

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

ELISEO BREDA DA SILVA

**CLIMATOLOGIA DOS SISTEMAS ATUANTES NO ESTADO DE SANTA
CATARINA E PERFORMANCE DO MODELO NUMÉRICO WRF PARA PREVISÃO
DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO**

FLORIANÓPOLIS - SC - BRASIL

15 DE AGOSTO DE 2024

ELISEO BREDA DA SILVA

**CLIMATOLOGIA DOS SISTEMAS ATUANTES NO ESTADO DE SANTA
CATARINA E PERFORMANCE DO MODELO NUMÉRICO WRF PARA PREVISÃO
DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO**

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: Dirceu Luis Herdies

Florianópolis – SC - Brasil

15 de agosto de 2024

CDD 551.6
S586c

Silva, Eliseo Breda da
Climatologia dos sistemas atuantes no estado de Santa Catarina e performance do modelo numérico WRF para previsão de eventos extremos de precipitação [DIS] / Eliseo Breda da Silva; orientação de Dirceu Luis Herdies – Florianópolis, 2024.

1 v.: il.

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

Inclui referências.

1. Climatologia dos sistemas em Santa Catarina. 2. NWP. 3. WRF. I. Herdies, Dirceu Luis. II. Título.

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

Aluno (a): **ELISEO BREDA DA SILVA**

Título:	<i>CLIMATOLOGIA DOS SISTEMAS ATUANTES NO ESTADO DE SANTA CATARINA E PERFORMANCE DO MODELO NUMÉRICO WRF PARA PREVISÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO</i>
----------------	--

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

Dr(a). DIRCEU LUIS HERDIES

Documento assinado digitalmente
gov.br DIRCEU LUIS HERDIES
Data: 26/09/2024 16:38:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

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

Dr(a). ADRIANO VITOR

Documento assinado digitalmente
gov.br ADRIANO VITOR
Data: 01/10/2024 15:13:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC

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

Dr(a). CASSIO AURELIO SUSKI

Documento assinado digitalmente
gov.br CASSIO AURELIO SUSKI
Data: 01/10/2024 15:43:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador(a) Interno / IFSC / Itajaí - SC

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

Dr(a). HELBER BARROS GOMES

Documento assinado digitalmente
gov.br HELBER BARROS GOMES
Data: 01/10/2024 18:59:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador(a) Externo / UFAL / Maceió - AL

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

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(X) **unanimidade**

Florianópolis, 18 de setembro de 2024.

Dedico esse trabalho à Susana Ramos, minha querida esposa, e aos meus filhos Felipe, Camila e Sara, que são a razão e motivação de minha busca por sempre evoluir e crescer como pessoa e como profissional.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Dirceu Luis Herdies, pela orientação competente e profissional, pela disponibilidade, dedicação de tempo e prazer com que sempre compartilhou seus conhecimentos e experiências, fatores fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu coorientador, Dr. Mário Francisco Leal de Quadro pelas contribuições e entusiasmo demonstrado durante minha jornada no curso de mestrado, que me fizeram acreditar ainda mais na capacidade científica de nosso país.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina, por meio do Programa de Mestrado Profissional em Clima e Ambiente (PCAM) pela infraestrutura disponibilizada e ao corpo docente do PCAM, composto por profissionais altamente capacitados que contribuiu de forma decisiva para meu crescimento profissional.

Aos membros da banca examinadora de qualificação; à Meteorologista Roseli de Oliveira e aos Professores Adriano Vitor e Michel Muza, pelas críticas e sugestões e apoio no desenvolvimento estatístico ao longo da pesquisa.

À minha esposa, Susana Ramos, pelo incentivo na busca do conhecimento e pelo apoio em iniciar o mestrado. E aos meus filhos, Felipe, Camila e Sara, pela compreensão por minha ausência para que fosse possível dedicar tempo durante quase três anos com o objetivo de concluir o mestrado e contribuir para o desenvolvimento científico do Brasil.

Ao colega Gerson Luiz Camillo pelo suporte computacional na instalação e uso do modelo WRF.

A todos os colegas e amigos que estiveram ao meu lado nos últimos três anos e que contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho.

"A história da humanidade torna-se cada vez mais uma corrida entre
a educação e a catástrofe."

(Herbert George Wells, 1866-1946)

RESUMO

A transformação digital é uma realidade em todas as áreas da atividade humana e tem sido acelerada pela recente pandemia de Covid-19. O uso de Inteligência Artificial, Data Analytics, Realidade Aumentada, robôs, entre outras tecnologias, possibilita a automação de processos em praticamente todos os setores da economia: agricultura, produção e serviços. Entender as variáveis climáticas e seus impactos no meio ambiente sempre foi um desafio para a humanidade, que, desde a antiguidade até os dias atuais, se depara com situações inesperadas que afetam o cotidiano e, muitas vezes, colocam vidas em risco. Atualmente, além de compreender, busca-se prever o clima e seus impactos ambientais, de modo a mitigar riscos e garantir o desenvolvimento sustentável, preservando a natureza (fauna, flora, recursos naturais etc.). O uso de ferramentas computacionais para modelagem numérica dessas variáveis é de extrema importância, respondendo à necessidade de variações cada vez mais rápidas e confiáveis. Este projeto analisa a precisão de uma ferramenta disponível no mercado, que utiliza o modelo WRF, na simulação de eventos extremos de oferta em Santa Catarina. Para isso, foram selecionados 26 eventos de atualizações representativos dos percentuais acima de 99,9% de cada estação do ano, nas 11 mesorregiões de Santa Catarina, que foram analisados para identificar a climatologia dos sistemas que mais influenciam o estado e provocam tais ocorrências. Nesses 26 eventos, foram avaliados ao menos dois eventos dos principais sistemas meteorológicos atuantes no estado: sistemas de mesoescala (mais comuns na região oeste), circulação marítima (mais comum na região litorânea) e frentes frias clássicas. Para esses 26 eventos, o modelo WRF foi executado para avaliar a precisão da previsibilidade dessas ocorrências com 24, 48 e 72 horas de antecedência, resultando em taxas de acerto de 100% de acerto quanto a ocorrência de precipitação e de 24,30%, 34,82% e 36,79% na comparação entre os volumes de precipitação acumulados observados e os resultados simulados pelo WRF. A baixa assertividade nos volumes de precipitação deve-se principalmente a incertezas quanto às condições iniciais e às granularidades espaciais e temporais utilizadas.

Palavras-chave: NWP; WRF; Climatologia dos sistemas em Santa Catarina.

ABSTRACT

Digital transformation is a reality in all areas of human activity and has been accelerated by the recent Covid-19 pandemic. The use of Artificial Intelligence, Data Analytics, Augmented Reality, and robots, among other technologies, enables the automation of processes in practically all segments of the economy: agriculture, manufacturing, and services. Understanding climatic phenomena and their impacts on the environment has always been a challenge for humanity, which, from the past to the present, has faced unforeseen situations that impact daily life and often put lives at risk. Currently, in addition to understanding these phenomena, efforts are being made to predict the climate and its environmental impacts to mitigate risks and ensure the continuity of development while preserving nature (fauna, flora, natural resources, etc). The use of computational tools for numerical modeling that represent these phenomena is of great importance, addressing the need for faster and more reliable forecasts. This project analyzes the accuracy of a tool available on the market that uses the WRF model to predict extreme precipitation events in Santa Catarina. For this, 26 precipitation events representing percentiles above 99.9% for each season of the year were selected across the 11 mesoregions of Santa Catarina. These events were analyzed to identify the climatology of the systems that most influence the state and cause such occurrences. In these 26 events, at least two occurrences of the main meteorological systems operating in the state were evaluated: mesoscale systems (more common in the western region), maritime circulation (more common in the coastal region), and classic cold fronts. For these events, the WRF model was executed to assess the accuracy of the predictability of these occurrences 24, 48, and 72 hours in advance, resulting in predictability rates of 100% in terms of precipitation occurrence and 24.30%, 34.82%, and 36.79% when comparing the observed cumulative precipitation volumes to the WRF outputs. The low levels of precipitation volumes predictability are related to uncertainties in the initial conditions and the spatial and temporal granularity used.

Keywords: NWP; WRF; Systems climatology in Santa Catarina.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Componentes da plataforma *WRF-ARW*
- Figura 2:** Parametrizações de subgrade e sua interação
- Figura 3:** Sistema frontal clássico. Linhas inteiras isóbaras
- Figura 4:** 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
- Figura 5:** Densidade de ciclogêneses subtropical obtida da reanálise 1 do NCEP
- Figura 6:** Circulação nos níveis baixos, médios e altos da atmosfera; a) climatologia de verão e b) em eventos de ZCAS
- Figura 7:** Mapa global das regiões de ocorrência dos JBNs, com base em dados horários de um período de 21 anos do Mesoscale Model 5
- Figura 8:** 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
- Figura 9:** Número médio de dias por ano com condições favoráveis para formação de tempestades severas e tornados para todo o globo
- Figura 10:** Mesorregiões Catarinenses
- Figura 11:** Domínios 1 e 2 configurados no WRF
- Figura 12:** Localização das 11 mesorregiões do Estado de Santa Catarina e a localização dos 24 municípios referentes à coleta dos dados das estações pluviométricas
- Figura 13:** Distribuição dos volumes de precipitação por mesorregião e estação do ano
- Figura 14:** Frequência dos volumes de precipitação observados acima do limiar 99,9%
- Figura 15:** Imagem do satélite GOES 13 em dias com chuva na Grande Florianópolis e Litoral Norte de SC, (a) 24/08/2017 e (b) 29/09/2017, quando o anticiclone na costa favoreceu o efeito da circulação marítima
- Figura 16:** Evento de Frente Fria em Joaçaba ocorrido em 26/2/2020
- Figura 17:** Eventos selecionados por mesorregião

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Localização das Estações Meteorológicas e Série Temporal Analisada

Tabela 02: Resultados dos percentis 99,9% de precipitação observada (em mm) por mesorregião e estação do ano em SC

Tabela 03: 26 eventos extremos de precipitação observada (POBS em mm) em SC acima dos percentis 99,9% por mesorregião e estação do ano em SC

Tabela 04: Eventos extremos por estação do ano

Tabela 05: Eventos extremos por sistema atuante

Tabela 06: Resultados da precipitação em mm do WRF na simulação de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina

Tabela 07: Assertividade do WRF na simulação de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina

Tabela 08: Assertividade do WRF na simulação de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina por mesorregião

Tabela 09: Assertividade do WRF na simulação de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina por estação do ano

Tabela 10: Assertividade do WRF na simulação de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina por sistema climatológico atuante

Tabela 11: BIAS e RMSE dos 26 eventos extremos de precipitação analisados

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS - América do Sul

ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

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*)

CGA - Circulação Geral da Atmosfera

CLA - Camada Limite Atmosférica

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

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

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

GIZ - *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*

GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite

GFS - Global Forecast System

HN - Hemisfério Norte

HS - Hemisfério Sul

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais

JBN - Jato de Baixos Níveis

JBNAS - JBN da América do Sul

LI - Linha de Instabilidades

MAS - Modo Anular Sul

MMA - Ministério do Meio Ambiente

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

NCEP - National Center for Environmental Prediction

OMM - Organização Mundial de Meteorologia

PNT - Previsão Numérica do Tempo

RMSP - Região Metropolitana de São Paulo

RS - Rio Grande do Sul

TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission

VCAN - Vórtice Ciclônico de altos Níveis

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

WMO - World Meteorological Organization

WRF - World Research Forecast

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos.....	18
1.2 Organização do Trabalho.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT).....	20
2.1.1 O modelo WRF.....	22
2.2 Sistemas de Escala Sinótica.....	24
2.2.1 Sistemas Frontais.....	25
2.2.2 Ciclones.....	30
2.2.3 Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e Pacífico Sul (ASPS).....	35
2.2.4 Zona de Convergência do Atlântico Sul.....	36
2.2.5 Jato de Baixos Níveis.....	38
2.2.6 Jato de Altos Níveis.....	40
2.3 Sistemas de Mesoescala.....	42
2.3.1 Sistemas Convectivos de Mesoescala.....	42
2.3.2 Circulação Marítima.....	44
2.4 Impactos socioeconômicos e estudos de extremos de precipitação.....	44
3 DADOS E METODOLOGIA.....	49
3.1 Área de Estudo.....	49
3.2 Dados.....	50
3.3 Metodologia.....	52
3.3.1 Materiais.....	52
3.3.2 Métodos.....	54
3.3.3 Tratamento dos Dados.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1 Percentis de precipitação por mesorregião.....	57
4.2 Eventos extremos de precipitação por mesorregião.....	59
4.3 Assertividade na simulação dos eventos extremos de precipitação.....	63
5 PRODUTO DESENVOLVIDO.....	69
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
APÊNDICE A – Configurações do WRF utilizadas.....	97

1 INTRODUÇÃO

A região Sul do Brasil caracteriza-se pela grande variabilidade de sistemas meteorológicos atuantes ao longo do ano, resultando em condições variadas de tempo. A frequência de eventos meteorológicos extremos nessa região chamou a atenção de pesquisadores, que passaram a dedicar tempo e esforço ao entendimento dos mecanismos climáticos e atmosféricos associados a tais aspectos.

A região está localizada em uma zona de clima subtropical, com inverno e verão bem definido, e com suprimentos bem distribuídos ao longo do ano na parte sul da região, além de um regime pluviométrico de monção no setor norte (GRIMM, 2009). Mesmo considerando a ausência de uma estação sazonal seca ou chuvosa, ocorrem períodos prolongados de ausência de ocorrência ou de excesso de entrega, provocando ocorrências como secas, inundações e enchentes em qualquer estação do ano.

O estado de Santa Catarina (SC) tem um histórico de inundações frequentes em todas as mesorregiões, com maior frequência no Vale do Itajaí, Grande Florianópolis e Norte Catarinense. Essas mesorregiões concentram a maior parte dos dez municípios com maior frequência de inundações e penetração de massa do estado.

A variabilidade da ocorrência, com eventos extremos, tem impacto econômico e socialmente na região Sul do Brasil. Ao analisar diferentes tipos de desastres naturais que ocorreram em um período de 30 anos (1980-2010) no estado de Santa Catarina (SC), Marcelino *et al.*, (2014) verificaram que as inundações graduais são o tipo mais recorrente. Isso se deve, basicamente, à presença de sistemas meteorológicos que possuem características estacionárias, os quais provocam vários dias com chuva persistente na região e muitas vezes causam outros tipos de desastres, como os escorregamentos. O excesso de superação em um determinado período saturado ou solo, gerando condições adequadas ao desencadeamento desse tipo de desastre natural (MARCELINO *et al.*, 2014).

De acordo com o levantamento elaborado por Herrmann e Alves (2014), entre os anos de 2000 e 2010, os prejuízos provocados por inundações foram significativos, sendo o ano de 2008 o destaque em danos econômicos, com prejuízos da ordem de aproximadamente dois bilhões de reais (R\$ 2 bi) e considerado um episódio de calamidade pública, afetando 85 municípios e deixando 36.467 desabrigados. Entre

os dias 30 de junho de 2020 e 1º de julho de 2021, o Sul do Brasil experimentou um dos mais graves episódios de tempo severo de sua história, com a formação de um ciclone bomba no Atlântico Sul. O fenômeno deixou treze mortos, sendo onze em Santa Catarina, uma no Paraná e uma no Rio Grande do Sul.

Neste cenário, contar com o apoio de modelos de previsão numérica do tempo (PNT) que permitem prever com acuracidade e antecedência suficientes os eventos extremos de previsão são de extrema importância, possibilitando uma tomada de ações de mitigação de riscos e impactos socioeconômicos.

Para isso, o uso de ferramentas computacionais para modelagem numérica que representem os processos atmosféricos, oceânicos e de superfície é fundamental, permitindo a simulação de cenários ambientais e a identificação de tendências com rapidez e segurança.

O aumento da capacidade computacional facilitou o uso dessas ferramentas, com redução significativa dos tempos de processamento, contribuindo, dessa maneira, para a popularização do uso de modelos numéricos de previsão do tempo, que inicialmente eram muito concentrados em centros operacionais, como, por exemplo, o Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP), nos Estados Unidos, e o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Com isso, esses modelos foram adotados também por universidades, agências governamentais e iniciativas privadas (MASS; KUO, 1998) durante as últimas décadas.

Nesse sentido, os modelos meteorológicos de mesoescala têm sido utilizados como ferramentas de pesquisa para melhorar o entendimento dos processos de mesoescala e para o desenvolvimento e aprimoramento das parametrizações desses processos para uso em modelos de previsão climática de longa escala.

Para a área de estudo deste trabalho, os três modelos mais utilizados são: o BRAMS (Sistema Brasileiro de Modelagem Atmosférica Regional), o ETA (o nome do modelo derivado da letra grega η (eta), que denota a coordenada vertical) e o WRF (Weather Forecast Research), todas as operações no CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto de Pesquisas Espaciais). Considerando-se a maior disponibilidade de códigos e programas, a possibilidade de execução em computadores do tipo pessoal e a maior disponibilidade de dados necessários, este estudo será utilizado o modelo WRF.

O WRF é um modelo de mesoescala, não hidrostático e compressível. Resolve o movimento vertical de maneira direta, com opção hidrostática e de alta resolução.

Foi desenvolvido com o apoio de vários centros de pesquisa, como o Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (NCAR) e o Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP/NOAA) (SKAMAROCK *et al.*, 2008). O modelo possui dois núcleos de solução dinâmica: o *Advanced Research WRF (ARW)* e o *Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM)*, além de três componentes principais: WPS, ARW e pós-processamento. Apresenta, ainda, uma diversidade de opções de esquemas dinâmicos e parametrizações físicas, tornando-o adequado para a previsão numérica e simulação do clima (SKAMAROCK *et al.*, 2008). As parametrizações usadas pelo WRF são implementadas em módulos separados, organizados em cinco blocos principais: a) microfísica de nuvens; b) processos convectivos; c) trocas e transportes turbulentos na Camada Limite Planetária; d) processos de radiação; e) interação solo-superfície (OLIVEIRA, 2014).

Na atualidade, além de buscar entender, busca-se prever o tempo e o clima e seus impactos ambientais, de modo a mitigar os riscos e viabilizar a continuidade do desenvolvimento, preservando a natureza (fauna, flora, recursos naturais etc). O uso de ferramentas computacionais para modelagem numérica que representem estes fenômenos é de suma importância, endereçando a necessidade de previsões cada vez mais rápidas e confiáveis.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de avaliar os resultados do modelo de previsão numérica WRF, utilizado na simulação de eventos extremos de ocorrência em regiões específicas do Estado de Santa Catarina (SC), comparando-os com os dados observados e calculando os desvios entre eles. Buscou-se, com isso, gerar indicadores objetivos que auxiliem os profissionais da área de meteorologia na escolha de modelos mais assertivos, dependendo dos processos e regiões que estiverem estudando.

Especificamente, este projeto propõe:

- i) identificar os principais sistemas meteorológicos que atuam no Estado de SC e que provocam os eventos extremos de incidentes;
- ii) mapear os episódios de eventos extremos de ocorrências, ocorridos na região no período de 2007 a 2020, que sejam representativos das diversas mesorregiões

que compõem o Estado de SC;

iii) utilizar uma versão do modelo WRF para realizar simulações de tempo de curto prazo;

iv) avaliar a acuracidade do modelo na simulação de eventos extremos de precipitação estatisticamente selecionados e

v) desenvolver um produto técnico com o roteiro passo a passo da metodologia utilizada, que ajude na reprodução de análises de outros eventos extremos.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos.

No Capítulo 1 consta a introdução e objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os modelos de previsão numérica do tempo e os sistemas meteorológicos que influenciam a região de estudo.

No Capítulo 3 são detalhados os dados utilizados, a área de estudo e a metodologia aplicada.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados encontrados, detalhando-se os percentis de precipitação das mesorregiões de Santa Catarina, os eventos extremos de precipitação estatisticamente selecionados, a assertividade nas simulações desses eventos e a identificação dos sistemas climatológicos atuantes.

No Capítulo 5 faz-se uma exposição do produto desenvolvido durante o trabalho.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modelos de Previsão Numérica do Tempo

Muitos estudos de verificação de resultados de modelos de Previsão Numérica do Tempo foram realizados, sendo a maioria focada nos modelos de mesoescala de quinta geração do *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), da Universidade Estadual da Pensilvânia (GRELL *et al.*, 1994).

Entre esses estudos, incluem-se comparações com outros modelos de várias regiões do mundo, como Colle *et al.*, (1999), Nutter e Manobianco (1999), White *et al.* (1999), Mass *et al.*, (2002), Hong (2003) e Colle *et al.*, (2003).

Nos últimos anos, o WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) tem sido um dos modelos mais utilizados internacionalmente, com diversos trabalhos sobre a região da América do Sul e uma versão operacional no Centro de Previsão de Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), bem como a Defesa Civil de Santa Catarina (VENDRASCO *et al.*, 2015; FERREIRA *et al.*, 2020). Também constam dessa lista os modelos ETA (BLACK *et al.*, 1988) e Modelo Atmosférico Regional Brasileiro – BRAMS (FREITAS *et al.*, 2016).

O trabalho de White *et al.*, (1999) avaliaram seis modelos no oeste dos Estados Unidos durante a estação fria (janeiro, fevereiro e março), demonstrando que houve variação especial nas viés de cada modelo. O estudo mostrou que os maiores erros ocorrem nos modelos de previsão com maior resolução horizontal. Os resultados também indicaram a necessidade de comparações entre múltiplos modelos, permitindo identificar os erros e visões relacionadas à física dos modelos, bem como os benefícios e limitações decorrentes do aumento da resolução.

Usando o MM5 com resolução horizontal de 4 km, Hanna e Yang (2001) avaliaram o desempenho do modelo durante um período de quatro dias, comparando a velocidade e a direção do vento observadas a 10 metros acima da superfície do solo com os resultados do modelo. Os resultados mostraram que o erro médio (EM) e a raiz do erro quadrático médio (REQM) da velocidade média horária do vento foram de 1,5 m/se 2,5 m/s, respectivamente, para velocidades entre 2,8 m/ se 3,4 m/s. O EM e o REQM da direção do vento foram de -2 graus e 66 graus, respectivamente. Os autores sugeriram que essas incertezas na velocidade e na direção do vento foram causadas principalmente por processos de turbulência aleatórios, que não puderam

ser simulados pelos modelos, mesmo com variações no terreno e no uso da terra.

Muitos estudos também têm foco em comparações entre os modelos de previsão MM5 e NCEP ETA (ONCLEY; DUDHIA, 1995; MANNING; DAVIS, 1997; WHITE *et al.*, 1999; COLLE *et al.*, 1999; 2000; 2003). Oncley e Dudhia (1995) constataram que o aumento excessivo da umidade do solo nas simulações levou a uma visão de resfriamento durante o dia, gerando aumento no fluxo de calor latente (resfriamento evaporativo) e diminuição do calor sensível. Usando o MM5, Manning e Davis (1997) descobriram que a adição de gelo nas montanhas como condição inicial aprimorou as viés de frio nas baixas altitudes durante o dia.

No que diz respeito à acurácia da previsão de precipitação, não se observa uma rápida evolução nos últimos anos, quando comparada à acurácia de outras variáveis meteorológicas (OLSON *et al.*, 1995). De acordo com os autores, os erros nas previsões quantitativas da precipitação são resultados principalmente das incertezas relativas às condições iniciais, resolução horizontal insuficiente em regiões de topografia acidentada, além de deficiências nas parametrizações dos modelos no que diz respeito à microfísica e convecção.

Após estudar as previsões de precipitação no oeste dos Estados Unidos utilizando MM5, Colle *et al.* (1999; 2000) mostraram que, durante a estação fria, a acuracidade do modelo aumentou com o refinamento da grade espacial de 36 para 12 km. Entretanto, o aumento da resolução espacial para 4 km gerou baixo incremento na acuracidade, exceto para chuvas pesadas, devido a superestimativa da precipitação nas partes altas dos terrenos.

Wang e Seaman (1997) chegaram à conclusão semelhante em seus estudos de modelagem para ambas resoluções horizontais de 12 e 36 km, utilizando o mesmo critério de parametrização convectiva. Eles concluíram que usando a parametrização convectiva com a grade espacial de 12 km houve melhora na previsão da quantidade de precipitação, o que não ocorreu com a grade espacial de 36 km.

Por outro lado, Gallus (1999) constatou que houve um pequeno benefício na previsão da quantidade de precipitação usando a parametrização convectiva, com o aumento da resolução horizontal de 78 para 12 km, utilizando o modelo NCEP – ETA.

Almeida e Marton (2014) utilizaram o modelo WRF para realizar uma simulação de 120 horas (19 a 23 de novembro) do evento chuvoso que atingiu Santa Catarina em novembro de 2008. Esse evento teve consequências catastróficas, em especial para o Vale do Itajaí, em decorrência dos inúmeros deslizamentos de terra e recordes históricos de precipitação acumulada diária e/ou mensal. Eles mostraram que a

comparação feita para o campo de precipitação entre grades 2 e 3 da simulação mostraram que o refinamento da resolução espacial tem efeito importante na representação da distribuição espacial da precipitação, mas com menor impacto na reprodução dos valores acumulados. Concluíram que a representação adequada dos acumulados de precipitação ainda carece de desenvolvimentos nos módulos físicos dos modelos atmosféricos de previsão e na melhor representação das condições iniciais e de contorno dos mesmos.

Silva *et al.* (2019) realizaram 10 simulações do WRF para um evento de precipitação extrema em Santa Catarina, ocorrido em 30 de maio de 2019, explorando diferentes parametrizações físicas, além de variações na resolução espacial da grade e das condições iniciais. Os resultados obtidos permitem calcular uma média de acerto de 65,8% no comparativo entre volume médio de precipitação observado em 20 estações meteorológicas comparado com a média simulada, com variações no intervalo de 3,1% a 114,6% de acerto. Em geral o total acumulado foi subestimado. No entanto, os resultados mostraram que o incremento da resolução espacial de 10km para 5 km proporcionou melhorias na precipitação média espacial. Além disto, a melhoria da resolução dos campos de condição inicial e de fronteira do modelo GFS proporcionou também melhorias na simulação do total acumulado de precipitação. A simulação combinada destes dois parâmetros de resolução (grade e condição atmosférica de fronteira) proporcionou a melhor simulação do total médio acumulado de precipitação.

2.1.1 O modelo WRF

O Modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) é uma plataforma de modelagem atmosférica projetada para pesquisa e previsão numérica do tempo. Ele foi desenvolvido por meio de uma parceria entre seis instituições dos Estados Unidos da América: o Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (NCAR), a Administração Nacional Oceanográfica e Atmosférica (NOAA), a Força Aérea (USAF), o Laboratório de Pesquisa Naval (NRL), a Universidade de Oklahoma (OU) e a Administração Federal de Aviação (FAA).

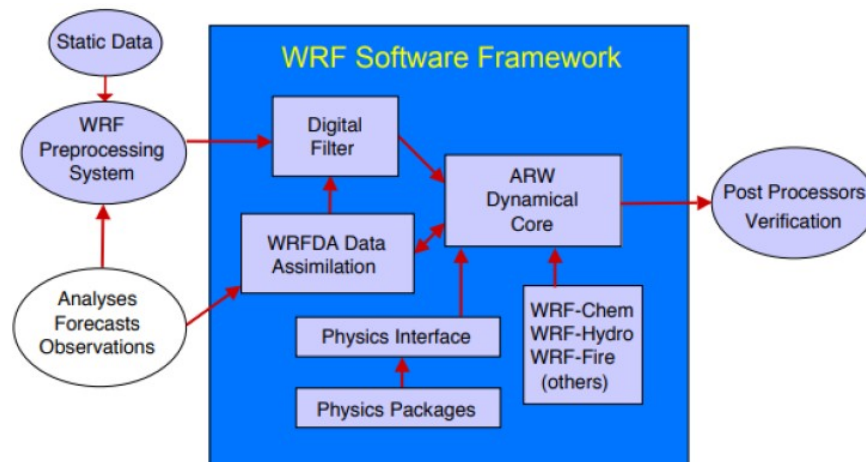
O desenvolvimento do WRF foi iniciado na segunda metade da década de 1990, com o objetivo de construir uma plataforma compartilhada para pesquisa e operações, criando uma ferramenta de previsão numérica do tempo de última geração. O produto final foi descoberto em um modelo de código aberto, com

contribuição da comunidade científica mundial, que atualmente é utilizado para previsão operacional e pesquisas em diversas universidades e laboratórios públicos e privados, bem como para aplicações comerciais.

Assim, o WRF é um sistema de código flexível, modular e portátil, que apresenta bom desempenho em vários ambientes de computação, conforme a necessidade. Pode ser executado desde laptops até supercomputadores com processamento altamente paralelizado.

A Figura 1 mostra os principais componentes do sistema WRF. O WRF Software Framework (WSF) é uma infraestrutura que contém um núcleo de design da dinâmica atmosférica (ARW), pacotes de física, materiais para inicialização, pré e pós-processamento de dados, assimilação de dados coletados (WRFDA) e recursos integrados, como a modelagem da química (WRF-Chem), a modelagem hidrológica (WRF-Hydro), a modelagem de incêndios em áreas remotas (WRF-Fire), entre outras variantes.

Figura 1: Componentes da plataforma WRF-AR



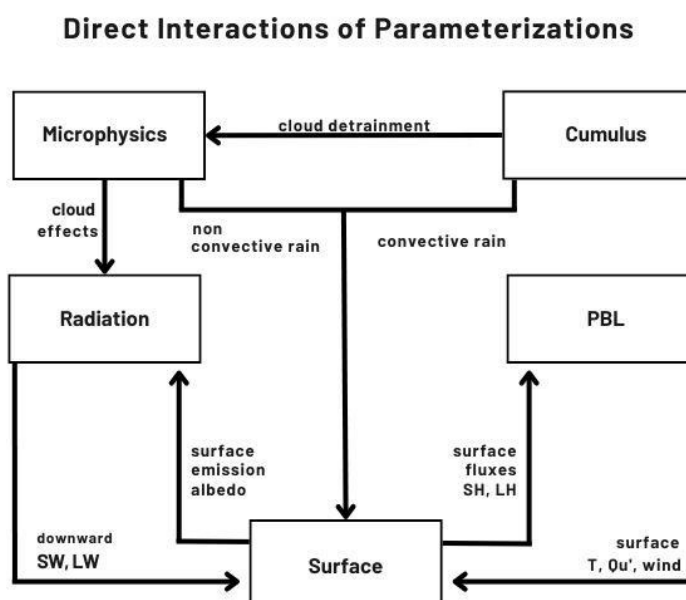
Fonte: SKAMAROCK *et al.*, (2019)

O WRF suporta simulações atmosféricas com amplo grau espacial, desde dezenas de metros, como na grande escala da turbulência (*LES – Large Eddy Simulation*), até milhares de quilômetros, como na escala global. Isso permite que o modelo realize a previsão numérica do tempo em tempo real, simular eventos, podendo ser utilizado como ferramenta na educação acadêmica e em estudos de processos atmosféricos. Além disso, possibilita o desenvolvimento da assimilação de dados e físicas parametrizadas, a realização de simulações regionais, a modelagem da qualidade do ar, acoplamento atmosfera-oceano e estudos de atmosferas idealizadas (SKAMAROCK *et al.*, 2019).

O sistema parametriza diversos processos físicos de subgrade: microfísica de nuvens, camada limite planetária, camada superficial, solo, oceano, radiação de onda curta e longa, e convecção. O WRF possui, para cada processo físico descrito, uma variedade de opções de parametrizações, que foram exploradas por trabalhos científicos e autores de diversas instituições de todo o mundo.

A Figura 2 ilustra os diferentes processos e interações físicas diretas e indiretas de subgrade.

Figura 2: Parametrizações de subgrade e sua interação



Fonte: DUDHIA (2014)

2.2 Sistemas de Escala Sinótica

As condições de tempo e clima no Sul e Centro-Sul da América do Sul (AS) são influenciadas pelos sistemas meteorológicos que atuam nessa região, principalmente nas escalas espaciais sinóticas e de mesoescala, sendo que alguns deles, inclusive, modificam o próprio ambiente. Associados a comprimentos de onda superiores a 2.000 km, que podem persistir por dias ou semanas, na escala sinótica, podem ser relatados nos Sistemas Frontais, nos Ciclones Extratropicais (CE), no Jato de Baixos Níveis (JBN), na Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e os Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico Sul (ASPS). Para comprimentos de onda entre 2 e 2.000 km e escala temporal da ordem de horas a um dia, observam-se as atuações dos sistemas meteorológicos de mesoescala (ORLANSKI, 1975). Os

exemplos desses sistemas incluem tornados, *downbursts*, linhas de instabilidades (LI), complexos convectivos de mesoescala (CCM), tempestades convectivas isoladas e circulação marítima.

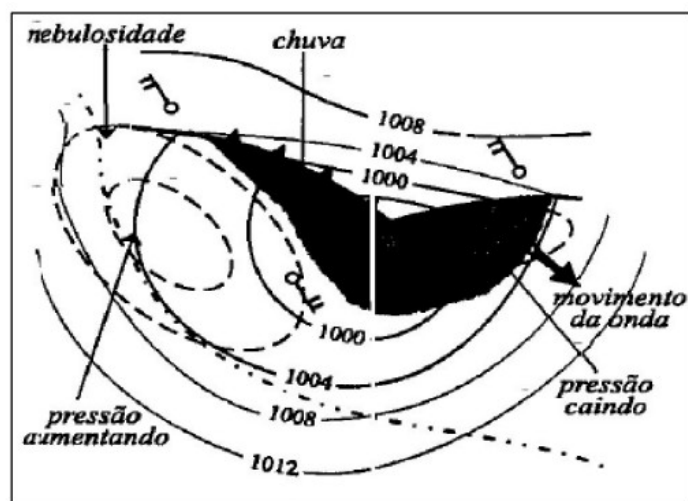
Neste capítulo, apresenta-se uma descrição resumida dos sistemas meteorológicos que mais influenciam o regime e a ocorrência de eventos extremos de precipitação na região em estudo.

2.2.1 Sistemas Frontais

A região Centro-Sul da América do Sul (AS) é identificada como uma região frontogenética, sendo favorável à formação e intensificação de sistemas frontais (SATYAMURTY; MATTOS, 1989; REBOITA *et al.*, 2009). Um sistema frontal é composto por um centro de baixa pressão na superfície (ciclone), uma frente fria e uma frente quente, conforme esquematizado na imagem da Figura 3.

As frentes podem comportar-se basicamente de duas formas quanto às suas posições: quando uma frente ultrapassa a outra, ocorre a oclusão delas e, nesse caso, o sistema frontal é caracterizado por um ciclone e uma frente oclusa; quando há pouco ou nenhum avanço das massas de ar, forma-se 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: Adaptado de ANDRADE (2005)

Segundo Bjerknes (1919), a definição de frente é a de uma zona de transição

entre duas massas de ar com densidades e temperaturas diferentes, também chamada de zona frontal, que influencia outras variações adversas. Nota-se a passagem de uma frente fria (FF) pelo decréscimo rápido da temperatura, a diminuição da pressão atmosférica quando está se aproximando de um certo local, seguido de aumento da pressão, mudança nos ventos de quadrante norte para quadrante sul no Hemisfério Sul e variação na nebulosidade, frequentemente acompanhada de precipitação e temporais (FEDOROVA, 1999; CAVALCANTI; KOUSKY, 2009).

Estudos de Da Silva e Silva Dias (2002), Andrade (2005) e Reboita et al. (2009) demonstraram que as frentes frias (FFs) que passam pelo 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 de 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 declínio da latitude.

Os SFs (Sistemas Frontais), como a maioria dos fenômenos sinóticos, sofrem influência de fenômenos de escala global, como os La Niña e El Niño, que afetam a quantidade de dias com frentes frias na faixa de latitude entre 20 e 40°S. Fedorova e Carvalho (2000) demonstraram que, nos meses de atuação do *El Niño*, há uma maior frequência dos sistemas frontais, atingindo 90,3% dos dias analisados. Por outro lado, em anos de *La Niña*, a frequência dos sistemas frontais diminuiu para 56,7% dos dias analisados.

Vários autores têm estudado os SFs aplicando métodos de detecção a fim de melhorar a previsibilidade da passagem destes sistemas em diversos lugares do globo. Dentre eles, destacam-se Renard e Clarke (1965), Clarke e Renard (1966) e Hewson (1998) que foram os pioneiros no desenvolvimento de métodos automatizados para identificar frentes, com foco na melhoria da previsão do tempo. Hoje com a disponibilidade dos dados de reanálises, que 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.

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. Eles utilizaram dados de reanálise ERA40 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.

Esses autores usaram a mesma metodologia, exceto que o mascaramento foi feito numericamente e um algoritmo de junção de linha foi usado para agrupar pontos contínuos em frentes individuais. Se os dois pontos estivessem separados por menos de cinco graus, o algoritmo unia pontos frontais ao vizinho mais próximo. Frentes com menos de três pontos eram removidas. Eles 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, usaram dois limiares de velocidades para separar as frentes em três tipos: frentes quentes com velocidade frontal acima de 1,5 m/s, frentes frias com velocidade frontal abaixo 1,5 m/s e, caso contrário, as frentes foram definidas como quase estacionárias.

Como resultados, as maiores frequências dos tipos de frentes foram observadas na região dos *storm tracks*, entre 40° e 60° de latitude em ambos os hemisférios.

No HS, Satyamurty e De Mattos (1989) encontraram a região de frontogênese máxima, onde os máximos estão localizados. As frentes quase estacionárias 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 no período de 21 anos (1989 a 2009). Aplicaram seu algoritmo ao nível de 850 hPa e vento a 10 m com critérios de mudança do vento de quadrante noroeste ao sudoeste e cuja intensidade na componente do vento meridional (sinalizado) excedesse 2 m/s.

A climatologia resultante mostrou que a maior frequência de pontos frontais é encontrada na região compreendida entre as latitudes 40° e 60°S, tanto no inverno quanto no verão, embora tenham observado uma série de assimetrias zonais no oceano, em regiões nas proximidades da Patagônia, sul da África, e sudoeste da Austrália.

Os resultados também mostraram que as frentes mais longas, com comprimentos médios acima de 2.000 km, estão no Oceano Índico. 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 exibem 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, baseado nas mudanças do vento de 10 m, enquanto o segundo em uma abordagem térmica utilizando o parâmetro da frente térmica em 850 hPa que é capaz de identificar as frentes frias e quentes.

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 tem sido determinar uma climatologia deste sistema para avaliar a frequência temporal e espacial da passagem das frentes em diversos lugares da AS.

Em um período de 10 anos compreendido entre 1961 e 1970, Kousky (1979) analisou a ocorrência de frentes frias que atingiram o nordeste do Brasil, 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.

Analisando a influência da Amazônia, com base em imagens de satélites, Oliveira (1986) observou 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 nesse estudo 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 três a quatro 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 nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, a primavera é a estação de maior ocorrência de frentes frias e que no verão os sistemas não conseguem penetrar no interior, com tanta frequência, sendo essa estação a que apresenta menor número de sistemas frontais em todas as áreas estudadas.

Em outro estudo, em que foram analisadas as passagens de FFs no período de 1979 a 2005, Cavalcanti e Kousky (2009) usaram 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.

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). Eles utilizaram como metodologia 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).

A identificação dos sistemas frontais foi realizada com base nos 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. Os limiares de 2 hPa e 2 °C foram encontrados a partir da média mensal de queda de temperatura e aumento da pressão. Os resultados mostraram uma maior frequência de frentes frias associadas a chuvas extremas no Vale do Itajaí durante a primavera e forneceram 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 mostrou 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, observaram-se 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).

2.2.2 Ciclones

Os ciclones são um dos mais severos da escala sinótica e desempenham um papel fundamental nas condições atmosféricas. Segundo Hakim (2003), os ciclones são reguladores dos contrastes de temperatura entre os polos e o Equador e mantêm os ventos de oeste em latitudes médias contra a dissipação friccional. Portanto, são um dos responsáveis pelo balanço de energia e vapor d'água na atmosfera.

Os ciclones são um dos fenômenos mais severos da escala sinótica e desempenham um papel fundamental nas condições atmosféricas. Segundo Hakim

(2003), os ciclones são reguladores dos contrastes de temperatura entre os polos 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.

Esses 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). Seus processos de formação ou intensificação são denominados ciclogênese, ocorrem 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). Sua dissipação é denominada ciclólise, quando os gradientes horizontais de temperatura enfraquecem e o sistema perde intensidade.

Na região do Atlântico Sul existem duas regiões preferenciais à formação de ciclones, conforme estudos de Gan e Rao (1991) que destacaram a região da Patagônia Argentina (45° S) como sendo a região de maiores densidades na formação de ciclones e Guia (2010) que mostrou a região da Bacia do Prata como uma região de alta densidade de ciclones principalmente no inverno. Ambos os estudos associaram os ciclones à 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 a costa brasileira, sobre o oceano atlântico (Hoskins e Hodges, 2005; GUIA, 2010; REBOITA *et al.*, 2009).

Conforme Guia (2011) ocorre uma densidade de ciclogêneses menor se comparada às outras regiões, mas com um aumento na estação de verão e com deslocamento para o sul/sudeste no inverno.

Já Reboita *et al.* (2009) destaca que os ciclones se deslocam mais para leste e sudeste com velocidade média de 9 m/s, percorrendo 2.700 km de distância aproximadamente e possuem tempo de vida médio de três dias, ressaltando a importância da presença de umidade à sua formação.

Vários estudos, como por exemplo de Gan; Rao (1991), Reboita *et al.*, (2009), Cavalcanti *et al.* (2009) e Guia (2010) mostraram a região de latitudes médias como favorável à ciclogênese.

Dutra (2012) afirma que os ciclones na AS atuam praticamente o ano todo com variação sazonal e latitudinal. Charney (1947) define que eles são assimétricos termicamente (presença de frentes), formam-se devido à 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.

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), tendo verificado sistemas de baixa pressão que passavam por processos de transição apresentando uma estrutura híbrida entre dois ciclones já existentes.

Os ciclones extratropicais (CE) formam-se 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). A Figura 4 ilustra a formação, desenvolvimento e enfraquecimento de um CE no HS.

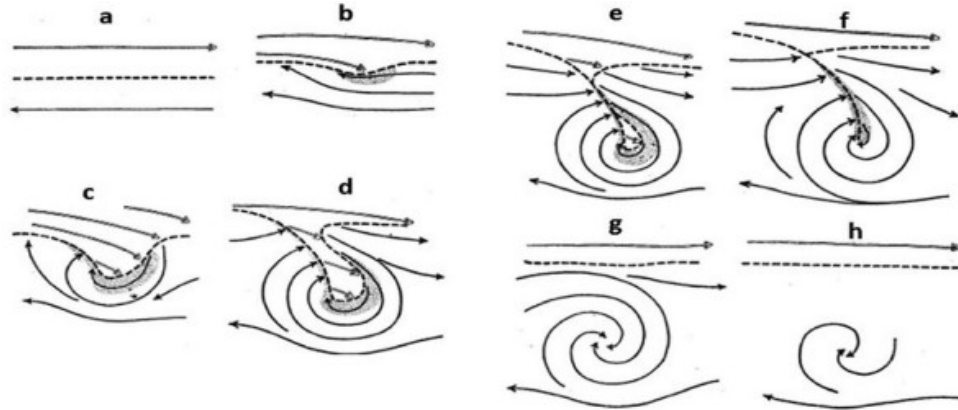
O CE forma-se em uma pequena onda que surge ao longo de uma frente (encontro de duas massas de ar distintas) em superfície (Fig. 4b). No HS, o vento de oeste vira de noroeste, formando frente quente (deslocando parte leste da frente para o sul) e a parte oeste da onda desloca-se para o norte/nordeste como frente fria (Fig. 4c).

Como a frente fria se propaga mais rapidamente do que a frente quente (Fig. 4d) 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. 4e) ocorre o aprisionamento do ar quente no centro do ciclone e, à 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. 4f).

Nesse estágio ele alcança sua intensidade máxima e é denominada oclusão. Na Figura 4g o ciclone torna-se um vórtice frio e simétrico e, como não há mais fonte de energia disponível, ele tende a desaparecer (Fig. 4h), (REBOITA et al, 2017).

Figura 4: 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; SOLBERG (1922)

Os ciclones tropicais (CTs) são também denominados tufões ou furacões, dependendo da localização onde atuam. Eles são caracterizados por possuir um núcleo quente, barotrópico e muito profundo, estendendo-se 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, originando-se nas regiões equatoriais do globo e intensificando-se por meio da convecção intensa e organizada, alimentada pela transferência de calor latente do oceano para a atmosfera.

Muitos estudos, como os de Gray (1968) e Galvin (2008), mostraram que, quanto maior for a temperatura da superfície do mar, maior será essa transferência. Assim, temperaturas acima de 26,5°C são ideais para a formação de CTs, bem como um fraco gradiente horizontal de temperatura em baixos níveis e um fraco cisalhamento vertical dos ventos, que também são condições para a formação de CTs (ROCHA *et al.*, 2016).

Marks (2002) afirma que uma camada de mistura oceânica com águas quentes, com profundidade aproximada de 50 metros, também é fundamental para a formação e desenvolvimento de ciclones tropicais. No entanto, estudos recentes mostram a ocorrência de ciclones tropicais sobre águas com temperaturas inferiores a 26,5 °C. No período entre 1981 e 2008, em uma climatologia entre 35° S e 35° N, Dare e McBride (2011) encontraram um total de 7% dos ciclones tropicais.

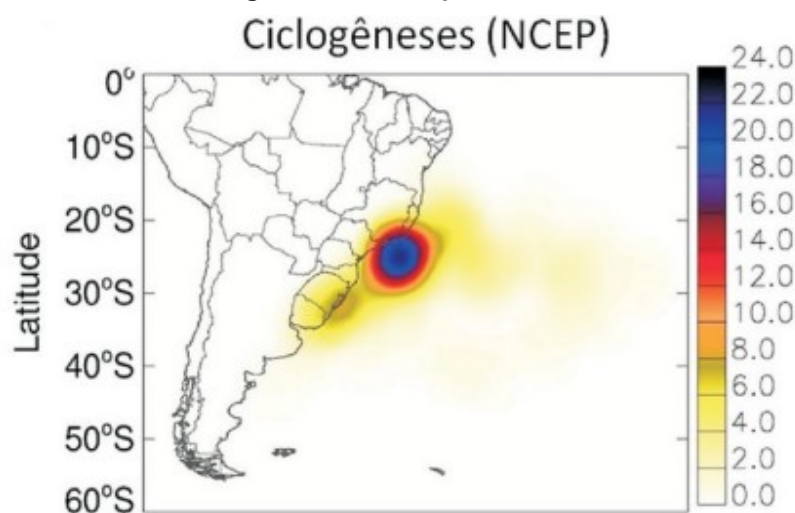
Um exemplo de ciclone tropical ocorreu em 2004 na costa sul da Austrália: o

furacão Catarina, que iniciou sua gênese em uma categoria e evoluiu para outras, ou seja, originou-se como extratropical, passou pela fase subtropical e decaiu como tropical.

Segundo Hart (2003), os ciclones subtropicais também são chamados de híbridos, pois são centros de baixa pressão que apresentam características tanto dos CTs quanto dos ciclones extratropicais (CEs). Eles apresentam núcleo quente em baixos níveis da atmosfera, como os CTs, e núcleo frio em altos níveis, como os CEs. Esses ciclones ocorrem em várias regiões, como no mar Mediterrâneo, próximo da Austrália, e 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 média de 7,2 sistemas por ano, resultado influenciado por terem utilizado limiares menos rígidos para a climatologia, como a inclusão de sistemas que não apresentavam baixa fechada na média troposfera e/ou cujo vento máximo em 925 hPa não atingia 17 m/s. 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 5).

Figura 5: Densidade de ciclogêneses subtropical obtida da reanálise 1 do NCEP



Fonte: Adaptado de GOZZO *et al.*, (2014)

No sudoeste do oceano Atlântico Sul, os ciclones subtropicais ocorrem preferencialmente no verão. Outras características encontradas por Gozzo *et al.*, (2014) indicam que os ciclones subtropicais percorrem distâncias menores e com menor velocidade em comparação aos ciclones extratropicais.

2.2.3 Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e Pacífico Sul (ASPS)

Os anticiclones são sistemas associados à circulação geral da atmosfera (CGA) e podem ser definidos como centros de alta pressão atmosférica. A CGA é responsável pela distribuição da energia solar na Terra. Essa distribuição consiste em movimentos atmosféricos que determinam as zonas climáticas em escala planetária, definindo diversos estados temporais em diferentes lugares (MENDONÇA; DANNI OLIVEIRA, 2007).

A CGA é composta por 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 pela formação dos anticiclones subtropicais. Esses 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, sendo mais intensos no inverno e aproximando-se mais do continente com deslocamento para o norte. No verão, afastam-se do continente e deslocam-se mais para o sul. Esse deslocamento ocorre devido ao aquecimento e à formação de uma baixa térmica continental (SATYAMURTY *et al.*, 1998).

Na América do Sul, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é responsável por grande parte das condições de tempo, sendo que a posição deste sistema e seu deslocamento zonal influenciam o regime de precipitação e os eventos meteorológicos na 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 a oeste. Quadro *et al.*, (2012) afirmam a importância do ASAS para o Sul e Sudeste do Brasil, na estação de verão, ao mencionar que o transporte de umidade da região Amazônica, por si só, não seria suficiente para compor toda a umidade observada nessas regiões nos meses mais quentes.

Em Santa Catarina, o ASAS é o principal responsável pelos ventos significativos do quadrante leste, que, na costa catarinense, favorecem a ocorrência de altos volumes de precipitação, conforme estudos de Rodrigues (2011).

Os primeiros estudos sobre os anticiclones ou centros de ação atmosféricos iniciaram-se em 1883 por Teisserenc de Bort, citado por Cardoso (2019). Em seguida, outros foram realizados (HASTENRATH, 1985; ITO, AMBRIZZI, 1999). Ito e Ambrizzi

(1999) realizaram um estudo climatológico sobre o ASAS para o período de 1977 a 1996, usando dados de reanálises do NCEP, com foco nos 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 entre os três meses foi constatado no mês de agosto.

Degola (2013) utilizou um algoritmo que identificou, mês a mês, a localização do ASAS nos dados do ERA-Interim ECMWF no período de 1989-2010. Os resultados obtidos mostraram que a variação latitudinal e a pressão central do ASAS apresentaram 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 grande variabilidade em sua posição longitudinal, enquanto de outubro até fevereiro, o ASAS permaneceu próximo a uma região fixa no oceano Atlântico Sul, em longitude próxima de 5° W.

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 América do Sul. A precipitação máxima anual na região sudoeste ocorre no inverno, e a mínima, no verão. Já na parte mais ao sul, a precipitação é 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-los, 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.

2.2.4 Zona de Convergência do Atlântico Sul

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é 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 (CARVALHO *et al.*, KOUSKY, 1988; QUADRO, 1994; 2012).

A formação de ZCAS é favorecida por diversos sistemas meteorológicos, tais como: o aquecimento diferencial entre continente - oceano, o Jato de Baixos Níveis (JBNS) que transportam umidade da Amazônia para região Sudeste e Sul (HERDIES

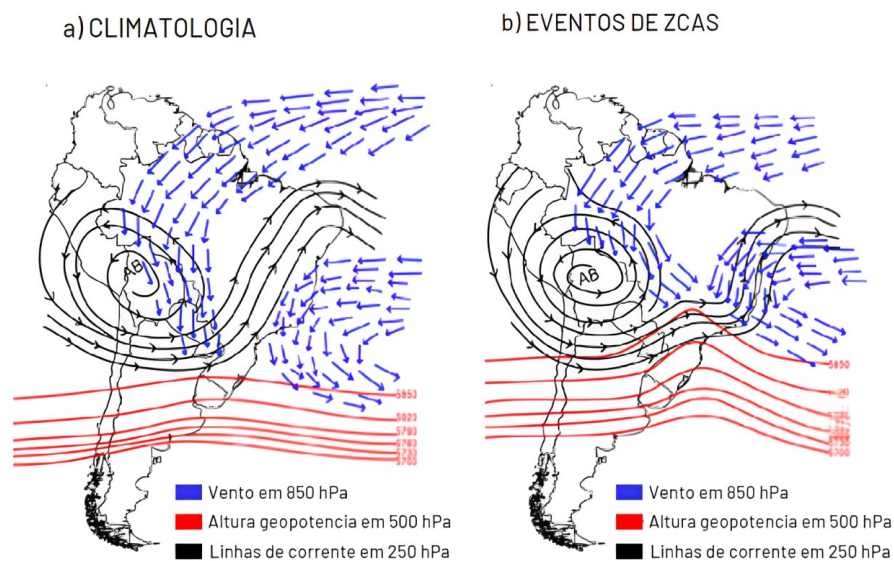
et al., 2002), a umidade transportada do oceano Atlântico Sul pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

Silva *et al.*, (2019), mostraram as diferenças da circulação atmosférica em eventos de ZCAS em relação à climatologia do verão (Figura 6), 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 6: Circulação nos níveis baixos, médios e altos da atmosfera



Fonte: SILVA *et al.*, 2019

2.2.5 Jato de Baixos Níveis

O Jato de Baixos Níveis (JBN) caracteriza-se por um máximo relativo no perfil vertical do vento na baixa troposfera (HERDIES *et al.*, 2002; HERDIES *et al.*, 2007), com velocidades máximas médias acima de 10 m/s, localizado em torno de 850 hPa e apresentando cisalhamento do vento até 700 hPa (CAMPOS; SANTOS, 2007).

O JBN atua em todos os continentes, conforme mostrado na Figura 7, e normalmente ocorre a leste de grandes cadeias de montanhas (STENSRUD, 1996).

Esses fluxos de vento, com grande extensão meridional, desempenham um papel muito importante na circulação atmosférica global, sendo responsáveis pela advecção de calor e umidade dos trópicos para regiões de latitudes médias (VERA *et al.*, 2006).

Figura 7: 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. Esse 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 dessa região. Esse 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 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 (CAMPOS *et al.*, 2007). Eles atuam como um dos reguladores do regime de chuva na região, pois influenciam na desestabilização da atmosfera e no disparo de convecção profunda ao interagir com os sistemas transientes e com a topografia local, sendo também fundamentais na formação e desenvolvimento de tempestades severas que se desenvolvem na região de saída do jato (MARENGO; SOARES, 2002).

Segundo os critérios de Whiteman *et al.*, (1997), adaptado de Bonner (1968), para se identificar um episódio de JBN 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 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 6 m/s e o vento meridional deve ser maior ou igual ao vento zonal.

Desde então, diversas versões modificadas de Bonner (1968) surgiram em muitos estudos, sendo que a versão mais recente foi implementada por Oliveira *et al.*, (2018), que propuseram algumas mudanças nos critérios de detecção dos JBNs, tais 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-chave da América do Sul, como as Serras de Córdoba, no centro da Argentina, e no sul e sudeste do Brasil.

2.2.6 Jato de Altos Níveis

O Jato de Altos Níveis é uma corrente forte, estreita e 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).

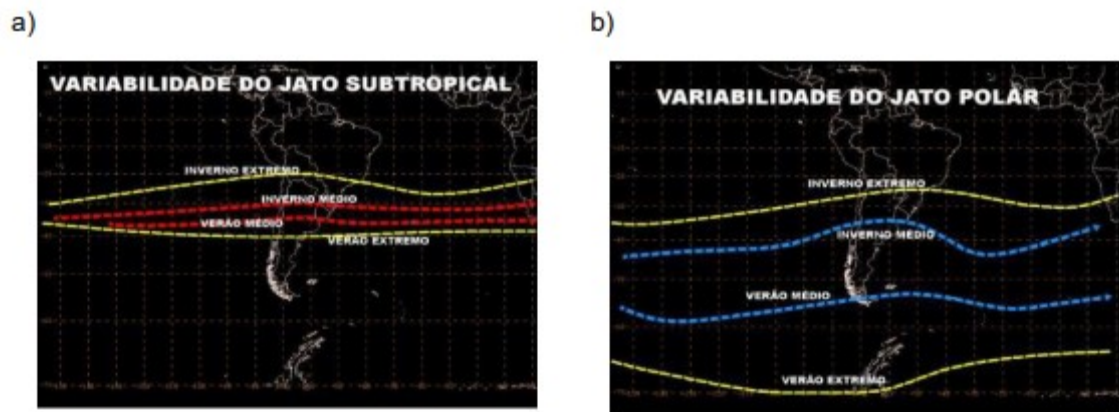
O Jato de Altos Níveis foi descoberto durante a Segunda Guerra Mundial, quando aviões bombardeiros norte-americanos sobrevoavam as Ilhas Japonesas a uma altura aproximada de 10 km e perdiam potência. Eles sobrevoavam de leste a oeste e, certas vezes, permaneciam praticamente parados em relação ao solo, devido à existência e influência de ventos fortes de oeste (RIEHL, 1969).

O núcleo da corrente de jato é representado pela região na qual as velocidades do vento são máximas, variando entre 140 e 300 km/h. Esta corrente de jato se localiza entre 9 e 13 km de altitude. Existem dois tipos de correntes de jato: o Jato Subtropical (JST) e o Jato Polar (JP).

O JST 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, estando 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 de que o JP depende da posição de atuação dos sistemas frontais. Durante o inverno, as frentes frias atuam com mais frequência do que no verão e atingem latitudes mais baixas, por isso sua posição é mais próxima ao Equador no inverno. A Figura 8 mostra a variabilidade sazonal do JST e do JP, percebendo-se que, no verão, o Jato Polar oscila tipicamente entre 30°S e 70°S, enquanto o JST encontra-se aproximadamente entre 20°S e 30°S (GUIA, 2011).

Figura 8: 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



Fonte: Adaptado de GUIA (2011)

Existem muitos estudos sobre a Corrente de Jato de Altos Níveis, como os de Riehl (1969), Browning (1985) e Kousky e Cavalcanti (1984).

Pezzi e Cavalcanti (1994) identificaram os principais padrões de circulação em altos níveis associados a Correntes de Jato. Por um período de 10 anos, com dados do ECMWF e foco na estação de inverno, verificaram que o maior número de casos com anomalias positivas durante todo o inverno ocorreu nas latitudes de 30°S a 20°S, sendo que o máximo ocorreu no mês de agosto, com 172 casos para os desvios (anomalias) maiores que 0 m/s.

Outro estudo com foco no JST foi realizado 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 do 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 demonstrou 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 do JST no período de 30 anos, foi elaborada uma climatologia mensal.

O JST varia de 16° a 35°S, 330 K e 40 m/s durante o verão, e de 18° a 29°S, 340 K e 60 m/s durante o inverno. Por fim, os autores determinaram a correlação entre os anos de *El Niño* Oscilação Sul (ENSO) e verificaram que o comportamento do JST foi

diferente em meses específicos; em geral, eventos de *La Niña* enfraquecem o JST durante o inverno, enquanto eventos de *El Niño* o intensificam durante o verão.

2.3 Sistemas de Mesoescala

A dinâmica da atmosfera faz com que haja interação entre os sistemas meteorológicos de diferentes escalas. Assim, fenômenos de grande escala influenciam os sistemas de escala sinótica (SFS, ASPs, ASAS, JBN, ZCAS, JAN, VCANS etc). Da mesma forma, as características da escala sinótica interagem com as da mesoescala. Os sistemas de escala sinótica, como os SFS, são intensificados pelos de mesoescala e, até mesmo, contribuem para a formação de sistemas como os SCMs, LIs, circulação de brisas e tempestades tornádicas.

Tendo em vista esse inter-relacionamento entre os diversos sistemas meteorológicos, apresenta-se a seguir uma descrição resumida dos principais sistemas de mesoescala que influenciam a região de estudo.

2.3.1 Sistemas Convectivos de Mesoescala

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) são constituídos por um aglomerado de nuvens convectivas, apresentando áreas com ocorrência contínua que podem ser parcialmente estratiformes e parcialmente convectivas. Além disso, são sistemas que possuem formas variadas (HOUZE, 1993; MACHADO; ROSSOW, 1993).

Esses sistemas são classificados como: Linhas de Instabilidade (LI), que possuem forma de linha (HOUZE, 1977); Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), 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, esses sistemas possuem um deslocamento para leste no inverno e de sudoeste para nordeste na estação verão, e seus tempos médios de vida variam de 6 a 36 horas (ANABOR, 2004).

Campos *et al.*, (2011) estudaram, entre 2004 e 2008, as características físicas dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs), cuja gênese e manutenção ocorrem ao sul de 20°S, apresentando ciclo de vida de 6 horas. Foram utilizadas imagens de satélite GOES (Satélite Ambiental Operacional Geoestacionário), que

serviram como base de dados para a aplicação da técnica ForTraCC (FERREIRA *et al.*, 2003).

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 nesse trimestre, o que favoreceu uma maior atividade convectiva; iv) apresentaram as três 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 América do Sul (AS) entre 2005 e 2006 e documentaram sua frequência e morfologia. Uma análise mostrou 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, sendo que 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), coberto por uma camada de nuvens *cirrus* (Ci). Sua identificação mais usual se faz por meio da observação de imagens de satélite, devido ao seu formato aproximadamente circular e seu rápido desenvolvimento vertical, o que permite classificá-los (MADDOX, 1980).

Na AS, os CCMs costumam ser um pouco mais duradouros, entre 10 e 20 h, 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). Eles estão diretamente associados a eventos com intensas e fortes rajadas de vento, e, por vezes, tornados (DIAS, 1996).

As trajetórias preferenciais de ocorrência dos CCMs na AS foram descobertas por Velasco e Fritsch (1987), que mostraram uma tendência mais zonal na primavera e no início do outono, e mais meridional no verão. Os CCMs iniciam sua formação no 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, principalmente nas estações primavera e verão.

Sua formação ocorre durante a noite, com um ciclo de vida entre 10 e 20 h, sendo que as primeiras células que antecedem a classificação do evento como CCM podem

aparecer já no início da tarde. Sua extensão máxima acontece durante a madrugada e a dissipação ocorre por volta das 12h (meio-dia) do dia seguinte (VELASCO; FRITSCH, 1987; DIAS, 1987).

Apesar dos CCMs atuarem na mesoescala, eles são fortemente influenciados por sistemas da escala sinótica (SAULO *et al.*, 2007), tais como JBN, JANs e pela aproximação de frentes frias. Dos sistemas citados, o JBN é o que mais influencia a formação de CCMs (SAULO *et al.*, 2007).

2.3.2 Circulação Marítima

O efeito da circulação marítima favorece o transporte de umidade do mar para o continente e a atuação do vento de leste, resultando 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 por relevo e/ou circulação local. A intensidade da chuva varia de fraca a forte, dependendo das condições de circulação marítima e de outros sistemas atmosféricos também atuantes.

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 causadas pelas chuvas com ventos do quadrante leste. A orografia da região é determinante para intensificar as condições de chuva associadas ao fluxo de ventos provenientes da circulação marítima. Ao encontrar os paredões da Serra Geral, a barreira orográfica faz com que o ar úmido se eleve, favorecendo a precipitação estratiforme e volumosa.

Rodrigues (2011) analisou casos de chuva acumulada com mais de 200 mm em 3 dias consecutivos 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” associada ao anticiclone do Atlântico Sul e, algumas vezes, acompanhado de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN).

2.4 Impactos socioeconômicos e estudos de extremos de precipitação

As tempestades, em geral, estão entre as características meteorológicas que mais causam eventos de alto impacto para a sociedade, como chuva intensa, vendaval e queda de granizo, provocando desastres decorrentes de enchentes e inundações. As estatísticas oficiais dos desastres feitas por diversos órgãos das Defesas Civas do Brasil, no período de 1991 a 2012, mostram que 77% das tempestades associadas a vendavais ocorreram na região Sul, sendo que mais de 4 milhões de pessoas foram afetadas, direta ou indiretamente, por tempestades com vendavais nesse período (ATLAS, 2013).

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 de enchentes ao longo do litoral: em 1880, 1911, 1957 (quatro enchentes), 1961, 1983, 1984 e 2005, até chegar ao ano de 2008, quando novamente uma grande enchente impactou a região. Esses eventos de enchentes na região litorânea e no Vale do Itajaí impactaram a indústria pesqueira, turística, tecnológica e as estruturas portuárias, além de diversos modais que integram a cadeia logística, que ficaram fora de operação por horas ou até dias. Eventos como esses também causam a sedimentação das vias navegáveis, exigindo mais obras de dragagem para conter as limitações do calado operacional (SANTOS, 2010; MMA; GIZ, 2018).

Em 1983, ocorreu uma enchente que entrou para a história de Santa Catarina. No trimestre de junho/julho/agosto de 1983, as chuvas ficaram muito acima da média e causaram prejuízos em muitos setores econômicos, principalmente no setor portuário. Segundo Silva Dias (2009), as perdas durante a enchente foram estimadas em aproximadamente U\$ 1,1 bilhão em todo o estado de Santa Catarina.

Em 1984, uma enchente se repetiu no estado e os moradores da região ainda se recuperavam da ocorrida em 1983. A ocorrência de enchentes em sequência fez com que o Rio Itajaí - Açú atingisse um pico de 15,46 metros (SANTOS, 2010). O evento ocorreu a partir de 6 de agosto, ficando a área da bacia do Itajaí - Açú e do Itajaí Mirim submersa por mais de 3 dias e 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, Santa Catarina sofreu mais uma

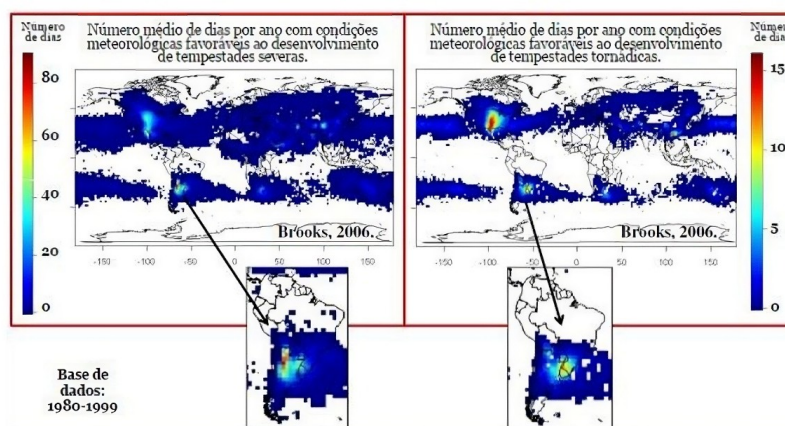
grande enchente, com perdas materiais e humanas significativas. As cidades de Blumenau, Itajaí e Ilhota foram as mais atingidas. Em Itajaí (163.218 habitantes), toda a população foi afetada: 100 mil pessoas foram deslocadas, 18.208 desabrigadas, 1.929 desalojadas, 1.800 feridas e cinco mortas. Foram 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 danificadas pela inundação (SILVA DIAS et al., 2009).

Na América do Sul, 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 na região da América do Sul são semelhantes aos existentes na região dos EUA, chamados “*Tornado Alley*” (BROOKS; DOSWELL III; KAY, 2003; NASCIMENTO; DOSWELL III, 2006). O padrão sinótico identificado por Nascimento (2005) mostra que a cordilheira dos Andes favorece o direcionamento do 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.

Esses fluxos resultam em alto cisalhamento de vento, delineando uma condição atmosférica favorável à atividade convectiva e, conseqüentemente, à formação de tempo severo no Sul do Brasil. Estudos de Brooks (2006) demonstraram o número médio de dias por ano com condições adequadas para a formação de tempestades severas e tornados para todo o globo (Figura 9):

Figura 9: Número médio de dias por ano favoráveis para tempestades severas e tornados



Fonte: CURSO REVOT; NASCIMENTO, (2010) adaptado 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.

O uso de técnicas estatísticas de percentis para o estudo de previsão tem sido muito utilizado para a classificação de eventos extremos de chuva. Estudos de Dereczynski *et al.*, (2008) e Barcellos (2009) 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 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 Da Silva e 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. Baseados nas características dinâmicas e sinóticas dos casos, definiram como episódio de chuva intensa aquele em que a isoietas de 50 mm/dia abrange 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 variações das estações pluviométricas disponíveis. Para cada grupo dessas séries temporais, foram obtidos os quantis de 99% e 99,9% para cada mês do ano. Como resultado, os eventos treinados 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%, definindo 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 inverno para a região Sul, com base em critérios estatísticos, foi o de Cardoso *et al.*, (2020). Esses autores utilizaram séries de atualizações diárias do 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 com padrões atmosféricos. Critérios estatísticos, como o quantil 99%, foram aplicados às séries de estudos diários. Sendo assim, obtiveram que o verão é a estação preferencial para a ocorrência de eventos extremos em todas as categorias comprovadas.

3 DADOS E METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

Neste trabalho foram escolhidas onze mesorregiões catarinenses (Figura 10): Litoral Norte, Baixo Vale do Itajaí, Grande Florianópolis, Litoral Sul, Médio Vale do Itajaí, Planalto Norte, Alto Vale do Itajaí, Planalto Sul, Meio - Oeste, Oeste, Extremo Oeste, de acordo com a divisão meteorológica da Defesa Civil do Estado:

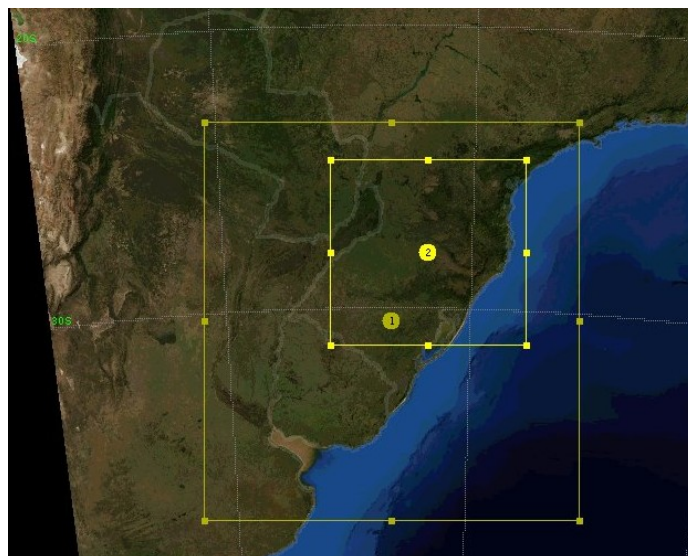
Figura 10: Mesorregiões Catarinense



Fonte: DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA

Para obter a representação geográfica dessa área de estudo no WRF, foram definidos dois domínios, conforme mostrados na Figura 11 abaixo:

Figura 11: Domínios 1 e 2 configurados no WRF



Fonte: O AUTOR (2022)

3.2 Dados

Foram selecionadas 24 estações pluviométricas de diferentes municípios, divididas nas 11 mesorregiões, abrangendo todo o estado de Santa Catarina, com as localizações de acordo com as coordenadas da Tabela 01, para as quais foram coletados dados de séries temporais históricas do volume de precipitação.

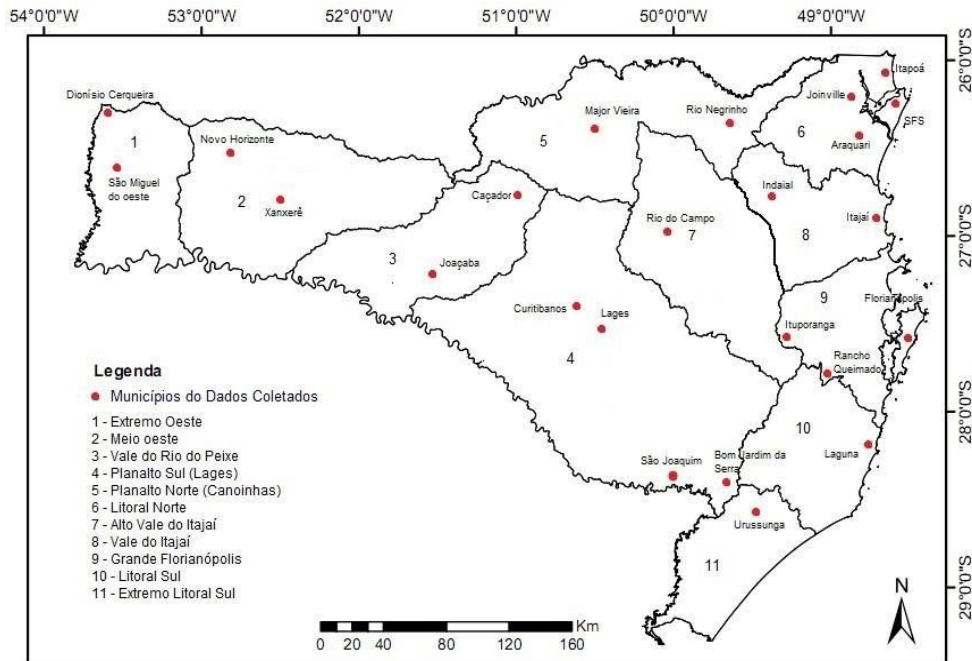
Tabela 01: Localização das Estações Meteorológicas e Série Temporal Analisada

Município	Longitude	Latitude	Período da série histórica
Araquari	-48,99	-26,35	01/07/2007 a 31/12/2020
Caçador	-48,65	-26,09	01/04/2008 a 30/06/2020
Curitibanos	-48,63	-26,49	01/03/2008 a 30/06/2020
Dionísio Serqueira	-48,61	-26,19	01/06/2008 a 30/06/2008
Florianópolis	-48,82	-26,383	01/02/2003 a 30/06/2020
Indaial	-48,781	-26,347	01/08/2006 a 30/06/2020
Itajaí	-48,875	-26,3309	01/07/2010 a 30/06/2020
Itapoã	-48,841	-26,301	01/07/2007 a 30/06/2020
Ituporanga	-48,865	-26,279	01/04/2008 a 30/06/2020
Joaçaba	-48,828	-26,273	01/10/2007 a 30/06/2020
Joinville	-48,797	-26,249	01/07/2007 a 31/12/2007
Lages	-48,988	-26,296	01/12/2014 a 30/06/2020
Laguna	-48,60197	-26,18108	01/06/2008 a 30/06/2020
Major Vieira	-48,6385	-26,2426	01/03/2009 a 30/06/2020
Bom Jardim	-48,72337	-26,37228	01/07/2007 a 30/06/2020
Novo Horizonte	-48,79885	-26,39942	01/10/2008 a 30/06/2020
Rio do Campo	-48,85	-26,32	01/04/2008 a 30/06/2020
Rancho Queimado	-48,86	-26,25	01/06/2016 a 30/06/2020
Rio Negrinho	-48,94	-26,18	01/04/2008 a 30/06/2020
São Francisco do Sul	-48,98	-26,25	01/07/2007 a 31/12/2007
São Joaquim	-48,99	-26,3	01/05/2008 a 30/06/2020
São Miguel	48,83	-26,45	01/04/2008 a 30/04/2020
Urussanga	-49	-26,14	01/06/2008 a 30/04/2020
Xanxerê	-52,4	-26,87	01/04/2008 a 30/04/2020

Fonte: O AUTOR (2022)

Essas estações meteorológicas podem ser visualizadas na Figura 12 abaixo:

Figura 12: Localização das 11 mesorregiões do Estado de Santa Catarina e a localização dos 24 municípios referentes à coleta dos dados das estações pluviométricas



Fonte: Alterado pelo autor BACK *et al.*, (2020)

Para a obtenção dos dados necessários à realização deste estudo, foram utilizados os disponíveis nas estações meteorológicas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), da Agência Nacional de Águas (ANA), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Centro Nacional de Monitoramento de Alertas e Desastres Naturais (CEMADEN) e do Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (Epagri/CIRAM).

Foram obtidas as séries históricas do ano de 2003 até o ano de 2020, totalizando 17 anos, representados por 104.860 dados de precipitação, a partir das quais foram selecionados eventos representativos de volumes de precipitação acima do percentil de 99,9% e posteriormente só utilizados os eventos ocorridos nos últimos cinco anos (2016 a 2020), para os quais a disponibilidade de informações mostrou-se mais completa.

Para a classificação dos sistemas meteorológicos atuantes, foram utilizadas as seguintes fontes de informação:

- <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman/>
- <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman/boletim/pdf/>
- <https://geokiriri.com/chuva-intensa-de-15-a-18-de-fevereiro-de-2019-joinville-e-regiao-e-litoral-norte-de-santa-catarina/>

- <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic?i=br>
- <http://tempo.cptec.inpe.br/>
- Sistema de detecção de frentes frias associadas a eventos meteorológicos de médio e alto impacto no Centro Sul da América do Sul – Dissertação defendida em 2022 pela mestre em Clima e Ambiente no IFSC: Roseli de Oliveira

3.3 Metodologia

3.3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

- Computador com acesso à Internet;
- Servidores de rede do laboratório do IFSC – Campus Florianópolis;
- Modelo WRF instalado nos equipamentos do laboratório do IFSC – Campus Florianópolis;
- *Scripts* em R para o pós-processamento dos dados gerados pelo modelo WRF;
- Dados pluviométricos da área de estudo, conforme detalhamento abaixo;
- *Scripts* desenvolvidos em *Python* para seleção de dados de precipitação, conforme metodologia detalhada nos itens 3.3.2 e 3.3.3 e
- *Scripts* desenvolvidos em GrADs para visualização gráfica dos eventos de precipitação extrema selecionados.

Quanto ao modelo WRF citado acima, foram utilizadas as seguintes configurações e parametrizações:

Hardware e Software utilizados para o Modelo Numérico WRF:

Foram usadas duas máquinas para a execução dos experimentos: um computador modelo *desktop* que estava implantado no laboratório do IFSC e um notebook pessoal. O notebook foi usado para complementar algumas execuções, em vista da grande quantidade de experimentos necessários.

O código WRF utilizado estava em sua versão 4.3.3, lançada à época em 11 de janeiro de 2022. O endereço para obter o código desta versão é: <https://github.com/wrf-model/WRF/releases/tag/v4.3.3>. Essa mesma versão foi instalada nas duas máquinas, sendo que o sistema operacional do computador do

IFSC era um *Linux* compatível com *RedHat*, no caso, *AlmaLinux* 8.5. No notebook, foi utilizado um *Linux* da distribuição *Fedora*.

Compõe também o sistema o código dos módulos de pré-processamento, referido como WPS (WRF Preprocessing System), cuja versão usada foi a 4.3.1. O tutorial contido no sítio <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/> apresenta informações básicas e referências para a instalação dos pré-requisitos e também para os módulos principais do WRF.

O WRF foi parametrizado conforme detalhado a seguir e apresentado no **Apêndice A** deste trabalho.

Dados de Inicialização do Modelo Numérico:

Dados atmosféricos globais históricos (GFS) obtidos do sítio da NCAR-UCAR, com resolução espacial de 0,25 graus (arquivos do tipo gfs0p25). Dados obtidos a partir de cadastro no sítio <https://rda.ucar.edu/datasets/d084001/> e os respectivos dados são nomeados como: “NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids HistoricalArchive.”

Referência: *National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce*. 2015, atualizado diariamente. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory*. Disponível em: <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>. Acesso em: 15 mar. 2022.

Algumas configurações do sistema WRF foram deixadas em seus valores padrões. O seguinte sítio, referido como “*namelist.input: Best Practices*,” contém boas práticas de configuração do sistema e respectivas parametrizações através da alteração do arquivo *namelist.input*.

Resolução Espacial (horizontal):

Dois domínios de grade com razão entre as resoluções de 5 para 1 e com comunicação *two-way feedback* (configuração padrão). O *feedback* também atualiza a grade mãe (mais externa) com as informações de ponto previstas no próximo passo de tempo.

- **Grade externa (domínio 1):** 10 x 10 km; 150 x 160 pontos de grade; dados de terreno com resolução espacial de 2 minutos.
- **Grade interna (domínio 2):** 2 x 2 km; 391 x 371 pontos de grade; dados

de terreno com resolução espacial de 30 segundos.

Projeção de mapa:

Lambert.

Resolução Espacial (vertical):

42 níveis na vertical, distribuídos de forma não igual, com ênfase na porção inferior da atmosfera e na porção vertical próxima aos níveis de jato. Coordenada central de D1, ou seja, da grade externa: -30.477, -53.302.

Parametrizações básicas tanto para D1 quanto para D2 (na maior parte baseada nos padrões usados no modelo WRF do CPTEC):

- **Física (microfísica de nuvens):** *Ferrier (new Eta)*; valor 5 no parâmetro *mp_physics* do arquivo de *namelist*.
- **Camada Limite Planetária:** *YSU scheme*; valor 1 no parâmetro *bl_pbl_physics* do arquivo de *namelist*.
- **Física de cúmulus:** *A newer Tiedtke scheme*; valor 16 no parâmetro *cu_physics* do arquivo de *namelist*.

3.3.2 Métodos

O método utilizado foi o indutivo, pois se buscou, com base nos 26 eventos extremos de precipitação, inferir sobre a acurácia das simulações obtidas a partir do processamento do WRF com 24, 48 e 72 horas de antecedência.

Para isso, foram executadas as seguintes atividades:

- i) Obtenção da documentação técnica disponível e versões para instalação de ferramentas que utilizam o modelo WRF para uso em ambiente de laboratório;
- ii) Execução do modelo instalado no Laboratório de Meteorologia do IFSC;
- iii) Realização de testes estatísticos com os dados gerados pelo modelo, parametrizações e demais configurações do modelo para a área selecionada;
- iv) Busca na base histórica de informações de clima e fenômenos naturais no estado de SC, que foram utilizadas para os testes de uso prático das ferramentas escolhidas;
- v) Avaliação da acurácia do modelo WRF para os 26 eventos de precipitação extrema.

3.3.3 Tratamento dos Dados

Os 104.860 dados de precipitação observada, em milímetros, foram coletados e tratados estatisticamente por meio de *scripts* desenvolvidos em *Python*, a partir dos quais foram calculadas as séries históricas e selecionados os 26 eventos de precipitação extrema no estado de Santa Catarina ocorridos nos últimos cinco anos (2016 a 2020), correspondentes aos percentis acima de 99,9% para cada mesorregião e estação do ano.

Esses 26 eventos foram simulados em execuções do WRF, cujos resultados foram processados por *scripts* escritos em R, utilizando dados de 25 pontos de grade WRF ao redor da localização geográfica de cada estação meteorológica, resultando em uma cobertura espacial de 10 km x 10 km.

A precipitação acumulada em 24 horas, 48 horas e 72 horas anteriores a cada evento foi obtida para cada um dos 26 eventos e comparada com a precipitação acumulada observada, analisando-se o desempenho quanto ao grau de assertividade, buscando-se avaliar variações de precisão em função de cada mesorregião, estação do ano e dos principais sistemas climatológicos atuantes.

O grau de assertividade foi calculado em todas as tabelas por meio do percentual obtido pela simples divisão entre o volume de precipitação gerado pelo WRF e o volume de precipitação observado.

Para o cálculo do grau de assertividade do volume de precipitação agregado por mesorregião, estação do ano e sistema climatológico atuante, tanto para os dados observados quanto para os gerados pelo WRF, foram calculadas as médias, a partir das quais foram determinados os percentuais de variação.

Assim, por exemplo, para a mesorregião Alto Vale do Itajaí, com duas ocorrências (Rio do Campo em 14/01/2016 e 26/03/2016), calculou-se a média de precipitação observada e a média de precipitação gerada pelo WRF, dividindo-se a média da precipitação gerada pela média da precipitação observada para obter o grau de assertividade.

O mesmo racional foi aplicado para o cálculo do grau de assertividade por estação do ano. Por exemplo, para a estação "Inverno", que teve oito ocorrências (Itajaí em 05/06/2017, Dionísio Cerqueira em 20/08/2017, Rancho Queimado em 05/06/2017, São Francisco do Sul em 16/07/2016, Itapoá em 16/07/2016, Urussanga em 15/07/2016, Indaial em 01/06/2017 e Rio Negrinho em 20/08/2016), foram calculadas a média de precipitação observada e a média de precipitação gerada pelo

WRF, dividindo-se a média da precipitação gerada pela média da precipitação observada para obter o grau de assertividade.

A mesma técnica foi aplicada para os sistemas climatológicos atuantes. Por exemplo, para "Circulação Marítima", que teve quatro ocorrências (Itajaí em 30/09/2017, Itajaí em 07/02/2020, Joinville em 30/09/2017 e Itapoá em 03/05/2018), calculou-se a média de precipitação observada e a média de precipitação gerada pelo WRF, dividindo-se a média da precipitação gerada pela média da precipitação observada para obter o grau de assertividade.

Além dessas análises de grau de assertividade, com base nos percentuais anteriormente descritos, foram também calculadas duas métricas estatísticas amplamente utilizadas em avaliações de variações entre dados observados e dados gerados por modelos numéricos: BIAS e raiz do erro quadrático médio (RMSE), conforme as fórmulas a seguir:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_o)$$

Onde x_i é a variável de análise; y_o as observações e N o número de observações.

O BIAS reflete a relação entre as variáveis de análise e as medidas obtidas por observações. Quando o valor do BIAS é negativo, significa que as variáveis da análise, em média, subestimam as observações. Por outro lado, valores positivos de BIAS indicam que houve superestimação.

Já a raiz do erro quadrático médio (RMSE, na sigla em inglês) é uma estimativa do desvio padrão dos dados. Quanto mais distante de zero for o valor do RMSE, maior será a magnitude do erro. Diferente do BIAS, que aponta a direção dos erros (subestimação ou superestimação), o RMSE fornece uma medida da magnitude das imprecisões nas estimativas.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_o)^2}$$

Onde x_i , é a variável da análise; y_o as observações e N o número de observações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Percentis de precipitação por mesorregião

Os dados de precipitação observada, correspondentes ao percentil de 99,9% para cada mesorregião e estação do ano, obtidos por meio da execução do *script* desenvolvido em *Python*, estão apresentados na Tabela 02:

Tabela 02: Resultados dos percentis 99,9% de precipitação observada (em mm) por mesorregião e estação do ano em SC

Mesoregião	Inverno	Primavera	Verão	Outono
Alto Vale do Itajaí	86,35	135,85	116,44	115,47
Baixo Vale do Itajaí	77,60	87,06	106,60	110,18
Médio Vale do Itajaí	75,13	96,73	78,50	77,38
Planalto Norte	79,26	80,38	76,36	116,30
Planalto Sul	113,38	106,95	110,17	123,20
Extremo Oeste	113,74	125,06	137,14	138,65
Oeste	140,90	118,93	129,97	126,29
Meio Oeste	103,04	92,66	70,84	102,70
Grande Florianópolis	109,86	96,84	197,40	145,97
Litoral Norte	74,93	152,36	127,05	106,14
Litoral Sul	82,72	85,52	109,54	158,20

Fonte: O AUTOR (2022)

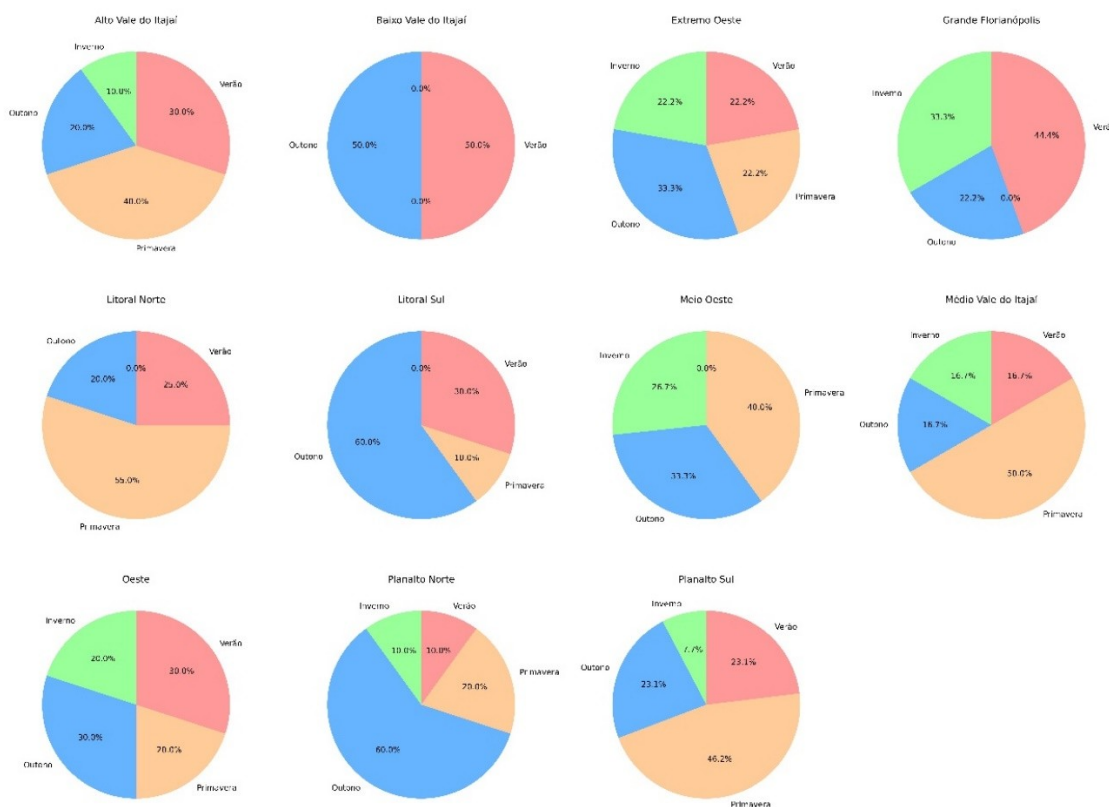
As médias de precipitação dos dados apresentados na tabela acima foram de 96,08 mm no inverno, 106,8 mm na primavera, 114,5 mm no verão e 120 mm no outono, com média geral do ano em 109,3 mm, demonstrando que os eventos extremos em geral ultrapassam os 100 mm diários, com maiores volumes nas estações do outono e verão.

Entre as mesorregiões, as maiores médias de volume de precipitação foram as observadas para a Grande Florianópolis com 137,5 mm e Oeste com 129 mm, com grande variabilidade entre as estações do ano para a Grande Florianópolis (desvio padrão de 45 mm) e menor variabilidade para o Oeste (desvio padrão de 9 mm).

A distribuição dos volumes de precipitação observadas acima do percentil de

99,9% por mesorregião e estação do ano pode ser visualizada na Figura 13 abaixo.

Figura 13: Distribuição dos volumes de precipitação por mesorregião e estação do ano



Fonte: O AUTOR (2022)

Na figura acima observa-se que em todas as mesorregiões existiram eventos de precipitação acima do limiar de 99,9% durante o outono.

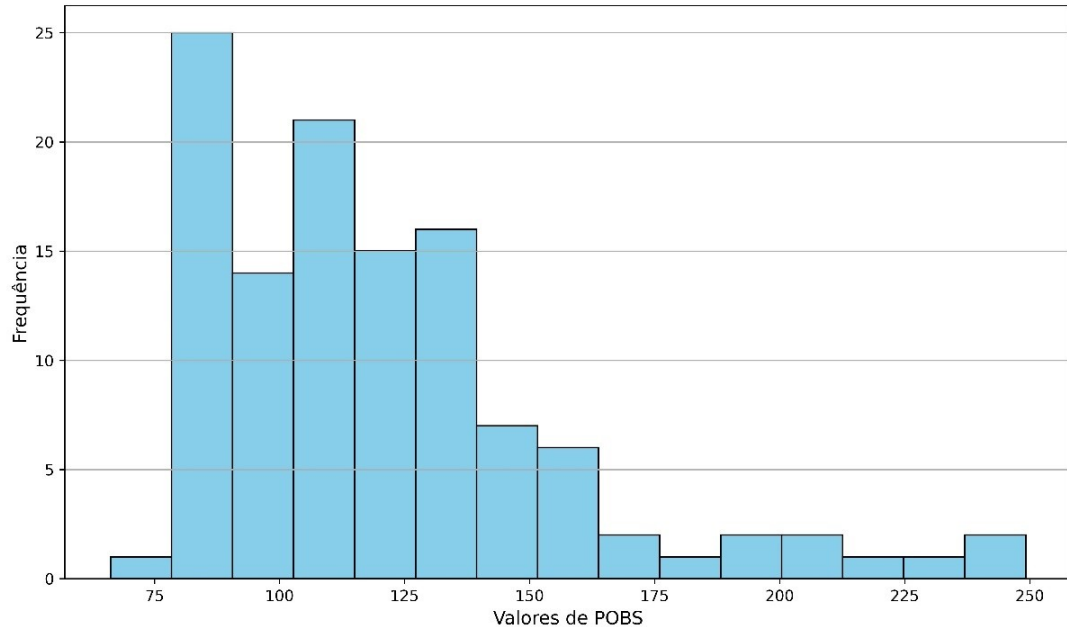
Já durante o verão isso também aconteceu em 10 das 11 mesorregiões, sendo que apenas no Meio Oeste não foi observado evento nessa estação do ano.

Na primavera foram observados eventos nessa categoria em 9 das 11 mesorregiões, não tendo ocorrências no Baixo Vale do Itajaí e na Grande Florianópolis.

Por fim, no inverno ocorreram eventos com essa característica em 8 das 11 mesorregiões, não tendo sido observados no Baixo Vale do Itajaí, Litoral Norte e Litoral Sul.

O histograma de frequência dos volumes de precipitação observados acima do limiar de 99,9% é apresentado na Figura 14 apresentada a seguir.

Figura 14: Frequência dos volumes de precipitação observados acima do limiar 99,9%



Fonte: O AUTOR (2022)

Foram observados 95 eventos de precipitação acima do limiar de 99,9% em toda a base de dados histórica utilizada (2003 a 2020), com média de 121,9 mm por dia e desvio padrão de 38,4 mm, sendo que o menor valor observado foi de 67,6 mm e o maior valor 249,2 mm.

4.2 Eventos extremos de precipitação por mesorregião

Com base nesses percentis, foram selecionados os 26 eventos extremos de precipitação observada (em mm) que ultrapassaram esses limiares nos últimos cinco anos dessa base de dados. Nos casos em que não houve eventos que superassem o limiar, foi considerado ao menos um evento imediatamente inferior. Esses dados estão apresentados na Tabela 03 abaixo, onde a coluna POBS indica a precipitação observada em milímetros, além de identificar os principais sistemas meteorológicos atuantes.

Tabela 03: 26 eventos extremos de precipitação observada (POBS em mm) em SC acima dos percentis 99,9% por mesorregião e estação do ano em SC

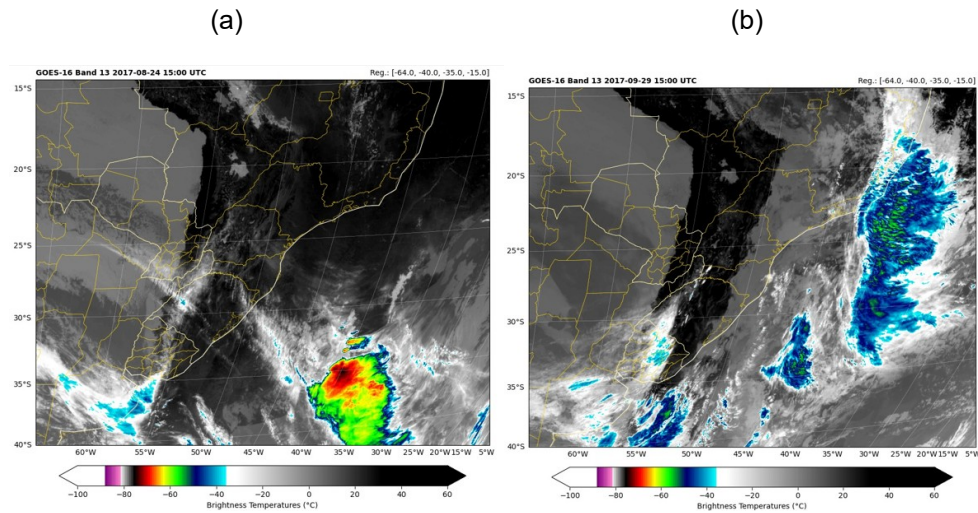
#	Município	Mesoregião	Data	Estação	POBS - 24 h	Sistema atuante
1	Rio do Campo	Alto Vale do Itajaí	14/01/16	Verão	130,6	Frente Fria
2	Rio do Campo	Alto Vale do Itajaí	23/03/16	Outono	132	Ciclone extratropical
3	Itajaí	Baixo Vale do Itajaí	26/10/16	Primavera	86,4	Frente Fria
4	Itajaí	Baixo Vale do Itajaí	05/06/17	Inverno	76,4	Baixa pressão
5	Itajaí	Baixo Vale do Itajaí	30/09/17	Primavera	87,8	Circulação Marítima
6	Itajaí	Baixo Vale do Itajaí	07/02/20	Verão	109,8	Circulação Marítima
7	Dionísio Cerqueira	Extremo Oeste	20/08/17	Inverno	125	Frente Fria
8	Dionísio Cerqueira	Extremo Oeste	04/11/17	Primavera	139,2	Frente Fria
9	Dionísio Cerqueira	Extremo Oeste	05/04/19	Outono	137	Frente Fria
10	Rancho Queimado	Grande Florianópolis	05/06/17	Inverno	101,8	Frente Fria
11	São Francisco do Sul	Litoral Norte	16/07/16	Inverno	77,9	Frente Fria
12	Itapoá	Litoral Norte	16/07/16	Inverno	95,4	Frente Fria
13	Joinville	Litoral Norte	30/09/17	Primavera	156,5	Circulação Marítima
14	Itapoá	Litoral Norte	03/05/18	Outono	129,4	Circulação Marítima
15	Urussanga	Litoral Sul	21/02/16	Verão	109,8	Frente Fria
16	Urussanga	Litoral Sul	15/07/16	Inverno	86,8	Frente Fria
17	Laguna	Litoral Sul	25/05/19	Outono	166	Frente Fria
18	Indaial	Médio Vale do Itajaí	27/04/16	Outono	75,2	Frente Fria
19	Indaial	Médio Vale do Itajaí	01/06/17	Inverno	67,6	Cavado
20	Caçador	Meio Oeste	31/05/19	Outono	104,6	SCM - Convectivo Meso escala
21	Joaçaba	Meio Oeste	26/02/20	Verão	90,2	Frente Fria
22	Xanxerê	Oeste	15/02/19	Verão	136	Cavado
23	Xanxerê	Oeste	30/01/20	Verão	130	Frente Fria
25	Rio Negrinho	Planalto Norte	31/05/19	Outono	126	SCM - Convectivo Meso escala
26	Bom Jardim da Serra	Planalto Sul	04/12/16	Verão	153,6	Ciclone extratropical

Fonte: O AUTOR (2022)

Os dados da Tabela 03 apontam para uma média de 111,97 mm com desvio padrão de 28,18 mm de precipitação diária, tendo como maior volume o da ocorrência em Joinville no dia 30/9/2017 (156,5 mm) e o menor volume o da ocorrência em Indaial no dia 1/6/2017 (67,6 mm).

Para facilitar a identificação do Sistema Climatológico atuante foram utilizadas imagens como, por exemplo do Satélite GOES 13, para os eventos de agosto e setembro de 2017, no Litoral Norte de Santa Catarina, conforme apresentado na Figura 15:

Figura 15: Imagem do satélite GOES 13 na Grande Florianópolis e Litoral Norte de SC, (a) 24/08/2017 e (b) 29/09/2017: o anticiclone na costa favoreceu o efeito da circulação marítima.



Outro exemplo de imagem utilizada na identificação do Sistema Climatológico atuante foi a da Frente Fria durante o evento de 26 de fevereiro de 2020 em Joaçaba, conforme apresentado na Figura 16:

Figura 16: Evento de Frente Fria em Joaçaba ocorrido em 26/2/2020



Nesta seleção de eventos extremos, a quantidade por estação do ano pode ser visualizada na Tabela 04 abaixo:

Tabela 04: Eventos extremos por estação do ano

Estação do Ano	Ocorrências na amostra Para simulação – WRF	%
Outono	7	26,9%
Verão	7	26,9%
Primavera	4	15,4%
Inverno	8	30,8%
Total	26	100,0%

Fonte: O AUTOR (2022)

Observa-se na Tabela 04 uma distribuição equilibrada dos eventos extremos entre as estações do outono, verão e inverno, com sete, sete e oito ocorrências, respectivamente. Já na primavera, a quantidade de eventos foi inferior, com apenas quatro eventos selecionados.

A quantidade de eventos extremos do sistema meteorológico atuante está apresentada na Tabela 05 a seguir:

Tabela 05: Eventos extremos por sistema atuante

Sistema atuante	Ocorrências de chuvas acima Do percentil 99,9%	%
Mesoescala	2	7,70%
Circulação Marítima	4	15,40%
Frentes Frias	15	57,70%
Outros	5	19,20%
Total	26	100,00%

Fonte: O AUTOR (2022)

Na Tabela 05 observa-se uma grande quantidade de eventos extremos de precipitação relacionadas as ocorrências de Frentes Frias (57,7%) que são muito comuns na área de estudo. Outro sistema climatológico também importante nas ocorrências de altos volumes de precipitação é a Circulação Marítima, representando 15,4% dos eventos selecionados.

A distribuição da quantidade de eventos extremos de precipitação por mesorregião está detalhada na Figura 17, permitindo uma visualização clara de como esses eventos são distribuídos geograficamente pelo estado, destacando as áreas mais impactadas.

Figura 17: Eventos selecionados por mesorregião



Fonte: O AUTOR (2022)

Nessa figura visualizam-se duas mesorregiões com a maior quantidade de eventos extremos de precipitação: Litoral Norte e Baixo Vale do Itajaí, ambas com quatro ocorrências. Logo na sequência observam-se outras duas mesorregiões com três eventos: Litoral Sul e Extremo Oeste.

4.3 Assertividade na simulação dos eventos extremos de precipitação

Os resultados obtidos para o grau de assertividade na simulação dos 26 eventos extremos de precipitação selecionados são apresentados nas Tabelas 06 a 10.

A Tabela 06 mostra os volumes de precipitação acumulada em mm observados e simulados com 24 horas, 48 horas e 72 horas de antecedência para os 26 eventos.

Tabela 06: Resultados da precipitação em mm do WRF na simulação de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina

26 Eventos de precipitação extrema em SC – acima do percentil 99,9% para cada mesoregião / estação do ano (prioridade para os mais recentes (2016 a 2020))			Previsão com 24 horas De antecedência			Previsão com 48 horas de antecedência		Previsão com 72 horas De antecedência
#	Município	Data	POBS - 24 h	POBS - 48 h	POBS - 72 h	WRF - Acum 24 h	WRF - Acum 48 h	WRF - Acum 72 h
1	Rio do Campo	14/01/16	130,6	130,6	139	6,265	7,4298	18,9085
2	Rio do Campo	26/03/16	132	168,4	168,6	12,03276	146,6682	204,307
3	Itajaí	26/10/16	86,4	88,4	88,4	68,063	13,3963	18,2873
4	Itajaí	05/06/17	76,4	76,8	76,8	45,0998	51,526	42,5621
5	Itajaí	30/09/17	87,8	90,8	90,8	51,3392	41,1637	46,5304
6	Itajaí	07/02/20	109,8	123,2	132,2	13,5873	12,7421	16,9079
7	Dionísio Cerqueira	20/08/17	125	132,4	132,4	28,3165	32,8491	27,6544
8	Dionísio Cerqueira	04/11/17	139,2	191,8	191,8	50,74	86,105	45,805
9	Dionísio Cerqueira	05/04/19	137	137	137,2	23,9184	31,8025	63,4115
10	Rancho Queimado	05/06/17	101,8	102,4	102,4	31,7224	53,8617	52,2749
11	São Francisco do Sul	16/07/16	77,9	78,9	84	33,1232	61,1348	61,8975
12	Itapoá	16/07/16	95,4	95,4	99,6	43,6989	46,9734	46,3957
13	Joinville	30/09/17	156,5	175,9	175,9	58,8013	24,4445	43,0317
14	Itapoá	03/05/18	129,4	131,4	131,4	1,3304	8,1981	41,1044
15	Urussanga	21/02/16	109,8	109,8	109,8	6,20405	indisponível	1,12805
16	Urussanga	15/07/16	86,8	109,8	109,8	1,1153	13,7588	21,0088
17	Laguna	25/05/19	166	242,6	250	8,1401	72,9898	26,5662
18	Indaial	24/04/16	75,2	75,2	75,2	7,8742	16,5559	20,6012
19	Indaial	01/06/17	67,6	89,8	98	5,6698	55,8615	68,5129
20	Caçador	31/05/19	104,6	119,6	128,6	45,2806	59,3018	71,5815
21	Joaçaba	26/02/20	90,2	106,8	106,8	4,3842	47,2758	68,3413
22	Xanxerê	15/02/19	136	136	136	19,6162	51,2777	32,229
23	Xanxerê	30/01/20	130	142	142	55,025	33,4854	10,0701
24	Rio Negrinho	20/08/16	80,4	85,4	108,2	6,265	7,4298	18,9085
25	Rio Negrinho	31/05/19	126	149,8	178,4	39,3248	47,6296	68,1706
26	Bom Jardim da Serra	04/12/16	153,6	153,8	155,2	0,1532	38,471	45,3424

Fonte: O AUTOR (2022)

A simulação de precipitação para o caso 15 (Urussanga – 21/12/2016), com antecedência de 48 horas, está registrada na Tabela 06 como "indisponível". Esse resultado decorre de um erro nos dados globais e de inicialização, conforme detalhado a seguir:

Problema com dados de entrada (fornecido pela UCAR)
<https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/>

214405820 Oct 14 16:28 gfs.t00z.pgrb2.0p25.f036

13132926 Oct 14 16:28 gfs.t00z.pgrb2.0p25.f039

Tamanho de f039 é de apenas 13MB, logo, contém menos dados do que necessários para inicialização do WRF.

A partir dos resultados obtidos através do processamento do WRF, apresentado na Tabela 06, foi calculado o grau de assertividade das simulações. O cálculo foi realizado pela divisão dos volumes de precipitação das simulações e dos volumes observados para os cenários de 24, 48 e 72 horas, mostrando assim o grau de acerto das simulações. Os dados resultantes deste cálculo estão apresentados na Tabela 07.

Tabela 07: Assertividade do WRF na simulação de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina

26 Eventos de precipitação extrema em SC – acima do percentil 99,9% para cada mesoregião / estação do ano (prioridade para os mais recentes (2016 a 2020))						Previsão com 24 horas De antecedência	Previsão com 48 horas de antecedência	Previsão com 72 horas De antecedência	Assertividade com 24 horas De antecedência	Assertividade com 48 horas de antecedência	Assertividade com 72 horas De antecedência
#	Município	Data	POBS - 24 h	POBS - 48 h	POBS - 72 h	WRF - Acum 24 h	WRF - Acum 48 h	WRF - Acum 72 h	Acum 24 h	Acum 48 h	Acum 72 h
1	Rio do Campo	14/01/16	130,6	130,6	139	6,265	7,4298	18,909	4,80%	5,69%	13,60%
2	Rio do Campo	26/03/16	132	168,4	168,6	12,03276	146,6682	204,307	9,12%	87,10%	121,18%
3	Itajaí	26/10/16	86,4	88,4	88,4	68,063	13,3963	18,287	78,78%	15,15%	20,69%
4	Itajaí	05/06/17	76,4	76,8	76,8	45,0998	51,526	42,562	59,03%	67,09%	55,42%
5	Itajaí	30/09/17	87,8	90,8	90,8	51,3392	41,1637	46,5304	58,47%	45,33%	51,24%
6	Itajaí	07/02/20	109,8	123,2	132,2	13,5873	12,7421	16,9079	12,37%	10,34%	12,79%
7	Dionísio Cerqueira	20/08/17	125	132,4	132,4	28,3165	32,8491	27,6544	22,65%	24,81%	20,89%
8	Dionísio Cerqueira	04/11/17	139,2	191,8	191,8	50,74	86,105	45,805	36,45%	44,89%	23,88%
9	Dionísio Cerqueira	05/04/19	137	137	137,2	23,9184	31,8025	63,4115	17,46%	23,21%	46,22%
10	Rancho Queimado	05/06/17	101,8	102,4	102,4	31,7224	53,8617	52,2749	31,16%	52,60%	51,05%
11	São Francisco do Sul	16/07/16	77,9	78,9	84	33,1232	61,1348	61,8975	42,52%	77,48%	73,69%
12	Itapoá	16/07/16	95,4	95,4	99,6	43,6989	46,9734	46,3957	45,81%	49,24%	46,58%
13	Joinville	30/09/17	156,5	175,9	175,9	58,8013	24,4445	43,0317	37,57%	13,90%	24,46%
14	Itapoá	03/05/18	129,4	131,4	131,4	1,3304	8,1981	41,1044	1,03%	6,24%	31,28%
15	Urussanga	21/02/16	109,8	109,8	109,8	6,20405	indisponível	1,12805	5,65%	indisponível	1,03%
16	Urussanga	15/07/16	86,8	109,8	109,8	1,1153	13,7588	21,0088	1,28%	12,53%	19,13%
17	Laguna	25/05/19	166	242,6	250	8,1401	72,9898	26,5662	4,90%	30,09%	10,63%
18	Indaial	24/04/16	75,2	75,2	75,2	7,8742	16,5559	20,6012	10,47%	22,02%	27,40%
19	Indaial	01/06/17	67,6	89,8	98	5,6698	55,8615	68,5129	8,39%	62,21%	69,91%
20	Caçador	31/05/19	104,6	119,6	128,6	45,2806	59,3018	71,5815	43,29%	49,58%	55,66%
21	Joaçaba	26/02/20	90,2	106,8	106,8	4,3842	47,2758	68,3413	4,86%	44,27%	63,99%
22	Xanxerê	15/02/19	136	136	136	19,6162	51,2777	32,229	14,42	37,70%	23,70%
24	Rio Negrinho	20/08/16	80,4	85,4	108,2	6,265	7,4298	18,9085	7,79%	8,70%	17,48%
25	Rio Negrinho	31/05/19	126	149,8	178,4	39,3248	47,6296	68,1706	31,21%	31,80%	38,21%
26	Bom Jardim da Serra	04/12/16	153,6	153,8	155,2	0,1532	38,471	45,3424	0,10%	25,01%	29,22%
Médias									24,30%	34,82%	36,79%

Fonte: O AUTOR (2022)

Os percentuais de assertividade por mesoregião foram obtidos considerando-se as médias observadas do volume de precipitação em comparação com as médias simuladas pelos processamentos do WRF. Os resultados encontram-se na Tabela 08 a seguir, onde estão destacados em verde os melhores resultados (maiores graus de acerto) e em vermelho os piores (menores graus de acerto).

Tabela 08: Assertividade do WRF na simulação de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina por mesorregião

Mesorregião	Precipitação média para os eventos extremos			Previsão com 24 horas de antecedência	Previsão com 48 horas de antecedência	Previsão com 72 horas De antecedência	Assertividade com 24 horas De antecedência	Assertividade com 48 horas De antecedência	Assertividade com 72 horas De antecedência
	POBS - 24 hs	POBS - 48 hs	POBS - 72 hs	WRF	WRF	WRF	24 horas	48 horas	72 horas
Alto Vale do Itajaí	131,30	149,5	153,8	9,149	77,049	111,608	6,97%	51,54%	72,57%
Baixo Vale do Itajaí	90,10	94,8	97,05	44,522	29,707	31,072	49,47%	31,34%	32,02%
Médio Vale do Itajaí	71,40	82,5	86,6	6,772	36,209	44,557	9,48%	43,89%	51,45%
Planalto Norte	103,20	117,6	143,3	22,795	27,53	43,54	22,09%	23,41%	30,38%
Planalto Sul	153,60	153,8	155,2	0,153	38,471	45,342	0,10%	25,01%	29,22%
Extremo Oeste	133,73	153,73	153,8	34,325	50,252	45,624	25,67%	32,69%	29,66%
Oeste	133,00	139	139	37,321	42,382	21,15	28,06%	30,49%	15,22%
Meio Oeste	97,40	113,2	117,7	24,832	53,289	69,961	25,50%	47,07%	59,44%
Grande Florianópolis	101,80	102,4	102,4	31,722	53,862	52,275	31,16%	52,60%	51,05%
Litoral Norte	114,80	120,4	122,72	34,238	35,188	48,107	29,82%	29,23%	39,20%
Litoral Sul	120,86	154,06	156,53	5,153	43,374	16,234	4,26%	28,15%	10,37%

Fonte: O AUTOR (2022)

O maior grau de acerto foi observado para a mesorregião de Alto Vale do Itajaí no cenário de simulação com 72 horas de antecedência, chegando-se a 72,57% quando comparado o volume de precipitação acumulado para 72 horas com base no resultado simulado de 111,6 mm com o observado de 153,8 mm.

Por outro lado, o menor grau de acerto foi observado para a mesorregião Planalto Sul no cenário de simulação com 24 horas de antecedência, chegando-se a 0,10% quando comparado o volume de precipitação acumulado para 24 horas com base no resultado simulado de 0,15 mm com o observado de 153,6 mm.

Já as assertividades por estação do ano foram calculadas considerando-se as médias por estação do ano de volumes de precipitação observados em comparação com as médias obtidas pelos processamentos do WRF. Os resultados estão na Tabela 09, na qual os melhores resultados (maiores graus de acerto) aparecem destacados em verde, enquanto os piores (menores graus de acerto) estão em vermelho.

Tabela 09: Assertividade do WRF na simulação de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina por estação do ano

Estação	Previsão de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina por estação do ano			Previsão com 24 horas De antecedência	Previsão com 48 horas De antecedência	Previsão com 72 horas De antecedência	Assertividade com 24 horas De antecedência	Assertividade com 48 horas De antecedência	Assertividade com 72 horas De antecedência
	POBS - 24 hs	POBS - 48 hs	POBS - 72 hs	WRF	WRF	WRF	24 horas	48 horas	72 horas
Outono	124,31	146,286	152,771	19,7	54,735	70,82	15,85%	37,42%	46,36%
Verão	122,86	128,886	131,571	15,034	27,24	27,561	12,24%	21,14%	20,95%
Primavera	117,47	136,725	136,725	57,236	41,277	38,414	48,72%	30,19%	28,10%
Inverno	88,91	96,363	101,4	24,376	40,424	42,402	27,42%	41,95%	41,82%

Fonte: O AUTOR (2022)

O maior grau de acerto foi observado para a estação da primavera no cenário de simulação com 24 horas de antecedência, chegando-se a 48,72% quando comparado

o volume de precipitação acumulado para 24 horas com base no resultado simulado de 57,2 mm com o observado de 117,4 mm.

Por outro lado, o menor grau de acerto foi observado para a estação do verão no cenário de simulação com 24 horas de antecedência, chegando-se a 12,24% quando comparado o volume de precipitação acumulado para 24 horas com base no resultado simulado de 15 mm com o observado de 122,8 mm.

Foram também apurados os percentuais de assertividade por sistema climatológico atuante, levando em consideração as médias de volumes de precipitação por sistema climatológico observados em comparação com as médias dos valores simulados pelos processamentos do WRF. Os resultados são apresentados na Tabela 10, onde os melhores resultados podem ser destacados em verde (maiores graus de acerto) e os piores (menores graus de acerto) em vermelho.

Tabela 10: Assertividade do WRF na simulação de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina por sistema climatológico atuante

Precipitação média para eventos extremos				Previsão com 24 horas De antecedência	Previsão com 48 horas De antecedência	Previsão com 72 horas De antecedência	Assertividade com 24 horas De antecedência	Assertividade com 48 horas De antecedência	Assertividade com 72 horas De antecedência
	POBS - 24 hs	POBS - 48 hs	POBS - 72 hs	WRF	WRF	WRF	24 horas	48 horas	72 horas
SCM	115,30	134,7	115,3	42,303	53,466	69,876	36,69%	39,69%	60,60%
Circulação Marítima	120,88	130,325	120,875	31,265	31,637	36,894	25,87%	16,60%	30,52%
Frentes Frias	108,78	121,9	108,78	24,99	35,003	33,417	22,97%	28,71%	30,72%
Outros	113,12	124,96	200,54	16,514	68,761	78,591	14,60%	55,03%	37,19%

Fonte: O AUTOR (2022)

O maior grau de acerto foi observado para o sistema climatológico SCM no cenário de simulação com 72 horas de antecedência, chegando-se a 60,6% quando comparado o volume de precipitação acumulado para 72 horas com base no resultado simulado de 69,8 mm com o observado de 115,3 mm.

Por outro lado, o menor grau de acerto foi observado para o sistema climatológico Outros (Ciclone e Cavado) no cenário de simulação com 24 horas de antecedência, chegando-se a 14,6% quando comparado o volume de precipitação acumulado para 24 horas com base no resultado simulado de 16,5 mm com o observado de 113,1 mm.

A partir dos resultados do processamento do WRF apresentados na Tabela 06, foram calculados o BIAS e o RMSE dos dados de saída do WRF em relação às precipitações observadas para os cenários de simulação da precipitação acumulada em 24, 48 e 72 horas, conforme apresentado na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11: BIAS e RMSE dos 26 eventos extremos de precipitação analisados

	Acum 24 horas	Acum 48 horas	Acum 72 horas
BIAS			
$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_o)$	-86,32	-83,91	-83,345
RMSE			
$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_o)^2\right)}$	93,071	91,736	97,067

Fonte: O AUTOR (2022)

Os dados apresentados indicam que o modelo subestimou os volumes de precipitação em mais de 83 mm para os três cenários de acumulados em 24, 48 e 72 horas. Ao analisar os resultados individuais dos 26 casos selecionados, observa-se que, exceto pelo caso da precipitação acumulada em 72 horas em Rio do Campo, em 26/3/2016, o WRF superestimou o volume, apresentando uma precipitação observada de 168,3 mm e uma estimativa de 204,3 mm (121,18%). Em todos os demais casos, constatou-se que o WRF subestimou o volume de precipitação, embora em 100% das situações tenha sido assertivo ao prever algum volume de precipitação.

Na comparação com estudos similares realizados por outros autores citados nesse trabalho, como os de Almeida e Marton (2014) e Silva *et al.* (2019), os resultados apresentados confirmam a assertividade nas simulações do WRF em prever ocorrências de chuvas, bem como do viés de volumes de precipitação subestimados em relação aos volumes observados.

Em termos de graus de acerto, como os estudos citados foram realizados para apenas um evento de precipitação extrema, com variações nas parametrizações realizadas, o comparativo com o presente estudo, que avaliou 26 eventos distintos com um único cenário de parâmetros, não faz muito sentido. Embora exista indicação de que exercícios de sensibilidade com ajustes nas parametrizações utilizadas nesse estudo podem gerar graus de assertividade maiores dos que foram obtidos.

5 PRODUTO DESENVOLVIDO

O produto desenvolvido por este trabalho foi o roteiro passo a passo da metodologia utilizada, a seguir detalhado:

Especificação da Configuração de Execução WRF

A execução do WRF necessita de vários módulos que fazem tratamento e manipulação de dados geográficos e meteorológicos com o fim de produzir previsões numéricas de tempo (NWP). O sítio de referência do modelo apresenta o fluxo de dados e respectivos programas/sistemas em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/model_overview.html.

Para automatizar o processamento tanto para finalidades de operação quanto de pesquisa foram criados *scripts* usando linguagem *Bash Shell* (<https://www.gnu.org/software/bash/>) e comandos/programas disponíveis em sistemas *Linux*.

O conjunto de *scripts* definem o sistema ***model-wrf*** pode ser encontrado em <https://github.com/glcamillo/model-wrf> e foi disponibilizado sob licença MIT (*open source*). Na página no *GitHub* há explicações e informações sobre a execução do modelo e como parametrizá-lo. Os *scripts* do modelo só contemplam a execução, de forma que uma instalação prévia do WRF já deve estar operacional. O sítio do WRF disponibilizado pelo laboratório *Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory* (MMM) da universidade UCAR MMM já contempla um tutorial de instalação: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/compilation_tutorial.php

O download dos códigos para a máquina local pode ser feito por meio dos seguintes comandos:

a) acesso ao endereço:

<https://github.com/glcamillo/model-wrf/archive/refs/heads/main.zip> ou

b) usando o comando *git clone*:

\$ *git clone* <https://github.com/glcamillo/model-wrf.git>

Na página do sistema no *GitHub* há informações sobre configuração do sistema, principalmente diretórios e variáveis de ambiente, para acomodar a estrutura de instalação do WRF.

Configuração básica para execução

O modelo WRF é extremamente configurável através de parâmetros. As configurações são ajustadas em arquivos próprios de cada módulo. Nos *scripts* do modelo, os arquivos de configuração ficam em subdiretórios dentro de `~/model-wrf`. Dependendo da escolha do usuário ao executar o *script* de rodada `runwrf.sh`, os arquivos de configuração são alterados e copiados para os diretórios de execução dos módulos.

Segue exemplo de execução básica, considerando:

- Inicialização do modelo: 2015-07-24 00UTC;
- Previsão de 24 horas;
- Configuração de domínio B, conforme especificado nos requisitos do projeto;
- Número de processos MPI para execução do módulo WRF (módulo de integração numérica; demais módulos têm sua execução serial).

```
$ ulimit -s unlimited
```

```
$ cd ~/model-wrf
```

```
$ chmod u+x runwrf.sh
```

```
$ ./runwrf.sh -conf B -ts 2015-07-24-00 -ti 24 -np 2
```

Observações:

- O comando “*ulimit - s unlimited*” é usado para não restringir o tamanho de pilha para os processos em execução;
- **[-conf B]** Escolha da configuração de domínio B. Neste endereço são especificados as configurações básicas: <https://github.com/glcamillo/model-wrf/blob/main/README.md#configurations-some-domain-configurations-available-to-be-used>;
- **[-ts 2015-07-24-00]** A opção `-ts` especifica data - hora da inicialização do modelo;
- **[-ti 24]** Especifica o tempo de integração (previsão) que pode ser: 24, 48 ou 72 (em horas);
- **[-np 2]** Parâmetro Opcional (padrão: 1). Especifica o número de processos.

Algumas outras opções que podem ser úteis:

```
$ ./runwrf.sh -conf B -ts 2015-07-24-00 -ti 24 -np 2 -gti 3 --wrf-time-step 40 --use-static-geogrid
```

- **[-gti 3]** Parâmetro opcional (padrão: 3). A opção *gti* indica a resolução temporal dos dados globais. Caso você utilize o GFS padrão e deseje iniciar a inicialização com dados a cada três horas, deverá especificar o seguinte formato: “-gti 3”. O padrão do *script* já é este; portanto, somente se houver necessidade de valores de intervalo de tempos diferentes, essa opção deve ser utilizada;
- **[--wrf-time-step 40]** Parâmetro opcional (padrão: conforme configuração de execução). Este parâmetro ajusta o passo de tempo para o módulo de integração numérica *wrf.exe*. Cada configuração possui um valor padronizado, mas, caso seja necessário alterá-lo, pode-se especificar através da opção mencionada. Para a configuração B, o valor padrão é 60 s;
- **[--use-static-geogrid]** Parâmetro opcional (padrão: geração dos dados a cada execução). Esta opção permite o uso de arquivos estáticos gerados anteriormente para cada configuração. Assim, não é necessário executar o módulo *geogrid.exe*, que, embora não impacte significativamente no tempo de processamento, demanda muito espaço em disco para os arquivos geográficos globais. Os arquivos devem estar localizados no seguinte diretório do modelo: `~/model-wrf/config-domains/r_sul-RS-SC-2d`;
- **Nomeação dos arquivos:** Os arquivos devem ser nomeados da seguinte forma: *geo_em.d01.nc* (para domínio 1), *geo_em.d02.nc* (para domínio interno 2) e assim por diante.

Alteração/configuração avançada de parâmetros de execução

A alteração de parâmetros pode ser feita em dois locais (arquivos):

a) No próprio arquivo de execução do modelo (*runwrf.sh*). Por exemplo: a configuração de domínio B (região sul, centrada em Santa Catarina) possui as seguintes configurações:

```

[bB]) # *****
CONFIG_NAME="r_sul-RS-SC-2d"
    export _MAX_DOMAIN=2
export _WRF_TIME_STEP=60
if [ -z ${_T_INTERVAL_OUTPUT_1} ]; then # Not set by the user
    export _T_INTERVAL_OUTPUT_1=180 ## interval time: 3 h for DOMAIN
1
fi
export _T_INTERVAL_OUTPUT_2=60 ## interval time: 1 h for DOMAIN 2
export _T_INTERVAL_OUTPUT_3=60 ## interval time: 1 h for DOMAIN 3
export _PARENT_ID_2=1; export _PARENT_ID_3=""
export _I_PARENT_START_2=51 ; export _I_PARENT_START_3=""
export _J_PARENT_START_2=71 ; export _J_PARENT_START_3=""
export _GEODATA_RES_1=2m; export _GEODATA_RES_2=30s; export
_GEODATA_RES_3=""
export _MAP_PROJECTION=lambert
export _E_WE_1=150; export _E_WE_2=391; export _E_WE_3=""
export _E_SN_1=160; export _E_SN_2=371; export _E_SN_3=""
export _DX_1=10000
export _DY_1=10000
# Spatial resolutions of nests are calculated from parent_grid_ratio.
# No more necessary.
export _DX_2=2000; export _DX_3=""
export _DY_2=2000; export _DY_3=""
export _REF_LAT=-30.477; export _REF_LON=-53.302
    export _TRUELAT1=-30.477; export _TRUELAT2=-30.477; export
_STAND_LON=-53.302
GLOBAL_DATE_TIME_INTERVAL=3 # 3 hours
GLOBAL_DATA=gfs0p25 # GFS_0p50 GFS_0p25 NCEP_WRF_1km
GLOBAL_DATA_SOURCE="gfs"
export _PARENT_RATIO_2=5 # Best values: 3 or 5
export _PARENT_RATIO_3="" # Best values: 3 or 5
export _FEEDBACK=1 # 0 one-way no feedback 1 two-way w/ feedback
(default)
export _SMOOTH=2 # Default=2

```

```

export _MP_PHYSICS_1=5; export _MP_PHYSICS_2=5;
export _MP_PHYSICS_3=5
export _BL_PBL_PHYSICS_1=1; export _BL_PBL_PHYSICS_2=1; export
_BL_PBL_PHYSICS_3=1
export _CU_PHYSICS_1=16; _CU_PHYSICS_2=16; _CU_PHYSICS_3=0;
export _E_VERT=41
# Number of vertical levels. The levels are automatically calculated
# (auto_levels_opt=2) stretching in lower and in top of the
# atmosphere. Minimum number of levels when dzstretch_s and
# dzstretch_u in namelist.input
# dzstretch(dzstretch_s-dzstretch_u)=1.2-1.06 => 41 for ptop=50

```

Também podem ser realizadas configurações específicas para os módulos de inicialização WPS. Os arquivos são *scripts* que interpretam/substituem variáveis de ambiente e geram os respectivos arquivos de configuração (*namelist*).

- Arquivos presentes em `~/model-wrf/wps`: `executes_ungrib.sh` e `namelist.wps.sh`. Eles contêm os parâmetros para definição de domínio.
- Arquivos `~/model-wrf/wrf`: `namelist.input.wrf.afwa-diags.sh` e `namelist.input.wrf.sh`. Os dois arquivos contêm basicamente as mesmas configurações para o programa `real.exe` e `wrf.exe`, exceto que o primeiro inclui parâmetros para configurações avançadas de diagnósticos fornecidas pelo módulo AFWA
(http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/AFWA_Diagnostics_in_WRF.pdf). Esses arquivos podem ser editados para alterar diversas configurações e parâmetros do modelo (física, camada limite, etc).

Processamento para extração de dados usando R (e CDO)

O modelo gera saídas GrADS que podem ser processadas por *scripts* próprios (presentes em `~/model-wrf/post_processing`). Para o propósito do projeto, foram usados *scripts* R e comandos CDO para extração de dados pontuais de precipitação. Os *scripts* desenvolvidos estão disponíveis em repositório *Git* público, no seguinte endereço: <https://github.com/glcamillo/model-extract-and-plot>. Para obter (fazer *download*) desse *script*, deve-se executar um dos seguintes comandos:

- <https://github.com/glcamillo/model-extract-and-plot/archive/refs/heads/main.zip>
- `git clone` <https://github.com/glcamillo/model-extract-and-plot.git>
- Acesso direto ao arquivo: <https://github.com/glcamillo/model-extract-and-plot/blob/main/wrfout-extract-PRP-with-R-casos-Eliseo-for-24-48-72h.R>
- Informações de como executar serão exploradas a seguir.
- O processamento via *scripts* R acessa arquivos NetCDF através das coordenadas de grade *i* e *j* do modelo WRF.

Portanto, algumas considerações importantes foram observadas:

a) **Obtenção prévia das coordenadas *i*, *j*** referentes à localização especificada (coordenadas de latitude/longitude). Para esse propósito, você pode usar o programa **ncview**, que permite obter correspondências entre os dois tipos de coordenadas.

b) O projeto exige uma mudança média sobre uma área quadrada de aproximadamente 10 quilômetros de lado. Assim, o processamento da área por área exigiu a seguinte configuração:

- A partir do ponto central *i*, *j* do WRF, foram obtidos dados de outros 24 pontos distantes dois quilômetros entre si, de modo a compor uma abrangência aproximada de 10 km.
- Um resumo estatístico foi fornecido pela função `summary()` do R, contendo: mínimo, média, mediana, máximo e quartis.

c) A execução de *scripts* em R requer a instalação dos pacotes básicos conforme as informações disponíveis em <https://cran.r-project.org/>. Além da instalação básica, é necessário complementar o pacote **r-cran-rnetcdf** (pacote GNU R que fornece uma interface R para conjuntos de dados NetCDF) ao utilizar distribuições *Linux* derivadas do *Debian/Ubuntu*.

d) Aqui foram fornecidos *scripts* e comandos do CDO para a remoção de dados pontuais de arquivos NetCDF; no entanto, outras linguagens e recursos também podem ser utilizados.

Extração de dados por área

O seguinte *script* extrai dados de arquivos NetCDF produzidos como saída WRF e apresenta dados de precipitação por ponto e um sumário. O *script* foi programado em R e é parametrizado com:

- **[./wrfout-extract-PRP-with-R-casos-Eliseo-for-24-48-72h.R]**: caminho e nome do arquivo do script em R.
- **[CAMINHO_E_NOME_ARQUIVO_FINAL_WRF.nc]**: arquivo de saída do WRF em formato NetCDF, por exemplo, wrfout_d02_2016-01-12_00.nc (este nome foi renomeado do arquivo de saída do WRF).
- **[NOME_ARQUIVO_SAIDA]**: qualquer nome que indique especificamente os dados contidos. Por exemplo: caso-01-20160114-riodocampo-d2-72h-AREA.
- **[COORD_X]**: coordenada central da área que corresponde à coordenada *i* da grade do modelo WRF.
- **[COORD_Y]**: coordenada central da área que corresponde à coordenada *j* da grade do modelo WRF.
- **[TEMPO_PREVISAO]**: tempo de previsão presente no arquivo.
- **[TIPO_PROCESSAMENTO]**: são duas opções: **POINT** ou **AREA**, sendo que os processamentos foram realizados exclusivamente com a opção **AREA**.

Exemplos de comandos e resultados (em tela e que foram escritos em arquivos):

```
72h:./wrfout-extract-PRP-with-R-casos-Eliseo-for-24-48-72h.R
wrfout_d02_2016-01-12_00.nc caso-01-20160114-riodocampo-d2-72h-AREA 278
244 72 AREA
[1] 16.874371 8.975282 7.065782 3.649144 2.660214 17.417940 12.423160
[8] 9.204975 3.703314 2.507992 12.673026 7.464438 4.392147 2.755603
[15] 3.059908 10.562754 6.255880 4.059951 3.111260 2.334455 10.226622
[22] 6.766695 5.202722 4.574454 3.505717
Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.
2.334 3.506 5.203 6.857 9.205 17.418
```

```
48h:./wrfout-extract-PRP-with-R-casos-Eliseo-for-24-48-72h.R
wrfout_d02_2016-01-13_00.nc caso-01-20160114-riodocampo-d2-48h-AREA 278
244 48 AREA
```

```
[1] 4.4074465 3.1394828 2.5610304 1.9443040 0.7763767 3.4903296
3.0733880
```

```
[8] 2.0852000 1.3154784 0.8594064 3.6803546 1.9112629 1.4047916
1.4846264
```

```
[15] 0.8351218 2.8494633 1.9202628 1.7269880 1.1654787 0.9326722
2.2327309
```

```
[22] 1.5088931 1.5036165 1.4482994 0.6938900
```

```
Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.
```

```
0.6939 1.3155 1.7270 1.9580 2.5610 4.4074
```

```
24h:./wrfout-extract-PRP-with-R-casos-Eliseo-for-24-48-72h.R
```

```
wrfout_d02_2016-01-14_00.nc caso-01-20160114-riodocampo-d2-24h-AREA 278
244 24 AREA
```

```
[1] 13.663426 10.793596 7.028851 3.543419 1.921384 13.992137
10.459312
```

```
[8] 6.698219 3.813109 2.323862 10.709391 9.689279 6.264982 4.876913
```

```
[15] 4.559804 9.402451 7.977650 7.245204 4.632228 3.708069 11.038969
```

```
[22] 7.266530 5.801353 4.633793 3.514930
```

```
Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.
```

```
1.921 4.560 6.698 7.022 9.689 13.992
```

Extração de dados por ponto

A extração de dados pontuais, embora não tenha sido realizada como parte deste trabalho, pode ser feita por meio de um *script* próprio em R, conforme descrito a seguir, ou usando comandos do CDO. A diferença é que o *script* em R requer as coordenadas *i* e *j* da grade do modelo, enquanto o comando do CDO recebe o ponto por meio de coordenadas geográficas.

Exemplo de execução R para o seguinte caso:

```
1- RIO DO CAMPO - 2016-01-14 - Verão - 130,6 mm
```

```
-- Coordenada WRF central (ponto): i=x=278 j=y=244
```

```
-- Previsão: 24 horas
```

```
./wrfout-extract-PRP-with-R-timeinterval.R wrfout_d02_2016-01-14_00.nc
caso-1-24h 278 244 24 POINT 1
```

[1] "wrfout_d02_2016-01-14_00.nc" "caso-1-24h"
[3] "278" "244"
[5] "24" "POINT"
[7] "1"
[1] 390 370 25 390 370 25
[1] "Coordenada i=x: 278"
[1] "Coordenada j=y: 244"
[1] 0 60 120 180 240 300
[1] "minutes since 2016-01-14 00:00:00"
[1] "mm"
[1] 390 370 25
[1] "mm"
[1] 390 370 25
[1] "24h: 6.26498198509216 Result: 6.26498198509216"
[1] "Hour: 1 PRP in mm: 0.372971897308481"
[1] "Hour: 2 PRP in mm: 0.764474666382419"
[1] "Hour: 3 PRP in mm: 1.91679807379842"
[1] "Hour: 4 PRP in mm: 0.301705598831177"
[1] "Hour: 5 PRP in mm: 0.186107993125916"
[1] "Hour: 6 PRP in mm: 0.208443880081177"
[1] "Hour: 7 PRP in mm: 0.0297293663024902"
[1] "Hour: 8 PRP in mm: 0.000838994979858398"
[1] "Hour: 9 PRP in mm: 0.28931736946106"
[1] "Hour: 10 PRP in mm: 0.323705673217773"
[1] "Hour: 11 PRP in mm: 0.0163636207580566"
[1] "Hour: 12 PRP in mm: 0.246755123138428"
[1] "Hour: 13 PRP in mm: 0.260291576385498"
[1] "Hour: 14 PRP in mm: 0.0908946990966797"
[1] "Hour: 15 PRP in mm: 0.172902345657349"
[1] "Hour: 16 PRP in mm: 0.311793804168701"
[1] "Hour: 17 PRP in mm: 0.21945858001709"
[1] "Hour: 18 PRP in mm: 0.0646305084228516"
[1] "Hour: 19 PRP in mm: 0.033172607421875"
[1] "Hour: 20 PRP in mm: 0.0995430946350098"
[1] "Hour: 21 PRP in mm: 0.0401544570922852"

```
[1] "Hour: 22 PRP in mm: 0.00932884216308594"
```

```
[1] "Hour: 23 PRP in mm: 0.0795516967773438"
```

```
[1] "Hour: 24 PRP in mm: 0.226047515869141"
```

```
[1] 24 2
```

```
[1] 24
```

```
[1] 2
```

Para a extração de dados usando o CDO, podem ser utilizados comandos disponíveis diretamente do pacote CDO, instalado previamente. Neste caso, os comandos extraem dados de precipitação pontuais, tendo como referência a coordenada geográfica (latitude/longitude) específica do local

Exemplos de comandos:

- Para coordenada Lat/Lon: -28.5325/-49.315278

- Para previsão de 24 horas:

```
cdo -v select,name=RAINNC wrfout_d02_2016-07-15_00.nc wrf-output-d2-RAINNC.nc
```

```
cdo -outputtab,lon,lat,date,time,value -remapnn,lon=-49.315278_lat=-28.5325 wrf-output-d2-RAINNC.nc > caso-26-20160715-urussanga-D2-24h-PRP-from-cdo-49.31-28.53.txt
```

Cálculo das precipitações observadas correspondentes ao percentil 99,9%

O seguinte *script* em *Python* foi utilizado para o cálculo das precipitações observadas correspondentes ao percentil de 99,9% para cada mesorregião e estação do ano:

```
#-----
# MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE IFSC - FLORIANOPOLIS
# Author: Eliseo Breda ----- DATA:08/2023
## Este Script calcula o percentil 99,9% para cada Mesoregião / Estação de SC
#-----
#Importando Bibliotecas
import pandas as pd
```

```

import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.mlab as mlab
plt.rcParams.update({'font.size': 12, 'font.family':'serif'})
#-----
#Carregar arquivo xlsx, para ler o dataset e remover os valores zeros
xls = pd.ExcelFile('./dados/tabela_Eliseo.xlsx')
# arquivo com muitas abas, citar a aba de interesse no Dataframe (df)
df = pd.read_excel(xls, sheet_name='Dados detalhados')
df_remove = df.loc[(df['POBS'] <= 0)]
df
#Especificar as colunas que deseja remover ## Usar este passo caso queira remover
colunas no DataFrame
colunas_para_remover = ['Data.1', 'POBS.1', 'Percentil?', 'Unnamed: 9', 'Unnamed:
10']
# Remova as colunas especificadas,
colunas_existentes = [coluna for coluna in colunas_para_remover if coluna in
df.columns]
df = df.drop(columns=colunas_existentes)
df # este comando mostra o Dataframe
# Outra maneira de Exibir o DataFrame, após a remoção das colunas
print("\nDataFrame após a remoção das colunas:")
print(df.head())
#A função dropna remove linhas que contenham valores ausentes na coluna 'Estação
do Ano'.
df = df.dropna(subset=['Estação do Ano'])
###-----
#Aqui o código itera sobre as mesorregiões e as estações do ano presentes nos
dados.
#Combina a mesorregião e estação do ano, e calcula o quantil 0.999 (99.9º percentil)
dos valores da coluna 'POBS'
#Esses percentis são armazenados em um dicionário chamado 'percentis', onde a
chave é uma string concatenada
#da mesorregião e estação do ano, e o valor é o quantil calculado.
###-----
percentis = {}

```

```

mesoregiones = list(set(df['Mesoregião']))
estacoes = list(set(df['Estação do Ano']))
for meso in mesoregiones:
    df_meso = df.loc[(df['Mesoregião'] == meso)]
    for estacao in estacoes:
        df_meso_estacao = df_meso.loc[(df['Estação do Ano'] == estacao)]
        quantile = df_meso_estacao['POBS'].quantile(0.999)
        nome = f"{meso}_{estacao}"
        percentis[nome] = quantile
    #O dicionário 'percentis' é retornado.
percentis
###-----
# Criar DataFrame a partir do dicionário para melhor visualizar os percentis
df_quantis = pd.DataFrame(list(quantis.items()), columns=['Mesorregião_Estação',
'Quantil'])
df_quantis
#Salva o Dataframe em planilha excel.xlsx
df_quantis.to_excel("../dados/perc_eliseo.xlsx")
###-----

```

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O grau de assertividade na simulação de ocorrência de chuvas foi de 100%, tendo sido previstas precipitações para todos os 26 eventos analisados. Quanto aos graus de acerto dos volumes acumulados de precipitação para os 26 eventos executados no WRF de 24,30% para as simulações de precipitação acumulada em 24 horas, 34,82% para as simulações de precipitação acumulada em 48 horas e 36,79% para as simulações de precipitação acumulada em 72 horas, levam a uma avaliação inicial de serem baixos.

Entretanto, quando se leva em consideração que a média dos volumes observados nesses eventos extremos foi de 121,84 mm, mesmo o grau de acerto menor de 24,30% já sinaliza um volume de precipitação no patamar de 29,6 mm, que pode ser considerado um volume de precipitação forte.

Desses 26 eventos, observou-se que, em 13 deles, as simulações mais assertivas foram as realizadas para precipitação acumulada em 72 horas (50%), em 8 eventos as simulações mais assertivas foram as realizadas para precipitação acumulada em 48 horas (30,8%) e, em 5 eventos, as simulações mais assertivas foram as realizadas para precipitação acumulada em 24 horas (19,2%).

Os dois maiores graus de acerto foram observados nos eventos ocorridos em 26/03/2016 em Rio do Campo, quando a precipitação acumulada em 48 horas observada foi de 168,4 mm e a simulação executada resultou em 146,6 mm, ou seja, 87,1% de assertividade; e em 26/10/2016 em Itajaí, quando a precipitação acumulada em 24 horas observada foi de 86,4 mm e a simulação executada resultou em 68,06 mm, ou seja, 78,78% de assertividade.

Os dois menores graus de acerto relativo às melhores simulações entre os três cenários de antecedência foram observados nos eventos ocorridos em 04/12/2016 em Bom Jardim da Serra, quando a precipitação acumulada em 24 horas observada foi de 153,6 mm e a simulação executada resultou em 0,153 mm, ou seja, 0,10% de acerto; e em 21/02/2016 em Urussanga, quando a precipitação acumulada em 72 horas observada foi de 109,8 mm e a simulação executada resultou em 1,128 mm, ou seja, 1,03% de assertividade.

A assertividade da simulação de precipitação por mesorregião também apresenta grande variabilidade, sendo que os três melhores resultados foram para Alto Vale do Itajaí, com precipitação acumulada em 72 horas (72,57%); Meio Oeste, com

precipitação acumulada em 72 horas (59,44%); e Grande Florianópolis, com precipitação acumulada em 48 horas (52,60%). Os três piores resultados foram para Planalto Sul, com precipitação acumulada em 24 horas (0,10%); Litoral Sul, com precipitação acumulada em 24 horas (4,26%); e Alto Vale do Itajaí, com precipitação acumulada em 24 horas (6,97%).

Também pode ser observada variabilidade significativa na assertividade por estação do ano, sendo que os três melhores resultados foram observados na Primavera, com precipitação acumulada em 24 horas (48,72%); no Outono, com precipitação acumulada em 72 horas (46,36%); e no Inverno, com precipitação acumulada em 48 horas (41,95%). Já os menores graus de acerto por estação do ano foram observados no Verão, com precipitação acumulada em 24 horas (12,24%); no Outono, com precipitação acumulada em 24 horas (15,85%); e no Verão, com precipitação acumulada em 72 horas (20,95%).

Esse cenário de variabilidade na assertividade também se repete no que diz respeito aos sistemas climatológicos atuantes nos eventos extremos, sendo que o maior grau de acerto foi observado na Mesoescala, com precipitação acumulada em 72 horas (60,60%); em Outros (Ciclone Extratropical e Cavado), com precipitação acumulada em 48 horas (55,03%); e na Mesoescala, com precipitação acumulada em 48 horas (39,69%). Os menores graus de assertividade foram observados para as médias dos Outros Sistemas (Ciclone Extratropical e Cavado), com precipitação acumulada em 24 horas (14,6%); na Circulação Marítima, com precipitação acumulada em 48 horas (16,60%); e na Frente Fria, com precipitação acumulada em 24 horas (22,97%).

Analisando as variáveis estatísticas BIAS e RMSE, observa-se que o viés é de subestimação dos volumes de precipitação acumulada no patamar de 83 a 86 mm e que a magnitude dos erros fica no patamar de 91 a 97 mm.

Os resultados desses 26 casos processados no WRF apresentam grandes disparidades entre os dados observados e os resultados de volume de precipitação simulados pelo WRF, com as parametrizações e condições iniciais utilizadas como entrada do modelo. O refinamento e aumento da assertividade certamente passam por trabalhar tanto as parametrizações quanto as condições iniciais utilizadas para que se obtenha uma melhor representação das condições climáticas e, conseqüentemente, das pluviométricas da área de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, V.A.; MARTON, E. **Chuvas intensas em Santa Catarina: Análise sinótica de um evento extremo e simulação numérica com o modelo atmosférico WRF**. Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ – Rio de Janeiro, RJ, 2014.

ANABOR, Vagner. **Análise descritiva dos sistemas convectivos de escala meso-escala 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. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 168 p., 2013.

BERRY, Gareth; REEDER, Michael; JAKOB, Christian. **A global climatology of atmospheric fronts**. Geophysical Research Letters, v. 38, n. 4, 2011.

BJERKNES, J. **On the structure of moving cyclones**. Geofysiske Publikationer, v. 1, n. 2, p. 1-8, 1919.

BJERKNES, J.; SOLBERG, H. **Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation**. Geof. Publ., v. 3, n. 1, p. 3-18, 1922.

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.

BROWNING, K. A. **Conceptual Models of Precipitation Systems**. Meteorological Magazine, Bracknell, Eng., v. 114, n. 1359, p. 293-319, 1985.

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, v. 29, 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, p. 112, 2015.

CARDOSO, Letícia 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/10.1590/0102-778635203>

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

CLARKE, Leo C; RENARD, Robert. **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 abr. 2022.

COLLE, B. A.; WESTRICK, K. J.; MASS, C. F. **Evaluation of the MM5 and Eta-10 precipitation forecasts over the Pacific Northwest during the cool season.** *Weather and Forecasting*, v. 14, p. 137–154, 1999.

COLLE, B. A.; MASS, C. F.; WESTRICK, K. J. **MM5 precipitation verification over the Pacific Northwest during the 1997-99 cool seasons.** *Weather and Forecasting*, v. 15, p. 730–744, 2000.

COLLE, B. A.; OLSON, J. B.; TONGUE, J. S. **Multiseason Verification of the MM5. Part I: Comparison with Eta Model over the Central and Eastern United States and impact of MM5 resolution.** *Weather and Forecasting*, v. 18, p. 431–457, 2003a.

COLLE, B. A.; OLSON, J. B.; TONGUE, J. S. **Multiseason Verification of the MM5. Part II: Evaluation of high-resolution precipitation forecasts over the northeastern United States.** *Weather and Forecasting*, v. 18, p. 458–480, 2003b.

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

CAMPOS, Cláudia Rejane Jacondino de; SANTOS, José Guilherme Martins dos. **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.

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.

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

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

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.

DUDHIA, Jimy. **A history of mesoscale model development.** Asia-Pacific Journal Of Atmospheric Sciences, [S.L.], v. 50, n. 1, p. 121-131, jan. 2014. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13143-014-0031-8>

DURKEE, Joshua; MOTE, Thomas. **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.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2012.

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

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.

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.

FERREIRA, R. N.; RICKENBACH, T. M.; HERDIES, D. L.; CARVALHO, L. M. V. **Variability of South American convective cloud systems and tropospheric circulation during January-February 1998 and 1999**. Monthly Weather Review, Boston - MA, v. 131, n. 5, p. 961-973, 2003.

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, v. 37, n. 1, p. 17-21, 2015.

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**. Monthly Weather Review, v. 119, p. 1293-1302, 1991.

GRELL, G. A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D. R. **A description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)**. NCAR Tech. Note NCAR/TN-398 1A. National Center for Atmospheric Research, Boulder, USA, p. 107, 1994.

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.

GRIMM, Alice. **Clima da região sul do Brasil**. Tempo e Clima no Brasil, 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009a.

GUIA, C. V. F. **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.

HAAS, R. **Simulações da chuva orográfica associada a um ciclone extratropical**. Tese de Doutorado, DCA – IAG – USP, São Paulo – SP, dezembro de 2002.

HAKIM, G. J. **Cyclogenesis**. In: 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.

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.

HERDIES, D. L.; SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; SOUZA, R. A. F. **Assimilação do IWV-GPS no Brasil: otimização das estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real**. Revista Brasileira de Geofísica (Impresso), v. 25, p. 267-279, 2007.

HERDIES, D. L.; Da Silva A.; SILVA DIAS, M. A. F.; FERREIRA R.N. **Moisture budget of the bimodal pattern of the summer circulation over South America**. Journal of Geophysical Research, Washington-DC, v. 107, n.D20, p. 1-10, 2002.

HERRMANN, M.; ALVES, D. **As principais consequências negativas provocadas pelas adversidades atmosféricas no estado de Santa Catarina**. Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: Instituto Histórico e Geográfico de Santa Catarina (IHGSC)/Cadernos Geográficos - GCN-UFSC, p. 83–116, 2014.

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

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

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

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. p. 115.

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.

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

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

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

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

MANNING, K. W.; DAVIS, C. A. **Verification and sensitivity experiments for the WISP94 MM5 forecasts.** *Weather and Forecasting*, v. 12, p. 719–735, 1997.

MARCELINO, I. D. O. et al. **Adversidades atmosféricas no estado de Santa Catarina no período de 1980 a 2010.** *Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina*. Florianópolis: Instituto Histórico e Geográfico de Santa Catarina (IHGSC)/Cadernos Geográficos - GCN-UFSC, p. 13–82, 2014.

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*, v. 17, n. 1, p. 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. **State of the Science: Radar View of Tropical Cyclones.** *Meteorological Monographs*, v. 3, p. 33, 2003.

MASS, C. F.; Kuo, Y. H. **Regional real-time numerical weather prediction: current status and future potential.** *Bull. American Meteorological Society*, v. 79, p. 253–263, 1998.

MASS, C. F.; Ovens, D.; Westrick, K. J.; Colle, B. A. **Does increasing horizontal resolution produce better forecast? The results of two years of real-time numerical weather prediction in Pacific Northwest.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, p. 407–430, 2002.

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

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.

MORAIS, Marcos Antônio de; CASTRO, Wagner Antonio Chiba de; TUNDISI, José Galizia. **Climatologia de frentes frias sobre a Região Metropolitana de São Paulo.** 116 f.

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, p. 121-140, 2005.

NUTTER, P.; Manobianco, J. **Evaluation of the 29-km Eta Model. Part I: Objective verification at three selected stations.** Weather and Forecasting, v. 14, p. 5–17, 1999.

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. **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, p. 85, 2001.

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.

OLIVEIRA, E. M. G. **Parametrizações Convectivas no Modelo WRF e sua relação com a precipitação durante ciclogêneses no sudeste da América do Sul.** [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2014.

OLIVEIRA, Roseli. **Sistema de detecção de frentes frias associadas a eventos**

meteorológicos de médio e alto impacto no Centro Sul da América do Sul. Dissertação defendida pela mestranda em Clima e Ambiente no Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, 2022.

OLSON, D. A.; Junker, N. W.; Korty, B. **Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasts at NMC.** *Weather and Forecasting*, v. 10, p. 498–511, 1995.

ONCLEY, S. P.; Dudhia. **Evaluation of surface fluxes from MM5 using observations.** *Monthly Weather Review*, v. 125, p. 3344–3357, 1995.

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

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, Mário Francisco Leal de. **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.

QUADRO, M. F. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; HERDIES, D. L.; DE GONÇALVES, L. G. G. **Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 27, p. 152-162, 2012.

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, v. 25, n. 2, p. 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.

RIEHL, H. **Jet Streams of the Atmosphere.** Medical Opinion & Review, setembro, p. 33-50, 1969.

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.

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, 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.

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

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

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

SAULO, J. Ruiz e Y. G. Skabar. **Synergisms between the Low-Level Jet and Organized Convection at Its Exit Region.** Monthly Weather Review, v. 135, p. 1310-1326, 2007.

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.

SILVA, L. J.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. **Relação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais (RSMG) com a Precipitação e Eventos de Geada.** Revista Brasileira de Climatologia, v. 14, n. 10, p. 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.

SILVA, R. R.; SOUZA, D.C.; GATTI, E.C.; PINTO, M.W.; BORTOLI, N.; COSTA, N.V.; SOUZA, P.L. **Experimentos numéricos com o modelo WRF para previsões de curto prazo para o estado de Santa Catarina. II Encontro Nacional de Meteorologia de Santa Catarina / VIII Encontro Sul Brasileiro de Meteorologia.** Florianópolis – SC, 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.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; DUDA, M. G.; HUANG, X.; WANG, W.; POWERS, J. G. **A description of the advanced research WRF version 3.** National Center for Atmospheric Research, 2008. 125 p. NCAR TECHNICAL NOTE.

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

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

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, p. 9591–9613, 1987.

VERA, C. et al. **The South American low-level jet experiment**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 87, p. 6377, 2006.

WHITEMAN, 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.

ZIMMERMANN, Diego Fernando Rodriguez; YNOUE, Rita Yuri. **Subtropical jet climatology over South America: Climatologia do jato subtropical na América do Sul**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

APÊNDICE A – Configurações do WRF utilizadas

Foram utilizadas as seguintes configurações do WRF para o processamento dos 26 casos de precipitação extrema no estado de SC:

Nome da configuração (dentro do *script*): CONFIG_NAME= "r_sul-RS-SC-2d"

Quantidade de domínios: 2 (*namelist: time_step*) (domínio D1 e domínio D2)

Time step previsto: WRF_TIME_STEP= 40 (40s)

Intervalo de tempo das saídas:

D1: 180s (3 h)

D2: 60s (1 h)

Resolução dos dados geográficos

D1: 2minutos (em minutos de arco)

D2: 30s

Resolução espacial

D1 (*namelist: dx e dy*): 10000x10000 metros

Parent grid ratio (*namelist: parent_grid_ratio*): 5 (ou seja, de 5 para 1, logo, de 10km para 2km)

D2 (*namelist: dx e dy*): 2000x2000 metros

Coordenada central de D1: -30.477 -53.302

Dados atmosféricos globais: conforme definido no NCAR-UCAR

GFS: gfs0p25 resolução de 0,25 graus

FEEDBACK de D2 para D1: 1 two-way w/ feedback (default)

Parametrizações básicas tanto para D1 quanto para D2 (na maior parte baseada nos padrões usados no modelo WRF do CPTEC):

Física: valor 5 (*namelist: mp_physics (max_dom)*): Ferrier (new Eta) microphysics, operational High-Resolution Window version

Camada Limite Planetária (*namelist: bl_pbl_physics*): valor 1: YSU scheme

Física de cumulus (*namelist: cu_physics*): valor 16: A newer Tiedtke scheme

Física de ondas longas (*namelist: ra_lw_physics*): valor 4: rrtmg scheme

Física de ondas curtas (*namelist: ra_sw_physics*): valor 4: rrtmg scheme

Física: surface-layer option (*namelist: sf_sfclay_physics*): valor 1: Revised MM5 Monin-Obukhov scheme (Jimenez, renamed in v3.6)

Física: land-surface option (*namelist: sf_surface_physics*): valor 2: Unified Noah land-surface model

Número de níveis na vertical=42