critérios: (i) estar presente em pelo menos dois horários sinóticos consecutivos e (ii) atuar em, pelo menos 5 (cinco) das áreas continentais ou litorâneas definidas na figura 8.

O algoritmo de detecção oferece como Produto Técnico e Tecnológico (PTT), uma tabela contendo hora inicial e final, data inicial e final, número de horas de atuação da FF, taxa de detecção mínima, média e máxima, IFFN médio, IFF máximo, intensidade por categorias (fraco, moderado ou forte) e as áreas de passagem das FFs e figura de detecção nos quatro horários sinóticos, como ilustrado na figura 9. Mais detalhes dos casos detectados estão disponíveis no link:

http://meteorologia.florianopolis.ifsc.edu.br/climenv/produtos_alunos/iff/Produto_Tecnico_Tecnologico_Rose.pdf

3.3.5. *Categorização do grau de impacto das FFs*

Nesta etapa, visando categorizar o grau de impacto (baixo, médio ou alto) de eventos extremos de chuva, foram utilizadas técnicas estatísticas. Para tal, foi utilizada a técnica de percentis aplicada na série de precipitação das 22 EMAs do INMET e no produto diário de precipitação MERGE do CPTEC (ROZANTE et al., 2010), entre os anos de 2015 e 2020, período de validação dos casos levantados pelo MOBS associados a danos em SC. Para a classificação, a partir dos trabalhos de Dereczynsky et al. (2008), Barcellos (2009), Polifke da Silva & Justida Silva (2010), Teixeira e Satyamurty (2010), Rodrigues (2015), Cardoso et al 2020 entre outros, definiu-se que o baixo impacto se refere a percentil abaixo de 90%, o médio impacto de 95% e alto impacto acima de 99%. E ainda foram considerados somente os valores maiores ou iguais a 0,1 mm de chuva, descartando os valores nulos das séries.

A proposta inicial para a comparação dos casos de FFs levantados pelo MOBS com os casos detectados pelo algoritmo (MOBJ) seria através de uma tabela de contingência (WILKS, 1995). Esta tabela é utilizada para determinar

associações estatísticas entre duas ou mais variáveis categóricas. Para a comparação entre o MOBJ e MOBS os seguintes critérios seriam seguidos: A) Períodos em que existiram os casos e o algoritmo detecta; B) Períodos em que existiram os casos e o algoritmo não detecta; C) Períodos em que não existiram os casos e o algoritmo detecta; D) Períodos em que não existiram os casos e o algoritmo não detecta. No entanto, pela factibilidade da pesquisa, optou-se por fazer a análise onde somente os critérios A e B foram analisados.

Na sequência, foi feita uma análise, comparando o grau de impacto com os danos ocorridos e foram usadas as ocorrências registradas pela Defesa Civil Estadual, na qual consta data, hora, município, impacto, danos humanos, materiais e IAH (Itens de Assistência Humanitária), além dos decretos municipais de Estado de Calamidade Pública e de Situação de Emergência, (disponíveis em: defesacivil.sc.gov.br/municipios/decretacao-se-ecp/), os quais contém informações de eventos como chuvas intensas, enxurradas, estiagem, granizo, vendavais entre outros. Ressalta-se que os decretos municipais são baseados na Instrução normativa nº36, de 04 de dezembro de 2020, a qual classifica a intensidade dos desastres em três níveis: nível I – desastres de baixa intensidade; nível II – desastres de média intensidade; e nível III – desastres de alta intensidade.

Os decretos de situação de emergência, em caso de desastres, são emitidos pelo município numa situação de alteração intensa e grave das condições de normalidade em um determinado município, estado ou região, comprometendo parcialmente sua capacidade de resposta. Já os decretos de calamidade pública são emitidos em caso de desastres mais graves que a situação de emergência, pode ser decretado quando o desastre é grande o suficiente para comprometer totalmente a capacidade de resposta do poder público municipal e estadual. Nestes casos, a União pode definir a intervenção da Força Nacional para auxiliar no controle de danos, em ainda alguns casos, de ajuda internacional (Ministério da Integração Nacional – Diário Oficial da União, 2020).

A relação do grau de impacto com a chuva ocorrida foi feita e ilustrada em quatro casos mais significativos que afetaram SC.

4. RESULTADOS

4.1. Levantamento Observacional dos casos de FF

O MOBS aplicado aos casos que impactaram SC está descrito na seção [3.3.1.](#) . Os critérios usados para classificar cada caso de FF exigiu um determinado tempo de seleção de cada sistema, portanto, neste trabalho considerou-se uma amostra aceitável um número de 51 casos de FF relacionados a eventos extremos. Sendo que, dos 51 casos, 13 casos foram registrados na estação verão, 10 no outono, 10 no inverno e 18 na primavera, como mostram as tabelas 2, 3, 4 e 5.

O levantamento considerou FFs que influenciaram a AL4 e nesta região a precipitação é bem distribuída ao longo do ano e apresenta totais pluviométricos elevados. No verão, devido ao forte aquecimento, células de convecção se formam causando os temporais de verão que são responsáveis por enxurradas repentinas. Outros sistemas que atuam preferencialmente no verão são os SCMs e CCMs, já as FFs que atuam nesta estação são menos intensas e mais litorâneas comparadas às demais estações. Na tabela 2 constam os casos de FF que atuaram no verão, e observa-se que dos 13 casos, somente em um dos casos que o acumulado de chuva nos dias de atuação do sistema ultrapassou 100 mm.

No outono, a passagem de FFs aumenta em relação ao verão (SIMMONDS et al., 2012), influenciando no aumento do volume de chuva da estação. Entre os 51 casos catalogados, 10 pertencem ao outono (tabela 3) e destes 10 casos, 8 estão relacionados diretamente à chuva intensa com acumulados acima de 100 mm. Destacam-se dois casos, o caso 001 que está associado com chuva intensa, mas também com vendaval (vento forte) e caso 043 que causou impactos como alagamentos, pontes e estradas submersas, destelhamentos e quedas de muros em escola e casa, queda de árvores e de pontes na região da Serra, Norte e Oeste catarinense.

Tabela 2: Casos de Frentes Frias que impactaram SC entre 2015 e 2020 no verão.

VERÃO						
Caso	Data Inicial	Data Final	Evento/impacto	Região	Prec. Máx/dia (mm)	Prec. AC (mm)
009	27/01/2016	30/01/2016	Temporais com granizo, rajadas de vento de 60 a 80 km/h	Todas as Regiões	86,6	86,6
010	07/02/2016	10/02/2016	Temporais, ventos fortes, alagamentos e deslizamentos.	Litoral e Norte	17	57,6
011	26/02/2016	29/02/2016	Temporais, ventos fortes, alagamentos e deslizamentos.	Centro-leste	42,8	86,6
015	12/03/2017	15/03/2017	Temporais com Granizo	maioria das regiões	22,6	23,2
018	22/12/2017	25/12/2017	Chuva intensa	Litoral Norte	78,6	89,2
019	22/01/2018	25/01/2018	Temporal com chuva	Litoral e Norte	21,2	63,2
020	15/03/2018	19/03/2018	Chuva moderada a forte com trovoadas	Leste e Nordeste	24,2	42,2
027	08/01/2019	13/01/2019	Vendaval com chuva forte	Oeste e Planalto Serrano	22,4	67
028	16/01/2019	19/01/2019	Vendaval com chuva forte	Litoral Sul, Grande Florianópolis e Vale do Itajaí	38,4	72,4
029	23/01/2019	26/01/2019	Chuva forte, alagamentos e deslizamentos	Grande Florianópolis	62,8	66,2
030	11/03/2019	14/03/2019	Temporal com chuva	-	54,4	92,2
039	15/01/2020	18/01/2020	chuva moderada a forte com raios	maioria das regiões	23	23
040	25/02/2020	28/02/2020	Temporal e chuva forte	Oeste e Norte	93	138,8

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 3 : Casos de Frentes Frias que impactaram SC entre 2015 e 2020 no outono

OUTONO						
Caso	Data Inicial	Data Final	Evento/impacto	Região	Prec. Máx//dia (mm)	Prec. AC
001	11/06/2015	14/06/2015	Temporais, Ventos fortes, Micro explosão	Oeste	82,0	128,2
012	13/05/2016	17/05/2016	Raios, granizo, vento de 60 a 70 km/h/ Microexplosão	Planalto Norte	36,0	44,6
031	03/04/2019	06/04/2019	Chuva intensa	Oeste	137	142,4
032	26/04/2019	29/04/2019	Pancadas de chuva com trovoadas	Do Oeste ao Litoral Sul	48,4	69,2
033	09/05/2019	12/05/2019	Pancadas de chuva com trovoadas	maioria das regiões	97,4	140,2
034	22/05/2019	25/05/2019	Temporal com chuva forte	Planalto Sul e Litoral Sul	76,6	149,6
035	26/05/2019	31/05/2019	Chuva intensa com granizo	maioria das regiões	104,6	125,0
041	05/04/2020	08/04/2020	Pancadas de chuva com trovoadas	maioria das regiões	53,0	145,0
042	20/05/2020	25/05/2020	Chuva intensa	Oeste e Meio Oeste	71,4	106,4
043	09/06/2020	13/06/2020	Chuva intensa	Oeste, Serra e Norte	91,4	173,2

Fonte: Elaboração própria (2022).

Os casos de FFs da tabela 4 ocorreram no inverno, e nesta estação os sistemas frontais além de atuarem com maior frequência, são mais intensos, e mais continentais, comparados às demais estações, sendo responsáveis pelos maiores totais pluviométricos ocorridos na região (KOUSKY, 1979; SILVA et al., 2014; CARDOZO et al., 2015). No entanto, dos casos de FFs levantados no inverno, somente um caso registrou acumulados de precipitação acima de 100mm. Este caso (002) provocou um acumulado de 167 mm influenciando as regiões Meio Oeste, Planalto Sul e Litoral Sul, conforme registros da DC/SC um total de 47 municípios foram afetados e 36 municípios decretaram Situação de Emergência (SE).

Tabela 4: Casos de Frentes Frias que impactaram SC entre 2015 e 2020 no inverno.

INVERNO						
Caso	Data Inicial	Data Final	Evento/impacto	Região	Prec. Máx/dia (mm)	Prec. AC. (mm)
002	13/07/2015	16/07/2015	Temporal com chuva intensa	Planalto Sul, Litoral Sul, Meio- Oeste	81,2	167,2
003	19/07/2015	22/07/2015	Temporais com chuva forte	maioria das regiões	24,6	25
013	12/07/2016	17/07/2016	Temporais com chuva forte	maioria das regiões	47,8	95,4
036	25/06/2019	28/06/2019	Temporal Isolado, e pancadas de chuva	Oeste, Meio Oeste, Serra e Litoral Sul	58	58
037	01/07/2019	04/07/2019	chuva moderada a forte, ventos intensos e raios	Extremo Oeste, Oeste, Meio Oeste, Planalto e Litoral Sul.	57,2	94,6
044	24/06/2020	27/06/2020	Temporais com chuva forte e raios	maioria das regiões	51,6	51,6
045	05/07/2020	08/07/2020	Chuva intensa	maioria das regiões	55,8	74,4
046	11/07/2020	14/07/2020	Temporal com chuva forte	Do Oeste ao Litoral Sul	55,6	56,4
047	27/07/2020	30/07/2020	Temporais com chuva forte e raios	-	34,4	35,2
048	02/09/2020	05/09/2020	Pancadas de chuva com trovoadas	Centro-leste	-	-

Fonte: Elaboração própria (2022).

Na tabela 5 constam os casos de FF que ocorreram na primavera. Um total de 18 casos influenciaram SC. Destes 18 casos, 7 casos tiveram o acumulado de chuva acima de 100 mm. Destaca-se o caso 021, no qual o avanço da frente fria em direção ao centro-leste e norte do estado, provocou chuva forte e temporais na região, o município de Papanduvás ficou com 600 casas afetadas.

Tabela 5 :Casos de Frentes Frias que impactaram SC entre 2015 e 2020 na primavera.

PRIMAVERA						
Caso	Data Inicial	Data Final	Evento/impacto	Região	Prec. Obs (mm)	Prec. AC (mm)
004	25/09/2015	28/09/2015	Temporais com Granizo	Oeste, Meio- Oeste e Planalto Sul	116,4	153,4
005	08/10/2015	11/10/2015	Chuva intensa e alagamentos	Maioria das regiões	56,6	92,4
006	20/10/2015	23/10/2015	Enxurrada e alagamentos	Meio Oeste, Planalto Sul, Grande Florianópolis, Vale do Itajaí e Litoral Norte	61,4	160,4
007	05/12/2015	08/12/2015	Chuva intensa	Oeste	48,2	48,2
008	09/12/2015	14/12/2015	Chuva intensa	Maioria das regiões	83,0	83,6
014	01/11/2016	04/11/2016	Chuva com trovoadas	Do Oeste ao Planalto	27,4	69,6
016	19/10/2017	22/10/2017	Chuva intensa	Planalto Norte	54,4	125,2
017	08/11/2017	11/11/2017	Chuva intensa, alagamentos, granizo	Planalto sul	48,2	91,4
021	01/10/2018	04/10/2018	Temporais com chuva forte	centro-leste e Norte	78,4	130,2
022	10/10/2018	13/10/2018	Chuva com trovoadas	Oeste e Meio Oeste	47,4	69,6
023	17/10/2018	20/10/2018	Temporais com chuva forte	Oeste e Norte	56,2	75,2
024	25/10/2018	28/10/2018	Temporais e chuva forte, alagamentos	Oeste, Meio Oeste	29,8	35,6
025	01/11/2018	04/11/2018	Chuvas intensas/Vendavais	Oeste (Joaçaba, Herval D'oeste e Bom Jesus)	35,6	103,2
026	11/12/2018	14/12/2018	Vendaval com chuva forte	Maioria das regiões	-	-
038	26/11/2019	29/11/2019	Chuva intensa e enxurrada	Maioria das regiões	79,6	95,0
049	26/09/2020	29/09/2020	Temporais em diversas localidades	Meio Oeste, Alto Vale do Itajaí e Planalto Sul	34,2	50,4
050	01/10/2020	04/10/2020	Temporais com chuva forte e raios	Do Planalto ao Litoral	46,6	120,8
051	13/12/2020	18/12/2020	Pancadas de chuva com trovoadas	maioria das regiões	31,0	106,4

Fonte: Elaboração própria (2022).

4.2. Índice de Detecção de Frentes Frias e Validação na AL4

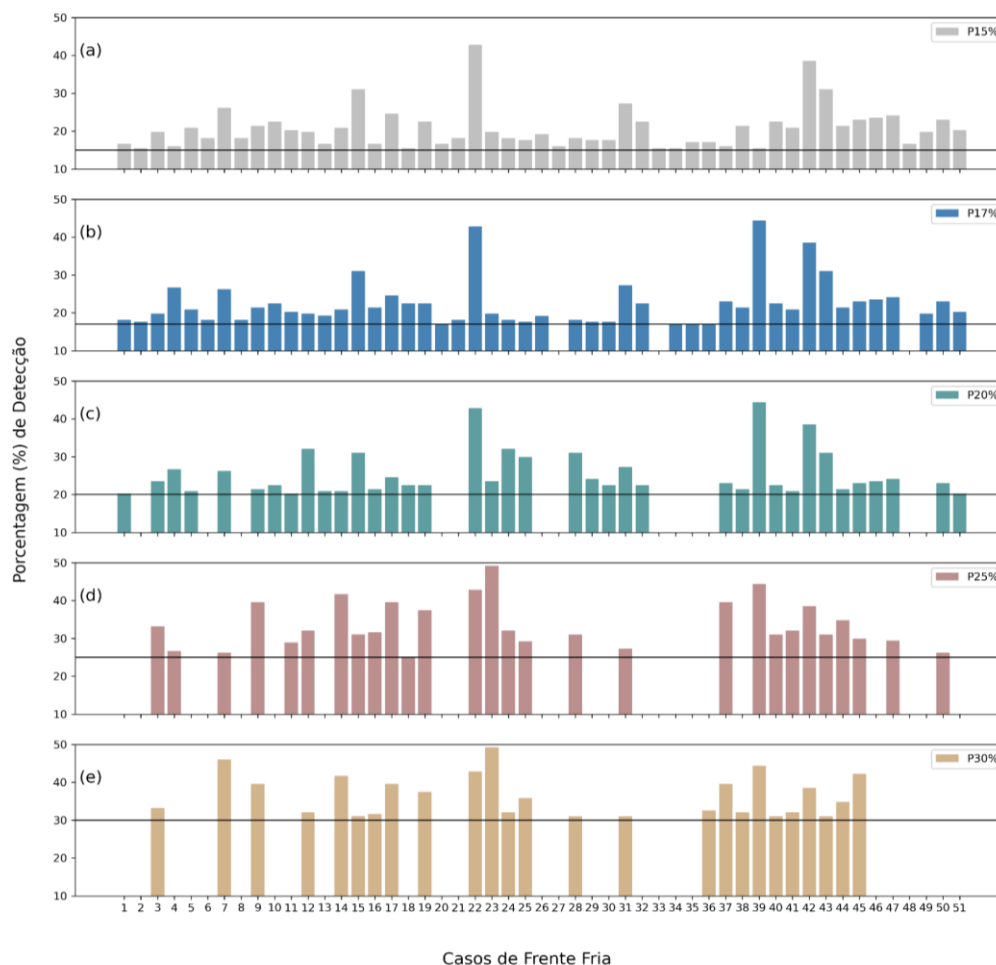
A figura 12 apresenta a percentagem de detecção das FFs que atuaram na AL4 para cada episódio selecionado, considerando os limiares P15, P17, P20, P25 e P30. Como o período médio de atuação de cada caso se deu em 4 dias, optou-se por mostrar, quando possível, o menor valor da percentagem dentro de cada limiar de P. Em alguns casos observou-se que desde o P15 até o P30 a menor taxa de detecção foi a mesma, resultando um mesmo valor ilustrado na figura 12. Como exemplo, cita-se os casos 15 e 22.

Na figura 12a, considerando o limiar P15, observa-se que o algoritmo detectou todos os 51 casos levantados. Ao aplicar a percentagem P17 (Fig. 12b) o algoritmo não detectou 3 dos 51 casos, sendo que os casos 27, 33 e 48, os quais só foram detectados através do P15 com a taxa de detecção de 16.0, 15.5 e 16.6%, respectivamente (Fig. 12a). Considerando P20 e P25 (figura 12c e 12d) foram detectados 38 e 28 casos, respectivamente. Com o P30 (figura 12e) foram detectados 25 dos 51 casos de frentes frias sobre a AL4. Apesar do limiar P15 detectar todos os 51 casos pré-determinados, verificou-se que, com o aumento da série temporal de casos de FFs, este limiar se mostrou muito abrangente, detectando casos irreais (resultado não apresentado). Nesse sentido, considerou-se que o limiar P17 foi o mais adequado para caracterizar o percentual mínimo do IFF que representasse a atuação de uma frente fria em cada uma das 10 áreas delimitadas neste estudo. Os casos 07, 23 e 39 foram os que registraram maiores taxas de detecção com valores de 46.0, 49.2, e 44.4 %, respectivamente.

Os valores, do Índice de Detecção de Frente Fria Normalizado (IFFN), médios (barras em cor verde) e máximos (barras em cor rosa), que o algoritmo registrou de cada caso selecionado, são mostrados na figura 13. O IFFN médio com valores entre 7 e 10 (intensidade forte) foi registrado por 25 casos, sendo que 6 destes casos (casos 2, 36, 43, 44, 46 e 48) registraram intensidade 10. Como nestes 6 casos o IFFN médio foi igual o máximo, tal resultado indica que a intensidade destes sistemas foi máxima em todos os horários de varredura do algoritmo, ou seja, em todo o período de atuação do sistema na região avaliada. Valores de IFFN médio igual e acima de 4 foram registrados por 17 casos e,

consequentemente, 8 registraram IFFN abaixo de 4, sendo categorizados como fracos.

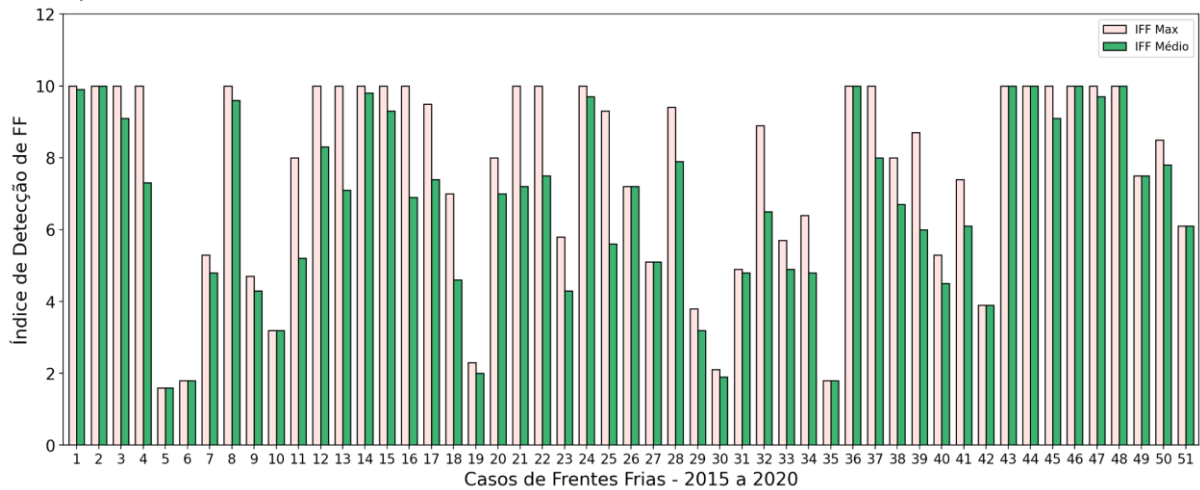
Figura 12: Valores de percentagens de detecção P15 (a), P17 (b), P20 (c), P15 (d) e P30 (e) usados nos 51 episódios que atuaram na AL4 entre os anos de 2015 a 2020.



Fonte: Elaboração própria (2022).

E referente aos valores máximos de IFFN, um total de 21 casos registrou intensidade máxima. Destes 21 casos, somente quatro casos (14, 22, 37 e 45) obtiveram a relação positiva entre a intensidade máxima e maior taxa de detecção (figura 13), demais casos não necessariamente um valor de índice alto está relacionado com a maior área de atuação do sistema e vice-versa.

Figura 13: Valores de índice máximo e médio de detecção normalizados dos 51 casos de Frentes Frias que atuaram na AL4 entre os anos de 2015 a 2020.

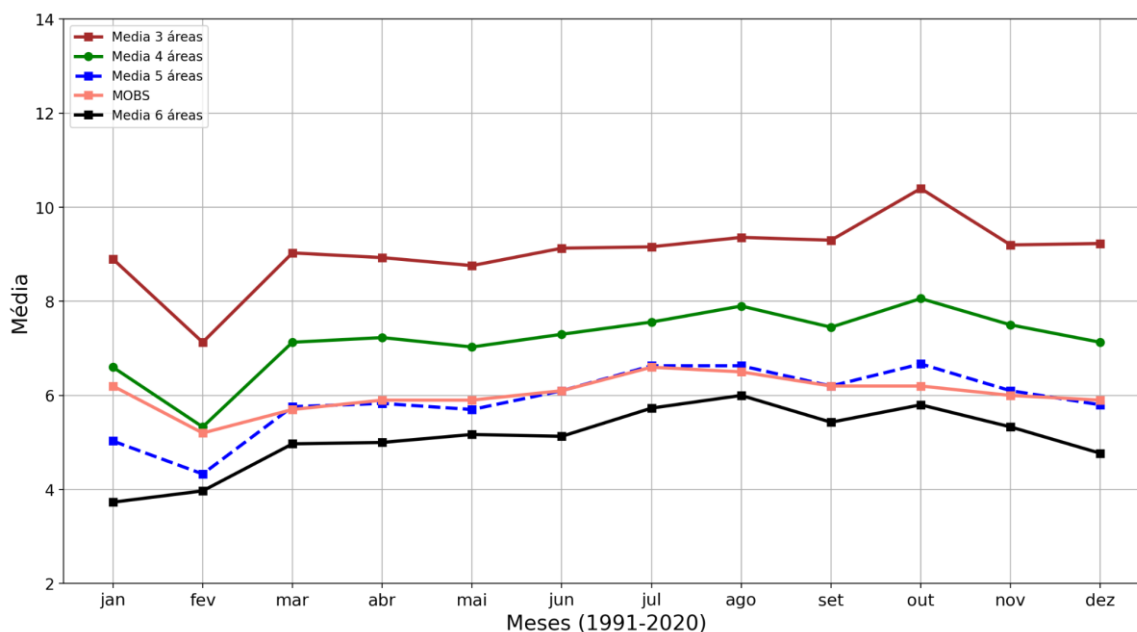


Fonte: Elaboração própria (2022).

De acordo com a metodologia descrita na seção [3.3.4.](#), a figura 14 mostra a comparação entre o número médio mensal de FFs obtidas pelo método observacional (MOBS) (linha em cor laranja) com a média do método objetivo (MOBJ) referente às condições de 3 a 6 áreas. A análise desta figura mostra que a climatologia mensal automática das FFs se aproximou da climatologia feita com o MOBS, considerando a condição de que cada sistema atuasse em cinco áreas (ALs ou ACs) e no mínimo em 2 horários sinóticos diferentes. Na condição de um sistema atuar em, no mínimo, 3 e 4 áreas (linhas vermelha e verde), o MOBJ superestimou a média mensal do MOBS. Considerando a atuação em, no mínimo, 6 áreas (linha preta), o MOBJ subestimou a climatologia das FFs definida pelo MOBJ.

É interessante observar através da figura 14 que os meses de janeiro e fevereiro foram os únicos que a médias se aproximaram do limiar mínimo estabelecido de 5 áreas. Possivelmente este resultado esteja associado ao fato destes 2 meses, mas principalmente em fevereiro por apresentar um número menor de dias no ano, o MOBJ detectar um número menor de FFs, independente do limiar de áreas selecionado.

Figura 14: Comparação entre o número médio mensal de frentes Frias detectadas pelo método objetivo, considerando um mínimo de 3, 4, 5 e 6 áreas de atuação e o método observacional, calculados entre os anos de 1991 e 2020.



Fonte: Elaboração própria (2022).

4.3. Validação Climatológica do Algoritmo

4.3.1. Comparação com as FFs registradas pelo algoritmo com o Boletim Climanálise - 1996 a 2013

Neste estudo, o período usado para a comparação com o MCLN foi de 1996 a 2013 e, diferentemente de outros autores (citados na seção 2.1.2), neste trabalho optou-se pela contagem das FFs baseada em seu deslocamento pelo litoral sul e sudeste do Brasil. Nesta análise não foi estabelecida nenhuma divisão de áreas específicas, mantendo a abrangência em toda a área de estudo (entre 35° S e 20° S). Além disso, como descrito na metodologia (seção 3.3.4.), com o algoritmo computacional foi possível detectar casos de FF. Inicialmente, por meio das saídas do algoritmo, foi utilizado um método observacional (MOBS) para determinar a climatologia de FFs detectadas. No entanto, tal método não se mostrou eficaz, devido a demora em obter um resultado, sendo necessário desenvolver um código automático que lesse as saídas para a contagem dos sistemas.

A tabela 6 apresenta o total mensal de FFs detectadas pelo algoritmo de 1991 a 2020 tanto pelo MOBJ, quanto pelo MOBS. Com o MOBJ foram detectados durante os 30 anos um total de 2124 FFs, com uma média anual de 70,8 sistemas e por meio do MOBS, um total de 2173 FFs foram contadas sendo uma média anual de 72 sistemas. A frequência mensal de FFs pelos dois métodos foi de aproximadamente 6 sistemas.

Ainda, na tabela 6 consta de 1996 a 2013 uma separação (linhas horizontais e uma vertical em cor laranja) a fim de comparar o número de FFs dos dois métodos com as catalogadas do boletim Climanálise (tabela 7). Portanto, destaca-se na tabela 6 os números mensais de FFs que são maiores (cor vermelha), menores (cor azul) ou igual (cor preta) aos sistemas da tabela 7. Observa-se na tabela 6, pelo MOBJ, que os números mensais de FFs que são maiores em relação a tabela 7 foram aumentando após o ano de 2004, mas com o MOBS não se observa um padrão bem definido. Em comum entre os dois métodos têm-se os anos de 2010 e 2011, os quais mostram 10 e 7 que são os maiores valores, respectivamente. O MOBJ apresenta um total de 92 valores de FF e o MOBS com 82 valores que são maiores que o MCLN. Valores em cor azul apresentados pelo MOBJ são um total de 77 e do MOBS de 61 que são menores que os da tabela 7. Os números mensais de FFs que são iguais ao MCLN foram registrados 47 valores pelo MOBJ e 72 valores pelo MOBS. Uma tendência mensal encontrada em relação aos números em cor vermelha é que há um aumento em ambos os métodos entre os meses de janeiro a maio. Esta tendência é mais evidenciada com o MOBS.

Na tabela 7 consta o número mensal de FFs catalogadas do boletim Climanálise no período de 1996 a 2013. Neste período, pelo MCLN foram registrados um total de 1280 sistemas com uma média anual de 71 FFs. A frequência média mensal é de aproximadamente 6 sistemas com destaque para os meses de agosto a outubro que apresentaram maior ocorrência de FF comparado aos outros meses.

Tabela 6: Número mensal de FFs detectado pelo Algoritmo, pelo MOBJ (a), MOBS (b), do período de 1991 a 2020. Os números em cor azul, vermelho e preto correspondem a quantidade menor, maior e igual, respectivamente, em relação ao número de FFs da tabela 7 MCLN.

CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS PELO ALGORITMO – 1991 A 2020																								
	(a) Método Objetivo												(b) Método Observacional											
	Jan	fev	mar	abr	Mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	Jul	ago	Set	out	nov	dez
1991	2	7	7	6	5	6	5	8	6	6	7	4	5	6	6	6	4	6	6	8	5	7	6	4
1992	2	4	3	5	4	4	6	6	5	7	6	6	4	5	4	7	8	6	7	7	5	7	5	8
1993	5	4	2	6	5	5	8	7	5	7	7	8	6	4	5	6	6	6	7	4	7	7	6	7
1994	6	5	4	7	3	7	7	7	6	10	6	5	7	5	5	5	5	7	5	7	8	6	4	4
1995	6	6	8	2	5	8	5	9	5	7	7	7	6	6	5	5	6	6	7	8	7	5	7	6
1996	4	5	4	7	7	5	9	6	5	6	8	6	9	7	6	6	7	6	7	6	6	7	6	7
1997	4	5	4	7	7	5	7	6	9	6	7	3	6	6	5	6	7	4	7	6	8	7	7	8
1998	5	3	6	2	5	7	6	7	6	6	8	6	6	5	7	5	4	6	7	6	6	7	5	6
1999	8	5	4	4	8	8	6	5	7	8	4	7	8	7	5	5	8	8	6	6	8	5	5	7
2000	3	4	8	3	7	6	7	8	6	5	7	9	6	6	6	5	7	5	8	8	5	7	6	8
2001	4	4	6	9	6	4	7	6	5	6	6	6	7	6	6	7	4	7	8	6	5	5	6	7
2002	5	5	7	5	7	7	8	6	5	5	5	6	5	5	6	6	8	7	7	7	6	7	6	5
2003	5	3	7	5	5	4	7	7	9	6	4	8	6	5	6	6	5	6	6	6	6	7	7	9
2004	5	6	4	7	4	6	6	8	7	9	3	5	5	5	4	7	6	7	6	6	7	8	5	6
2005	7	2	6	4	6	6	5	7	4	9	4	9	7	5	6	7	6	6	6	7	6	7	6	5
2006	7	3	7	8	6	6	6	5	5	7	5	2	7	4	6	6	5	5	6	7	7	6	6	5
2007	5	5	4	6	9	7	8	9	3	8	7	7	7	4	7	7	7	6	8	9	5	7	6	6
2008	5	3	6	4	4	6	3	7	5	9	4	4	5	5	6	6	5	5	8	7	5	8	4	6
2009	4	5	9	10	4	7	8	7	7	6	7	8	5	5	6	7	6	6	5	7	6	6	9	7
2010	5	8	7	7	7	5	9	6	7	4	7	7	6	7	6	5	5	5	8	6	5	5	6	7
2011	5	5	6	8	7	8	7	9	8	8	5	4	7	6	6	7	5	8	7	6	7	7	6	3
2012	5	5	6	8	3	7	11	6	8	7	3	7	5	4	6	6	8	6	10	5	6	5	5	6
2013	4	4	7	5	5	8	6	5	7	7	6	3	4	4	6	4	6	7	6	5	6	6	7	4
2014	4	2	8	5	5	6	8	7	7	3	5	4	7	4	7	5	6	6	4	7	7	3	6	4
2015	4	5	3	5	4	5	8	6	5	6	6	6	6	4	6	7	5	6	7	8	6	6	5	5
2016	6	3	6	7	7	6	6	6	5	6	8	7	9	7	5	5	6	5	5	7	5	6	7	7
2017	7	3	5	5	6	6	3	8	9	5	8	4	7	4	5	6	4	6	5	6	5	6	7	7
2018	6	5	6	6	5	6	5	5	5	9	7	6	6	4	7	5	7	5	5	6	6	6	5	5
2019	4	3	7	5	8	7	7	5	8	5	9	5	6	6	6	8	6	7	6	4	8	4	8	5
2020	9	3	6	7	7	5	5	5	7	7	7	5	5	6	5	5	6	6	8	7	6	5	6	4

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 7: Número mensal de FFs levantados do boletim Climanálise (MCLN) entre 1996 e 2013.

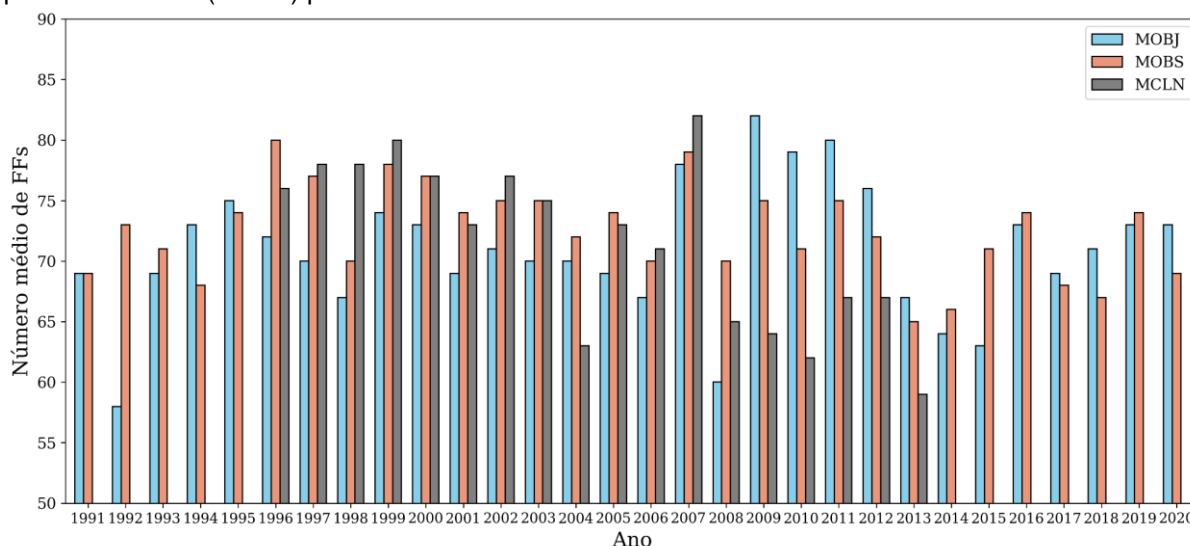
FRENTES FRIAS OBTIDAS PELO BOLETIM CLIMANÁLISE – 1996 A 2013												
	Jan	Fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	Nov	dez
1996	6	8	4	7	7	5	6	6	6	6	7	8
1997	6	6	4	4	7	7	7	5	8	8	8	8
1998	7	6	7	5	4	7	6	9	6	8	6	7
1999	8	6	5	6	7	8	6	7	9	6	5	7
2000	5	5	9	4	6	6	7	6	7	7	6	9
2001	7	7	6	7	4	8	7	5	5	6	6	5
2002	6	4	7	6	5	5	7	7	7	10	7	6
2003	6	8	5	3	7	6	7	5	6	7	6	9
2004	3	5	4	5	7	8	6	6	5	6	4	4
2005	4	5	5	7	7	7	5	6	6	8	7	6
2006	6	3	5	6	6	5	5	7	7	6	4	4
2007	4	3	7	7	7	7	7	9	7	7	10	7
2008	5	4	4	5	5	6	9	8	4	8	1	6
2009	3	6	3	5	6	4	7	7	6	8	7	2
2010	3	4	2	4	6	5	8	5	5	9	6	5
2011	4	4	4	6	6	8	6	8	10	5	4	2
2012	3	4	4	6	3	8	10	7	6	5	4	7
2013	3	4	5	3	5	8	6	6	6	4	5	4

Fonte: Elaboração própria (2022).

A figura 15 mostra a frequência anual das FFs detectadas pelo algoritmo, por meio do MOBJ (barras em cor azul) e MOBS (barras em cor laranja), e levantada pelo MCLN (barras em cor cinza). O levantamento da FFs pelo boletim climanálise tem como objetivo validar as FFs detectadas pelo algoritmo. A análise entre 1996 e 2013 mostrou que o número de FFs na região de estudo ficou entre 50 e 80 por ano, com valor máximo de 82 FFs tanto pelo MOBJ em 2011, quanto pelo MCLN em 2007. Pelo MOBS o número máximo se deu em 1996 com 80 FFs. O número mínimo anual de sistemas por ambos os métodos se difere nos dois períodos. De 1996 a 2013 o número mínimo pelo MOBJ, MOBS e MCLN ocorreu nos anos de 2008 (MOBJ), e 2013 (MOBS e MCLN), com valores de 60, 65 e 59, respectivamente. E o número total de FF detectados pelos MOBJ e MOBS foi de 1329 e 1294 sistemas, no período de 18 anos com uma média anual de 72 e 74, respectivamente. Pelo MCLN foram registrados um total de 1280 sistemas com uma média anual de 71 FFs.

No período dos 30 anos, somente o MOBJ se mostrou diferente quanto ao número mínimo de sistemas, tal método detectou 58 FFs no ano de 1992. O algoritmo fornece uma saída das FF detectadas seguindo as condições da seção 3.3.2., no qual se permite avaliar cada caso de FF ao longo de todo o período (MOBS), no entanto, para uma contagem automática (MOBJ) seguiu-se as condições descritas na seção 3.3.4., resultando na climatologia dos sistemas. As FFs que constam no boletim climanálise são catalogadas por meio da análise de campos meteorológicos, cartas sinóticas e imagens de satélites.

Figura 15: Frequência Anual de Frentes Frias pelo Algoritmo (MOBJ e MOBS - 1991 a 2020) e pelo Climanálise (MCLN) período de 1996 a 2013.

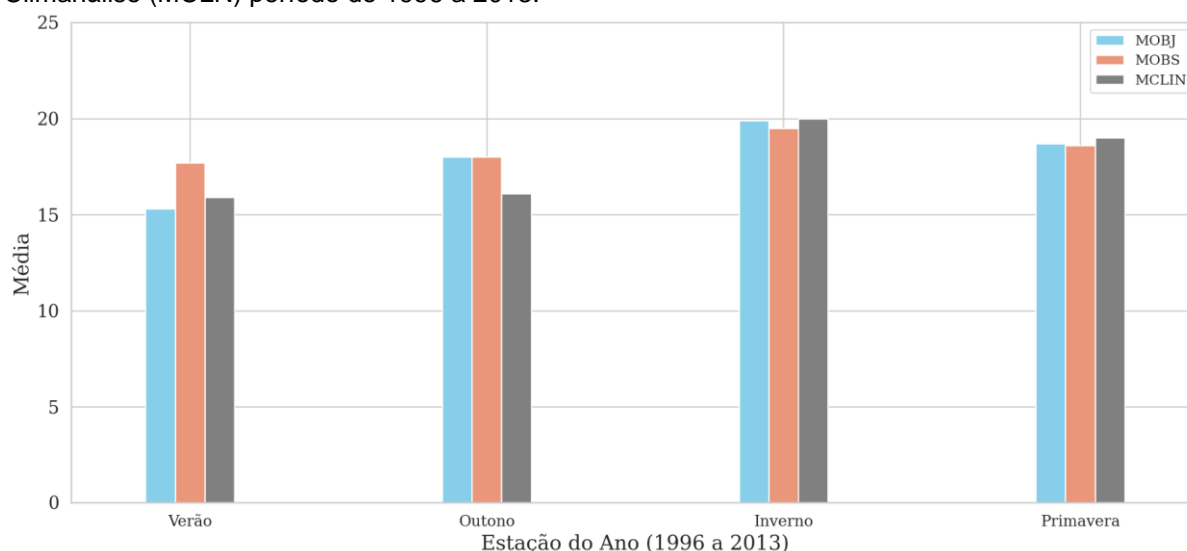


Fonte: Elaboração própria (2022).

A figura 16 mostra a climatologia sazonal das FFs obtida pelo algoritmo com o MOBJ e o MOBS e levantada com o MCLN entre 1996 a 2013. Sobre a comparação dos três métodos observa-se, na estação verão, o MOBJ (barras em cor azul) mostra um número menor de FF em relação ao MCLN (barras em cor cinza) e ao MOBS (barras em cor laranja), a diferença de FF entre MOBJ e MCLN é de um sistema e com MOBS são de 3 FFs. d. No outono, a diferença maior se dá entre o MCLN com 16 FFs e os outros dois métodos com 18. Ainda, como resultado, obtém-se que estação inverno (JJA) é a estação com maior número de sistemas nos métodos analisados, seguida da estação primavera e os três métodos registraram a mesma média sazonal nestas estações com 20 FFs no inverno e 19 na primavera. Este resultado corrobora com estudos de Kousky

(1979), Rodrigues et al. (2004), Andrade (2005) e Silva et al. (2014) nos quais mostraram por meio de algoritmos de detecção de FFs que a primavera e o inverno são as estações com maior ocorrência de sistemas frontais no centro-sul da AS; e que também foram eficazes em relação a frequência sazonal de FFs.

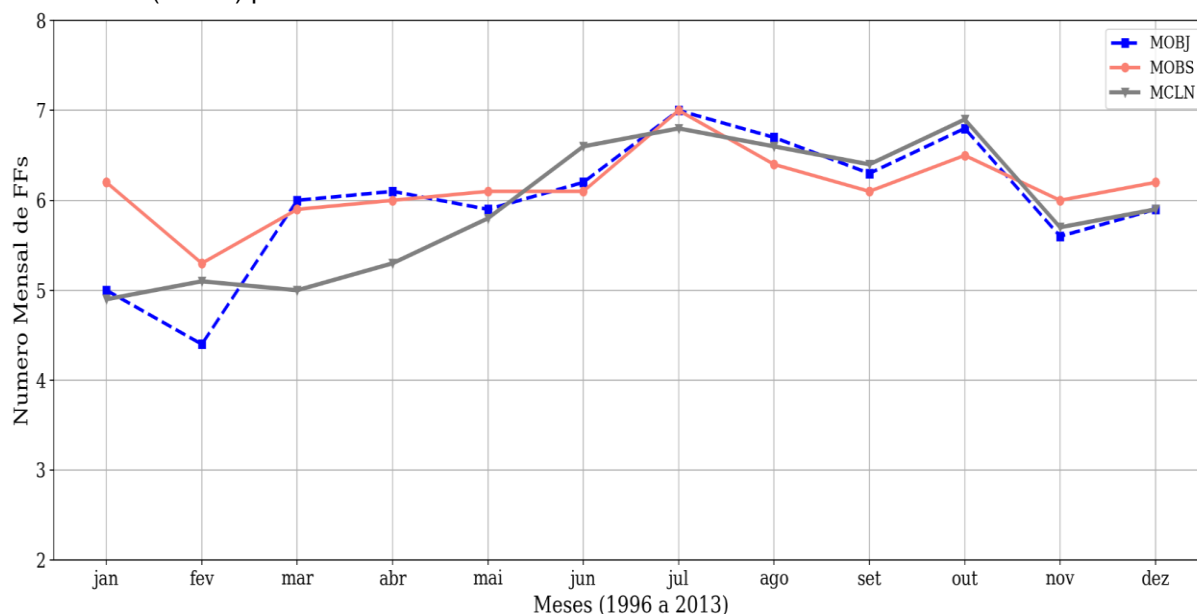
Figura 16: Frequência Sazonal de Frentes Frias obtidas pelo Algoritmo (MOBJ e MOBS) e pelo Climanálise (MCLN) período de 1996 a 2013.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Na figura 17, observa-se o número médio mensal das frentes frias obtidas pelos três métodos. Os meses de maio, julho, agosto, setembro e dezembro são os meses nos quais os três conjuntos de dados apresentam menor diferença no número de sistemas FF. E a maior diferença entre o MCLN e os outros dois métodos se dá nos meses de março, abril, junho e novembro. No entanto, se considerar o valor aproximado do número médio das FFs para números inteiros, tem-se que a diferença é de 1 sistema frontal entre os métodos na maioria dos meses. Ainda, observa-se que a maior frequência mensal de FFs ocorre entre junho e novembro, meses que pertencem ao inverno e primavera. A frequência mensal dos três métodos pouco se difere, sendo a média mensal detectada pelo MOBJ de 6,0 pelo MOBS de 6,1 e pelo MCLN de 5,92 e considerando o arredondamento pode-se afirmar que em média 6 FFs são registradas mensalmente pelos três métodos. Tais resultados mostram que o MOBJ se apresenta coerente em comparação com o MCLN, mesmo com aplicação de uma metodologia diferenciada.

Figura 17: Número médio Mensal de Frentes Frias obtidas pelo Algoritmo (MOBJ e MOBS) e pelo Climanálise (MCLN) período de 1996 a 2013.

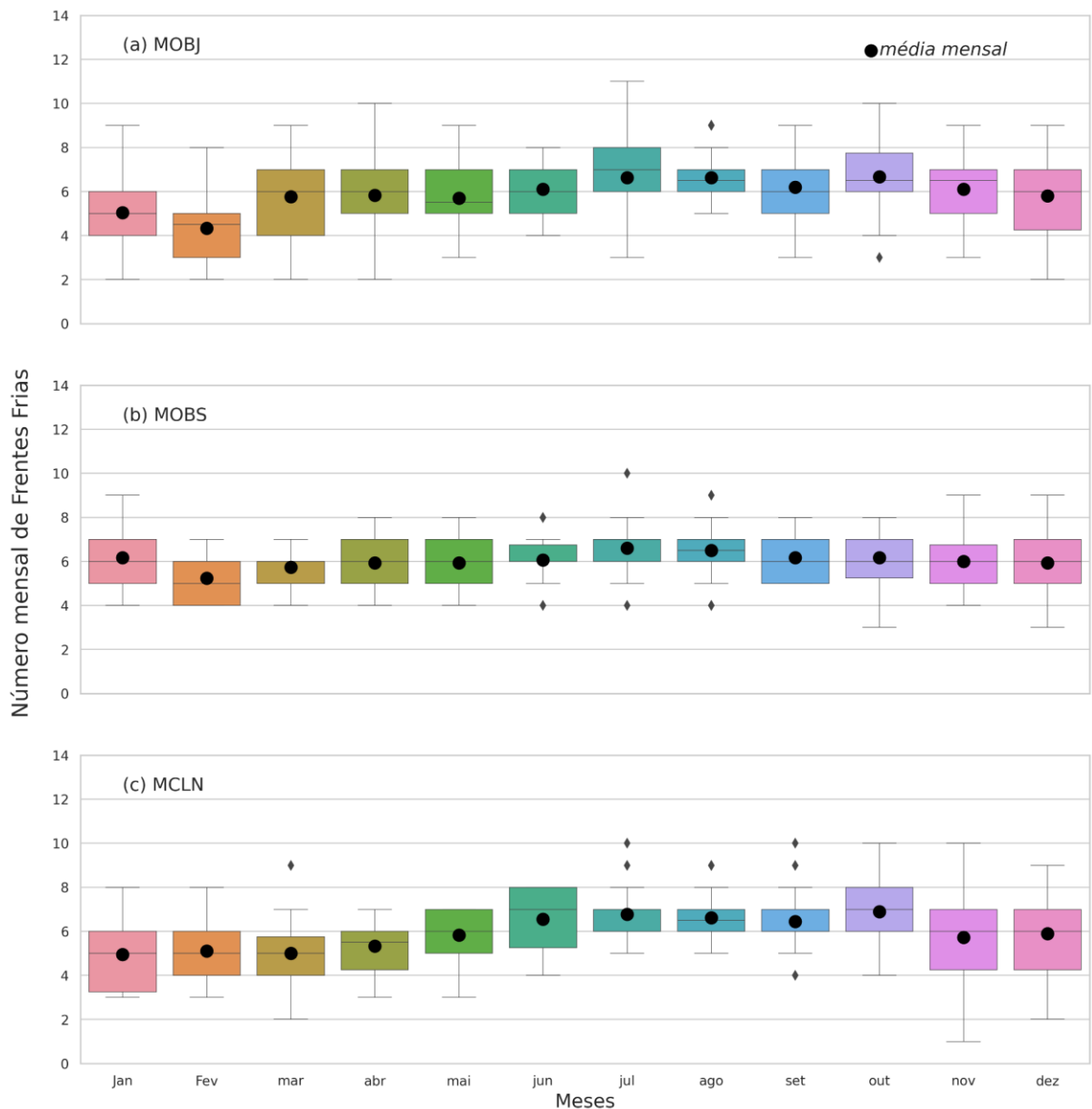


Fonte: Elaboração própria (2022).

Na figura 18, gráfico do tipo diagrama de caixa (*box plot*), observa-se estatisticamente os valores mínimos, medianas e os valores máximos, do número mensal de FFs do algoritmo (a, b) e climanálise (c), representados pelos quartis Q1, Q2 e Q3, que são valores que dividem a amostra em quatro partes iguais. O Q1 representa 25% da distribuição dos dados, Q2 (mediana) representa 50% e Q3 representa 75% da distribuição dos dados da série. O *box plot* também mostra os *outliers*, dependendo da série de dados, que são valores anormais ou extremos de uma série.

Pelo MOBJ (figura 18a), os valores extremos do número mensal de FFs são observados nos meses de agosto e outubro. Na figura 18(b), MOBS, os meses de junho, julho e agosto apresentam valores extremos do número de FFs. AS FFs catalogadas pelo MCLN são observadas na figura 18 (c), e nos meses de março, julho, agosto e setembro constam valores anormais no número de FF.

Figura 18: Box plot do Número mensal de Frentes Frias com MOBJ, MOBS e MCLN. A cor de cada caixa se refere ao um mês específico. Como exemplo; mês de fevereiro cor laranja.



Fonte: Elaboração própria (2022).

O levantamento observacional dos casos de FF resultou em 51 casos que impactaram a AL4 e consequentemente SC. Sendo que na maioria dos casos o impacto está relacionado a chuva intensa e por vezes associados a vendaval e queda de granizo. Os 51 casos foram usados para testar os limiares de detecção das FFs (P15, P17, P20, P25, P30) e conclui-se que, o limiar P17 foi o mais adequado para caracterizar o percentual mínimo da taxa de detecção e do valor do IFFN que representasse a atuação de uma frente fria em cada uma das 10 áreas estudadas. Com este limiar foi possível aplicar ao algoritmo e fazer a varredura num período de 30 anos na área de estudo. O algoritmo identifica os sistemas frontais pelo giro do vento norte para o quadrante sul (vento a 10 m),

diminuição da temperatura do ar a 2 m de um período para o outro e redução da temperatura até 24 horas após a passagem da FF. Andrade (2005) utilizou uma metodologia semelhante em sua climatologia de FFs sobre a América do Sul. Além dos critérios na mudança na temperatura e vento, a autora também utilizou o aumento de pressão reduzida ao nível médio do mar, considerando a média dos 5 pontos em cada área analisada e no nível de 925 hPa. Cavalcanti e Kousky (2003) diferentemente de Andrade, consideraram todos os pontos de grade sobre a América do Sul e usaram parâmetros como a presença de ventos de sul com pelo menos 2 m/s, queda na temperatura de no mínimo 2°C e aumento da pressão ao nível médio do mar de pelo menos 2 hPa.

Com a obtenção do IFFN pelo algoritmo foi possível comparar os casos levantados de FFs. Dos 51 casos, 21 casos registraram intensidade máxima e destes 21 casos, somente quatro casos tiveram a relação positiva entre a intensidade máxima e maior taxa de detecção, demais casos não necessariamente um valor de índice alto está relacionado com a maior área de atuação do sistema. Ainda, como o algoritmo fornece uma série de 30 anos de casos de FFs, com uso do MOBS foi feito a contagem do número de FF. No entanto, a fim de automatizar a contagem dos sistemas criou-se um código para a contagem (MOBJ) e também, a fim de validar o algoritmo, catalogou-se as FFs que constam no boletim Climanálise (MCLN). Como resultado da validação obteve-se que, as FFs detectadas pelo algoritmo, tanto as que foram contadas pelo MOBJ quanto pelo MOBS se apresentam coerente em comparação com o MCLN, mesmo com aplicação de uma metodologia diferenciada.

4.4. Climatologia de FFs detectadas pelo método objetivo

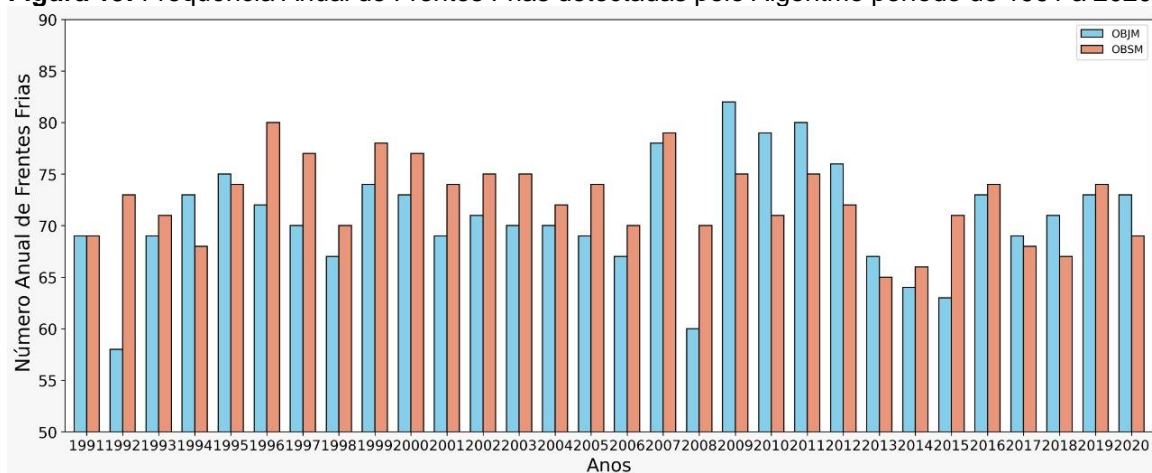
Neste trabalho a climatologia de FFs foi definida como o estudo dos padrões de comportamento destes sistemas por meio de uma descrição estatística num período de 30 anos (1991 a 2020). Período de 30 anos definido de climatologia pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM). A seguir apresenta-se a variabilidade anual, sazonal e mensal do número de FF e do IFFN ao longo de toda a área de estudo e em cada uma das 10 áreas delimitadas.

4.4.1. Variabilidade Anual

Como descrito na metodologia (seção [3.3.4.](#)), com o algoritmo computacional foi possível detectar casos de FF. Inicialmente, por meio das saídas do algoritmo, foi utilizado um método observacional (MOBS) para determinar a climatologia de FFs detectadas. No entanto, tal método não se mostrou eficaz, sendo necessário desenvolver um código automático que lesse as saídas para a contagem dos sistemas.

Na figura 19 observa-se a variabilidade anual das FFs detectadas pelo algoritmo. A análise dos 30 anos pelo MOBJ (barras em cor azul) mostrou uma variação da passagem das FFs de 50 a 80 por ano ao longo da área de estudo. No ano de 1992 a contagem automática mostrou 58 sistemas sendo o número mínimo da climatologia, e uma das justificativas pode ser pela atuação de um forte El Niño nos primeiros semestres de 1992 seguido de neutralidade no segundo semestre. O número máximo ocorreu em 2011 com 80 FFs. Pelo MOBS (barras em cor cinza) a frequência anual se deu entre 60 e 80 FFs. Sendo que, 7 anos ficaram com números entre 60 e 70 FFs e conseqüentemente 23 anos entre 70 e 80 sistemas. No ano de 2013 foram detectados 65 FFs sendo o número mínimo de sistemas e o número máximo foi observado em 1996 com 80.

Figura 19: Frequência Anual de Frentes Frias detectadas pelo Algoritmo período de 1991 a 2020.

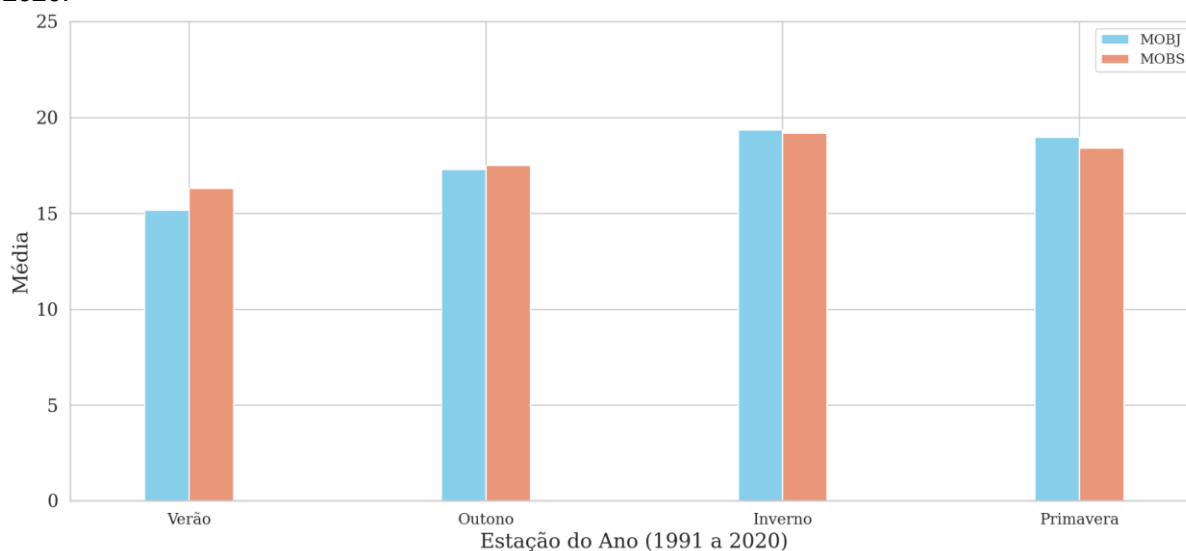


Fonte: Elaboração própria (2022).

4.4.2. Variabilidade Sazonal

A climatologia sazonal das FFs obtida pelo algoritmo com o MOBJ e o MOBS no período de 1991 a 2020 é mostrada na figura 20. Observa-se que, nas estações verão, outono o MOBJ (barras em cor azul) registra um sistema a menos comparado ao MOBS (barras em cor laranja). E na primavera o MOBJ registra um número a mais que o MOBS na média sazonal. No inverno os dois métodos registram maior média no número de FFs dentre as estações com total de 19 sistemas.

Figura 20: Número médio sazonal de Frentes Frias pelo MOBJ e MOBS no período de 1991 a 2020.



Fonte: Elaboração própria (2022).

A variabilidade sazonal do número de FFs (barras em cor cinza) e do IFFN (barras em cor verde) para cada uma das 10 áreas deste estudo pode ser observada na figura 21. A climatologia sazonal abrange o período de 1991 a 2020 e as estações do ano são denominadas com a abreviação dos meses referentes a cada estação, sendo o verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera (SON). Uma análise das áreas litorâneas (ALs) mostra que as estações com maior ocorrência de FFs são inverno e primavera e que ainda há uma diminuição no número dos sistemas das latitudes mais altas (AL1) para as mais baixas (AL5). As áreas continentais (ACs) apresentam pouca variação sazonal e menor número de FFs em relação às litorâneas.

Na AL1, observa-se um maior número de sistemas detectados e maiores valores de IFFN comparados com as demais áreas, com uma variação sazonal entre 18 no verão e 21 FFs no inverno, sendo que no verão, outono e primavera os sistemas são intensos e no inverno moderados. Nesta área, mesmo com a influência direta da ASPS, estudos mostram que algumas FFs e outros sistemas meteorológicos (cavados) migram do Pacífico e conseguem passar pela Cordilheira dos Andes, alguns destes sistemas vão para o Atlântico e outros são defletidos em direção ao equador (Müller e Berri, 2007; Müller e Ambrizzi, 2007). No entanto, ao longo das estações, a maioria destes sistemas favorecem e/ou fortalecem os sistemas frontais atuantes. Outros estudos, denominam a AL1 e arredores como uma região frontogenética, a qual é mais ativa no verão ao sul da Argentina, e no inverno, esta região possui um deslocamento para latitudes mais baixas (SATYMURTY E MATTOS, 1989; REBOITA et al., 2009; SIMMONDS et al., 2012). Ainda, no cinturão onde se localiza a AL1, entre as latitudes 40° e 60°S, há uma maior frequência de FFs, embora haja uma série de assimetrias zonais no oceano, regiões próximas a Patagônia, sul da África, e sudoeste da Austrália (SIMMONDS et al., 2012).

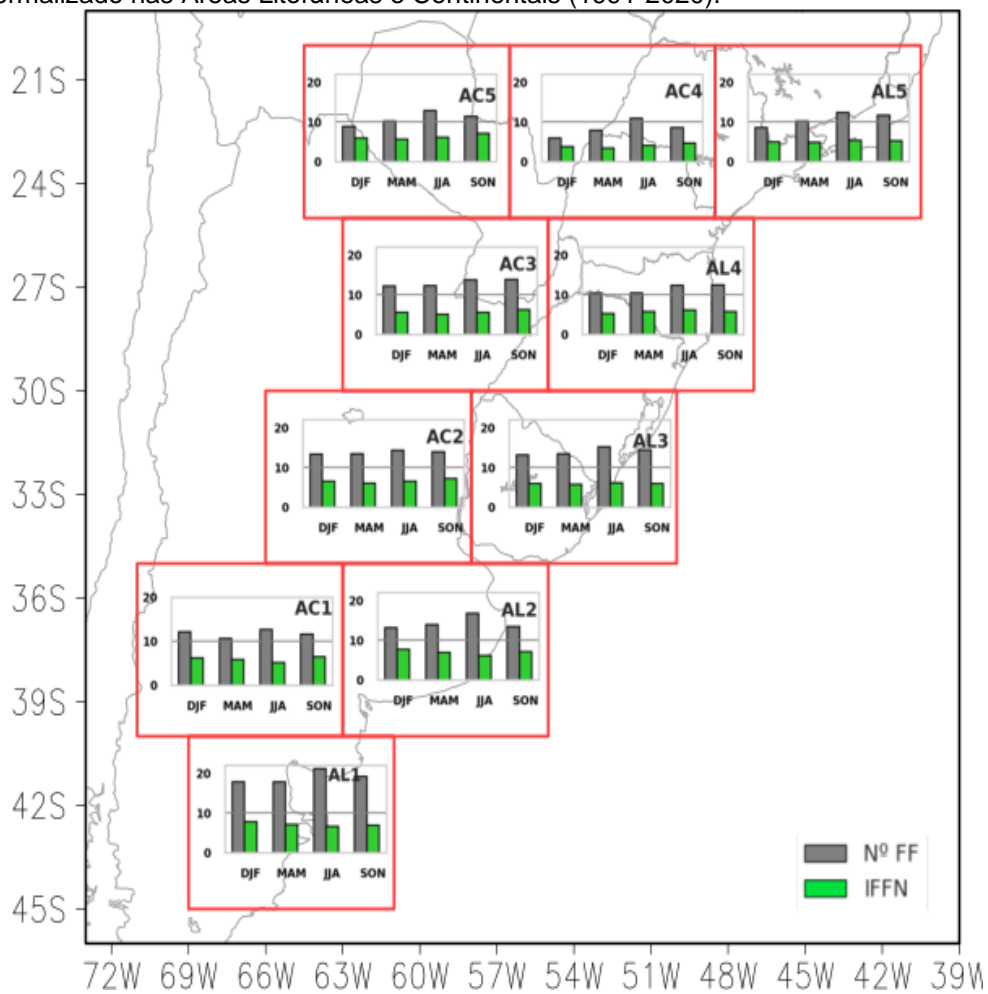
Na AC1, a variabilidade sazonal de FFs se mostra com menor número de sistemas em relação a AL1, variando entre 11 FFs no outono e 13 no inverno. Esta região também sofre a influência da ASPS e como é mais continental, a maioria dos SFs não consegue adentrar ao continente. A intensidade média dos sistemas na AC1 também diminui em relação a AL1, sendo que, em todas as estações a intensidade média das FFs é moderada. Nas áreas AC2 e AC3, as estações que mais ocorrem FFs são o inverno e primavera com aproximadamente 14 sistemas. Em relação ao IFFN na AC2 as FFs são intensas na primavera, nas demais estações os sistemas que ocorrem são moderados como na AC3 onde em todas as estações as FFs são de intensidade moderada.

Na AL2, as FFs são mais frequentes e mais intensas no inverno com média de 17 sistemas. No verão, outono e primavera os sistemas são menos frequentes, com número médio de 13 FFs. Na AL3, o número médio de FF varia de 13 a 15 sistemas, sendo o inverno a estação com maior ocorrência, seguida da primavera (14 FFs). Na área AL4 a maior frequência de FFs ocorre na primavera com

aproximadamente 13 sistemas, na sequência vem o inverno com 12 e as outras estações com a média de 10 FFs. Sobre a intensidade, tanto na AL3, quanto na AL4 os sistemas se apresentam em todas as estações com intensidade moderada.

Nas áreas AL5, AC4 e AC5, destaca-se o inverno com maior ocorrência de FFs com número médio de 12, 11 e 13, respectivamente. O verão se apresenta nas três áreas citadas com menor número de sistemas. A análise do IFFN nas três áreas mostra que na AL5 as FFs são moderadas, na AC5 são intensas na primavera e moderada nas demais estações, na AC4 as FFs são moderadas no inverno e primavera e fracas no verão e outono.

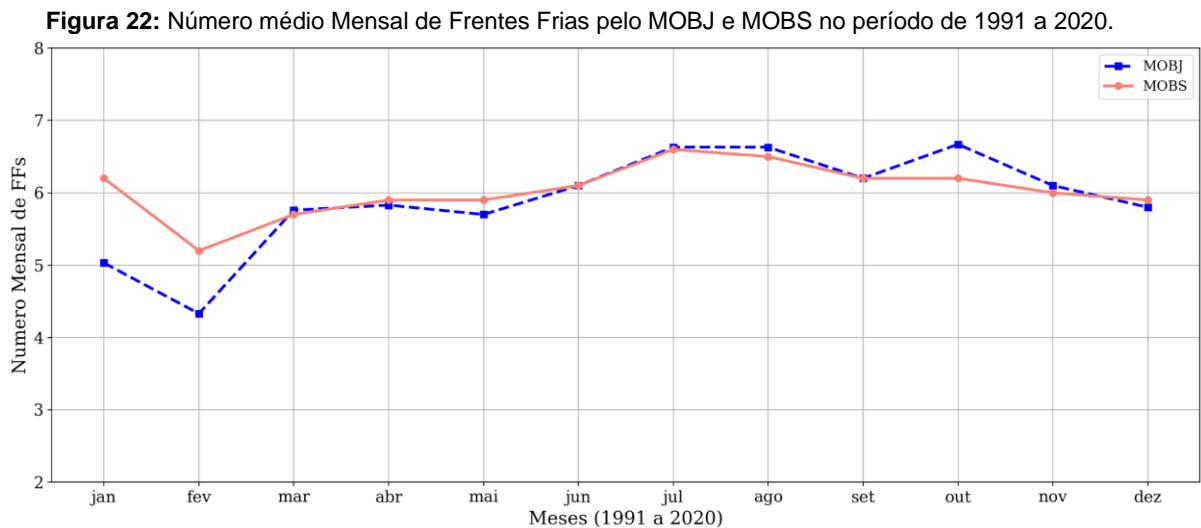
Figura 21: Número Médio Sazonal de Frentes Frias e do Valor Médio Sazonal do Índice de Frente Fria Normalizado nas Áreas Litorâneas e Continentais (1991-2020).



Fonte: Elaboração própria (2022).

4.4.3. Variabilidade Mensal

De acordo com a figura 22, analisando a climatologia mensal de FFs nos 30 anos de estudo, observa-se que o mês de fevereiro se mostra sendo com menor número mensal de FF, entre 4 e 5 sistemas. Os meses com maior frequência mensal são julho e agosto com 6,6 e 6,5 FF, respectivamente. No entanto, a frequência média mensal de FFs pelos dois métodos se dá de aproximadamente 6 sistemas.



Fonte: Elaboração própria (2022).

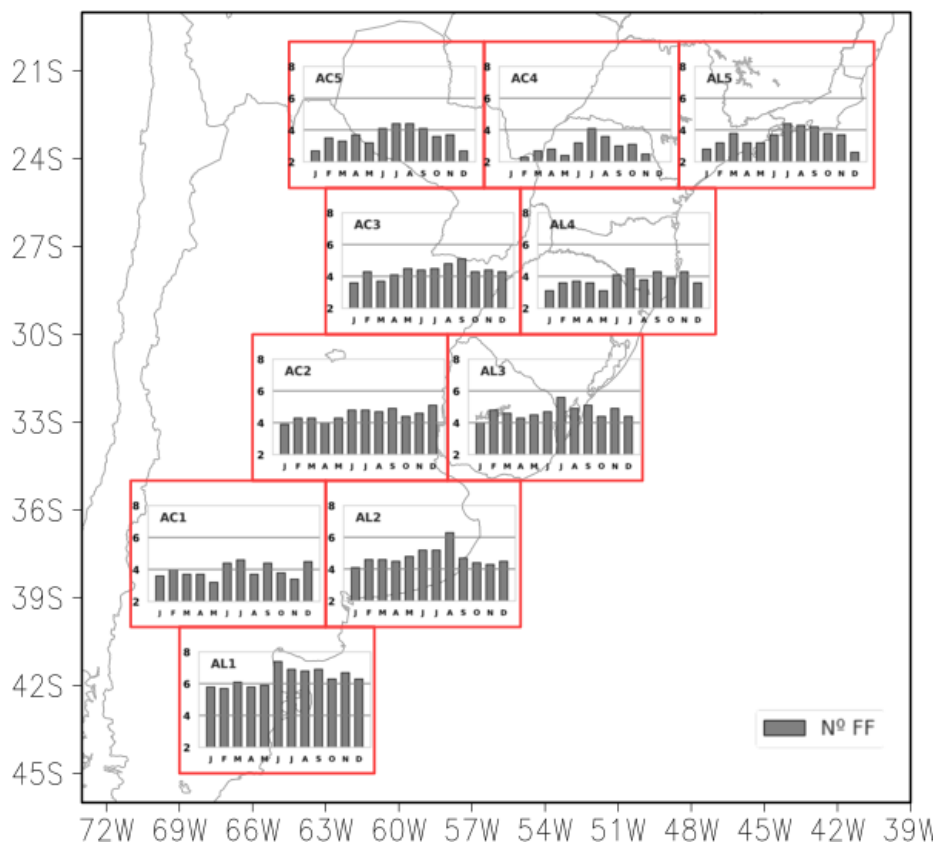
A figura 23 mostra o número médio mensal de FFs (barras em cor cinza) para cada uma das áreas litorâneas e continentais. A análise mensal das FFs na AL1 mostra que a atuação das frentes frias ocorre ao longo de todo o ano, sendo que o número médio mensal é de 6 sistemas frontais. Sendo que o máximo se apresenta em julho com 7 FFs e o número médio mínimo em janeiro e fevereiro com aproximadamente 6 sistemas.

Nas áreas continentais AC1, AC2 e AC3 a média mensal é de 4 FF, sendo que com o número máximo ocorre nos meses de julho e setembro com a média de 5 sistemas. O número mínimo ocorre nos meses de novembro, dezembro e janeiro, entre fim da primavera e o verão, período no qual as FF atuam mais na parte litorânea. Para AL2 e AL3, áreas litorâneas que abrangem o centro-leste da Argentina, Uruguai e centro sul do Rio Grande do Sul, o número máximo de 6 frentes ocorre nos meses de agosto e julho, respectivamente. E nas duas áreas a

média mensal é de 5 FF. Na área AL4, que engloba o estado catarinense, a média mensal é de 4 FF, com o máximo no mês de julho e mínimo em janeiro.

Nas áreas AL5, AC4 e AC5, região que engloba parte do sul, sudeste e centro-oeste do Brasil, a média mensal é de 4 FF, com o máximo nos meses de julho e agosto, e número mínimo em dezembro e janeiro. A área continental 4, dentre de todas as áreas avaliadas, é a que apresenta menor número médio de FF com aproximadamente 3 sistemas por mês.

Figura 23: Número Médio Mensal de Frentes Frias nas Áreas Litorâneas e Continentais (1991-2020).



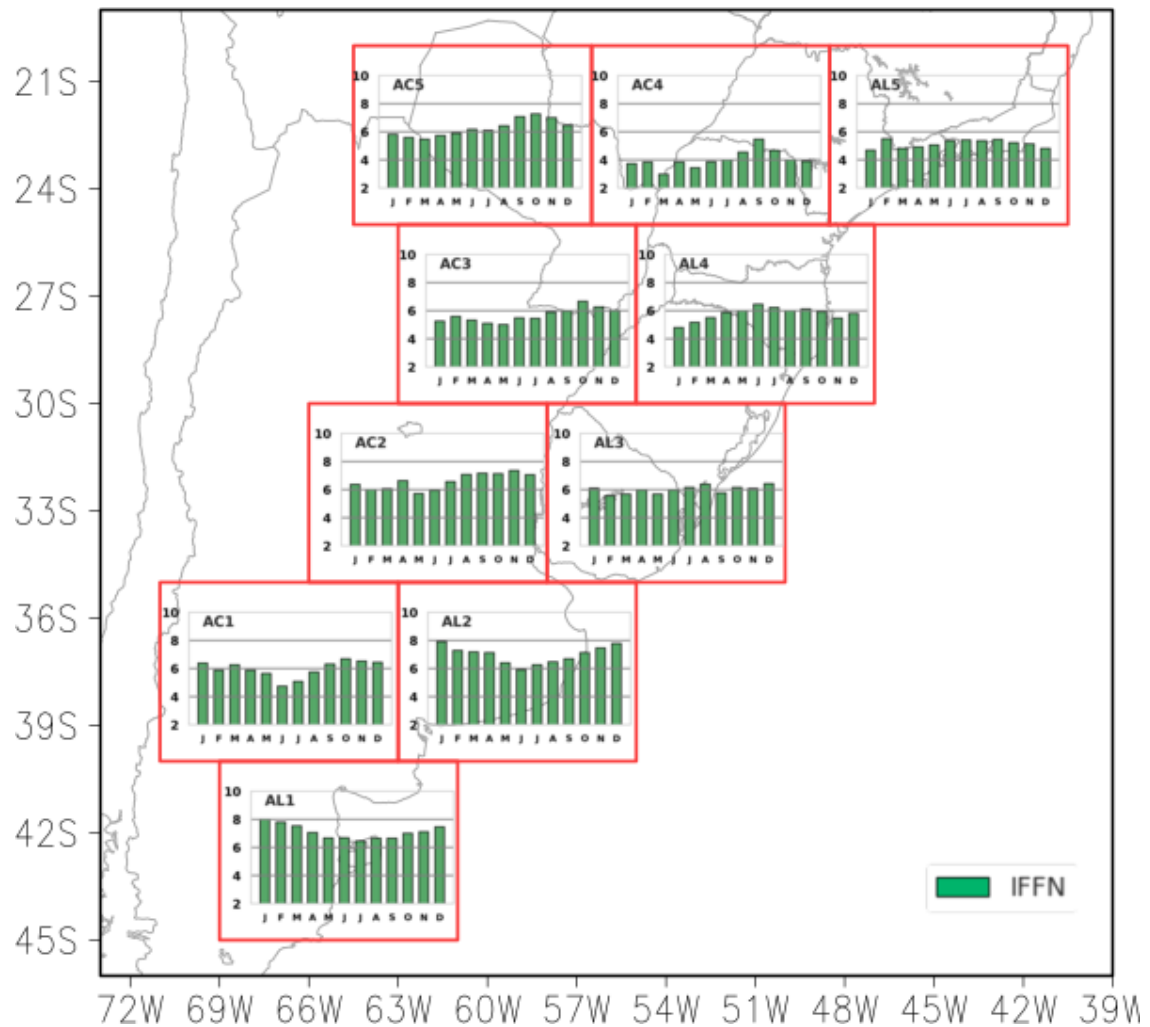
Fonte: Elaboração própria (2022).

A análise do número médio sazonal e mensal de FFs por área mostrou que as frentes frias diminuem em direção às latitudes menores, tanto nas áreas continentais quanto na litorâneas, este resultado corrobora com trabalhos de Oliveira (1986), Justi da Silva e Silva Dias (2002), Andrade (2005) e Reboita et al. (2009), entre outros. Como a área frontogenética e ciclogênica se limita entre 30

e 60 °S, isso implica em uma menor atuação de sistemas em latitudes abaixo de 30 °S.

Na figura 24 constam os valores médios do IFFN de cada uma das 10 áreas deste estudo. Na AL1, AL2 e AC2 o valor médio mensal do IFFN é igual a 7, indicando que as FFs são intensas, sendo que na AL1 e AL2 as FFs se mostram mais intensas entre os meses de outubro e abril, com destaque para o mês de janeiro com IFFN igual a 8 e de intensidade moderada entre maio e setembro. Na AC2 os sistemas são mais intensos entre agosto e dezembro, demais meses os sistemas são de intensidade moderada. As FFs que se formam ou passam pela AC1, AL3, AL4, AL5 e AC3 são em de intensidade moderada com valor de IFFN médio mensal igual a seis. Na AC4 os sistemas são em média moderados, no entanto entre os meses de dezembro e junho possuem intensidade fraca.

Figura 24: Valor Médio Mensal do Índice de Frente Fria Normalizado referente a cada uma das Áreas Litorâneas e Continentais (1991-2020).



Fonte: Elaboração própria (2022).

A comparação da climatologia anual das FFs detectadas pelo algoritmo via método MOBJ e pelo MOBS mostrou que o MOBJ foi o que registrou o número mínimo da climatologia com 58 sistemas, o número máximo de 80 FFs foi registrado por ambos os métodos, mas em anos diferentes.

As variabilidades sazonal e mensal do número de FFs e do valor do IFFN foram apresentadas para cada uma das dez áreas neste estudo, e a frequência sazonal de FFs mostrou que para todas as áreas, o inverno é a estação que mais ocorre sistemas frontais. Isso corrobora com estudos de Andrade, (2005), Reboita et al. (2009), Silva et al. (2014), os quais afirmam que no inverno os sistemas frontais conseguem avançar para latitudes mais baixas e longitudes mais a oeste comparadas às demais estações do ano, e isso é devido a existência de um maior contraste térmico separando as massas de ar, tal contraste faz com que estas

massas cheguem até a Região Central do Brasil. Destaca-se a AC2, AC3, AL3 e AL4 que além da estação inverno também registram na primavera maior número de FF.

Referente ao IFFN médio sazonal de cada área, tem-se que na AL1, no verão, outono e primavera os sistemas são intensos e no inverno moderados. Na AC1, AL3 e AL4 em todas as estações as FFs possuem intensidade moderada. Na AC2 as FFs são intensas na primavera, nas demais estações os sistemas que ocorrem são moderados como na AC3 onde em todas as estações as FFs são de intensidade moderada. Na AL5 as FFs são moderadas, na AC5 são intensas na primavera e moderada nas demais estações, na AC4 as FFs são moderadas no inverno e primavera, e fracas no verão e outono.

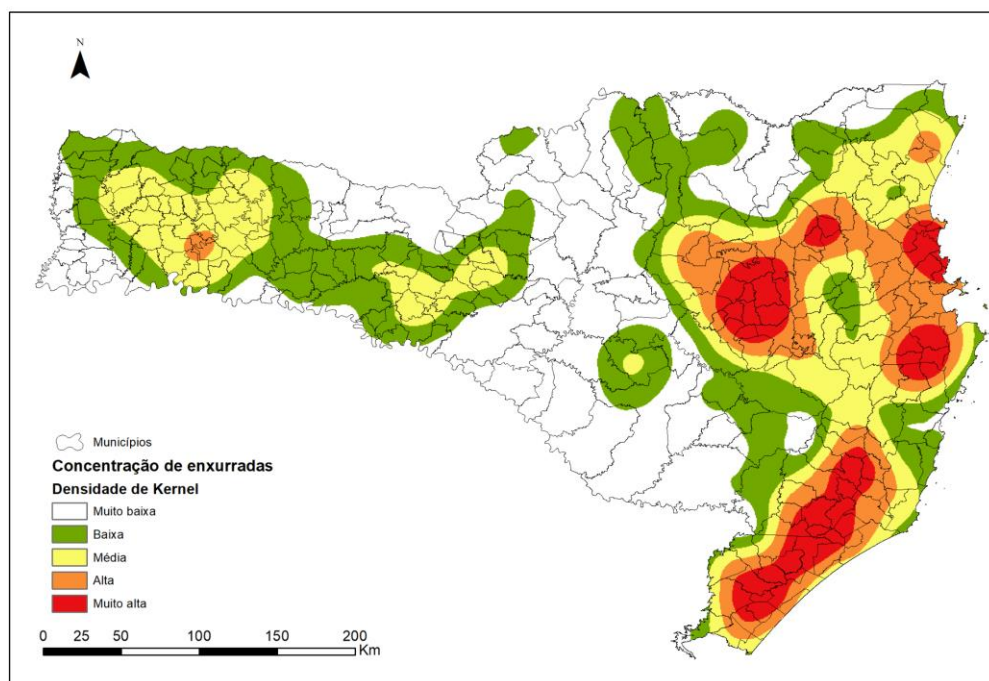
A análise da variabilidade mensal no número médio de FFs e dos valores médios de IFFN para cada área delimitada mostrou que para as áreas AL1, AL3, AL4 o número máximo de FFs ocorre em julho e na AL2 em agosto, os sistemas que atuam em julho na AL1 e AL3 são menos intensos comparados ao mesmo mês na AL4. Nas AC1, AC2 e AC3 as FFs atuam em maior número nos meses de julho e setembro, e nestes meses na AC2 e AC3 o IFFN indica sistemas intensos em atuação, já na AC1 sistemas mais intensos em setembro. Na AL5, AC4 e AC5, o número médio máximo de FFs ocorre nos meses de julho e agosto e são menos intensos na AL5 e AC5. Na AC4 em julho, os sistemas são menos intensos comparados a agosto.

4.5. Episódios Extremos

Eventos extremos de chuva, que causam alto impacto, e sua variabilidade, motivam muitos pesquisadores a estudar e caracterizar tais eventos. Neste estudo, em um período de 21 anos (2000 a 2020) foram contabilizados 1903 decretos, implicando num aumento de aproximadamente 300 eventos extremos de precipitação ocorridos até 2020, comparados ao levantamento do Atlas Brasileiro de Desastres (ATLAS, 2013). Na figura 25 são mostrados os decretos municipais referentes a eventos de enxurradas ocorridos entre 2000 e 2020 em SC. As Mesorregiões Litoral Sul, Grande Florianópolis e Vale do Itajaí obtêm a

maior concentração de ventos de enxurradas. No entanto, destaca-se também as mesorregiões Meio Oeste e Oeste de Santa Catarina com baixa e média concentração de enxurradas.

Figura 25: Decretos Municipais referentes a eventos de enxurradas ocorridos entre 2000 e 2020 em SC.

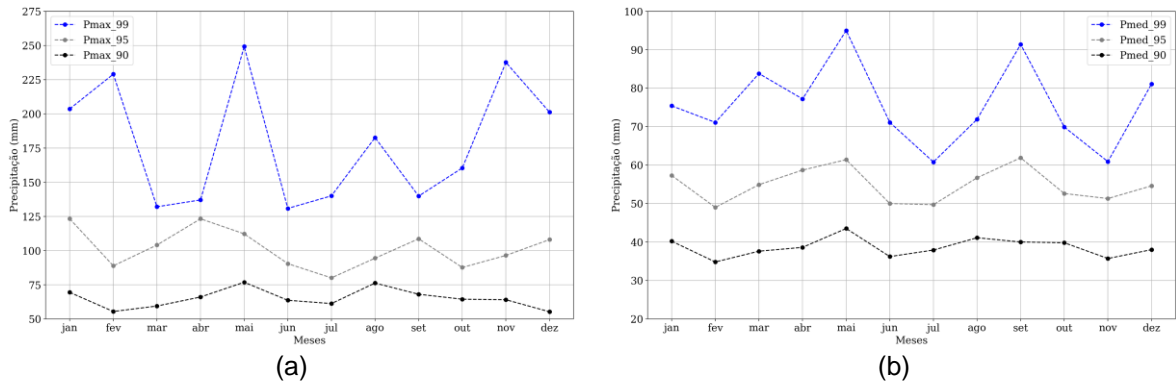


Fonte: Elaboração própria, com base nos Decretos DC/SC (2022).

Para a caracterização destes eventos a Técnica dos Percentis é uma das principais técnicas aplicadas na quantificação de eventos extremos de precipitação. Esta técnica, segundo Pinkayan (1966), mostra uma distribuição de frequência acumulada, ou seja, o intervalo de cada percentil calculado mostra a probabilidade para cada um dos eventos ocorrer numa determinada variável de uma série temporal. A Figura 26 mostra os percentis 90, 95 e 99 da precipitação máxima e média mensal, entre os anos de 2000 e 2020. Avaliando eventos máximos de precipitação diária (Fig. 26a) em relação ao P90, obtém-se um limiar de precipitação diária mensal entre 50 e 75 mm. O P95 mostra um limiar entre 75 e 125 mm, enquanto que o P99 indica uma faixa entre 125 e 250 mm. O P99 mostra eventos de chuva associados a alto impacto de uma determinada região. Considerando a precipitação média mensal (Fig. 26b), referente aos percentis médio 99, 95 e 90, o P99 médio indica limiar, para eventos extremos de chuva,

entre 60 e 95 mm, o P95 médio entre 46 e 60 mm e o P90 médio entre 35 e 45 mm.

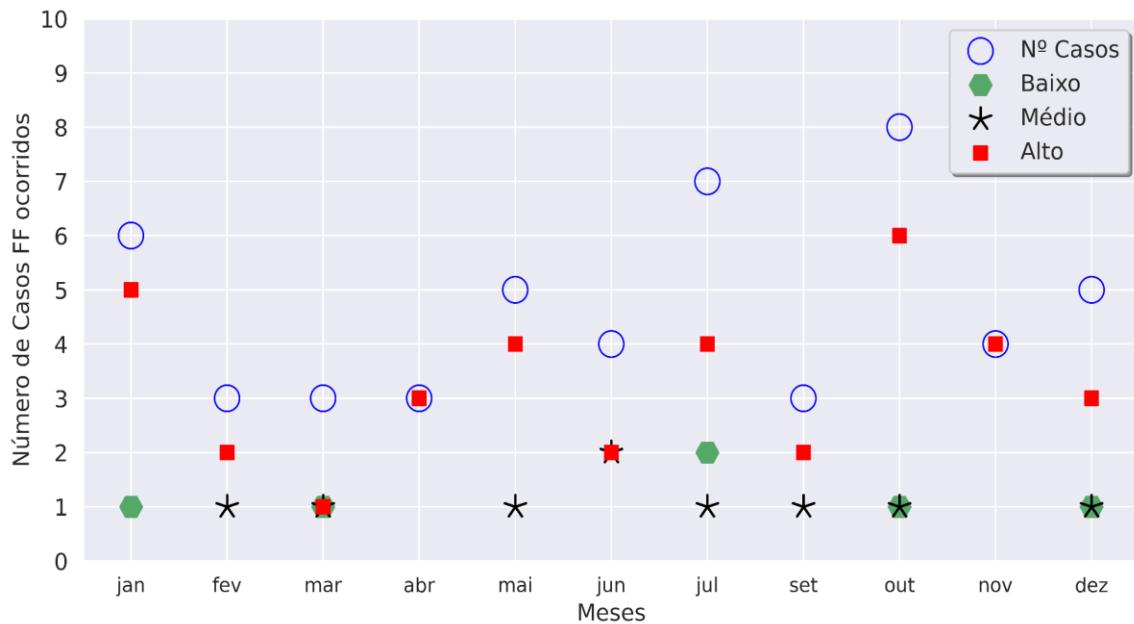
Figura 26: Percentis P99, P95 e P90 da precipitação diária máxima (a) e média (b) mensal, calculada para cada mês do ano, no período de 2000 a 2020.



Fonte: Elaboração própria (2022).

A aplicação da técnica de percentis na série de dados de precipitação resultou na classificação do impacto com os seguintes limiares: para o baixo impacto: $Precipitação < 45 \text{ mm}$, médio impacto: $45 \text{ (mm)} < precipitação > 60 \text{ (mm)}$ e alto Impacto: $Precipitação \geq 60 \text{ (mm)}$. Com estes limiares classificou-se os 51 casos levantados sendo um total de 36 de alto impacto, 9 de médio impacto e 6 de baixo impacto. Na Figura 27 observa-se que em todos os meses ocorrem casos de FF de alto impacto (quadrado em vermelho), destaque para os meses de abril e novembro que o número de casos levantados, 3 e 4 respectivamente, são de alto impacto. Os meses janeiro, maio, julho, outubro e novembro são os meses com maior número de casos de alto impacto.

Figura 27: Distribuição dos casos ocorrido (círculo em cor azul vazado) em cada mês do ano e a classificação quanto ao impacto, casos de baixo impacto (hexágono em cor verde), de médio (símbolo estrela em cor preta) e de alto impacto (quadrado em vermelho).



Fonte: Elaboração própria (2022).

O Resultado da comparação entre o MOBJ e MOBS dos casos levantados que impactaram SC é mostrado na tabela 8. A opção A indica períodos em que existiram os casos e o algoritmo detectou e B Períodos em que existiram os casos e o algoritmo não detectou. foi o ano que o algoritmo detectou menos casos ocorridos. Em resumo, dos 51 casos levantados a seção 4.1, um total de 37 destes casos foram detectados pelo MOBJ, método descrito na seção 3.3.4.. Sendo assim, dos 37 casos, 13 são da primavera, 8 do verão, 6 do outono e 10 do inverno.

Tabela 8: Comparação dos casos ocorridos e dos detectados entre 2015 e 2020. (A) Casos ocorridos e detectados e (B) Casos ocorridos e não detectados

2015	A	B	A	A	B	A	A	B					
2016	B	B	A	A	A	A							
2017	A	A	A	A									
2018	A	A	A	A	A	A	A						
2019	B	B	B	B	A	B	B	B	B	A	A	A	
2020	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A

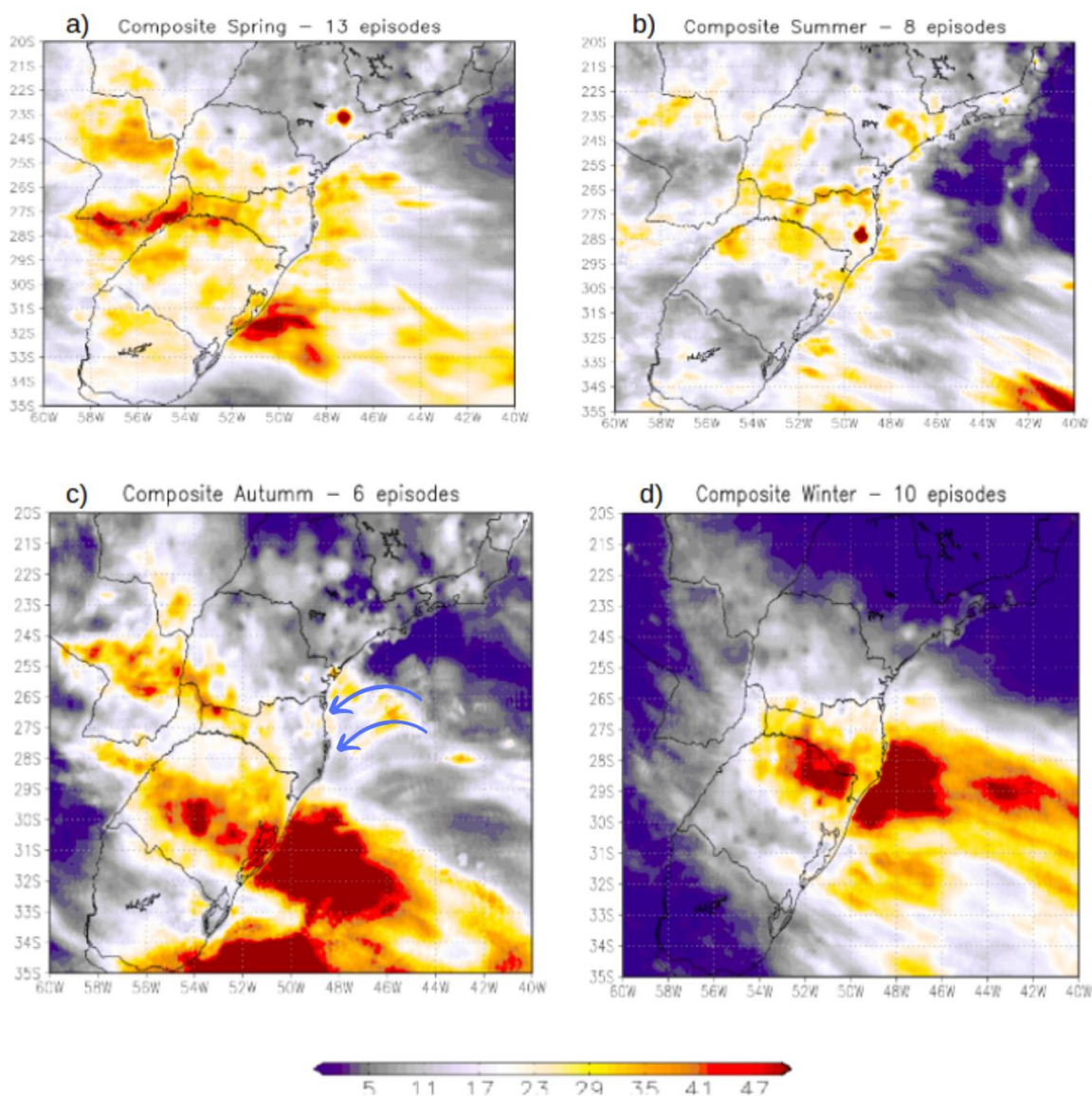
Fonte: Elaboração própria (2022).

A figura 28 ilustra a composição da precipitação acumulada nas datas referentes nos casos selecionados por estação do ano. Observa-se que os casos

de FFs levantados que atuaram nos meses de primavera concentraram os acumulados de precipitação na porção Oeste do estado. Destaca-se que na primavera e verão as FFs são menos frequentes em SC, no entanto, quando a atuação de uma FF se associa a outros sistemas como os CCMs e SCMs, ambos podem causar grande impacto no Estado relacionado a chuva intensa.

Nos meses de verão, devido ao forte aquecimento, células de convecção se formam de forma desorganizada causando os temporais de verão que são responsáveis por enxurradas repentinas, alagamentos entre outros. As FFs que atuam nesta estação são mais litorâneas comparadas às demais estações e isso pode ser observado na Figura 28b, que apresenta maiores acumulados em uma parte da porção leste de SC. No outono, a frequência na passagem das FFs pelo Sul do Brasil aumenta em relação à primavera e ao verão. Na figura 28c, observa-se que os maiores acumulados ficam concentrados sobre o RS. Em SC as frentes que conseguem avançar para latitudes mais baixas, provocam chuvas nas regiões oeste e norte do Estado. No litoral a chuva está muitas vezes relacionada à circulação pós-frontal, onde o Anticiclone Migratório (AM) na retaguarda dos SFs é responsável pela precipitação de caráter estratiforme e intensidade fraca a moderada, denominada de chuva por efeito de circulação marítima (Bonnet et al., 2018). Durante estes eventos, os ventos de direção sul sobre o oceano sopram em direção ao continente, transportando umidade em direção ao continente. No inverno (Fig. 28d), observa-se um padrão de precipitação típico da estação, onde as FFs são mais atuantes e as chuvas na maioria das regiões do estado estão relacionadas às FFs.

Figura 28: Precipitação acumulada (mm/dia) do MERGE referente às datas detectadas dos episódios de Frentes Frias nas quatro estações do ano - a) 13 episódios na primavera, b) 8 episódios no verão, c) 6 episódios no outono e d) 10 episódios no inverno - datas estas baseadas nos 51 casos levantados entre os anos de 2015 e 2020.



Fonte: Elaboração própria (2022).

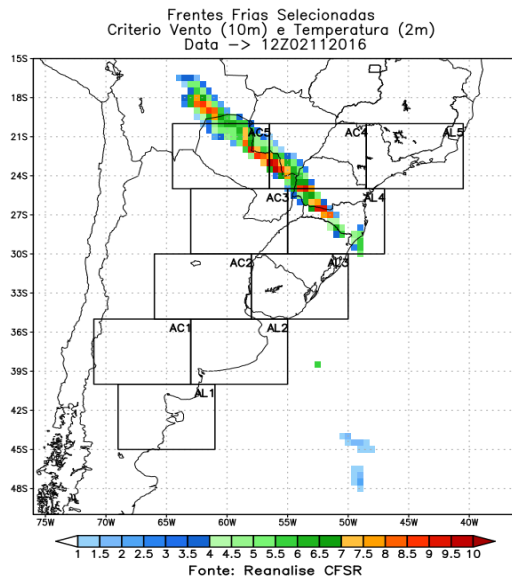
A Figura 29 ilustra o IFFN detectado pelo algoritmo referente a quatro casos (caso 14, caso 40, caso 43 e caso 02) de FFs que impactaram SC, em cada estação do ano. A Figura 29a exemplifica a FF detectada que influenciou SC na primavera, a qual impactou as áreas entre as regiões Oeste, Planalto Sul e Planalto Norte, no período de 01 e 04 de novembro de 2016. Conforme os valores de IFFN, este sistema foi considerado intenso. A formação desta FF ocorreu sobre as áreas AC1 e AL1 às 00Z do dia 01/11 (figura não mostrada) e atingiu a AL4 às

12Z do dia 02/11. Durante sua passagem por SC, foram registrados temporais acompanhados de chuva forte. As estações do INMET localizadas na faixa oeste e planalto catarinense registraram acumulados de até 69 mm, sendo 27 mm registrados em um único dia. Os maiores acumulados foram registrados nos municípios do RS (105 mm em 8 horas da atuação do sistema no dia 01/11 em Alegrete/RS). A análise sinótica deste episódio indica a presença de um cavado em 250 hPa, aprofundado até 500 hPa, no centro-sul da AS associadas ao sistema frontal em atuação em superfície. Além disso, a atuação do JST fornece suporte dinâmico fortalecendo o sistema frontal. Em baixos níveis (850 hPa) a junção do escoamento do JBN e do cavado em médios e altos níveis, associado ao sistema frontal em superfície, favoreceu a formação de áreas de instabilidades sobre o norte da Argentina, Paraguai, RS e SC. Portanto, mesmo que o IFFN tenha indicado um sistema intenso, os temporais com chuva forte ocorridos não causaram alteração significativas das condições de normalidade dos municípios impactados. Esse fato é corroborado pela precipitação registrada que, segundo a classificação do impacto, indica sistema de médio impacto.

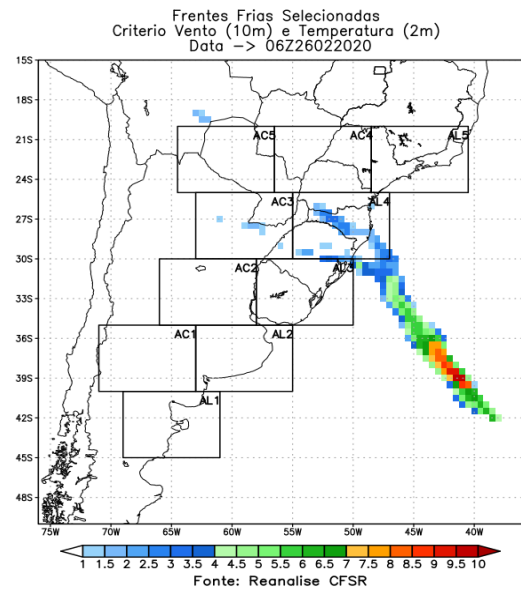
A Figura 29b apresenta um caso de FF que ocorreu no sul do país entre 25 e 28 de fevereiro de 2020, durante o verão, e que provocou chuva forte e volumosa nos três Estados da região Sul do Brasil. Este sistema se formou na AL2 às 00Z do dia 25/02 e seu avanço sobre a AL4 se deu às 06Z do dia 26/02. Em SC foram registrados pelo INMET acumulados de precipitação de 138 mm. Segundo o IFFN detectado, tal sistema foi categorizado como moderado e classificado como de alto impacto. A análise sinótica deste evento mostrou a atuação do JST e seu escoamento favoreceu a intensificação da FF em superfície. O cavado frontal também esteve presente no nível de 500 hPa. Em baixos níveis, o escoamento do JBN favoreceu a advecção de umidade mais para as áreas ao Norte de SC.

Figura 29 : IFFN detectado pelo algoritmo referente a quatro casos de FFs que impactaram SC, em cada estação do ano: a) Primavera - caso 014 - entre 01/11 e 04/11/2016; b) Verão - caso 040 - 25/02 a 28/02/2020; c) Outono - caso 043 - 10/06 a 13/06/2020 c) Inverno - caso 002 - 13/07 a 16/07/2015.

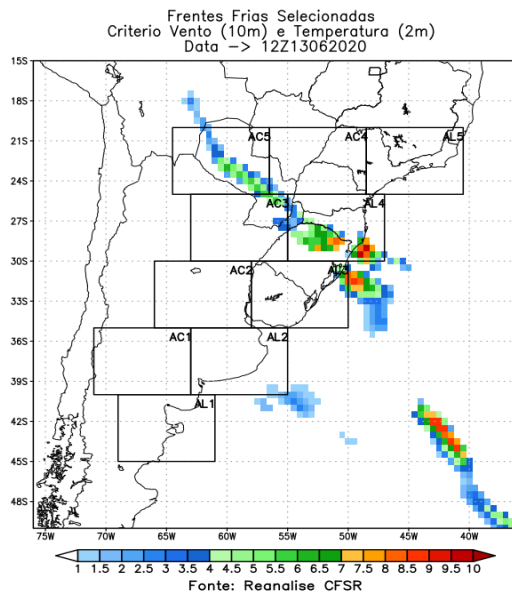
a)



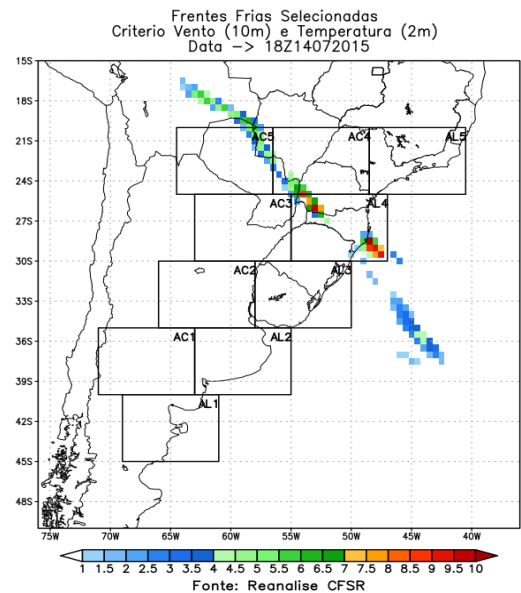
b)



c)



d)



Fonte: Elaboração própria (2022).

No outono, entre 10 e 13 de junho de 2020, uma FF (Figura 29c) se formou às 12Z do dia 12/06 sobre as áreas AL1, AC1, AL2 e AC2 com orientação de

nordeste/sudeste. Esse sistema apresentou deslocamento de sudoeste para noroeste, avançando para as áreas AL3, AL4, AC3, AC5 as 12Z do dia 13/06, influenciando principalmente a AL4 que engloba o Estado de SC. Este sistema influenciou as condições do tempo no Estado, apresentou índices elevados de precipitação e causou impactos nas regiões Planalto Sul, Norte e Oeste catarinense. O IFFN detectado desta FF foi máximo, indicando um sistema intenso e, relacionado com a precipitação ocorrida, este sistema foi de alto impacto. Segundo informações da DC/SC, foram registradas 40 ocorrências em 22 bairros em Lages com 25 pontos de alagamentos. Em Canoinhas, quatro bairros foram afetados com ruas e casas alagadas. Na região Oeste, os maiores prejuízos foram registrados no município de Saudades relacionados a pontos de alagamentos e quedas de pontes e estradas submersas em comunidades do interior. Outros municípios como Xanxerê, Nova Erechim, Águas Frias e Cunha Porã também registram problemas com alagamentos. Análise sinótica mostra que o JST apresentou com seu núcleo máximo sobre a região Sul do Brasil, favorecendo a divergência de ar em altos níveis e intensificando sistemas meteorológicos em superfície. Em 500 hPa, observa-se a atuação de cavados de onda curta e de um cavado mais pronunciado devido a influência da circulação em altos níveis. Em 850 hPa também se observa a atuação do JBN sobre a Região Sul. E em superfície a FF atuava principalmente sobre o norte e litoral do RS, oeste e sul de SC.

A Figura 29d mostra um caso de FF ocorrido no inverno e detectado pelo IFFN entre 11 e 14 de julho de 2015. Este sistema foi detectado pelo IFFN como sendo intenso e classificado conforme a técnica dos percentis como de alto impacto, com acumulado de precipitação de 167 mm. Este caso se formou às 00Z do dia 13/07 na AL2 e AC2, atingiu a AL4 às 00Z do dia 14/07 e permaneceu até a 00Z do dia 15/07. Ao longo do dia 14 a FF influenciou as regiões Oeste, Meio Oeste, Planalto Sul e Litoral Sul de SC causando temporais acompanhados de chuva intensa, granizo e ventos fortes. A análise sinótica coincidentemente é similar aos 3 casos já descritos (Figura 29 (a, b e c)). Destaca-se o fluxo do JBN mais intenso e com escoamento bem definido, se estendendo sobre o leste da Bolívia, Paraguai, estado do Mato Grosso do Sul e sobre os estados do sul do

País. Alguns dos campos meteorológicos utilizados para a análise sintótica dos 4 casos são ilustrados no APÊNDICE D.

Esta sub-seção ilustrou os decretos relacionados a eventos de enxurradas em SC entre 2000 e 2020, com intuito de mostrar que episódios extremos ligados à chuva são recorrentes em SC. Além disso, de acordo com a técnica dos percentis, categorizou-se o grau de impacto relacionado à precipitação ocorrida dos casos levantados. Com os limiares encontrou-se um total de 36 casos de alto impacto, 9 de médio e 6 de baixo impacto. E ainda, a fim de avaliar o padrão de precipitação nas datas dos casos selecionados pelos métodos MOBS e MOBJ, observou-se que os casos de FFs levantados que atuaram na primavera em SC concentraram os acumulados principalmente no oeste da Região Sul do Brasil e países vizinhos. No verão, células de convecção se formam de forma mal distribuída provocando principalmente temporais. No outono as FFs provocam precipitação no RS e nas regiões Oeste e Norte de SC. Nesta estação a influência da circulação marítima é bem significativa (setas em azul Fig. 28c). No inverno observou-se o padrão de chuvas associadas as FFs, onde os totais pluviométricos na maioria das vezes estão relacionados a estes sistemas. Além do padrão de precipitação, analisou-se quatro casos de FFs que influenciaram SC em cada estação do ano em relação ao IFFN. Sendo o caso 14 intenso e de médio impacto, o caso 40 categorizado como moderado e de alto impacto, os casos 043 e 002 que foram sistemas intensos e de alto impacto.

5. PRODUTO(S) DESENVOLVIDO(S)

Neste trabalho foram desenvolvidos dois Produtos Técnico-Tecnológicos (PTTs), sendo um deles um algoritmo de detecção de Frentes Frias e o outro uma base de dados com todos os casos de Frentes Frias detectadas. O Terceiro produto se refere ao artigo científico.

5.1 Artigos(s) Desenvolvido(s)

Os trabalhos citados abaixo foram, em formato resumo, submetidos, aceitos e publicados no Simpósio em Clima, Água, Energia e Alimentos, Rio de Janeiro, evento online de 13 a 15 de outubro de 2021. Os 20 melhores trabalhos dos anais do evento foram selecionados para publicação na Revista Anuário do Instituto de Geociências (Anuário IGEO). Portanto, o trabalho intitulado "DETECÇÃO DE FRENTES FRIAS EM EVENTOS DE MÉDIO E ALTO IMPACTO QUE OCORRERAM EM SANTA CATARINA", em processo de finalização para submissão, foi selecionado para publicação na Revista Anuário IGEO.

- 1) Roseli de Oliveira; Mário Francisco Leal de Quadro. **DETECÇÃO DE FRENTES FRIAS EM EVENTOS DE MÉDIO E ALTO IMPACTO QUE OCORRERAM EM SANTA CATARINA**. In: ANAIS DO SIMPÓSIO EM CLIMA, ÁGUA, ENERGIA E ALIMENTOS - 2021, 2021, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2021. Disponível em: <<https://proceedings.science/simclea-2021/papers/deteccao-de-frentes-frias-em-eventos-de-medio-e-alto-impacto-que-ocorreram-em-santa-catarina?lang=pt-br>> Acesso em: 29 abr. 2022.
- 2) Arthur Müller et al. **ANÁLISE TEMPORAL DA RELAÇÃO ENTRE A OSCILAÇÃO ANTÁRTICA E A PASSAGEM DE FRENTES FRIA SOBRE O ESTADO DE SANTA CATARINA**. In: ANAIS DO SIMPÓSIO EM CLIMA, ÁGUA, ENERGIA E ALIMENTOS - 2021, 2021, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2021. Disponível em: <<https://proceedings.science/simclea-2021/papers/analise-temporal-da-relacao-entre-a-oscilacao-antartica-e-a-passagem-de-frentes-fria-sobre-o-estado-de-santa-catarina?lang=pt-br>> Acesso em: 29 abr. 2022.

5.2 Produtos Técnicos-Tecnológicos

O principal PTT desenvolvido neste trabalho foi um algoritmo automatizado para detecção de Frentes Frias denominado Índice de detecção de FF (IFF) (Figura 30). O desenvolvimento baseou-se na metodologia usada por Rodrigues et. al. (2004), Silva et al. (2014) e Cardozo et al. (2015), desenvolvido no software GRADS (*Grid Analysis and Display System*) fornecido pelo *Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions* (COLA). Como descrito na seção 3.2, para executar a parte científica desta pesquisa utilizou-se dados de reanálise, a cada 6 horas (disponibilizados em arquivos diários), da componente meridional de vento a 10 m e temperatura do ar a 2 m do CFSR e CFSv2.

O algoritmo sinaliza a passagem de uma frente fria quando as seguintes condições, simultaneamente em cada ponto de grade do domínio de cada área, eram computadas: i) vento no quadrante norte no tempo $t-1$ (6 horas antes); ii) vento no quadrante sul do tempo t até $t+3$ indicando o giro do vento norte (valores negativos da componente meridional do vento) para o quadrante sul (valores positivos da componente meridional do vento) e persistência até 24 horas e iii) diminuição da temperatura do ar a 2 m até 24 horas após a passagem da FF, considerando o tempo $t-1$ a $t+3$. As condições descritas compõem a equação do IFF desenvolvida neste trabalho, a qual é indicada pela seta vermelha na Figura 30. No entanto, para melhor interpretação do IFF de cada frente fria, o mesmo foi normalizado, em função do máximo valor do domínio para torná-lo adimensional. Sendo assim, se obteve o índice IFFN (IFF normalizado) (seta branca indicada na Figura 30) em uma escala com variação de 0 a 10, na qual mostra a intensidade das FFs pelo algoritmo.

Visando tornar o algoritmo operacional, depois dos testes de sensibilidade e da aplicação científica do mesmo com o uso do CFSR, optou-se por usar os dados do GFS (*Global Forecast System*) que é um modelo de previsão do tempo produzido pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), que pertence ao NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e é muito utilizado nos centros de previsão do tempo e clima. Portanto, o IFF está operacional e pode ser acompanhado diariamente por meio do link <http://meteorologia.florianopolis.ifsc.edu.br/climenv/produtos_alunos/iff/oper>, o

qual mostra os mapas com a previsão da frente fria com as categorias de intensidade classificadas nesta pesquisa. Em uma segunda etapa, este aplicativo meteorológico será instalado junto aos servidores computacionais da EPAGRI/CIRAM, visando a disponibilização deste produto aos previsores deste Centro.

Figura 30: Parte principal do Algoritmo automatizado de Detecção de Frentes Frias - IFF

```
#####
### SCRIPT AUTOMÁTICO PARA DETECÇÃO DE FRENTES FRIAS          ###
### Utiliza o GFS do NCEP com previsões ate 06 horas.          ###
###                                                            ###
###Elaborado por:Roseli de Oliveira e Prof. Dr Mario Quadro    ###
### Para rodar :                                              ###
### "run detecta_frente_fria.gs YYYYMM(i) yyyyymm(f)"         ###
### Desenvolvido/Adaptado em: 21/01/2021                       ###
#####
*****
* Define a área do Mapa e os critérios do vento
*****
'set lon -76 -36'
'set lat -50 -15'
'set t '_t
'define a=((abs(vgrd10m(t-1))-vgrd10m(t-1))/2)*-1'
'define b=((abs(vgrd10m)+vgrd10m)/2)'
'define c=((abs(vgrd10m(t+1))+vgrd10m(t+1))/2)'
'define d=((abs(vgrd10m(t+2))+vgrd10m(t+2))/2)'
'define e=((abs(vgrd10m(t+3))+vgrd10m(t+3))/2)'
*****
* define a diminuição de tmp2meratura de um periodo para outro
*****
'define t1=(tmp2m(t-1)-tmp2m(t+3))'
*****
* seleciona as áreas onde houve queda de tmp2meratura
*****
'define at1=(abs(t1)+t1)/2'
*****
* Critérios do Script
* a*b -> Seleciona áreas aonde o vento girou de norte p/ sul
* a*b*c*d*e -> A partir do criterio anterior, se o vento permaneceu de sul por um dia
* a*b*c*d*e*at1 -> A partir do criterio anterior, se a tmp2meratura diminuiu 24h depois
da passagem da frente.
*****
'c'
'set gxout grfill'
'set grads off'
*
'define iff=sqrt((a*-1)*b*(a/a)*(b/b)*(c/c)*(d/d)*(e/e)*at1)'
'set gxout stat'
'd iff'
lin=sublin(result,8)
_vmax=subwrd(lin,5)
'define iff=10*iff/'_vmax
#
'set gxout grfill'
'set grads off'
'set ccols 0 43 44 45 47 48 49 33 34 35 37 38 39 23 24 25 26 27 28 29 0'
'set clevs 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0 8.5 9.0 9.5 10.'
'd iffn'
*****
```

Fonte: Elaboração própria (2022).

O segundo PTT desenvolvido se refere a uma base de dados no período de 1991 a 2020, contendo um total de 2124 casos de Frentes Frias detectadas pelo algoritmo com sua respectiva hora inicial e final, data inicial e final, número de horas de atuação da FF, taxa de detecção mínima, média e máxima, Índice de Frente Fria Normalizado (IFFN) médio, Índice de Frente Fria (IFF) máximo, intensidade por categorias (fraco, moderado ou forte) e as áreas de passagem das FFs (Apêndice C).

A disponibilização de informações caracterizando as FFs e a quantidade de casos dos sistemas torna este trabalho pioneiro em detecção automatizada em climatologia de FF no sul e centro-sul da AS. Este PTT visa subsidiar pesquisas futuras sobre a atuação das FFs na região de estudo. O apêndice C apresenta os 70 casos de FFs detectadas no ano de 1991. Uma breve análise sobre a intensidade por categoria revela que foram detectados 7 casos fracos, 44 moderados e 19 fortes. A listagem de toda a série climatológica dos sistemas está disponível no link: http://meteorologia.florianopolis.ifsc.edu.br/climenv/produtos_alunos/iff/Produto_Tecnico_Tecnologico_Rose.pdf >.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho buscou-se avaliar o comportamento da passagem de frentes frias pelo sul e centro-sul da América do Sul, no período de 1991 a 2020, por meio de um método objetivo de detecção, com o intuito de auxiliar na previsão de eventos meteorológicos de alto impacto que atuam na região. Para avaliar a formação e o deslocamento das FFs sobre toda a região de estudo, considerada uma região frontogenética, foram delimitadas 10 áreas de interesse, sendo 5 destas localizadas na região litorânea (AL) e 5 no continente (AC). Particularmente sobre o Estado de Santa Catarina, que sofre constantemente a influência de FFs durante todo o ano, foram analisados os eventos que impactam o Estado, causando eventos como chuva intensa, queda de granizo, raios e ventos fortes.

Na primeira etapa do trabalho foram levantados casos de FFs que impactaram SC entre 2015 e 2020, pertencente a área específica (AL4). Os casos foram catalogados com base em informações dos dados da reanálise do CFSv2, do Relatório 02 do MMA e GIZ (2018), do Boletim Climanálise do CPTEC, dos Boletins Ambientais Trimestrais da EPAGRI/CIRAM e ainda nos dados dos decretos municipais da Defesa Civil de SC (DC/SC). Como resultado do levantamento observacional dos casos de FF obteve-se um total de 51 casos que impactaram a AL4 e conseqüentemente SC. Sendo que na maioria dos casos o impacto esteve relacionado a chuva intensa e por vezes associados a vendaval e queda de granizo. Dos 51 casos catalogados, 13 casos foram registrados na estação verão, 10 no outono, 10 no inverno e 18 na primavera.

Na segunda e terceira etapas do projeto foi desenvolvido e aplicado um algoritmo computacional para detecção e caracterização das FFs que atuaram sobre o cone sul da América do Sul entre os anos de 1991 e 2020. O algoritmo detecta frentes frias no domínio nas 10 áreas selecionadas através dos dados da reanálise do CFSR e CFSRv2, a cada 6 horas, da componente meridional de vento a 10 m e da temperatura do ar a 2 m. Com a aplicação do algoritmo nos casos levantados de FFs foi possível avaliar a taxa de detecção e a intensidade de cada FF. Para encontrar um limiar de detecção foram testadas no algoritmo as

porcentagens de 10, 15, 17, 20, 25 e 30 % de pontos para detecção num período de 4 dias, período médio que normalmente uma frente fria influencia a AL4. Para melhor interpretação da intensidade de cada FF foi criado o Índice de Detecção de Frente Fria (IFF), que foi normalizado, em função do máximo valor do domínio para torná-lo adimensional. Sendo assim, se obteve o índice IFFN (IFF normalizado) em uma escala com variação de 0 a 10, na qual mostra a intensidade das FFs pelo algoritmo.

Com isso foi possível avaliar os 51 casos pré-selecionados visando validar o IFFN e a taxa de detecção dos sistemas. A aplicação dos limiares P15, P17, P20, P25 e P30, mostrou que o P17 foi o mais adequado na caracterização das FFs, embora o P15 tenha detectado todos os casos, no entanto com o aumento no período de análise ele detectava casos irreais. Em relação ao IFFN dos 51 casos, concluiu-se que 21 casos registraram intensidade máxima e destes 21 casos, somente quatro casos tiveram a relação positiva entre a intensidade máxima e maior taxa de detecção, demais casos não necessariamente um valor de índice alto está relacionado com a maior área de atuação do sistema.

Na quarta etapa determinou-se uma climatologia dos padrões de deslocamento e intensidade das frentes frias detectadas pelo algoritmo no cone sul da América do Sul. Com a definição do melhor limiar de classificação fez-se um estudo de comparação entre as FFs detectadas pelo algoritmo e as contidas no Boletim Climanálise para validação do método automático. Este estudo abrangeu o período de 1996 a 2013, disponibilidade do Boletim Climanálise, e foi denominado de método observacional (MOBS) e Método Climanálise (MCLN). Na sequência, este estudo foi estendido para todo o período de 1991 a 2020 visando a obtenção da climatologia mensal e sazonal da passagem das FFs nas 10 áreas delimitadas. Ainda nesta etapa, foi necessário desenvolver um código automático que lesse as saídas do algoritmo para a contagem das FFs, devido que o MOBS aplicado na contagem das FFs detectadas nos 30 anos de dados, não se mostrou eficaz pela demora na realização da análise.

As FFs detectadas pelo algoritmo foram contabilizadas pelo MOBJ (contagem automática) e MOBS e a comparação entre os dois métodos mostra

que a climatologia mensal automática das FFs se aproximou da climatologia feita com o MOBS, considerando a condição de que cada sistema atuasse em cinco áreas (ALs ou ACs) e no mínimo em 2 horários sinóticos diferentes. A validação das FFs detectadas pelo algoritmo (MOBJ e MOBS) foi feita por meio da catalogação dos sistemas pelo boletim climanálise (MCLN) com análises, de variabilidade anual, sazonal e mensal. E a comparação dos sistemas pela variabilidade anual pelos três métodos mostrou que o número total de FF detectados pelos MOBJ e MOBS foi de 1329 e 1294 sistemas, no período de 18 anos com uma média anual de 72 e 74, respectivamente. Pelo MCLN foram registrados um total de 1280 sistemas com uma média anual de 71 FFs.

Na quinta e última etapa realizou-se a classificação do impacto (baixo, médio ou alto) da precipitação associada à atuação das frentes frias por meio da técnica dos percentis e elaborou-se um modelo conceitual baseado nos padrões de deslocamento das frentes frias sobre as regiões litorâneas e continentais (Figura 31).

Na comparação da frequência sazonal de FFs entre os três métodos, observou-se que no verão, os métodos apresentam uma maior diferença no número de sistemas. No outono, a diferença maior se dá entre o MCLN com 16 FFs e os outros dois métodos com 18. Ainda, como resultado, obtém-se que estação inverno (JJA) é a estação com maior número de sistemas nos métodos analisados, seguida da estação primavera e os três métodos registraram a mesma média sazonal nestas estações. E a comparação mensal no número médio de FFs mostrou a diferença de 1 sistema frontal entre os métodos na maioria dos meses. Ainda, observou-se que a maior frequência mensal de FFs ocorre entre junho e novembro, meses que pertencem ao inverno e primavera. Tais resultados mostram que o MOBJ se apresenta coerente em comparação com o MCLN, mesmo com aplicação de uma metodologia diferenciada.

A variabilidade anual das FFs detectadas pelo algoritmo nos 30 anos de análise tanto com o MOBJ quanto com o MOBS mostrou uma variação da passagem das FFs de 50 a 80 por ano ao longo da área de estudo. O resultado da climatologia sazonal no número médio de FFs mostrou que nas estações,

verão, outono e primavera os métodos MOBJ e MOBS apresentam uma pequena diferença no número dos sistemas. No inverno os dois métodos registram maior média no número de FFs dentre todas as estações. A Climatologia mensal das FFs detectadas indicou que o mês de fevereiro registrou menor número mensal de FF. Os meses com maior frequência mensal são julho e agosto em toda a climatologia.

As variabilidades sazonal e mensal do número de FFs e do valor do IFFN foram apresentadas para cada uma das dez áreas neste estudo. E a frequência sazonal de FFs mostrou que para todas as áreas, o inverno é a estação que mais ocorre sistemas frontais. Isso corrobora com estudos de Andrade, (2005), Reboita et al. (2009), Silva et al. (2014), os quais afirmam que no inverno os sistemas frontais conseguem avançar para latitudes mais baixas e longitudes mais a oeste comparadas às demais estações do ano. E isso é devido a existência de um maior contraste térmico separando as massas de ar, tal contraste faz com que estas massas cheguem até a Região Central do Brasil. Destaca-se a AC2, AC3, AL3 e AL4 que além da estação inverno também registram na primavera maior número de FF.

Referente ao IFFN médio sazonal de cada área, tem-se que na AL1, no verão, outono e primavera os sistemas são intensos e no inverno moderados. Na AC1, AL3 e AL4 em todas as estações as FFs possuem intensidade moderada. Na AC2 as FFs são intensas na primavera, nas demais estações os sistemas que ocorrem são moderados como na AC3 onde em todas as estações as FFs são de intensidade moderada. Na AL5 as FFs são moderadas, na AC5 são intensas na primavera e moderada nas demais estações, na AC4 as FFs são moderadas no inverno e primavera, e fracas no verão e outono.

A análise da variabilidade mensal no número médio de FFs e dos valores médios de IFFN para cada área delimitada mostrou que para as áreas AL1, AL3, AL4 o número máximo de FFs ocorre em julho e na AL2 em agosto, os sistemas que atuam em julho na AL1 e AL3 são menos intensos comparados ao mesmo mês na AL4. Nas AC1, AC2 e AC3 as FFs atuam em maior número nos meses de julho e setembro, e nestes meses na AC2 e AC3 o IFFN indica sistemas intensos

de atuação, já na AC1 sistemas mais intensos em setembro. Na AL5, AC4 e AC5, o número médio máximo de FFs ocorre nos meses de julho e agosto e são menos intensos na AL5 e AC5. Na AC4 em julho, os sistemas são menos intensos comparados a agosto.

O modelo conceitual baseado nas diversas análises das FFs neste estudo, e principalmente nos padrões de deslocamento dos sistemas sobre as regiões litorâneas e continentais é representado pela Figura 31. O método aplicado nesta pesquisa permitiu avaliar a formação, desenvolvimento e trajetória dos sistemas frontais ao longo das 10 áreas e nas variabilidades sazonal e mensal. A frontogênese das FFs classificadas neste trabalho como oceânicas ocorrem em torno de 45°S (JUSTI DA SILVA E SILVA DIAS , 2002; ANDRADE, 2005; REBOITA et al.,2009), elas influenciam tanto a AL1 quanto a AL2 e são FFs rápidas, porém intensas, e ainda ocorrem ao longo de todo o ano. Dos quatro dias analisados concluiu-se, que as FFs oceânicas se dissipam no final do dia inicial (dia -1) ou no máximo no segundo dia (dia 0) de análise, com frontólise ocorrendo sobre o oceano Atlântico.

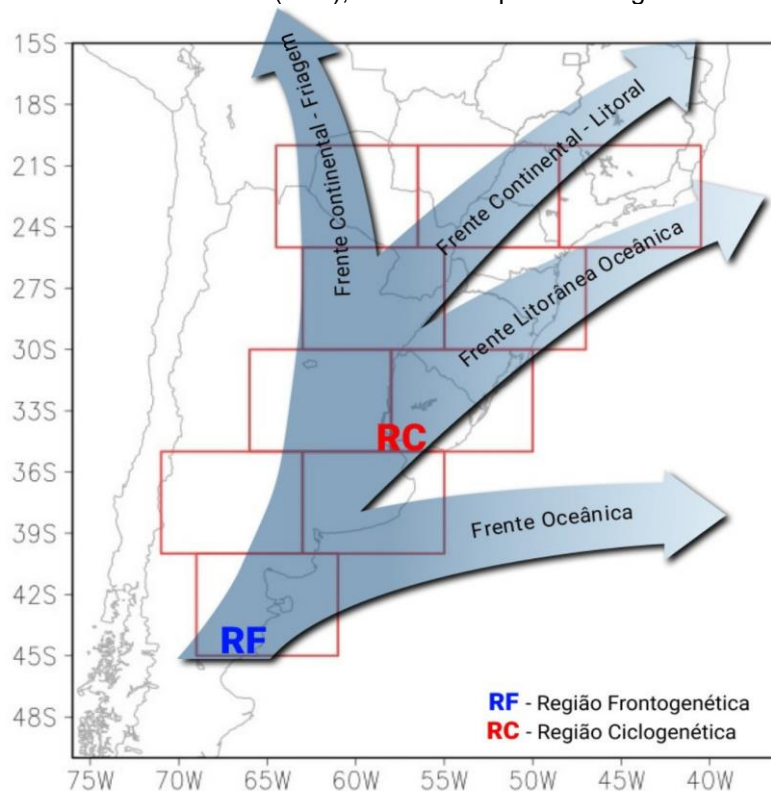
Sobre as FFs Litorâneas-oceânicas, muitas delas nascem na AL1 e se deslocam sobre o Sul do Brasil, onde chegam com menos intensidade e indo em direção ao oceano, onde ocorre a dissipação do sistema. No entanto, há casos de FFs Litorâneas-oceânicas que se formam entre a AL2 e AL3, região que engloba o centro-leste da Argentina e Uruguai, região também conhecida como umas das regiões ciclogênicas (RC) do Sul da AS, esta RC é mais ativa na estação inverno (HOSKINS e HODGES, 2005; REBOITA et al., 2009). Portanto, a ciclogênese frequente na costa do Uruguai favorece os sistemas frontais que se desenvolvem nesta região principalmente no inverno e isto está associado à uma maior instabilidade baroclínica nesta área, com fortes gradientes de temperatura e de umidade, além da presença do jato polar e subtropical.

As FFs Continentais - Litorâneas (FFCL) foram classificadas deste modo, devido que se formam sobre o continente, entre 30 e 35°S, e possuem uma trajetória inicial mais continental, passando sobre o sul do Paraguai, e parte dos

estados do sul e sudeste brasileiro. Algumas vezes estas FFCLs avançam até o sul da Bahia e se dissipam sobre o oceano.

As FFs Continentais (FFC) possuem duas regiões preferenciais de frontogênese, uma em torno de 45°S (RF) e outra em 35°S (RC). As FFCs que se formam na RF e avançam para latitudes mais baixas, passando pelas áreas continentais delimitadas neste estudo, possuem maior densidade comparada as FFs Litorâneas. As FFCs mais intensas possuem em sua retaguarda um anticiclone pós-frontal, o qual se move em direção ao norte atingindo estados como Mato Grosso, Roraima e Amazonas (HAMILTON e TARIFA, 1978; ESCOBAR et. al, 2019). Este anticiclone pós-frontal é responsável pela incursão de ar frio para latitudes menores e a ocorrência do fenômeno chamado de friagem. Este fenômeno ocorre no centro-oeste e norte do Brasil, principalmente entre os meses de maio a setembro, e causa uma queda acentuada da temperatura com duração de aproximadamente seis dias (Marengo et al., 1997; Oliveira et al., 2001).

Figura 31: Modelo conceitual das trajetórias das FFs sobre as áreas de estudos, sendo 5 áreas litorâneas (ALs) e 5 áreas continentais (ACs), delimitadas pelos retângulos em cor vermelha.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Por fim, conclui-se que a hipótese deste trabalho foi mostrada, visto que foi possível identificar os padrões de deslocamento e intensidade das FFs ao longo da área de estudo por meio de um algoritmo operacional. O Índice de Frente Fria desenvolvido foi eficaz e coerente, tanto na detecção, quanto na quantificação dos sistemas frontais. Além disso, obteve um desempenho satisfatório no quesito de indicar a intensidade dos sistemas conforme o avanço nas determinadas áreas de estudo. Os resultados obtidos, principalmente na frequência climatológica, foram similares a outros trabalhos que abordaram metodologia parecida. Portanto, o Índice de Frentes Frias se mostra como importante ferramenta a ser implantado em um centro operacional, servindo de suporte aos meteorologistas na previsão de FFs.

Sistemas meteorológicos de diferentes escalas temporais e espaciais como Frentes Frias, Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul, Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, Jato de Baixos Níveis, Zona de Convergência do Atlântico Sul, Jato de Altos Níveis, Vórtice Ciclônico de Altos Níveis, Sistema Convectivo de Mesoescala, Linhas de Instabilidades, Circulação de Brisas, tempestades tornádicas, entre outros, causam impactos ambientais nas regiões que atuam. Estes sistemas são os responsáveis por eventos extremos como chuvas intensas, estiagens, ventos fortes, ondas de frio e de calor que provocam impactos nas características físico-naturais do ambiente. As consequências ambientais geradas por episódios relacionados a chuva intensa, foco desta pesquisa, são recorrentes na região Sul do Brasil, especialmente em Santa Catarina. Os episódios extremos de chuva causam enchentes, alagamentos, inundações e deslizamentos de encostas afetando o ambiente, tanto na zona urbana, quanto na zona rural. Assim sendo, estudos sobre os sistemas meteorológicos e seu impacto no ambiente se tornam fundamentais. Nesse sentido, o IFFN desenvolvido neste trabalho é uma importante ferramenta para o monitoramento e previsão de sistemas frontais e análise de seus potenciais impactos.

De relevância e de suma importância o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na previsão do tempo e clima pois, o aumento da intensidade e frequência de eventos climáticos extremos tem colocado a população e economia global em constante ameaça. Associado a estes efeitos, a modificação do

ambiente se dá de forma natural, mas as variabilidades climáticas e a ação antrópica estão acelerando tal modificação, aumentando os riscos de desastres ambientais. O problema da falta de regularidade na expansão e da correta aposição da infraestrutura urbana fazem deflagrar negatividade de influência nos ecossistemas naturais tais como a escassez de áreas verdes, aumento de impermeabilização do solo, anormalidades nos cursos de rios, falta de uma rede de saneamento básico, entre outros problemas. Em especial, crescimento urbano desenfreado afeta diretamente na maneira que a cidade pode responder aos impactos ambientais devido a eventos climáticos severos.

Portanto, buscar responder a estes riscos com o máximo de resiliência é um desafio das cidades. Um planejamento adequado e gestão eficiente associado a uma previsão mais acurada sobre a formação, deslocamento, monitoramento e intensidade de sistemas meteorológicos como exemplo as frentes frias, pode auxiliar centros de previsão bem como órgãos de proteção civil, a prever os sistemas de médio e alto impacto com maior antecedência e servindo de subsídios para a criação de planos de contingência de potenciais eventos extremos relacionados a passagem das frentes frias no Cone Sul da AS.

Segue recomendações para Trabalhos Futuros:

- Monitorar e validar o algoritmo em operação na previsão dos sistemas frontais.
- Realizar um estudo mais detalhado da evolução das FFs sob influência de outro sistemas atuantes como exemplos em casos de ocorrência SCMs, de ZCAS e de JBN.
- Aumentar o levantamento de casos de FF que causaram precipitação intensa para seguir na validação do algoritmo.
- Estender a climatologia para a costa do Pacífico a fim de avaliar os sistemas que cruzam os Andes.
- Verificar a influência do ENOS sobre as Frentes Frias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANABOR, Vagner. **Análise descritiva dos sistemas convectivos de escala meso- α através das imagens de satélite GOES-8**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.
- ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -INPE - São José dos Campos, 185 p, 2005.
- ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS: 1991 a 2012 / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 168 p. 2013.
- Barcellos P.C. , 2009: Precipitações intensas na cidade do Rio de Janeiro: Probabilidade e Previsibilidade. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, p. 186, 2009.
- BERRY, Gareth; REEDER, Michael J.; JAKOB, Christian. A global climatology of atmospheric fronts. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 4, 2011.
- BONNET, Suzanna Maria; DERECZYNSKI, Claudine Pereira; NUNES, Ana. Caracterização sinótica e climatológica de eventos de chuva pós-frontal no Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 547-557, 2018.
- BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. **Geofysiske Publikationer**, v. 1, n. 2, p. 1-8, 1919.
- BJERKNES, J. e SOLBERG H., 1922: Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation. **Geof. Publ.**, **3(1)**, 3-18.
- BRASIL; MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Instrução Normativa nº 36, de 04 de dezembro de 2020. Estabelece procedimentos e critérios para a decretação de situação de emergência ou estado de calamidade pública pelos municípios, estados e pelo distrito federal, e para o reconhecimento federal das situações de anormalidade decretadas pelos entes federativos e dá outras providências. Diário Oficial da União, 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-36-de-4-de-dezembro-de-2020-292423788>. Acesso em: 10 de abril de 2021.
- BROOKS, H. E.; DOSWELL III, C. A.; KAY, M. P. Climatological estimates of local daily tornado probability for the United States. **Weather and Forecasting**, v. 18, n. 2, p. 626–640, 2003.
- BROWING, K. A., 1985. Conceptual Models of Precipitation Systems. **Meteorological Magazine, Bracknell**. Eng. 114(1359):293-319.

CAMPOS, C. R. J. EICHHOLZ, C. W., Características físicas dos sistemas convectivos de mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008. **Revista Brasileira de Geofísica**. v29 n.2, 2011.

CARDOZO, Amanda Balbino et al. CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS NA AMÉRICA DO SUL E SUA RELAÇÃO COM O MODO ANULAR SUL (CLIMATOLOGY OF COLD FRONTS OVER SOUTH AMERICA AND ITS RELATION WITH THE SOUTHERN ANNULAR MODE). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015.

CARDOSO, Leticia Karyne da Silva. **Aspectos climáticos das posições da zona de convergência intertropical e dos anticiclones semipermanentes do Atlântico Sul e do Pacífico Sul: relações com regimes de chuva no nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2019.

CARDOSO, C. de S.; QUADRO, Mário F. L. de; BONETTI, C.. Persistência e Abrangência dos Eventos Extremos de Precipitação no Sul do Brasil: Variabilidade Espacial e Padrões Atmosféricos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n. AHEAD, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786352031>.

CARVALHO, L. M. V; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, v. 17, p. 88–108, 2004.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Parte I - **Sistemas meteorológicos que afetam o tempo na América do Sul: Frentes frias sobre o Brasil**. In: CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque; FERREIRA, Nelson Jesus; SILVA, Maria Gertrudes Alvarez Justi da; SILVA DIAS, Maria Assunção Faus da Silva dias (Org.). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 135-147.

CHARNEY, J. G., 1947: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. **J. Meteor.**, **4**, 135–162.

CLARKE, Leo C.; RENARD, Robert J. The US Navy numerical frontal analysis scheme: Further development and a limited evaluation. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 5, n. 6, p. 764-777, 1966.

Climanálise: **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. São José dos Campos: INPE, 1996-2013. Mensal. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/>. Acesso em 19/04/2022.

DARE, Richard A.; MCBRIDE, John L. The threshold sea surface temperature condition for tropical cyclogenesis. **Journal of climate**, v. 24, n. 17, p. 4570-4576, 2011.

DEGOLA, T.S.D. **Impactos e Variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre o Brasil no Clima Presente e em Cenários Futuros**

Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 92 p., 2013.

DERECZYNSKI, C.P.; OLIVEIRA, J.S.; MACHADO, C.O. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 24-38, 2009.

Decker, Mark, Michael A. Brunke, Zhuo Wang, Koichi Sakaguchi, Xubin Zeng, Michael G. Bosilovich, 2012: Evaluation of the Reanalysis Products from GSFC, NCEP, and ECMWF Using Flux Tower Observations **J. Climate**, **25**, 1916-1944 (DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00004.1).

DE CAMPOS, Cláudia Rejane Jacondino; DOS SANTOS, José Guilherme Martins. Climatologia sazonal dos Jatos de Baixos Níveis na região metropolitana de Porto Alegre, no período de 1989 a 2003, utilizando dados de radiossondagens. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 30, n. 2, p. 82-91, 2007.

DYER, R. Rastros de Tornados no Sudoeste do Brasil, Leste do Paraguai e Nordeste da Argentina. **SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, p. 602, 1986.

DOSWELL, C. A. A review for forecasters on the application of hodographs to forecasting severe thunderstorms. **Natl. Wea. Dig**, v. 16, n. 1, p. 2-16, 1991.

DURKEE, Joshua D.; MOTE, Thomas L. A climatology of warm-season mesoscale convective complexes in subtropical South America. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 30, n. 3, p. 418-431, 2010.

DUTRA, Livia Márcia Mosso. **Ciclones subtropicais sobre o Atlântico Sul: análise da estrutura dinâmica de eventos**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ESCOBAR, J. C. G.; SELUCHI, E. S.; ANDRADE, K. Classificação Sinótica de Frentes Frias Associadas a Chuvas Extremas no Leste de Santa Catarina (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**. V. 31, n. 4, p. 649-661, Fev. 2016.

ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan; VAZ, João Caetano Mancini; REBOITA, Michelle Simões. Circulação Atmosférica em Superfície Associada às Friagens no Centro-Oeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ**, v. 42, p. 241-254, 2019.

FERREIRA, V; ANABOR, V. Climatologia De Sistemas Convectivos De Mesoescala Ocorridos Sobre a América Do Sul No Período De 2005 a 2006. **Ciência e Natura** vol. 37, n. 1, p. 17-21, 2015.

FEDOROVA, N. **Meteorologia sinótica**, Pelotas: UFPEL, 1999, v.1.

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.

GALVIN, J.F.P. The weather and climate of the tropics: Part 7 - Tropical revolving storms. **Weather**, v. 63, p. 327-333, 2008.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over south america. **Montly Weather Review**, v. 119, p. 1293 - 1302, 1991.

GUIA, CVF. **Análises das características sinóticas das trajetórias dos ciclones extratropicais que atuam na América do Sul e Vizinhanças**. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

GOZZO, L.F.; DA ROCHA, R.P.; REBOITA, M.S.; SUGAHARA, S. Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic: Climatological Aspects and Case Study. **Journal of Climate**, v. 27, p. 8543-8562, 2014.

GRAY, W.M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. **Monthly Weather Review**, v. 96, p. 669-700, 1968.

HAKIM, G. J. **Cyclogenesis**. Encyclopedia of Atmospheric Science. Edited by James R. Holton, Judith A. Curry and John A. Pyle, Academic Press, San Diego, v. 6, p. 589-594, 2003.

HAAS, R. 2002. **Simulações da chuva orográfica associada a um ciclone extratropical, no Litoral Sul do Brasil**, Tese de Doutorado do DCA – IAG – USP, São Paulo – SP, dezembro de 2002.

HAMILTON, M. G.; TARIFA, J. R. Synoptic aspects of a polar outbreak leading to frost in tropical Brazil, July, 1972. **Mon. Weather Rev.**, v.

HART, R. E. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. **Monthly Weather Review**, v. 131, p. 585–616, 2003.

HASTENRATH, S. Climate and circulation of the tropics. New York Atmospheric Sciences Library, 1985. 455 p

HEWSON, T. D., 1998: Objective fronts. **Meteor. Appl.**, 5, 37–65.

HOUZE Jr, R. A. 1993. **Mesoscale convective systems**. In: HOUZE Jr, R. A. (ed.) Cloud Dynamics. Academic Press, Inc., v. 53, p. 334-404.

HOSKINS, B.J.; HODGES, K.I. A new perspective on southern hemisphere storm track. **Journal of Climate**, v. 18, p. 4108- 4129, 2005.

ITO, E. R. K.; AMBRIZZI, T. Climatologia da posição da alta subtropical do atlântico sul para os meses de inverno. In: **XI CONGRESSO LATINOAMERICANO E IBERICO DE METEOROLOGIA, 2000**, Rio de Janeiro. A Meteorologia Brasileira além do ano 2000. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. p. 860-865.

JUSTI DA SILVA, M. G. A; SILVA DIAS, M. A. F. A Frequência de Fenômenos Meteorológicos na América do Sul: uma Climatologia. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002**, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: SBMET, 2002.

KOUSKY, V. E. Frontal Influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, n. 107, pp. 1140-1153, 1979.

KOUSKY, VERNON E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, n. 1, p. 217-231, 1988.

KANNENBERG, C. **UMA VISÃO AMPLIADA SOBRE OS JATOS DE BAIXOS NÍVEIS NA AMÉRICA DO SUL**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, Santa Maria, 2019.

MACHADO, L. A. T., e W. B. ROSSOW. Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters. **Mon. Wea. Rev.**, 121, 3234–3260, 1993.

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 61, 1374– 1387, 1980.

MARENGO, J. A. et al. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2261–2280, 2004a.

MARENGO, J. A. & Soares, W. R.. Episódios de jatos de baixos níveis ao leste dos Andes durante 13-19 de abril de 1999. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 17 (1): 35-52, 2002b.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C.; CULF, A. D. Climatic impacts of “friagens” in forested and deforested areas of the Amazon basin. **J. Appl. Meteorol.**, v. 36, n. 11, p. 1553-1566, 1997c.

MARKS, FRANK D. 2003. State of the Science: Radar View of Tropical Cyclones. **Meteorological Monographs** 3- - 33.

MAIELLO, I., FERRETTI, R., GENTILE, S., MONTOPOLI, M., PICCIOTTI, E., MARZANO, F. S., and FACCANLI, C.: Impact of radar data assimilation for the simulation of a heavy rainfall case in central Italy using WRF–3DVAR, **Atmos. Meas. Tech.**, 7, 2919-2935, <https://doi.org/10.5194/amt-7-2919-2014>, 2014.

MENDES, D. **Regimes de Circulação no Atlântico Sul e sua relação com a localização e intensidade de sistemas activos e com o balanço de vapor na região.** 155 p. Tese de Doutorado em Física – Meteorologia. Universidade de Lisboa, Lisboa, 2006.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Climatologia: Noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficinas de Textos, 2007.

MORAIS, Marcos Antônio de; CASTRO, Wagner Antonio Chiba de; TUNDISI, José Galizia. Climatologia de frentes frias sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), sua influência na limnologia dos reservatórios de abastecimento de água. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 205-217, 2010.

Müller, G. V., and G. J. Berri, 2007: Atmospheric Circulation Associated with Persistent Generalized Frosts in Central-Southern South America. **Mon. Wea. Rev.**, 135, No. 4, pages 1268–1289.

Müller, G. V., and T. Ambrizzi, 2007: Teleconnection Patterns and Rossby Wave Propagation Associated to Generalized Frosts over Southern South America. **Clim. Dyn.**, 29, No. 6, 633-645.

MMA e GIZ. Relatório produto 2: revisão bibliográfica, com foco na Região Sul, referente aos eventos meteorológicos causadores de danos e prejuízos às linhas de transmissão da Eletrosul (LT's) e ao Porto de Itajaí. **Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI)**. Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Brasília, DF, 2018.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.1, 121-140, 2005.

NASCIMENTO, E. L. **Noções Básicas sobre Tempestades**. ReVOT: Rede Voluntária de Observadores de Tempestade, p. 85, 2010.

NASA. NASA Facts: TRMM Instruments. Disponível em: http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/ceres.html. Acesso em julho de 2015

NERY, Jonas Teixeira. Dinâmica climática da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia**. 1986. 134 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1986.

Oliveira, P.J.; Kruijt, B.; Randow, C.V.; Manzi, A.O.; Waterloo, M. 2001. The Friagem Influence on CO₂ Fluxes in a Forest in Rondonia. In: **Global Change Open Science Conference: Challenges of a Changing Earth**, Book of Abstracts, Amsterdam,

Netherlands, p85.

OLIVEIRA, M. I.; NASCIMENTO, E. L.; KANNENBERG, C. A new look at the identification of low-level jets in south america. **Mon. Wea. Rev.**, 2018.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v 56 n.5, p. 527-530, 1975.

PENNA, A. C. **Avaliação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais com base em Cartas Sinóticas e Método Objetivo**. 2013.51 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Itajubá, 2013.

PEZZI, Luciano P.; ROSA, Marcelo B.; BATISTA, Nadja NM. A Corrente de Jato sobre a América do Sul. **Boletim Climanálise. CPTEC-Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Cachoeira Paulista-SP**, 1996.

PINKAYAN, S., 1966: Conditional probabilities of occurrence of wet and dry years over a large continental area. Boulder-CO: Colorado State University, Hydrology Papers, 12.

Polifke da Silva, F. & Justi da Silva, M.G.A. 2010. Chuvas Severas no Município do Rio do Janeiro: Simulação numérica dos casos de 2007. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, Anais, Belém – PA.

QUADRO M.F.L. **Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul ZCAS sobre a América do Sul**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE - São José dos Campos- SP, 1994.

QUADRO, M.F.L. **Estudo de Vórtices Ciclônicos de Mesoescala associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul. 2012. 141 f. Tese (Doutorado em Meteorologia)** - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RIEHLI, H., 1969. Jet Streams of the Atmosphere. **Medical Opinion & Review (September)**, 33-50.

RIFE, Daran L. et al. Global distribution and characteristics of diurnally varying low-level jets. **Journal of Climate**, v. 23, n. 19, p. 5041-5064, 2010.

REBOITA, M.S.; IWABE, C.; DA ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Análise de um ciclone semi-estacionário na Costa Sul do Brasil associado a bloqueio atmosférico: o Evento de 02 a 06 Maio de 2008. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24,n.4, p. 407-422, 2009.

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**, 25(2):185-204, 2010.

REBOITA, M; KRUSCHE, N; AMBRIZZI, T; ROCHA, R. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terra e Didática**, Campinas, v. 8, p. 34-50, 2012.

REBOITA, M.S.; DIAS PINTO, J.R.; DUTRA, L.M.M.; DA ROCHA, R.P. Synoptic Analysis of Subtropical Cyclones over the South Atlantic Ocean. In: **PASI on Atmospheric Processes in Latin America and the Caribbean: Observations, Analysis, and Impacts**. 27 de maio a 07 de junho de 2013, Cartagena, Colômbia.

REBOITA, Michelle Simões et al. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I-Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 171-186, 2017.

RENARD, Robert J.; CLARKE, Leo C. Experiments in numerical objective frontal analysis. **Monthly Weather Review**, v. 93, n. 9, p. 547-556, 1965.

ROCHA, F. P.; ARAVÉQUIA, J. A.; RIBEIRO, B. Z. Estudo de ciclones e de padrões de circulação atmosférica no oceano Atlântico Sul próximo à costa das Regiões Sul e Sudeste do Brasil usando dados da reanálise do ERA-Interim. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 141-156, 2016.

RODRIGUES, Maria Laura Guimarães; FRANCO, Davide; SUGAHARA, Shigetoshi. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 2, p. 135-151, 2004.

RODRIGUES, Maria Laura G.; YNOUE, R.; ALVES, Maikon Passos. Episódios de chuva intensa na região da grande Florianópolis/SC: análise preliminar dos eventos e caracterização sinótica. **Fourth Simp. Int. de Climatologia**, 2011.

RODRIGUES, Maria Laura Guimarães. **EVENTOS DE CHUVA OROGRÁFICA EM SANTA CATARINA: CLIMATOLOGIA E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**. 2015. 113 f. Tese Doutorado - Curso de Meteorologia, Departamento Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

ROZANTE, José Roberto et al. Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and forecasting**, v. 25, n. 3, p. 885-894, 2010.

SAHA, Suranjana, et. al., 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 91(8), 1015-1057 (DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1).

SAHA, Suranjana, at. al., 2014: The NCEP Climate Forecast System Version 2. **J. Climate**, 27, 2185-2208.

SAULO J. Ruiz e Y. G. Skabar, 2007. Synergisms between the Low-Level Jet and Organized Convection at Its Exit Region. **Mon. Wea. Ver.**, 135 1310-1326

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F. Climatological Lower Tropospheric Frontogenesis in the Midlatitudes due to Horizontal Deformation and Divergence. **Monthly Weather Review**, 117, n. 6, p. 1355-1364, 1989

SATYAMURTY, Prakki; NOBRE, Carlos A.; SILVA DIAS, Pedro L. South America. In: Meteorology of the southern hemisphere. **American Meteorological Society**, Boston, MA, 1998. p. 119-139.

SANTOS, Caio F. dos. **A Enchente em Itajaí (SC): Relatos, Percepções e Memórias**. Dissertação de Mestrado Profissional em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental, FAED – UDESC, 2010.

SILVA DIAS M.A.F. Sistemas de Mesoescala e Previsão de Tempo a Curto Prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2:133-150, 1987.

SILVA DIAS, M.A. 1996. Complexos convectivos de mesoescala sobre a região sul do Brasil. In: **Climanálise Especial: Edição Comemorativa de 10 anos**, Cachoeira Paulista, MCT/INPE/ CPTEC, p.173-179

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 Geadas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.14, n. 10, p.232-235, 2014.

SILVA, J. P.R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL EM CAMPOS ATMOSFÉRICOS RECENTES. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SIMMONDS, Ian; KEAY, Kevin; TRISTRAM BYE, John Arthur. Identification and climatology of Southern Hemisphere mobile fronts in a modern reanalysis. **Journal of Climate**, v. 25, n. 6, p. 1945-1962, 2012.

SUTCLIFFE, R.C. A contribution to the problem of development. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 73, p. 370- 383, 1947.

SCHEMM, Sebastian; RUDEVA, Irina; SIMMONDS, Ian. Extratropical fronts in the lower troposphere—global perspectives obtained from two automated methods. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 690, p. 1686-1698, 2015.

STENSRUD, D. J. Importance of low-level jets to climate: A review. **J. Climate**, v. 9, p. 1698-1711, 1996.

TEIXEIRA, M.S.; SATYAMURTY, P. Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in southern Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 2, p. 598-617, 2007.

TEIXEIRA, Mateus da Silva; SATYAMURTY, Prakki. Trends in the frequency of intense precipitation events in southern and southeastern Brazil during 1960–2004. **Journal of climate**, v. 24, n. 7, p. 1913-1921, 2011.

VELASCO, I. Y.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v.92, 9591–9613. 1987

VERA, C. et al. The south american low-level jet experiment. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 87, p. 6377, 2006.

WITEMAN, C. D.; BIAN, X.; ZHONG, S. Low-Level Jet Climatology from Enhanced Rawinsonde Observations at a Site in the Southern Great Plains. **Journal of Applied Meteorology**, v. 36, n. 10, p. 1363–1376, 1997.

WREGE, M. et al. **Atlas climático da região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Brasília - DF: Embrapa, 2012.

WMO. World Meteorological Organization. 2022. Environment. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment>>, acesso em maio de 2022.

ZIMMERMANN, Diego Fernando Rodriguez; YNOUE, Rita Yuri. **Subtropical jet climatology over south america: climatologia do jato subtropical na américa do sul**. 2017. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

APÊNDICE A - LISTA DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS (EMAs) UTILIZADAS

Informações como código, município, localização geográfica e início de operação das estações meteorológicas utilizadas neste estudo.

CÓDIGO DA EMA	MUNICÍPIO	LATITUDE (S)	LONGITUDE (W)	ALTITUDE (m)	INÍCIO DE OPERAÇÃO
A867	Araranguá	-28,931353	-49,49792	2	2008-09-27
A845	Bom Jardim da Serra	-28,126992	-49,47961	1790.38	2007-06-16
A859	Caçador	-26,819156	-50,98552	944.26	2008-03-18
A860	Curitibanos	-27,288624	-50,604283	978.1	2008-03-27
A848	Dionísio Cerqueira	-26,286562	-53,633114	807.54	2008-05-30
A806	Florianópolis	-27,60253	-48,620096	4.87	2003-01-21
A817	Indaial	-26,913704	-49,267978	72.24	2006-07-01
A868	Itajaí	-26,950924	-48,762031	9.76	2010-06-23
A851	Itapoá	-26,081303	-48,641774	6.18	2007-06-05
A863	Ituporanga	-27,41841	-49,646874	479.79	2008-03-03
A841	Joaçaba	-27,169268	-51,558963	767.63	2007-09-19
A865	Lages	-27,802228	-50,335457	952.7	2014-11-05
A866	Laguna	-28,604414	-48,813313	34.36	2008-05-31
A864	Major Vieira	-26,393664	-50,363211	799.58	2009-02-08
A816	Novo Horizonte	-26,406499	-52,850366	943.57	2008-09-19
A870	Rancho Queimado	-27,678507	-49,042027	881	2016-05-30
A861	Rio do Campo	-26,937526	-50,145445	591.67	2008-03-09
A862	Rio Negrinho	-26,248411	-49,580624	856.89	2008-03-21
A857	São Miguel do Oeste	-26,776699	-53,504541	654.51	2008-03-11
A815	São Joaquim	-28,27564	-49,934617	1400.06	2008-04-11
A814	Urussanga	-28,532557	-49,315205	40.56	2008-05-28
A858	Xanxerê	-26,938666	-52,39809	878.74	2008-03-14

APÊNDICE B - PRODUTO DE PRECIPITAÇÃO MERGE DO CPTEC/INPE

O Merge - CPTEC é resultado da combinação de dados de observação de superfície com estimativa de precipitação por satélites sobre o continente da América do Sul (ROZANTE et al., 2010). Este produto foi criado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para a geração dos dados do Merge, o CPTEC utilizava as estimativas de precipitação do sensor Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA), que eram produzidas em uma resolução temporal de 3 horas e espacial de 0,25°. As saídas do MERGE são disponibilizadas a partir do ano de 1998, em formato binário com resolução de 20 km (0.1°). As saídas são diárias com cobertura geográfica de 82.8° W-34° W a 52.2°S-12.2°N. No entanto, no ano de 2015 o sensor TRMM foi desativado (NASA, 2015) e o CPTEC começou a gerar o Merge com os dados do GPM (Global Precipitation Measurement) e IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM), sensor lançado em 2014 (NASA, 2014). Os dados do Merge com GPM-IMERG são gerados tanto diários (das 12:00 às 12:00 UTC) quanto horários, cobrindo a América do Sul e oceanos adjacentes (90°W-26°W e 57°S06°N). No sítio eletrônico (<http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/io/produtos/MERGE/>) é possível o acesso aos dados e mais informações sobre o produto.

APÊNDICE C - LISTA DE EPISÓDIOS DE FRENTES FRIAS DETECTADAS PELO IFF EM 1991

Casos de Frentes Frias detectadas pelo algoritmo com sua respectiva hora inicial e final, data inicial e final, número de horas de atuação da FF, taxa de detecção mínima, média e máxima, Índice de Frente Fria Normalizado (IFFN) médio, Índice de Frente Fria (IFF) máximo, intensidade por categorias (fraco, moderado ou forte) e as áreas de passagem das FFs.

Hora e Data Inicial	Hora e Data Final	Num. Horas	TxMin (%)	TxMed (%)	TxMax (%)	IFFN Med	IFF Max	Intensidade Categoria	Áreas
00Z - 21/01/1991	00Z- 22/01/1991	24	17.6	27.1	39.6	6.9	27.8	MODERADO	AC2, AC3, AL1, AL2, AL3
18Z- 24/01/1991	18Z- 25/01/1991	24	17.1	20.7	23.5	6.0	18.7	MODERADO	AC3, AC5, AL3, AL4
18Z- 04/02/1991	00Z- 05/02/1991	6	17.1	26.7	43.9	5.6	20.2	MODERADO	AC2, AC3, AL2, AL3
12Z- 05/02/1991	18Z- 05/02/1991	6	17.1	27.3	39.6	5.8	9.7	MODERADO	AC3, AC4, AC5, AL3, AL4
00Z- 10/02/1991	18Z- 10/02/1991	18	19.3	25.8	36.9	8.9	21.1	FORTE	AC1, AC2, AL1, AL2
06Z- 12/02/1991	18Z- 12/02/1991	12	23.0	34.5	50.8	6.3	21.5	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC4, AL1, AL2, AL4
00Z- 16/02/1991	06Z- 17/02/1991	30	17.6	25.3	32.1	9.1	38.6	FORTE	AC1, AC2, AL1, AL2
06Z- 21/02/1991	18Z- 23/02/1991	60	17.6	34.1	67.9	5.9	24.4	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4, AL5
00Z- 27/02/1991	00Z- 28/02/1991	24	18.7	27.5	36.9	7.0	33.9	MODERADO	AC1, AC2, AL1, AL2
12Z- 02/03/1991	18Z- 04/03/1991	54	17.6	24.2	41.2	3.9	13.6	FRACO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4
18Z- 08/03/1991	18Z- 09/03/1991	24	17.1	28.8	43.3	5.7	18.6	MODERADO	AC2, AC3, AC4, AL1, AL2, AL3
06Z- 12/03/1991	18Z- 12/03/1991	12	17.1	25.8	63.1	5.7	16.4	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AL1, AL2, AL3

18Z- 19/03/1991	00Z- 21/03/1991	30	17.1	22.5	38.0	7.0	18.5	MODERADO	AC2, AC3, AC5, AL1, AL2, AL3, AL5
00Z- 24/03/1991	18Z- 24/03/1991	18	19.3	36.9	51.9	6.5	13.6	MODERADO	AC2, AC3, AC5, AL1, AL2, AL3
06Z- 25/03/1991	18Z- 25/03/1991	12	17.1	25.9	41.2	5.4	11.7	MODERADO	AC1, AC3, AC4, AC5, AL3, AL4
18Z- 30/03/1991	06Z- 01/04/1991	36	17.6	29.7	52.9	4.8	21.4	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL2, AL3, AL4
18Z- 01/04/1991	00Z- 03/04/1991	30	17.6	25.8	39.0	5.9	11.6	MODERADO	AC1, AC2, AL2, AL3, AL5
12Z- 03/04/1991	06Z- 04/04/1991	18	19.3	24.2	38.5	8.7	9.5	FORTE	AC3, AC5, AL3, AL4
18Z- 09/04/1991	18Z- 10/04/1991	24	19.8	29.2	44.4	6.6	11.9	MODERADO	AC2, AL2, AL3
00Z- 12/04/1991	18Z- 12/04/1991	18	18.2	28.1	34.8	5.5	11.2	MODERADO	AC2, AL2, AL3
00Z- 17/04/1991	18Z- 18/04/1991	42	17.1	28.8	48.1	7.6	25.7	FORTE	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4
18Z- 22/04/1991	06Z- 24/04/1991	36	20.9	33.7	61.0	8.4	10.8	FORTE	AC2, AC3, AC5, AL2, AL3
06Z- 03/05/1991	06Z- 04/05/1991	24	20.9	32.3	58.8	8.1	12.7	FORTE	AC2, AC3, AL1, AL2, AL3
18Z- 04/05/1991	18Z- 05/05/1991	24	18.7	27.4	34.2	6.1	21.4	MODERADO	AC3, AC4, AC5, AL4, AL5
12Z- 12/05/1991	00Z- 13/05/1991	12	17.1	20.9	35.3	6.4	11.4	MODERADO	AC2, AC3, AC5
12Z- 22/05/1991	18Z- 23/05/1991	30	18.2	23.4	29.9	4.7	14.9	MODERADO	AC4, AL3, AL4, AL5
12Z- 28/05/1991	12Z- 30/05/1991	48	17.1	23.1	31.6	6.5	25.8	MODERADO	AC1, AC2, AL1, AL2, AL3
00Z- 05/06/1991	00Z- 07/06/1991	48	17.1	24.8	39.6	5.8	24.2	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4
06Z- 11/06/1991	18Z- 12/06/1991	36	19.3	30.9	48.7	3.7	20.7	FRACO	AC2, AC3, AL1, AL2, AL3, AL4, AL5

00Z- 14/06/1991	00Z- 15/06/1991	24	18.2	31.9	50.8	3.0	16.4	FRACO	AC2, AL1, AL2, AL3
06Z- 20/06/1991	06Z- 21/06/1991	24	18.2	29.8	43.9	4.1	24.8	FRACO	AC2, AC3, AC5, AL3, AL4
18Z- 21/06/1991	18Z- 23/06/1991	48	18.2	28.3	42.2	5.3	20.8	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL4, AL5
06Z- 26/06/1991	00Z- 28/06/1991	42	17.1	24.5	55.6	6.5	20.4	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC5, AL1, AL2, AL3
12Z- 01/07/1991	00Z- 04/07/1991	60	17.1	27.8	58.3	3.5	9.3	FRACO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4, AL5
00Z- 09/07/1991	18Z- 11/07/1991	66	17.1	26.7	57.8	7.3	17.3	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4, AL5
18Z- 19/07/1991	12Z- 20/07/1991	18	18.7	28.6	42.8	9.1	10.1	FORTE	AC1, AC2, AC3, AL2
18Z- 27/07/1991	06Z- 28/07/1991	12	18.7	21.6	29.9	5.8	8.9	MODERADO	AC1, AL1, AL2
18Z- 30/07/1991	12Z- 02/08/1991	66	17.1	28.2	60.4	7.7	32.9	FORTE	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4, AL5
18Z- 04/08/1991	06Z- 05/08/1991	12	17.1	26.6	48.1	4.3	4.7	FRACO	AC2, AC3, AC5
12Z- 07/08/1991	06Z- 08/08/1991	18	19.3	25.8	36.9	2.2	9.8	FRACO	AC1, AC2, AC3, AC5
00Z- 10/08/1991	18Z- 10/08/1991	18	17.1	19.3	23.5	5.3	11.7	MODERADO	AC4, AL3, AL4
18Z- 19/08/1991	12Z- 20/08/1991	18	17.6	27.7	51.9	4.6	16.0	MODERADO	AC1, AC2, AL1, AL2
06Z-2 2/08/1991	12Z- 23/08/1991	30	17.1	28.2	40.6	6.3	12.9	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AL1, AL2
18Z- 24/08/1991	00Z- 26/08/1991	30	18.2	24.2	37.4	6.8	9.4	MODERADO	AC1, AC2, AL2
12Z- 29/08/1991	18Z- 30/08/1991	30	20.3	38.5	63.1	4.7	25.1	MODERADO	AC1, AC2, AL1, AL2, AL3
06Z- 31/08/1991	18Z- 31/08/1991	12	17.6	25.1	41.7	5.0	13.1	MODERADO	AC3, AC5, AL4, AL5

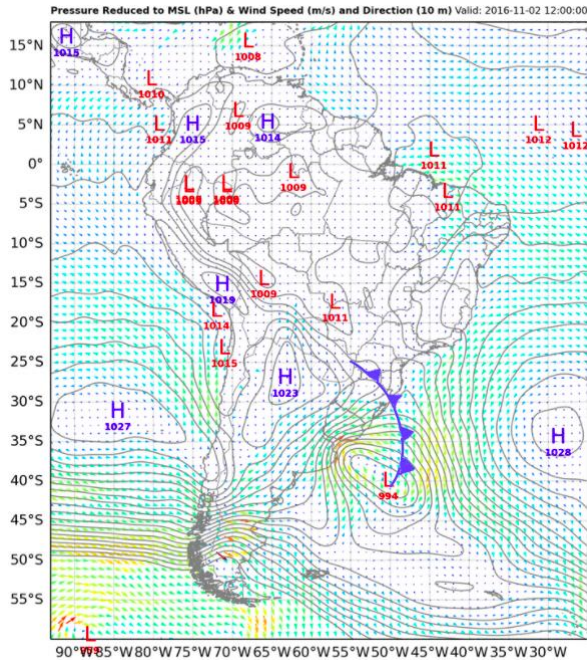
18Z- 05/09/1991	00Z- 07/09/1991	30	19.3	23.5	30.5	8.7	34.2	FORTE	AC2, AC3, AC5, AL1, AL2
00Z- 13/09/1991	18Z- 14/09/1991	42	17.6	27.3	37.4	8.3	32.3	FORTE	AC1, AC2, AC3, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4
00Z- 17/09/1991	18Z- 19/09/1991	66	17.1	24.3	40.6	5.3	21.5	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4, AL5
12Z- 21/09/1991	00Z- 23/09/1991	36	17.1	28.2	46.0	6.3	18.5	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4
00Z- 27/09/1991	12Z- 28/09/1991	36	18.2	30.0	48.1	6.4	28.3	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC5, AL1, AL2, AL3
18Z- 29/09/1991	00Z- 02/10/1991	54	17.1	27.1	43.3	6.7	20.5	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL2, AL3, AL4, AL5
12Z- 05/10/1991	12Z- 07/10/1991	48	17.1	29.7	49.2	6.5	34.6	MODERADO	AC3, AC4, AC5, AL2, AL3, AL4, AL5
12Z- 12/10/1991	06Z- 13/10/1991	18	17.1	25.8	31.6	9.1	27.5	FORTE	AC1, AC2, AL2
00Z- 17/10/1991	18Z- 17/10/1991	18	20.9	24.7	29.9	6.7	13.9	MODERADO	AC4, AL3, AL4, AL5
18Z- 21/10/1991	18Z- 23/10/1991	48	17.1	26.1	36.4	7.9	33.7	FORTE	AC1, AC2, AC3, AC5, AL1, AL2, AL3
12Z- 29/10/1991	18Z- 30/10/1991	30	17.6	22.1	36.9	8.6	17.5	FORTE	AC3, AC5, AL3, AL4
06Z- 31/10/1991	00Z- 01/11/1991	18	17.6	23.3	36.4	5.3	12.6	MODERADO	AC2, AC5, AL5
18Z- 05/11/1991	00Z- 07/11/1991	30	17.6	26.7	44.4	5.9	18.5	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL2
18Z- 09/11/1991	12Z- 11/11/1991	42	17.1	26.1	54.0	7.9	15.5	FORTE	AC2, AC3, AC5, AL2, AL3, AL4, AL5
00Z- 18/11/1991	12Z- 19/11/1991	36	17.1	28.9	43.3	4.8	19.7	MODERADO	AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AL1, AL2, AL3, AL4
18Z- 22/11/1991	12Z- 23/11/1991	18	17.6	31.0	49.2	8.4	38.1	FORTE	AC1, AC2, AL1, AL2

18Z- 26/11/1991	18Z- 27/11/1991	24	21.4	31.3	44.4	8.5	26.7	FORTE	AC4, AL4, AL5
06Z- 29/11/1991	00Z- 30/11/1991	18	20.9	31.9	48.7	7.8	16.7	FORTE	AC2, AC3, AC5, AL2, AL3
12Z- 30/11/1991	18Z- 01/12/1991	30	18.2	29.8	48.1	6.3	14.2	MODERADO	AC4, AC5, AL1, AL2, AL4, AL5
00Z- 11/12/1991	00Z- 12/12/1991	24	17.6	24.8	42.8	8.8	16.7	FORTE	AC2, AC3, AL3
06Z-1 3/12/1991	18Z- 13/12/1991	12	17.1	21.0	26.2	6.8	19.2	MODERADO	AC1, AL1, AL2, AL4, AL5
18Z- 24/12/1991	00Z- 26/12/1991	30	17.1	31.6	55.6	8.4	30.2	FORTE	AC1, AC2, AC3, AL2, AL3
12Z- 26/12/1991	00Z- 27/12/1991	12	17.6	25.3	38.5	7.0	20.3	MODERADO	AC4, AC5, AL4

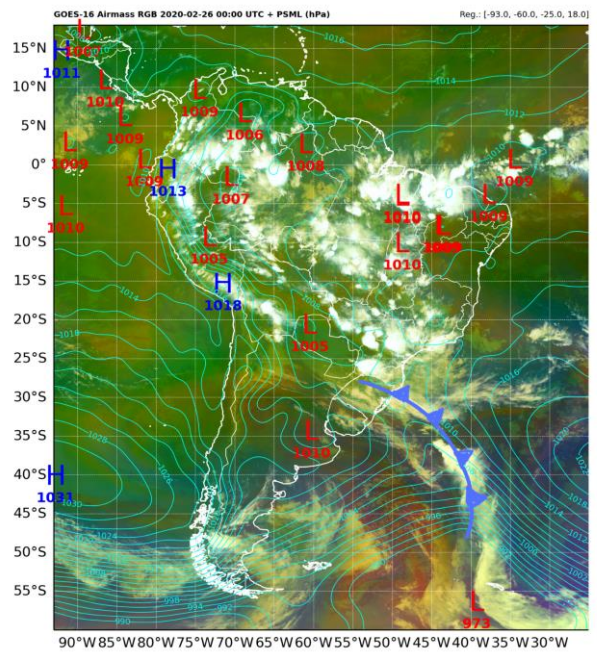
APÊNDICE D - ALGUNS CAMPOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS NA ANÁLISE SINÓTICA DOS CASOS 02, 14, 40 E 43.

Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar (hPa) , velocidade (m/s) e direção do vento a 10 m: a) Primavera - caso 014 e c) Outono - caso 043. Imagem de satélite GOES-16 com Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar (hPa): b) Verão - caso 040 e d) Inverno - caso 002.

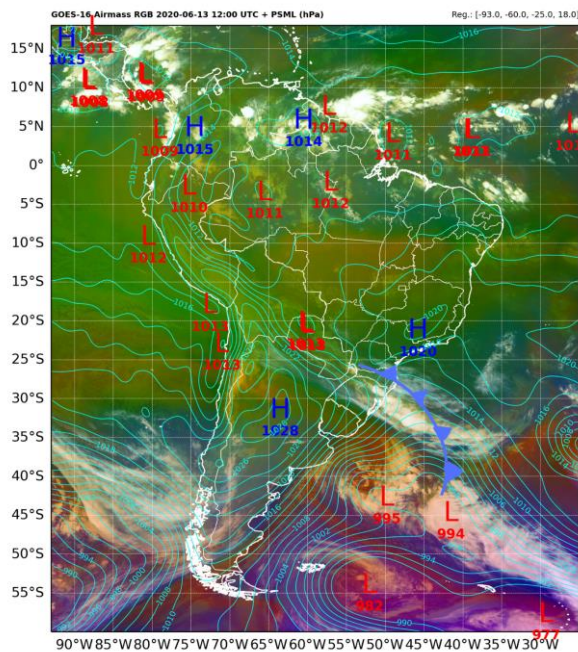
a)



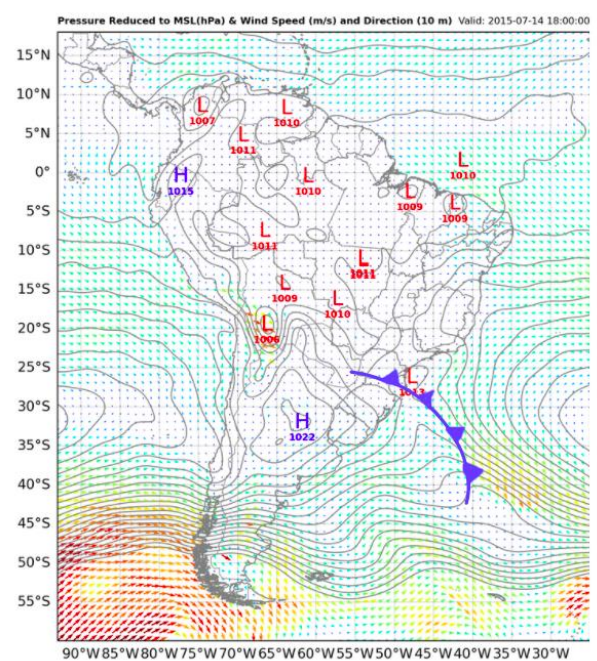
b)



c)

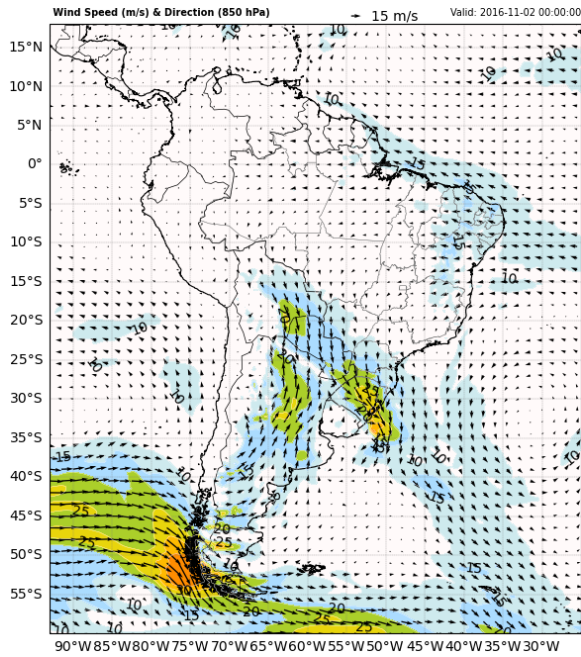


d)

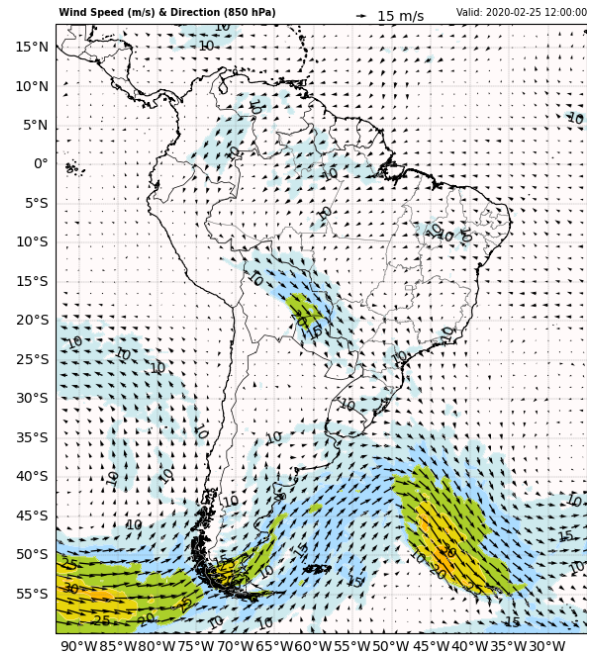


Velocidade e direção do vento em 850 hPa - Onde nos 4 casos se observa o fluxo do JBN. a) Primavera - caso 014; b) Verão - caso 040; c) Outono - caso 043; d) Inverno - caso 002.

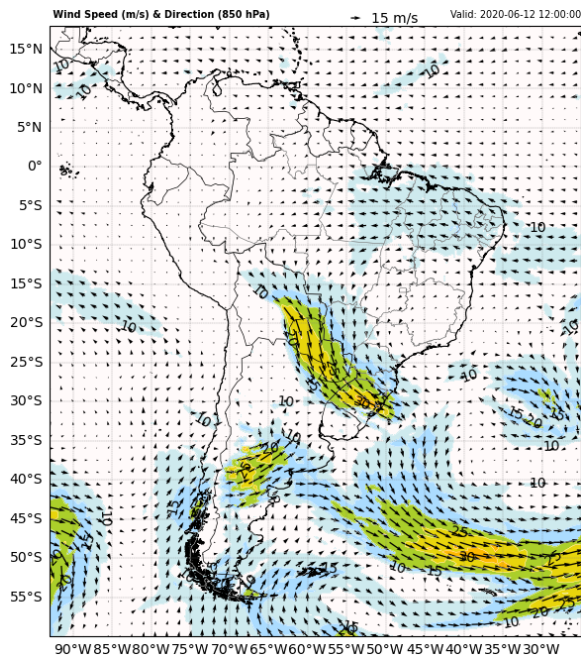
a)



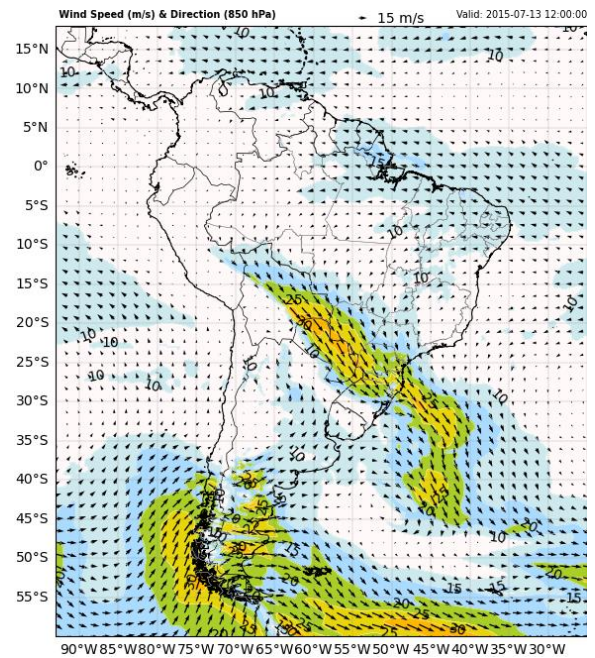
b)



c)

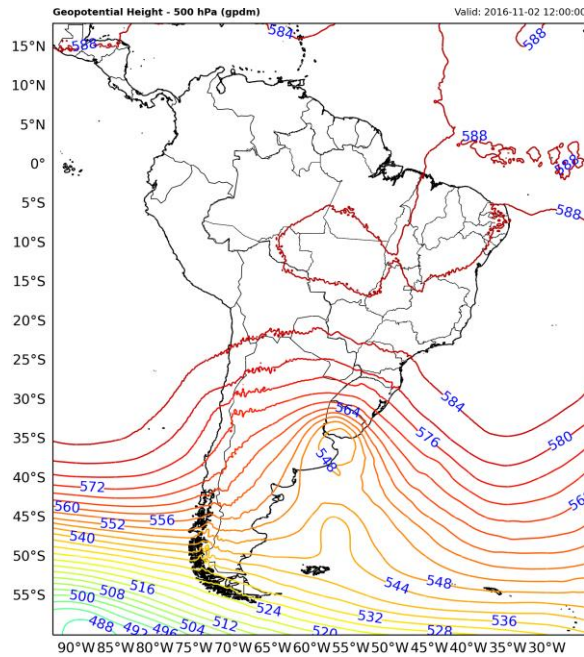


d)

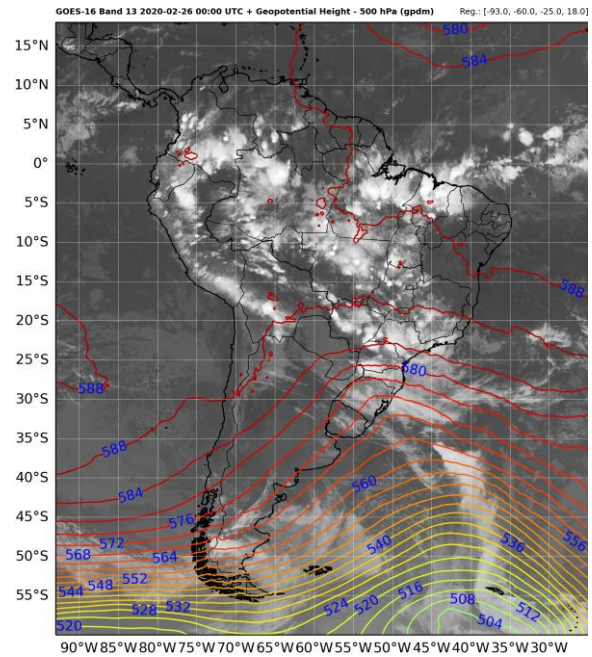


Altura Geopotencial (gpdm) em 500hPa dos quatro casos a) Primavera - caso 014 b) Verão - caso 040 - c) Outono - caso 043 c) Inverno - caso 002.

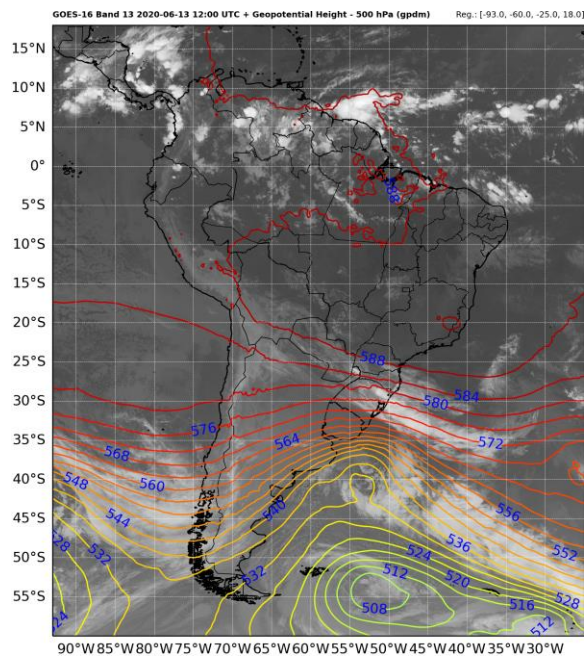
a)



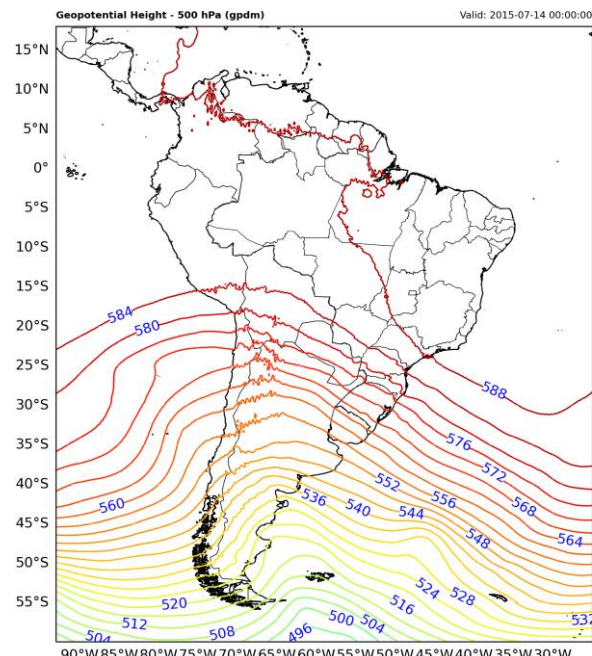
b)



c)



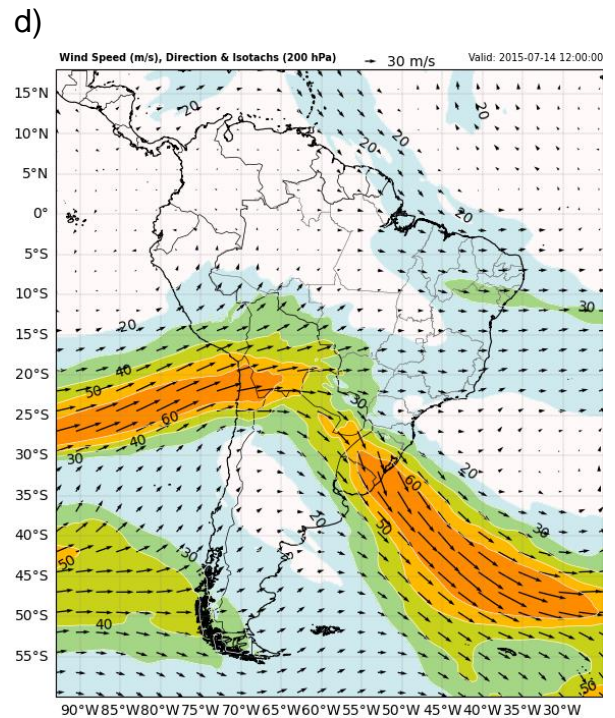
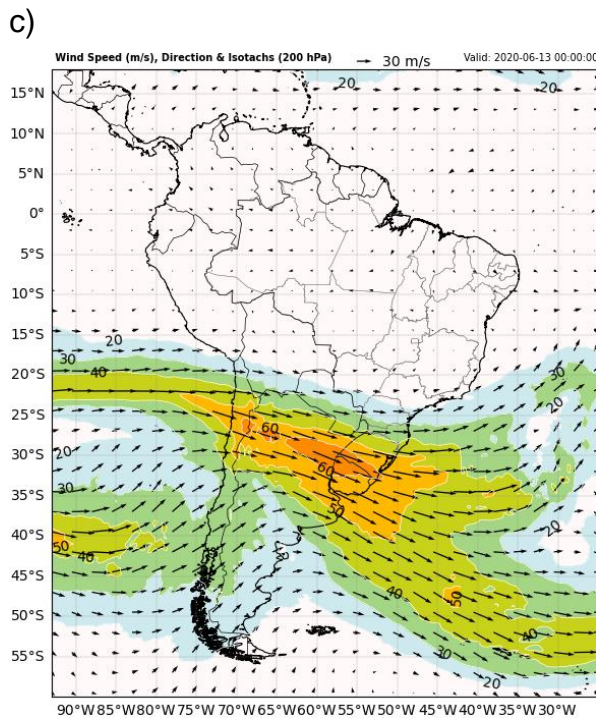
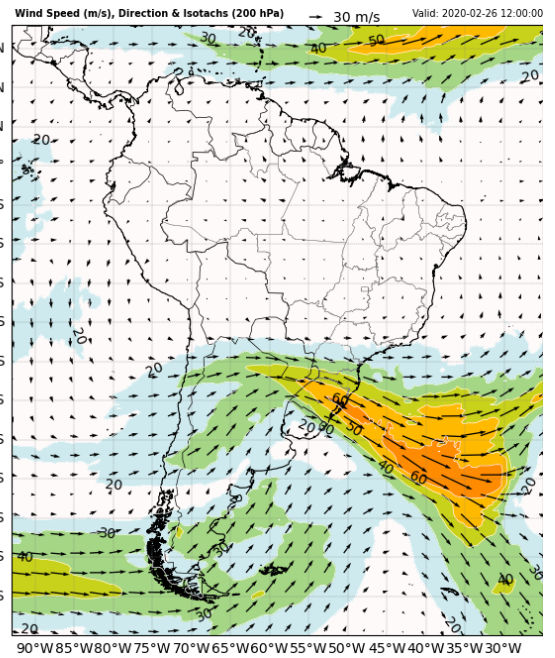
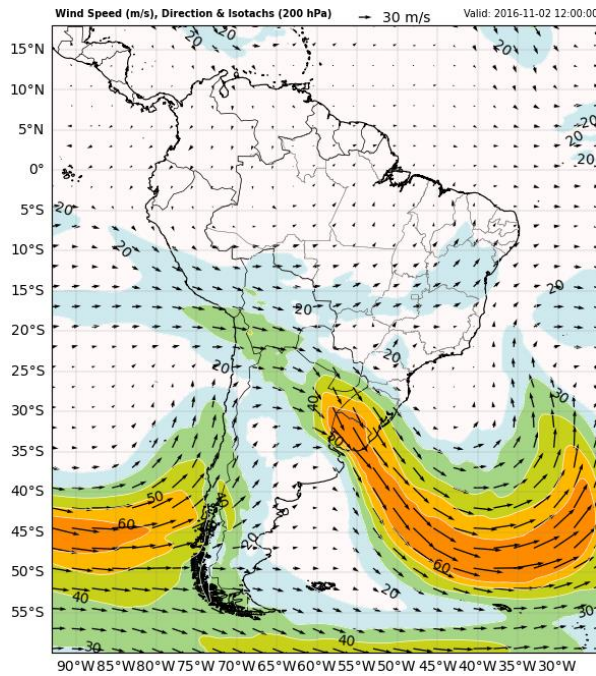
d)



Velocidade e direção do vento em 200 hPa - Onde nos 4 casos se observa o fluxo do JST. a) Primavera - caso 014 b) Verão - caso 040 c) Outono - caso 043 d) Inverno - caso 002.

a)

b)



As Figuras acima foram feitas com base na Atividade Pré-Curso – Programação em Python para Aquisição, Processamento e Visualização de Dados de Modelos de Previsão Numérica do Tempo e no curso *Processamento de Dados de Satélites Geoestacionários com Python* do CPTEC/INPE.

Disponível em: <<https://geonetcast.wordpress.com/2021/07/05/>>