

# ANEXO II

## CLIMA E METEOROLOGIA

Estudo de Dispersão Atmosférica - Região da UTE Candiota III  
Candiota/RS



Dezembro/2025

## Índice

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	03
2. COMPORTAMENTO CLIMÁTICO E DISPERSÃO DE POLUENTES.....	03
3. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER.....	04
4. SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES NA REGIÃO.....	07
5. OCORRÊNCIAS DE EL NIÑO E LA NIÑA.....	08
6. REGIME DE VENTOS – ANÁLISE DA ROSA DOS VENTOS (2020-2024).....	13
7. MÉDIAS CLIMATOLÓGICAS DA REGIÃO DE BAGÉ (1961-2024).....	19
8. VALIDAÇÃO DO MODELO METEOROLÓGICO WRF (2020-2025).....	26
9. CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DA ESTAÇÃO CANDIOTA-RS (2020-2024)	33

## 1. INTODUÇÃO

A caracterização das condições climáticas e meteorológicas é um componente essencial na análise ambiental, especialmente em regiões com atividades industriais e geração de energia, como o município de Candiota, no estado do Rio Grande do Sul. O conhecimento detalhado do comportamento atmosférico permite compreender os processos de dispersão de poluentes, transporte de massas de ar e variações sazonais que influenciam diretamente a qualidade do ar e o conforto ambiental. Além disso, a análise das variáveis meteorológicas é indispensável para a calibração e validação de modelos numéricos, como o *Weather Research and Forecasting* (WRF), amplamente utilizado em estudos de modelagem atmosférica e previsão do tempo.

Dessa forma, este relatório apresenta uma avaliação das condições climáticas e meteorológicas observadas na região de Candiota, abrangendo o período de 2020 a 2024, com o objetivo de subsidiar análises de dispersão atmosférica e compreender a influência das variabilidades sazonais e interanuais sobre a dinâmica local do clima.

Para prever como os poluentes atmosféricos se dispersam e como impactam a qualidade do ar, é essencial compreender o comportamento do tempo e do clima. Esses elementos determinam a forma como os poluentes se movem, se concentram ou se dissipam na atmosfera. Por isso, é importante estudar os principais sistemas atmosféricos atuantes na região, observando como cada um pode favorecer ou dificultar a dispersão dos poluentes.

## **2. COMPORTAMENTO CLIMÁTICO E DISPERSÃO DE POLUENTES**

A compreensão do comportamento climático e das condições meteorológicas é essencial para avaliar a dispersão dos poluentes atmosféricos, especialmente em regiões com atividades industriais e termoelétricas, como o município de Candiota, no Rio Grande do Sul. A variabilidade dos elementos meteorológicos, como temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa, vento, pressão atmosférica e precipitação, exerce influência direta sobre os processos de transporte, diluição e remoção dos contaminantes presentes na atmosfera (Seinfeld e Pandis, 2016).

A dispersão dos poluentes está fortemente associada à estrutura térmica da atmosfera e à circulação dos ventos. Em condições de instabilidade atmosférica, quando há intenso aquecimento da superfície e predominância de movimentos convectivos, ocorre uma mistura vertical mais eficiente das massas de ar, favorecendo a diluição e o transporte dos poluentes. Por outro lado, durante períodos de estabilidade, característicos das noites frias e dos invernos secos, a formação de inversões térmicas limita o movimento vertical do ar, retendo os poluentes próximos à superfície (Jacobson, 2005). Esse fenômeno é especialmente relevante em Candiota, onde a topografia suavemente ondulada e a ocorrência frequente de inversões térmicas no inverno contribuem para o acúmulo de material particulado e gases nas camadas mais baixas da atmosfera.

A direção e a velocidade dos ventos também exercem papel fundamental no comportamento dos poluentes. Ventos mais fortes aumentam a dispersão horizontal e reduzem as concentrações locais, enquanto períodos de calmaria favorecem a estagnação e o acúmulo das concentrações. O aumento da temperatura e a redução da umidade relativa intensificam as reações fotoquímicas, favorecendo a formação de ozônio troposférico e de outros poluentes secundários (Brandt et al., 2013). A radiação solar também influencia diretamente a química atmosférica. A maior incidência solar observada no verão potencializa as reações fotoquímicas e acelera a conversão de poluentes primários, como óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, em poluentes secundários, como ozônio e nitratos (Finlayson-Pitts e Pitts, 2000). No inverno, a menor disponibilidade de radiação e o resfriamento noturno favorecem a formação de camadas estáveis, limitando a mistura vertical e contribuindo para o confinamento dos poluentes próximos ao solo.

Portanto, o comportamento climático da região de Candiota apresenta forte sazonalidade, que condiciona a dispersão e a concentração de poluentes atmosféricos.

Durante o verão e a primavera predominam condições de instabilidade, ventos mais intensos e alta radiação solar, resultando em maior capacidade de dispersão. No outono e no inverno, a estabilidade atmosférica, as inversões térmicas e a menor incidência de radiação reduzem a ventilação e favorecem o acúmulo de poluentes, principalmente material particulado fino (PM2.5) e gases como dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), frequentemente associados às emissões de usinas termoeletricas. Essas variações demonstram a importância de integrar os dados meteorológicos locais às análises de qualidade do ar e aos modelos de simulação atmosférica, permitindo avaliar a eficiência das medidas de controle de emissões e prever condições críticas para a saúde humana e o meio ambiente.

### **3. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER**

A análise climática da região de Candiota, localizada no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, foi conduzida com base na classificação de Köppen-Geiger (Figura 1), amplamente reconhecida na climatologia por descrever regimes térmicos e pluviométricos a partir de séries históricas de dados meteorológicos. O município de Candiota enquadra-se na classe Cfa, correspondente ao clima subtropical úmido com verão quente. Essa classificação caracteriza um regime climático com verões de temperaturas elevadas, invernos frios e amenos e precipitação bem distribuída ao longo do ano, sem a presença de uma estação seca definida.

De acordo com a metodologia proposta por Köppen (1936) e revisada por Lima et al. (2023), a notação Cfa é composta por três letras que sintetizam as principais características do clima. A letra "C" identifica climas temperados ou subtropicais, nos quais a temperatura média do mês mais frio varia entre 0 °C e 18 °C (ou -3 °C e 18 °C, conforme a adaptação regional), enquanto a média do mês mais quente é superior a 10 °C, refletindo um regime de latitudes médias, com estações bem definidas e ausência de extremos térmicos acentuados. A letra "f" representa a inexistência de uma estação seca, sendo a precipitação do mês mais seco superior a 30 mm. Por fim, a letra "a" indica verões quentes, com temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, diferenciando-se dos verões amenos ou frios.

O comportamento térmico da região de Candiota é marcado por verões quentes e invernos frios e amenos, com ocorrência eventual de geadas. A amplitude térmica anual é moderada, resultado da influência marítima e da alternância entre massas de ar tropicais e polares. Durante o verão, a instabilidade atmosférica e as altas temperaturas favorecem a convecção e a dispersão de poluentes. No inverno, por outro lado, a estabilidade atmosférica e a ocorrência de inversões térmicas podem reduzir a mistura vertical do ar, promovendo o acúmulo de poluentes próximos à superfície.

O regime pluviométrico é caracterizado por precipitação bem distribuída ao longo do ano, sem uma estação seca bem definida, o que garante disponibilidade hídrica contínua e favorece as atividades agropecuárias predominantes na região. Essa condição difere dos climas tropicais com inverno seco (Aw) e mediterrâneos com verão seco (Cs), assegurando a manutenção da umidade do solo e o desenvolvimento da vegetação típica do bioma Pampa.

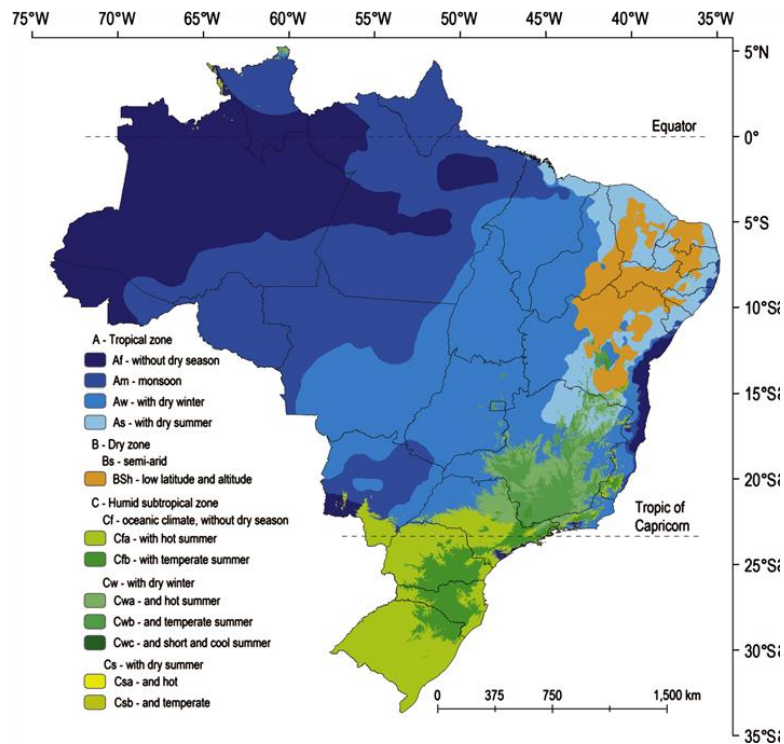
A localização geográfica de Candiota, ao sul do Trópico de Capricórnio, confere à região uma condição de transição climática, sob influência direta da alternância entre massas de ar tropicais, quentes e úmidas, e massas de ar polares, frias e secas. Essa dinâmica atmosférica resulta em elevada variabilidade temporal das condições meteorológicas, marcada pela passagem frequente de frentes frias, variações bruscas de temperatura e episódios recorrentes de instabilidade. Esses fatores são determinantes para os processos de dispersão e transporte de poluentes atmosféricos, especialmente em um contexto de presença de atividades termoelétricas no município.

O clima Cfa está intimamente associado ao bioma Pampa, característico da Campanha Gaúcha, com predominância de formações campestres e vegetação herbácea adaptada às variações sazonais de temperatura e precipitação. A combinação entre umidade elevada e verões quentes cria condições propícias à estabilidade ecológica, sustentando uma rica biodiversidade e favorecendo as práticas agrícolas e pecuárias extensivas da região.

A caracterização climática de uma região é essencial para compreender não apenas a dispersão dos poluentes atmosféricos, mas também o comportamento médio da atmosfera e suas variações ao longo do tempo. Esse tipo de análise é fundamental para o planejamento urbano, a defesa civil, a gestão de recursos hídricos, a agricultura e a saúde pública, contribuindo para a formulação de estratégias de mitigação e adaptação frente às mudanças ambientais e aos eventos extremos.

Além dos dados meteorológicos tradicionais, como precipitação, temperatura e insolação, outras variáveis também são importantes na caracterização climática, incluindo o saldo de radiação, a evapotranspiração de referência e os parâmetros do balanço hídrico, como evapotranspiração real, déficit e excesso de água no solo. A análise conjunta dessas variáveis fornece uma compreensão mais completa do comportamento atmosférico, permitindo identificar períodos de seca, excesso hídrico e seus impactos sobre o ambiente e as atividades humanas.

Com esse propósito, o presente estudo teve como objetivo caracterizar o regime climático da região de Candiota por meio da análise de variáveis meteorológicas. Para tanto, foram utilizadas séries históricas obtidas na estação meteorológica de Bagé, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Essa estação foi escolhida por representar de forma adequada as condições atmosféricas da área de estudo e por disponibilizar um conjunto de dados consistente e de longa duração.



Fonte: Lima et al. (2023).

**Figura 1** - Classificação climática para o Brasil Köppen (1936).

#### **4. SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES NA REGIÃO**

A dinâmica atmosférica que influencia o sul do Brasil, e em particular a região de Candiota, é marcada pela interação entre diversos sistemas meteorológicos de diferentes escalas, tanto continentais quanto oceânicos. A localização do município, na porção meridional do Rio Grande do Sul e próxima à fronteira com o Uruguai, o expõe à alternância constante entre massas de ar tropicais e polares, bem como à passagem frequente de frentes frias, que exercem papel decisivo no regime de chuvas, temperatura e vento ao longo do ano (Reboita et al., 2010).

Durante o verão, predominam as massas de ar tropicais, especialmente a Massa Tropical Atlântica, que se forma sobre o oceano Atlântico subtropical e transporta ar quente e úmido para o continente. Essa massa contribui para o aumento das temperaturas e da umidade relativa do ar. Em alguns períodos, há também influência da Massa Tropical Continental, oriunda do centro-oeste do Brasil, caracterizada por ar quente e seco, que favorece temperaturas mais elevadas e redução da nebulosidade. Essas condições resultam em instabilidade convectiva e formação de chuvas de curta duração, típicas da estação (Grimm et al., 1998; Reboita et al., 2010).

No outono e inverno, a influência das massas de ar polares se torna mais intensa, associada principalmente à Massa Polar Atlântica, que se desloca do sul do continente em direção ao norte após a passagem das frentes frias. Esse sistema é responsável por quedas significativas de temperatura, aumento da pressão atmosférica e períodos de tempo estável e seco, frequentemente acompanhados por formação de geadas (Reboita et al., 2010; INMET, 2025). Em Candiota, as incursões de ar polar são frequentes entre maio e setembro e estão relacionadas à formação de inversões térmicas, que reduzem a dispersão dos poluentes na baixa atmosfera (Jacobson, 2005).

As frentes frias representam outro sistema de grande importância para a região, resultantes do encontro entre massas de ar de características distintas, geralmente o ar frio polar e o ar quente tropical. Elas provocam mudanças bruscas nas condições meteorológicas, com aumento da nebulosidade, intensificação dos ventos e ocorrência de chuvas. A frequência média de frentes frias no sul do Brasil varia entre seis e dez eventos por mês, sendo mais elevada durante o inverno e a primavera (Grimm et al., 1998; Reboita et al., 2010).

Durante o verão, observa-se também a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que se manifesta como uma faixa de nebulosidade persistente estendendo-se da Amazônia até o oceano Atlântico. Embora seu núcleo principal ocorra em latitudes mais baixas, seus efeitos podem alcançar o Rio Grande do Sul, favorecendo a ocorrência de precipitações contínuas e episódios de instabilidade (Carvalho et al., 2004).

Outro sistema relevante é o Jato de Baixos Níveis (JBN), uma corrente de ventos intensos que se estende da Amazônia em direção ao sul do continente, transportando calor e umidade. Quando esse jato interage com frentes frias, há intensificação da convecção e aumento da probabilidade de eventos de chuva intensa, afetando diretamente o regime pluviométrico da região (Marengo et al., 2004; Vera et al., 2006).

De forma geral, o clima de Candiota resulta da alternância entre períodos dominados por massas tropicais quentes e úmidas e fases influenciadas por massas polares frias e secas. Essa interação constante gera uma alta variabilidade meteorológica, caracterizada por rápidas mudanças de temperatura, nebulosidade e direção dos ventos. A combinação desses fatores explica o comportamento típico do clima subtropical úmido da Campanha Gaúcha, marcado por contrastes sazonais e elevada instabilidade atmosférica.

## **5. OCORRÊNCIAS DE EL NIÑO E LA NIÑA**

O Quadro 1 apresenta a distribuição temporal dos trimestres em que foram identificados os eventos quentes de El Niño (representados em vermelho) e os eventos frios de La Niña (representados em azul), abrangendo o período de 1961 a 2019. Esses eventos foram classificados com base na metodologia internacionalmente adotada pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), que utiliza o Índice Niño Oceânico (ONI) como parâmetro de referência para determinar a ocorrência e a intensidade dos fenômenos.

A identificação dos eventos considera o limiar de  $\pm 0,5$  °C do ONI, mantido por um período mínimo de cinco trimestres consecutivos. O ONI é calculado a partir da média móvel trimestral das anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na região do Niño 3.4 (delimitada entre as latitudes 5°N–5°S e longitudes 120°–170°W), comparando-se os valores observados com a média climatológica de 30 anos, a qual é atualizada a cada cinco anos para garantir a representatividade das condições oceânicas atuais.

Ao lado do quadro, são apresentadas as intensidades dos fenômenos, as quais se baseiam nas anomalias da TSM mantidas por, no mínimo, três trimestres consecutivos. A

classificação segue a seguinte escala de magnitude: El Niño fraco: anomalias positivas entre 0,5 °C e 0,9 °C; El Niño moderado: anomalias entre 1,0 °C e 1,4 °C; El Niño forte: anomalias entre 1,5 °C e 1,9 °C; El Niño muito forte: anomalias iguais ou superiores a 2,0 °C.

Para os eventos de La Niña, adota-se o mesmo critério, porém considerando anomalias negativas dentro desses mesmos intervalos. Essa metodologia padronizada permite a comparação entre diferentes períodos e regiões, garantindo consistência nas análises de variabilidade climática. A partir dessas classificações, torna-se possível avaliar o impacto dos fenômenos El Niño e La Niña sobre o regime pluviométrico, uma vez que ambos influenciam de maneira significativa a distribuição espacial e temporal das chuvas. Em geral, os anos com predomínio de El Niño tendem a apresentar redução dos volumes de precipitação em algumas regiões do Brasil, especialmente no Norte e Nordeste, e aumento em outras, como o Sul do país. Por outro lado, durante os episódios de La Niña, observam-se condições inversas, com chuvas mais intensas no Norte e Nordeste e maior probabilidade de estiagens no Sul. Essas informações, portanto, foram fundamentais para a análise dos períodos com maiores ou menores volumes de precipitação pluvial na área de estudo, contribuindo para a compreensão das relações entre os padrões oceânicos e atmosféricos e os comportamentos hidrometeorológicos regionais, essenciais para subsidiar estudos de vulnerabilidade climática, planejamento de recursos hídricos e elaboração de planos de contingência.

**Quadro 1 – Classificação El Niño e La Niña (1961 – 2025).**

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ	Anos	Classificação	Intensidade
1961	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	1961 - 1962		
1962	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	1962 - 1963		
1963	-0.4	-0.2	0.2	0.3	0.3	<b>0.5</b>	<b>0.9</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>1.3</b>	1963 - 1964	El Niño	Moderado
1964	<b>1.1</b>	<b>0.6</b>	0.1	-0.3	<b>-0.6</b>	<b>-0.6</b>	<b>-0.6</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	1964 - 1965	La Niña	Fraca
1965	<b>-0.6</b>	-0.3	-0.1	0.2	<b>0.5</b>	<b>0.8</b>	<b>1.2</b>	<b>1.5</b>	<b>1.9</b>	<b>2.0</b>	<b>2.0</b>	<b>1.7</b>	1965 - 1966	El Niño	Forte
1966	<b>1.4</b>	<b>1.2</b>	<b>1.0</b>	<b>0.7</b>	0.4	0.2	0.2	0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	1966 - 1967		
1967	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.2	0.0	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	1967 - 1968		
1968	-0.6	-0.7	-0.6	-0.4	0.0	0.3	0.6	0.5	0.4	<b>0.5</b>	<b>0.7</b>	<b>1.0</b>	1968 - 1969	El Niño	Moderado
1969	<b>1.1</b>	<b>1.1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>0.6</b>	0.4	0.4	<b>0.5</b>	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>0.6</b>	1969 - 1970	El Niño	Fraca
1970	<b>0.5</b>	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.3	<b>-0.6</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.9</b>	<b>-1.1</b>	1970 - 1971	La Niña	Moderada
1971	<b>-1.4</b>	<b>-1.4</b>	<b>-1.1</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.9</b>	<b>-1.0</b>	<b>-0.9</b>	1971 - 1972	La Niña	Fraca
1972	<b>-0.7</b>	-0.4	0.1	0.4	<b>0.7</b>	<b>0.9</b>	<b>1.1</b>	<b>1.4</b>	<b>1.6</b>	<b>1.8</b>	<b>2.1</b>	<b>2.1</b>	1972 - 1973	El Niño	Forte
1973	<b>1.8</b>	<b>1.2</b>	<b>0.5</b>	-0.1	<b>-0.5</b>	<b>-0.9</b>	<b>-1.1</b>	<b>-1.3</b>	<b>-1.5</b>	<b>-1.7</b>	<b>-1.9</b>	<b>-2.0</b>	1973 - 1974	La Niña	Forte
1974	<b>-1.8</b>	<b>-1.6</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.0</b>	<b>-0.9</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.5</b>	-0.4	-0.4	<b>-0.6</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.6</b>	1974 - 1975	La Niña	Fraca
1975	<b>-0.5</b>	<b>-0.6</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.8</b>	<b>-1.0</b>	<b>-1.1</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.4</b>	<b>-1.4</b>	<b>-1.6</b>	<b>-1.7</b>	1975 - 1976	La Niña	Forte
1976	<b>-1.6</b>	<b>-1.2</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.5</b>	-0.3	0.0	0.2	0.4	<b>0.6</b>	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	1976 - 1977	El Niño	Fraca
1977	<b>0.7</b>	<b>0.6</b>	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	1977 - 1978	El Niño	Fraca
1978	<b>0.7</b>	0.4	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0.0	1978 - 1979		
1979	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	1979 - 1980	El Niño	Fraca
1980	<b>0.6</b>	<b>0.5</b>	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.0	1980 - 1981		
1981	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	1981 - 1982		
1982	0.0	0.1	0.2	<b>0.5</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>1.1</b>	<b>1.6</b>	<b>2.0</b>	<b>2.2</b>	<b>2.2</b>	1982 - 1983	El Niño	Muito Forte
1983	<b>2.2</b>	<b>1.9</b>	<b>1.5</b>	<b>1.3</b>	<b>1.1</b>	<b>0.7</b>	0.3	-0.1	<b>-0.5</b>	<b>-0.8</b>	<b>-1.0</b>	<b>-0.9</b>	1983 - 1984	La Niña	Fraca
1984	<b>-0.6</b>	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	<b>-0.6</b>	<b>-0.9</b>	<b>-1.1</b>	1984 - 1985	La Niña	Fraca
1985	<b>-1.0</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.6</b>	<b>-0.5</b>	<b>-0.5</b>	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	1985 - 1986		

1986	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2	1986 - 1987	El Niño	Moderado
1987	1.2	1.2	1.1	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	1987 - 1988	El Niño	Forte
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.9	-1.3	-1.3	-1.1	-1.2	-1.5	-1.8	-1.8	1988 - 1989	La Niña	Forte
1989	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	1989 - 1990		
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	1990 - 1991		
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5	1991 - 1992	El Niño	Forte
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	1992 - 1993		
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	1993 - 1994		
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1	1994 - 1995	El Niño	Moderado
1995	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	1995 - 1996	La Niña	Moderada
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	1996 - 1997		
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4	1997 - 1998	El Niño	Muito Forte
1998	2.2	1.9	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6	1998 - 1999	La Niña	Forte
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7	1999 - 2000	La Niña	Forte
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	2000 - 2001	La Niña	Fraca
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	2001 - 2002		
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1	2002 - 2003	El Niño	Moderado
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	2003 - 2004		
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	2004 - 2005	El Niño	Fraca
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8	2005 - 2006	La Niña	Fraca
2006	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9	2006 - 2007	El Niño	Fraca
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6	2007 - 2008	La Niña	Forte
2008	-1.6	-1.5	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	2008 - 2009	La Niña	Fraca
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6	2009 - 2010	El Niño	Moderado
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	2010 - 2011	La Niña	Forte
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0	2011 - 2012	La Niña	Moderada
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2	2012 - 2013		
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	2013 - 2014		
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	2014 - 2015	El Niño	Fraca

<b>2015</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.7</b>	<b>0.9</b>	<b>1.2</b>	<b>1.5</b>	<b>1.9</b>	<b>2.2</b>	<b>2.4</b>	<b>2.6</b>	<b>2.6</b>	2015 - 2016	El Niño	Muito Forte
<b>2016</b>	<b>2.5</b>	<b>2.1</b>	<b>1.6</b>	<b>0.9</b>	0.4	-0.1	-0.4	<b>-0.5</b>	<b>-0.6</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.6</b>	2016 - 2017	La Niña	Fraca
<b>2017</b>	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	<b>-0.7</b>	<b>-0.8</b>	<b>-1.0</b>	2017 - 2018	La Niña	Fraca
<b>2018</b>	<b>-0.9</b>	<b>-0.9</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.5</b>	-0.2	0.0	0.1	0.2	<b>0.5</b>	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	2018 - 2019	El Niño	Fraco
<b>2019</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5	2019 - 2020		
<b>2020</b>	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	<b>-0.6</b>	<b>-0.9</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.3</b>	<b>-1.2</b>	2020 - 2021	La Niña	Moderada
<b>2021</b>	<b>-1.0</b>	<b>-0.9</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.5</b>	-0.4	-0.4	<b>-0.5</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.8</b>	<b>-1.0</b>	<b>-1.0</b>	2021 - 2022	La Niña	Fraca
<b>2022</b>	<b>-1.0</b>	<b>-0.9</b>	<b>-1.0</b>	<b>-1.1</b>	<b>-1.0</b>	<b>-0.9</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.9</b>	<b>-1.0</b>	<b>-1.0</b>	<b>-0.9</b>	<b>-0.8</b>	2022 - 2023	La Niña	Moderada
<b>2023</b>	<b>-0.7</b>	-0.4	-0.1	0.2	<b>0.5</b>	<b>0.8</b>	<b>1.1</b>	<b>1.3</b>	<b>1.6</b>	<b>1.8</b>	<b>1.9</b>	<b>2.0</b>	2023 - 2024	El Niño	Forte
<b>2024</b>	<b>1.8</b>	<b>1.5</b>	<b>1.1</b>	<b>0.7</b>	0.4	0.2	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	2024 - 2025		
<b>2025</b>	-0.6	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.5				2025 - 2026		

Fonte: Adaptado de < Fonte: [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)>

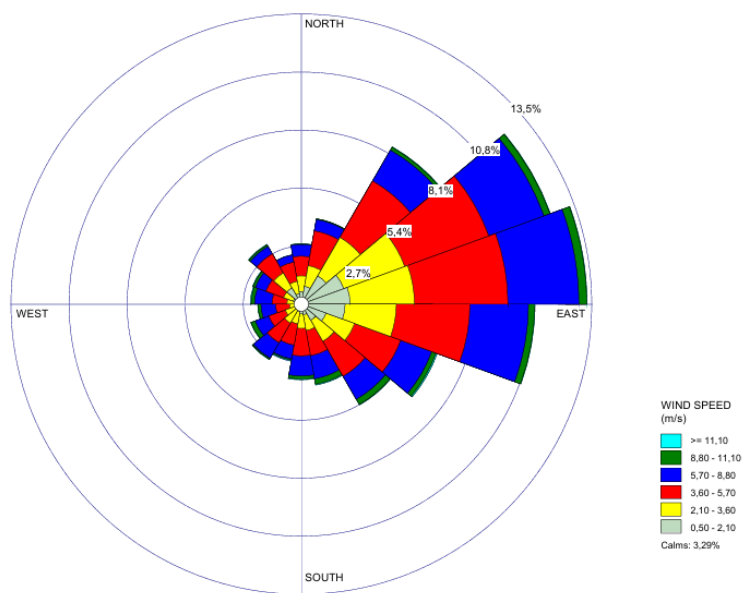
## **6. REGIME DE VENTOS – ANÁLISE DA ROSA DOS VENTOS (2020-2024)**

Este tópico apresenta uma análise detalhada da Rosa dos Ventos do município de Candiota, no Rio Grande do Sul, considerando as quatro estações do ano e abrangendo o período de 2020 a 2024. A Rosa dos Ventos é uma ferramenta gráfica fundamental na análise climatológica, pois mostra a distribuição da frequência e da intensidade dos ventos em uma determinada região. Os dados utilizados foram obtidos a partir de gráficos específicos para o inverno, outono, primavera e verão, o que permitiu identificar padrões sazonais distintos no regime de ventos da área estudada.

De forma geral, observa-se que, ao longo dos cinco anos analisados, as direções predominantes dos ventos em Candiota são Leste (E) e Nordeste (NE). Ainda assim, tanto a velocidade média quanto a frequência de ventos mais intensos variam significativamente entre as estações. Os dados utilizados foram obtidos a partir de gráficos específicos para o inverno, outono, primavera e verão, o que permitiu identificar padrões sazonais distintos no regime de ventos da área estudada. De forma geral, observa-se que, ao longo dos cinco anos analisados, as direções predominantes dos ventos em Candiota são Leste (E) e Nordeste (NE). Ainda assim, tanto a velocidade média quanto a frequência de ventos mais intensos variam significativamente entre as estações.

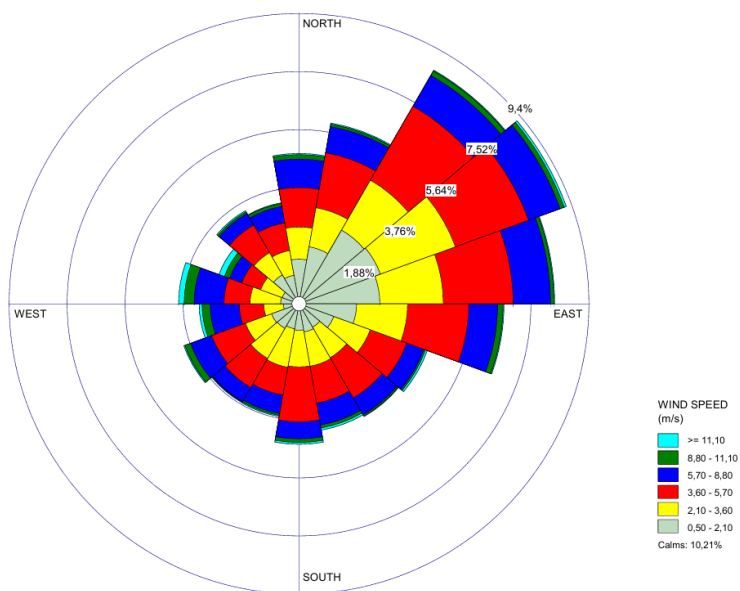
A análise das Rosas dos Ventos permite compreender o comportamento sazonal do regime de ventos na região e suas variações de intensidade e direção ao longo do ano. A direção predominante e a velocidade dos ventos estão associadas às condições sinóticas e aos sistemas meteorológicos atuantes no sul do país, influenciando diretamente aspectos climáticos locais, como temperatura, umidade e conforto térmico. Os gráficos analisados, elaborados a partir de registros horários, evidenciam variações sazonais marcantes na direção predominante, na intensidade média e na frequência de calmarias. Essa variabilidade demonstra o dinamismo atmosférico da região, com períodos de ventos mais intensos e persistentes na primavera e no verão, e condições mais estáveis e de menor velocidade média no outono e inverno.

Durante o verão (Figura 8), observou-se uma predominância de ventos provenientes dos quadrantes Leste (E) e Nordeste (NE), com menor contribuição das direções Sul (S) e Sudeste (SE). A velocidade média do vento foi de 4,22 m/s, indicando um regime moderado de ventos. A ocorrência de períodos de calma foi baixa (3,29%), o que reforça a predominância de ventos ativos nesta estação.



**Figura 8** – Rosa dos Ventos – Verão (2020–2024), Candiota/RS.

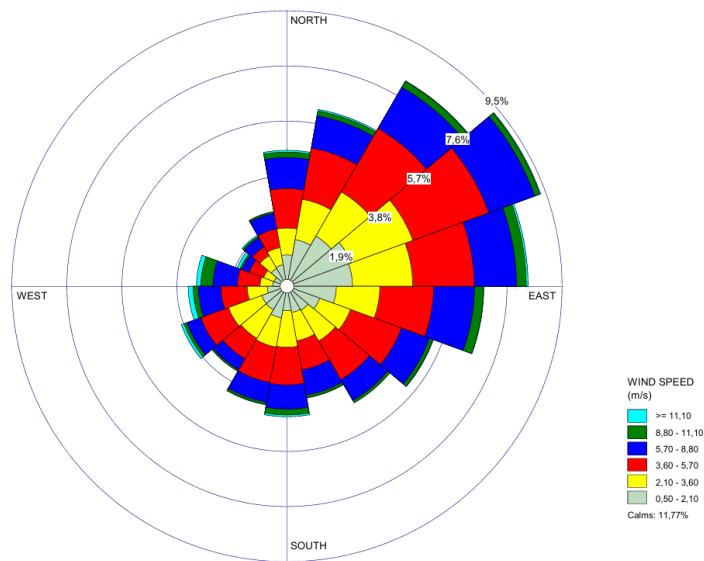
No outono (Figura 9), manteve-se a predominância dos ventos oriundos de Leste (E) e Nordeste (NE), embora com menor intensidade média em relação ao verão. A velocidade média registrada foi de 3,47 m/s, e os ventos calmos representaram 10,21% das observações, indicando uma redução na atividade e na frequência dos ventos mais fortes.



**Figura 9** – Rosa dos Ventos – Outono (2020–2024), Candiota/RS.

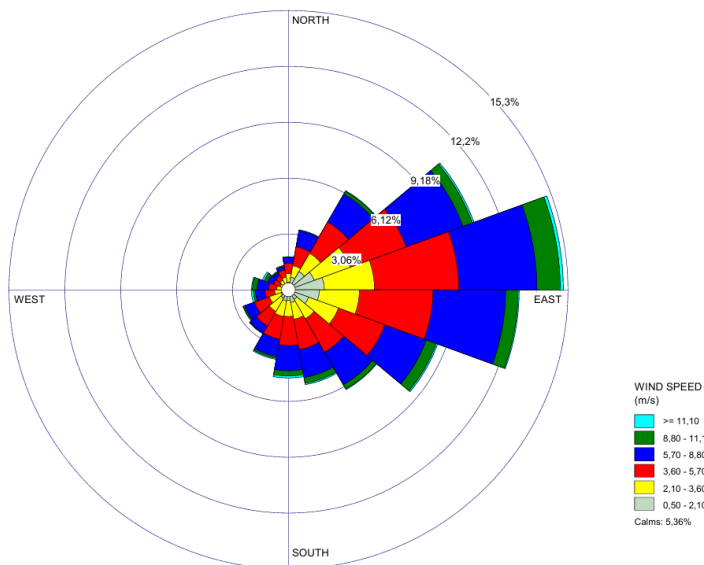
Durante o inverno (Figura 10), o padrão de direção se manteve semelhante, com ventos predominantes de Leste (E) e Nordeste (NE). No entanto, houve uma leve diminuição na

intensidade média (3,55 m/s) e um aumento no percentual de calmarias (11,77%), sugerindo um período de ventos mais estáveis e menos vigorosos.



**Figura 10** – Rosa dos Ventos – Inverno (2020–2024), Candiota/RS.

A primavera (Figura 11) apresentou o comportamento mais dinâmico entre as estações, com ventos mais intensos e frequentes. A direção predominante continuou sendo Leste (E) e Nordeste (NE), e a velocidade média atingiu 4,50 m/s, a maior entre as estações. O percentual de calmarias foi o menor do ano (5,36%), caracterizando a primavera como a estação de maior movimentação atmosférica.



**Figura 11** – Rosa dos Ventos – Primavera (2020–2024), Candiota/RS.

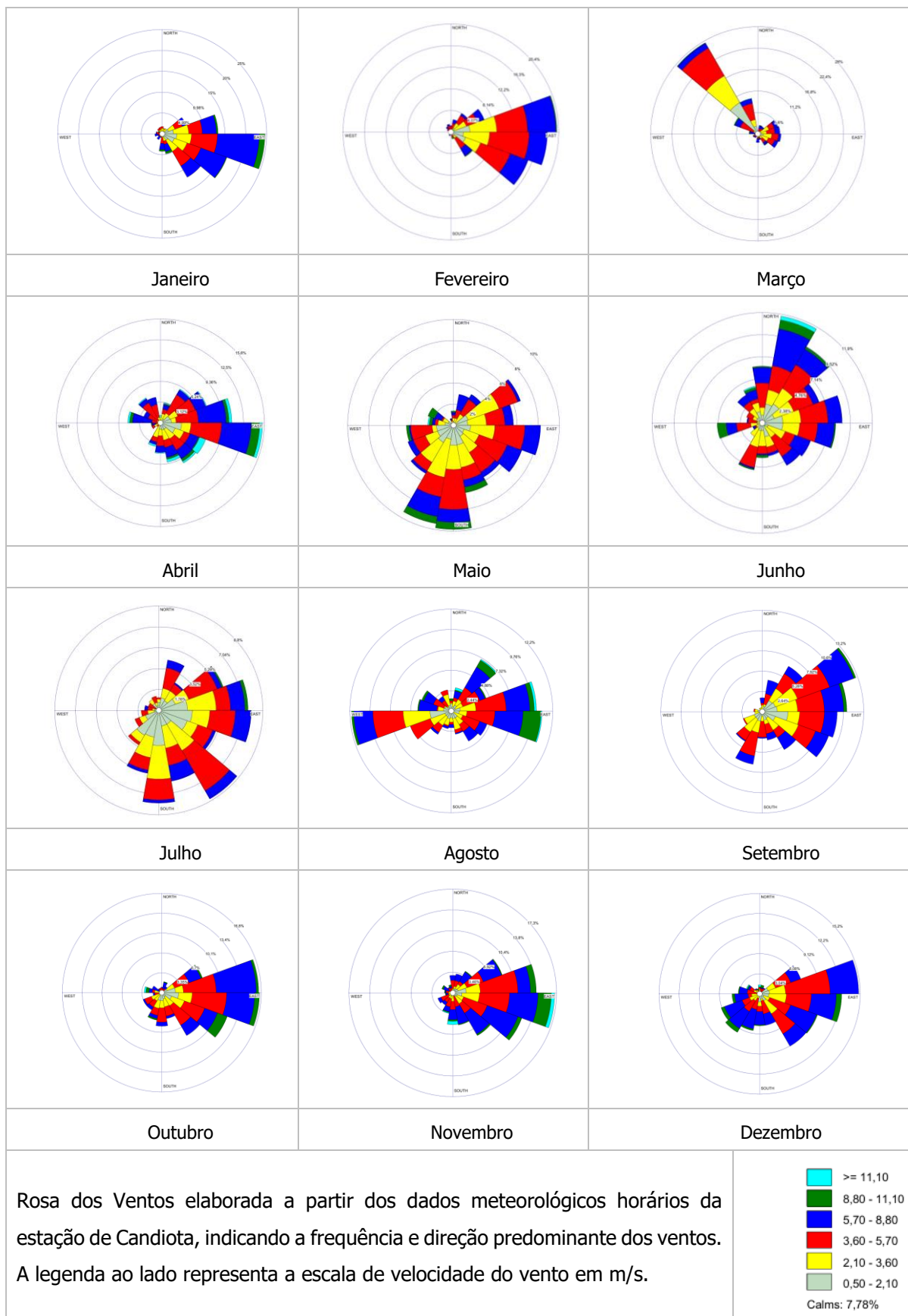
Ao longo dos cinco anos analisados, verifica-se que os ventos de Candiota apresentam predominância marcante dos quadrantes Leste e Nordeste, padrão típico da região devido à influência dos sistemas de circulação regional e topografia local. A intensidade dos ventos varia sazonalmente, com maiores velocidades na primavera e verão, e maior ocorrência de calmarias no outono e inverno. A tabela a seguir resume as principais características do regime de ventos em Candiota, RS, por estação, facilitando a comparação.

**Tabela 1** - Características do regime de ventos em Candiota, RS (2020 – 2024)

<b>Característica</b>	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>
<b>Velocidade Média (m/s)</b>	4,22	3,47	3,55	<b>4,50</b>
<b>Ventos Calmos (%)</b>	<b>3,29</b>	10,21	11,77	5,36
<b>Direções Predominantes</b>	E e NE	E e NE	E e NE	E e NE
<b>Frequência Máxima (E)</b>	13,5%	9,4%	9,5%	<b>15,3%</b>
<b>Faixa de Velocidade Dominante</b>	<b>5,70 - 8,80 m/s</b>	2,10 - 5,70 m/s	2,10 - 5,70 m/s	<b>5,70 - 8,80 m/s</b>
<b>Ventos Fortes (&gt; 8,80 m/s)</b>	Média	Baixa	Baixa	<b>Alta</b>

Avaliando o regime de ventos para o ano de 2024 (figura 12), o município de Candiota (RS) apresentou um comportamento de ventos marcado pela predominância das direções leste e sudeste (E–SE) durante praticamente todo o ano, resultado dos sistemas atmosféricos típicos do sul do Rio Grande do Sul. As velocidades médias mensais variaram de 2,32 m/s em julho a 5,05 m/s em abril, com uma média anual aproximada de 3,9 m/s, indicando um regime de ventos moderado, porém constante. Os meses de janeiro, fevereiro, abril, novembro e dezembro se destacaram como os mais ventosos, apresentando velocidades médias entre 4,1 e 5,0 m/s e baixos índices de calmarias, o que favorece a dispersão de poluentes.

Por outro lado, o inverno (principalmente julho) foi o período que registrou uma menor intensidade dos ventos, com 26,34% de calmarias e ventos fracos predominando de sul e sudeste, refletindo a estabilidade atmosférica típica da estação fria. Essa variação sazonal revela um padrão bem definido: ventos mais intensos e persistentes no verão e outono, e períodos de maior calmaria no inverno, retomando a força gradualmente na primavera. Em suma, o regime de ventos de Candiota é caracterizado por predominância leste-sudeste, boa regularidade anual e variações sazonais associadas à transição entre massas de ar que influenciam a região de estudo.



**Figura 12** - Rosa dos Ventos Mensal – Candiota/RS (janeiro a dezembro de 2024)

A Tabela 2 apresenta um resumo das informações mostradas nas rosas dos ventos mensais, sintetizando o comportamento sazonal do regime de ventos em Candiota ao longo de 2024. Observa-se a predominância de ventos provenientes dos quadrantes Leste e Sudeste durante a primavera e o verão, associados a maiores intensidades, e o aumento das calmarias e da frequência de ventos de Sul e Sudeste no outono e inverno.

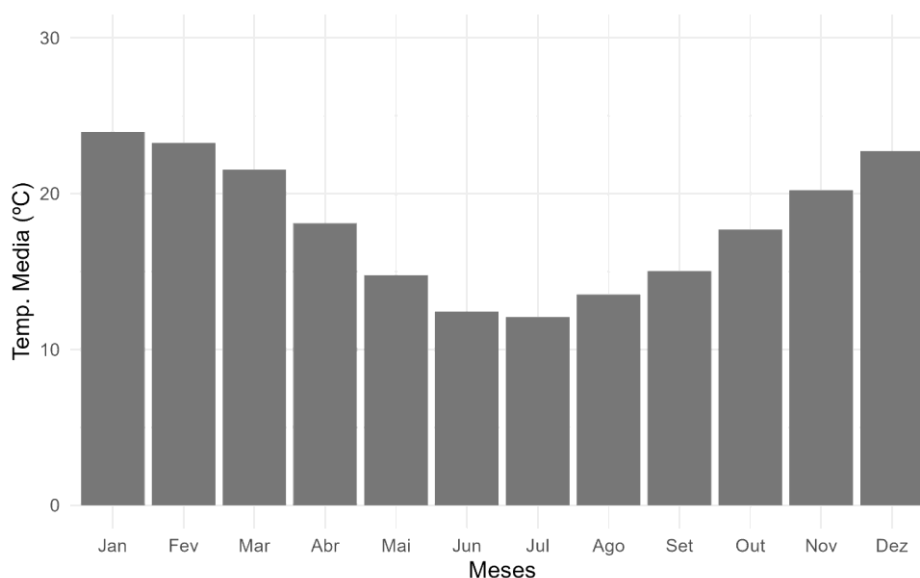
**Tabela 2** - Características do regime de ventos em Candiota, RS (2024)

<b>Mês</b>	<b>Velocidade Média (m/s)</b>	<b>Calmarias (%)</b>	<b>Direção Predominante</b>
<b>Janeiro</b>	4,33	2,82	N-NE, E-SE
<b>Fevereiro</b>	4,11	1,19	E, SE
<b>Março</b>	3,57	8,47	E-SE
<b>Abril</b>	5,05	8,61	E-SE, S
<b>Mai</b>	3,31	13,44	SE, S
<b>Junho</b>	3,78	7,78	E-SE
<b>Julho</b>	2,32	26,34	S, SE
<b>Agosto</b>	3,96	11,96	E-SE
<b>Setembro</b>	3,50	8,06	E-SE, S
<b>Outubro</b>	4,31	6,45	E, SE
<b>Novembro</b>	4,99	3,47	E-SE
<b>Dezembro</b>	4,73	3,63	E-SE

## **7. Médias Climatológicas da Região de Bagé (1961-2024)**

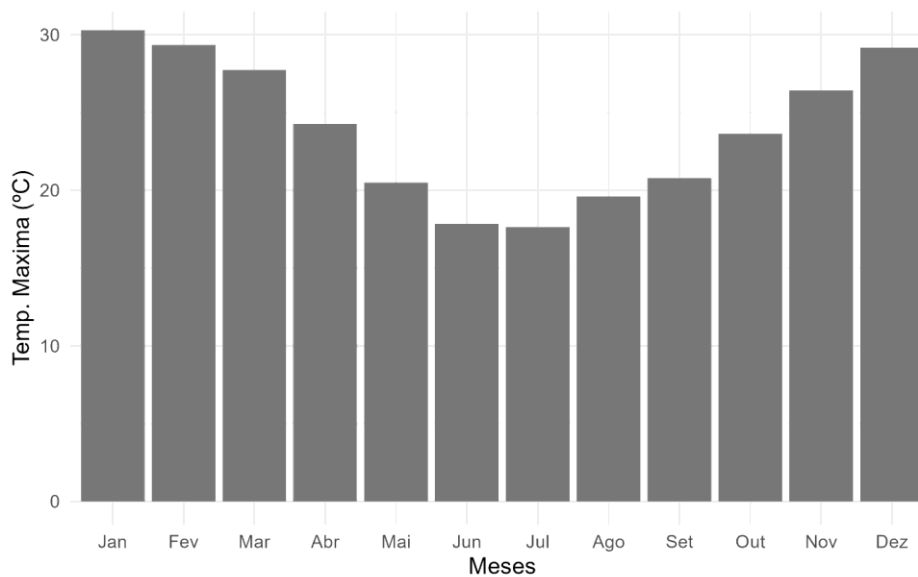
A série histórica da estação meteorológica de Bagé, correspondente ao período de 1961 a 2024, representa um registro consistente e abrangente do comportamento climático da região, caracterizada pelo clima subtropical úmido típico da Campanha Gaúcha. Localizada no extremo sul do Rio Grande do Sul, Bagé apresenta estações bem definidas, marcadas por verões quentes, invernos frios e distribuição de chuvas relativamente homogênea ao longo do ano. As variáveis analisadas incluem temperatura média, máxima e mínima do ar, precipitação, pressão atmosférica, umidade relativa, insolação e número de dias com chuva, permitindo compreender a dinâmica climática local e evidenciar a sazonalidade e as tendências que se destacam ao longo das últimas seis décadas.

A temperatura média do ar (Figura 7) apresenta de maneira clara o padrão sazonal característico da região. Os meses de janeiro e fevereiro apresentam as maiores médias, com valores próximos ou superiores a 24 °C, indicando o período mais quente do ano. Já os meses de junho e julho registram as menores temperaturas médias, variando entre 11 °C e 13 °C, representando o auge do inverno. Essa amplitude térmica anual, geralmente superior a 10 °C, traduz o contraste entre a forte radiação solar do verão e a influência de massas de ar polar durante o inverno. As transições sazonais são bem definidas, com o outono marcando o declínio gradual das temperaturas e o aumento da estabilidade atmosférica, enquanto a primavera traz o reaquecimento e a intensificação das instabilidades que antecedem o retorno das condições de verão.



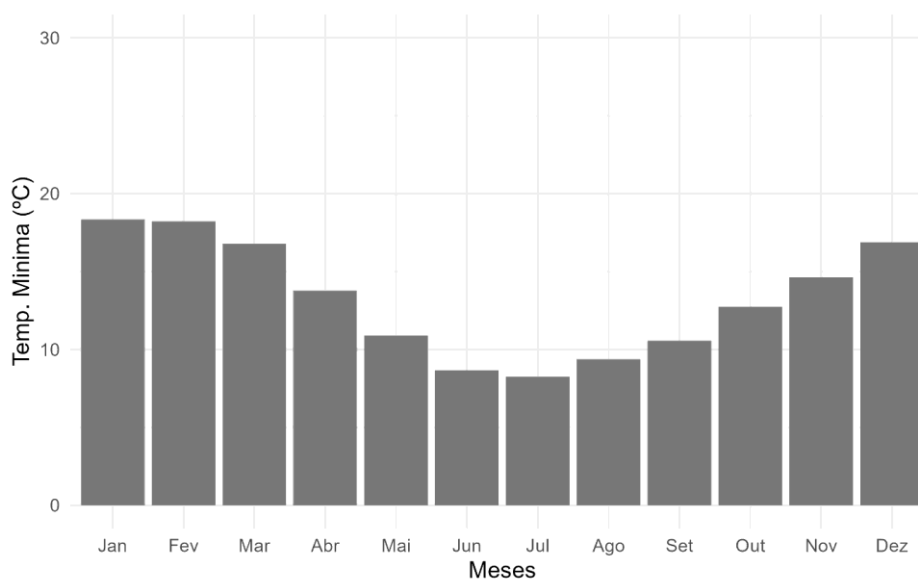
**Figura 7** – Temperatura média mensal do ar em Bagé (1961–2024).

A temperatura máxima (Figura 8) acompanha o mesmo padrão sazonal, com picos de aquecimento entre dezembro e fevereiro, quando as médias diárias ultrapassam frequentemente os 30 °C, e valores reduzidos entre junho e agosto, variando entre 15 °C e 18 °C. No verão, a insolação elevada e o predomínio de massas de ar quente promovem dias de calor intenso, eventualmente intercalados com pancadas de chuva de curta duração. Durante o inverno, a presença de frentes frias e massas de ar polar limita o aquecimento diurno, resultando em tardes frias e temperaturas máximas relativamente baixas. Essa variação expressa a influência direta da circulação atmosférica sobre o regime térmico local, caracterizando um contraste bem definido entre as estações quentes e frias do ano.



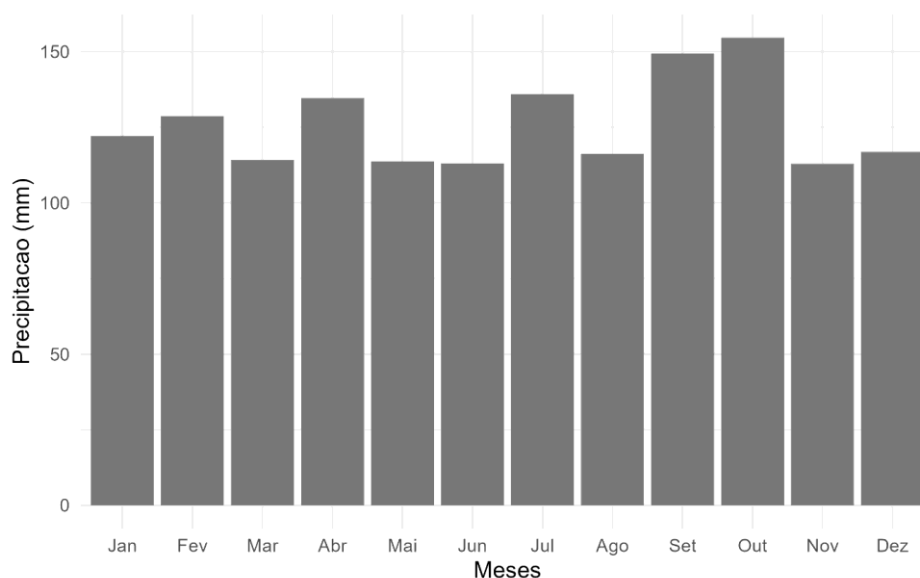
**Figura 8** – Temperatura máxima mensal em Bagé (1961–2024).

A temperatura mínima (Figura 9) entre maio e agosto, as mínimas frequentemente se aproximam de 5 °C, com registro de geadas recorrentes, especialmente em julho, mês mais frio da série histórica. Durante o verão, as mínimas mantêm-se elevadas, em torno de 18 °C a 20 °C, refletindo noites quentes e abafadas. A amplitude térmica diária tende a ser maior no outono e no inverno, quando o ar seco e o céu limpo favorecem a perda de calor por radiação noturna. Esses contrastes entre temperaturas diurnas e noturnas contribuem para a variabilidade térmica marcante que caracteriza a região da Campanha Gaúcha.



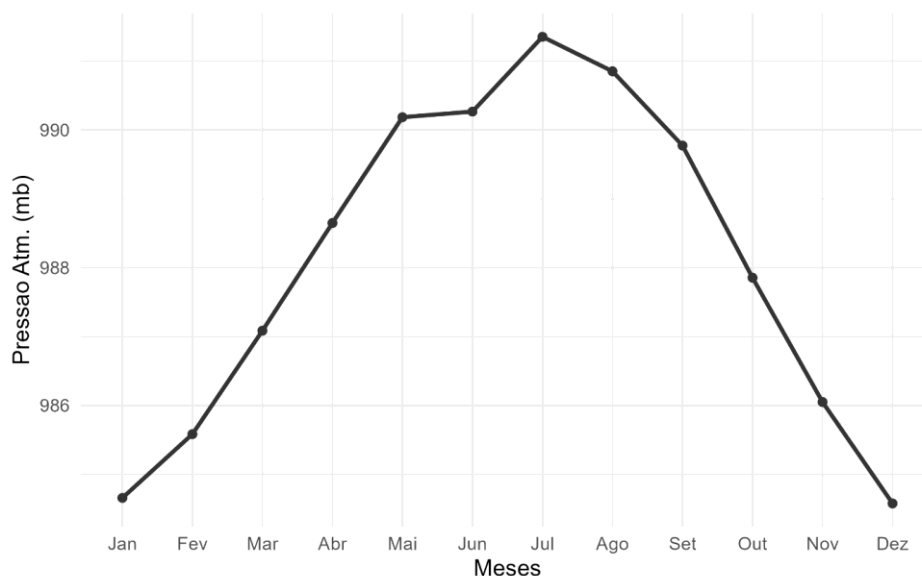
**Figura 9** – Temperatura mínima média mensal em Bagé (1961–2024).

A precipitação (Figura 10) apresenta uma distribuição relativamente uniforme ao longo do ano, sem uma estação seca bem definida, o que confirma o caráter úmido do clima local. Os totais mensais variam entre 100 e 150 mm, com leve predomínio das chuvas na primavera, sobretudo em setembro e outubro, quando a atuação de frentes frias e sistemas convectivos é mais frequente. No verão, embora os volumes acumulados permaneçam próximos da média anual, a irregularidade aumenta, com alternância entre períodos de estiagem e episódios intensos de chuva. O outono apresenta redução gradual dos volumes e frequência de precipitação, enquanto o inverno se caracteriza por chuvas mais constantes e de menor intensidade. Essa variabilidade é influenciada pelos fenômenos El Niño e La Niña, que modulam significativamente a distribuição e o volume das chuvas interanuais.



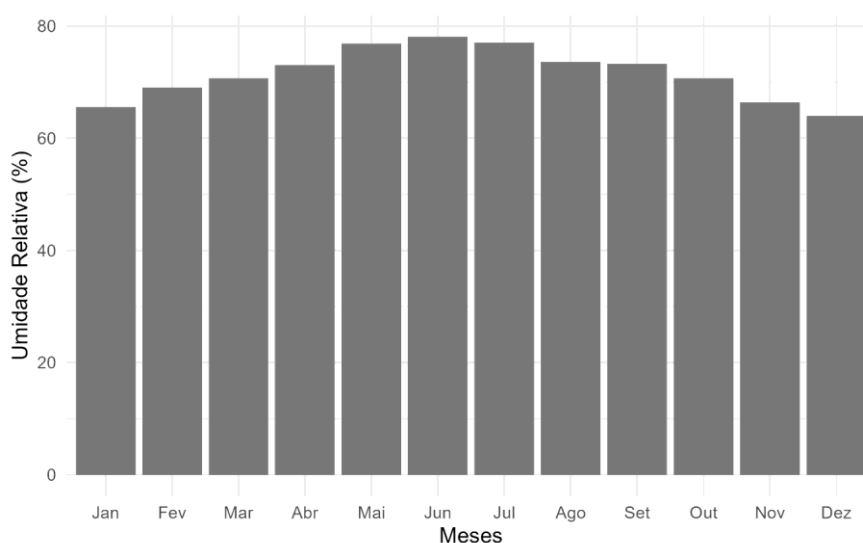
**Figura 10** – Precipitação média mensal em Bagé (1961–2024).

A pressão atmosférica (Figura 11) apresenta comportamento inversamente proporcional à temperatura, atingindo valores mais elevados nos meses frios e reduzindo-se no verão. Durante o inverno, entre maio e agosto, a pressão aumenta devido à predominância de sistemas de alta pressão e massas de ar frio e denso, que promovem maior estabilidade e redução da nebulosidade. No verão, de dezembro a fevereiro, a pressão média tende a cair em função do aquecimento superficial e da intensificação da convecção, resultando em períodos de instabilidade atmosférica e maior frequência de chuvas. Esse comportamento reflete o equilíbrio dinâmico entre os sistemas de alta e baixa pressão que atuam sazonalmente sobre o sul do país.



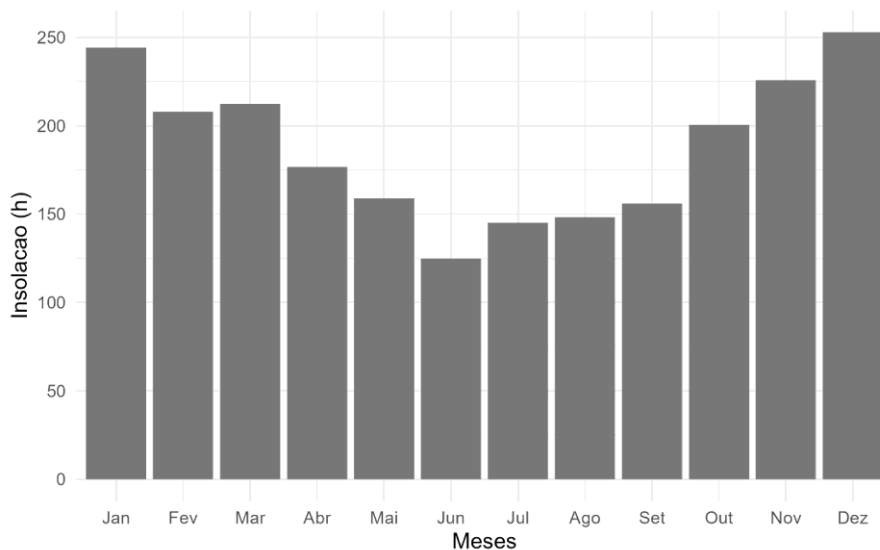
**Figura 11** – Pressão atmosférica média mensal em Bagé (1961–2024).

A umidade relativa do ar (Figura 12) mantém valores médios anuais elevados, geralmente acima de 70%, o que caracteriza a atmosfera úmida típica da região. Durante o inverno, as temperaturas mais baixas e o ar mais estável aumentam a umidade relativa, frequentemente acima de 80%. No verão, embora as chuvas sejam comuns, o calor intenso e a forte insolação reduzem temporariamente a umidade, especialmente nas tardes de maior aquecimento. A variação mensal mostra um padrão bem definido, com maiores valores de umidade entre maio e agosto e menores entre dezembro e fevereiro, refletindo a relação direta entre temperatura e capacidade do ar de reter vapor d'água.



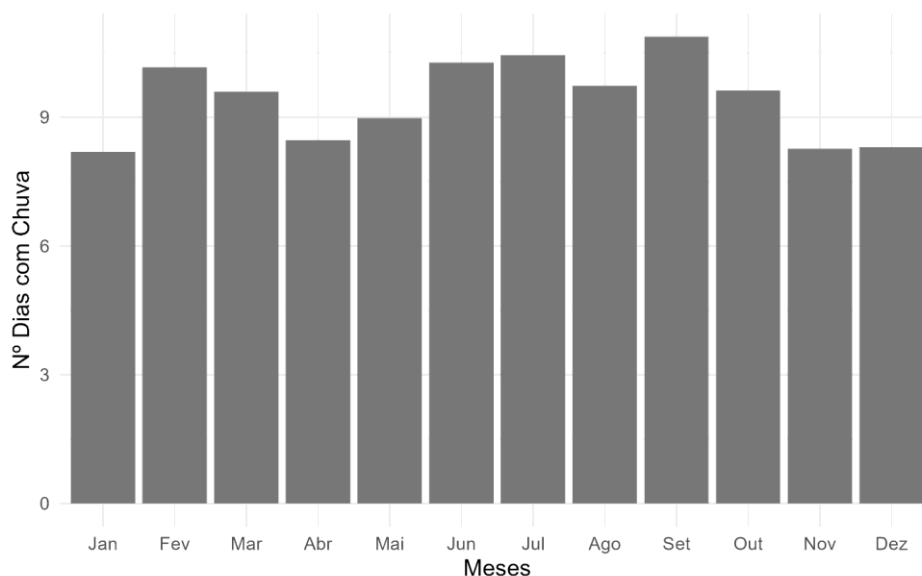
**Figura 12** – Umidade relativa média mensal do ar em Bagé (1961–2024).

A insolação (Figura 13), expressa em horas de brilho solar, apresenta máximos entre novembro e fevereiro, quando os dias são mais longos e o predomínio de céu claro favorece a radiação solar direta. Os valores mais baixos ocorrem no inverno, entre junho e agosto, devido à maior nebulosidade e à menor duração do dia. Bagé registra, em média, mais de 2.400 horas anuais de brilho solar, o que evidencia elevado potencial de radiação e reforça o contraste sazonal entre o verão ensolarado e o inverno nublado. Essa variação de insolação está diretamente relacionada às oscilações térmicas e ao regime de precipitação observado ao longo do ano.



**Figura 13** – Insolação média mensal (horas de brilho solar) em Bagé (1961–2024).

O número de dias (Figura 14) com chuva acompanha a distribuição dos totais pluviométricos, apresentando entre 8 e 12 dias com precipitação por mês, dependendo da estação. Os meses de setembro e outubro tendem a registrar o maior número de dias chuvosos, coincidindo com a primavera mais instável e úmida. Durante o verão, as chuvas ocorrem de forma mais concentrada em episódios curtos e intensos, enquanto o inverno apresenta maior frequência de dias nublados com chuvas leves e persistentes associadas à passagem de frentes frias. Essa regularidade anual confirma o equilíbrio entre períodos de instabilidade e estabilidade atmosférica que caracterizam o regime climático regional.



**Figura 14** – Número médio mensal de dias com chuva em Bagé (1961–2024).

De modo geral, as variáveis analisadas confirmam o caráter subtropical úmido do clima de Bagé, com forte sazonalidade térmica, distribuição regular das chuvas, umidade elevada e boa disponibilidade de radiação solar. O conjunto dos dados evidencia a alternância entre verões quentes e úmidos, invernos frios e estáveis e períodos de transição bem definidos, compondo um retrato fiel do comportamento climático local e suas tendências ao longo do tempo.

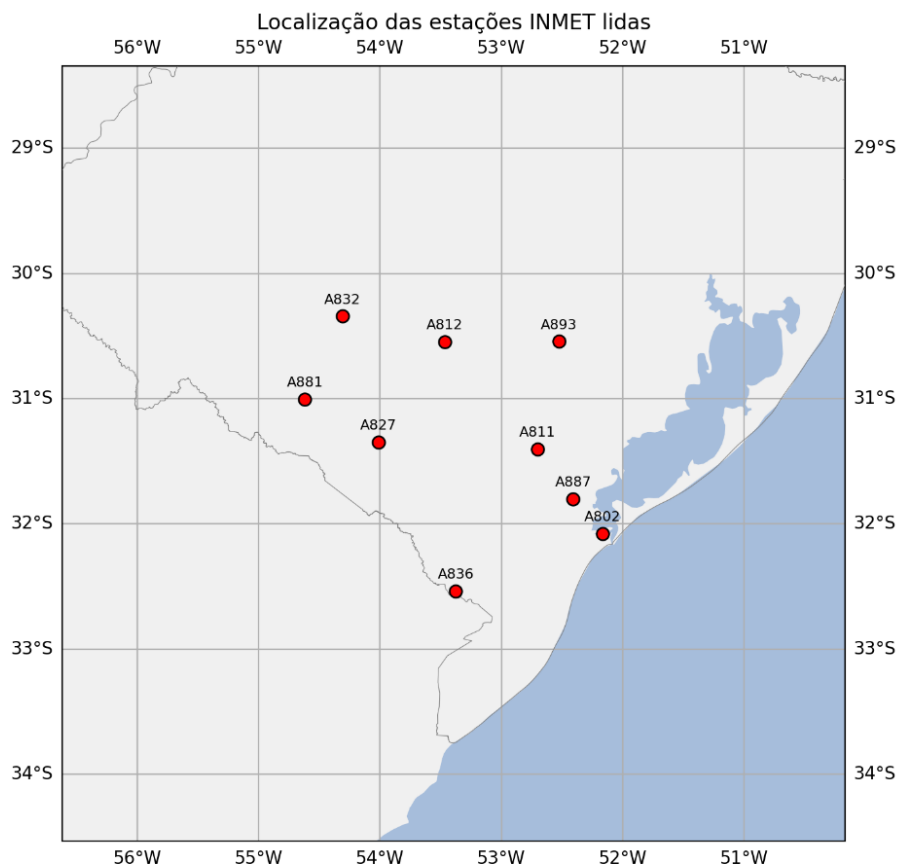
## 8. Validação do Modelo Meteorológico WRF (2020-2025)

A etapa de validação do modelo meteorológico teve como objetivo avaliar o desempenho do *Weather Research and Forecasting* (WRF) na representação das condições atmosféricas observadas sobre a região sul do Rio Grande do Sul. Para isso, foram utilizados dados observacionais de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), comparados às simulações geradas pelo modelo para o mesmo período e domínio espacial.

A validação constitui uma etapa fundamental para verificar a confiabilidade e a precisão do modelo numérico, permitindo identificar possíveis discrepâncias entre o comportamento simulado e as condições reais observadas. Foram consideradas, neste estudo, as principais variáveis meteorológicas de superfície: temperatura do ar (°C), umidade relativa (%), velocidade e direção do vento (m/s e graus), temperatura do ponto de orvalho (°C), pressão atmosférica (hPa) e precipitação (mm).

As comparações foram realizadas com base em dados provenientes de oito estações meteorológicas representativas da região de estudo, abrangendo diferentes condições topográficas e microclimáticas. As estações utilizadas foram: Caçapava do Sul (A812), Encruzilhada do Sul (A893), Jaguarão (A836), Dom Pedrito (A881), Bagé (A827), Canguçu (A811), São Gabriel (A832) e Capão do Leão – Pelotas (A887).

A Figura 1 apresenta o mapa de localização das estações meteorológicas utilizadas na validação, evidenciando a distribuição espacial dos pontos de observação na região sul do estado. Essa disposição geográfica permite uma avaliação abrangente do desempenho do modelo em diferentes contextos locais, desde áreas de relevo mais elevado até regiões de planície costeira.



**Figura 15** - Mapa de localização das estações meteorológicas utilizadas na validação

A análise dos resultados foi realizada a partir de indicadores estatísticos amplamente utilizados em estudos de validação meteorológica, tais como o *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), Coeficiente de Correlação ( $r$ ), Coeficiente de

Determinação ( $R^2$ ) e viés (Bias). Esses índices permitem quantificar o grau de concordância entre as simulações do modelo WRF e os dados observados, avaliando sua capacidade de reproduzir as variáveis meteorológicas com precisão e sem tendências sistemáticas significativas. A seguir, são apresentadas as tabelas com os resultados obtidos para cada variável meteorológica analisada, acompanhadas de uma descrição interpretativa dos principais comportamentos observados nas diferentes estações do INMET. A etapa de validação dos dados meteorológicos teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF) na representação das condições atmosféricas observadas sobre a região sul do Rio Grande do Sul. Para isso, foram utilizados dados observacionais de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), comparados às simulações geradas pelo modelo para o mesmo período e domínio espacial.

A análise estatística realizada entre os dados simulados pelo modelo WRF e as observações das estações meteorológicas do INMET indicou um bom desempenho do modelo para a variável de temperatura do ar. De maneira geral, o erro médio quadrático (RMSE) variou entre 2,1 e 2,7 °C, com valores de correlação acima de 0,9 para todas as estações. Esses resultados demonstram que o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente a variabilidade térmica regional, apresentando ligeira tendência negativa no viés, o que indica uma leve subestimativa das temperaturas simuladas em relação às observadas. As melhores correlações foram observadas em Dom Pedrito e Caçapava do Sul, enquanto Bagé apresentou os maiores desvios. A Tabela 3 apresenta o resumo estatístico para a temperatura do ar.

**Tabela 3** – Resultados estatísticos da validação da Temperatura do Ar (°C) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET.

Estação	RMSE	MAE	$R^2$	Correlação	Viés
Caçapava do Sul (A812)	2,10	1,55	0,86	0,93	-0,19
Encruzilhada do Sul (A893)	2,29	1,74	0,81	0,93	-0,53
Jaguarão (A836)	2,49	1,98	0,82	0,92	-0,91
Dom Pedrito (A881)	2,44	1,88	0,86	0,94	-1,00
Bagé (A827)	2,71	2,14	0,83	0,93	-1,40
Canguçu (A811)	2,11	1,57	0,82	0,93	0,04
São Gabriel (A832)	2,43	1,85	0,84	0,93	-0,53
Capão do Leão (A887)	2,51	2,02	0,78	0,90	-0,90

Em relação à umidade relativa do ar (Tabela 4), o modelo apresentou desempenho satisfatório, ainda que inferior ao observado para a temperatura. As correlações variaram entre 0,77 e 0,83, com RMSE entre 8 % e 13 %. O modelo tendeu a superestimar a umidade

em algumas estações e subestimar em outras, resultando em um viés variável entre -6 % e +3 %. A maior discrepância ocorreu em São Gabriel, possivelmente devido a variações locais não captadas pelo modelo. A Tabela 2 resume os resultados obtidos para essa variável.

**Tabela 4** – Resultados estatísticos da validação da Umidade Relativa do Ar (%) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET

Estação	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	Correlação	Viés
Caçapava do Sul (A812)	10,93	7,80	0,63	0,81	-2,64
Encruzilhada do Sul (A893)	11,14	7,90	0,58	0,81	-2,13
Jaguarão (A836)	8,80	6,39	0,66	0,83	-1,73
Dom Pedrito (A881)	10,16	7,67	0,64	0,82	2,81
Bagé (A827)	9,94	7,40	0,64	0,83	2,66
Canguçu (A811)	10,35	7,37	0,62	0,80	-0,54
São Gabriel (A832)	12,77	9,36	0,45	0,77	-6,09
Capão do Leão (A887)	9,39	6,81	0,59	0,78	-0,93

A variável velocidade do vento (Tabela 5) apresentou maior dispersão entre as estações, com valores de R<sup>2</sup> variando entre 0,04 e 0,65. As correlações mais elevadas ocorreram em Capão do Leão e Bagé, refletindo melhor representação das condições de vento nessas áreas. Os valores de RMSE oscilaram de 1,6 m/s a 2,2 m/s, indicando que o modelo tende a apresentar maiores erros em locais com topografia mais complexa ou regime de ventos mais variável. O viés positivo em várias estações mostra uma tendência de superestimativa da velocidade do vento. A Tabela 3 apresenta os resultados estatísticos dessa variável.

**Tabela 5** – Resultados estatísticos da validação da Velocidade do Vento (m/s) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET

Estação	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	Correlação	Viés
Caçapava do Sul (A812)	1,65	1,27	0,05	0,51	0,42
Encruzilhada do Sul (A893)	2,20	1,83	0,04	0,54	1,64
Jaguarão (A836)	1,93	1,56	0,25	0,64	-0,13
Dom Pedrito (A881)	1,95	1,46	0,56	0,56	0,56
Bagé (A827)	1,74	1,32	0,58	0,58	0,29
Canguçu (A811)	1,76	1,37	0,50	0,50	0,31
São Gabriel (A832)	2,20	1,81	0,53	0,53	1,57
Capão do Leão (A887)	1,61	1,25	0,65	0,66	0,60

O ponto de orvalho (Tabela 6) apresentou desempenho consistente com o comportamento da temperatura e da umidade, refletindo a boa capacidade do modelo em reproduzir as condições termodinâmicas da atmosfera. As correlações ficaram acima de 0,9 em todas as estações, e o RMSE oscilou entre 2,0 °C e 2,8 °C. Observou-se leve tendência de subestimativa generalizada, com viés negativo predominante. Esse resultado indica que o modelo reproduziu adequadamente os padrões de umidade e temperatura do ar, fundamentais para análises de conforto térmico e processos de evapotranspiração. A Tabela 4 resume esses resultados.

**Tabela 6** – Resultados estatísticos da validação do Ponto de Orvalho (°C) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET

<b>Estação</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Correlação</b>	<b>Viés</b>
Caçapava do Sul (A812)	2,25	1,72	0,81	0,92	-1,02
Encruzilhada do Sul (A893)	2,33	1,85	0,77	0,92	-1,02
Jaguarão (A836)	2,45	1,95	0,78	0,92	-1,37
Dom Pedrito (A881)	2,00	1,53	0,86	0,93	-0,55
Bagé (A827)	2,48	1,88	0,81	0,91	-0,95
Canguçu (A811)	2,04	1,53	0,84	0,92	-0,13
São Gabriel (A832)	2,75	2,24	0,73	0,93	-1,97
Capão do Leão (A887)	2,50	1,99	0,76	0,91	-1,26

A pressão atmosférica foi a variável que apresentou o melhor desempenho geral, com valores de correlação próximos de 1,0 e R<sup>2</sup> de 0,98 em todas as estações. O RMSE manteve-se abaixo de 1 hPa, indicando excelente ajuste entre os dados simulados e observados. Os valores de viés foram baixos e sem tendência sistemática de super ou subestimação. Esses

resultados confirmam a robustez do modelo WRF na simulação de variáveis de grande escala, como a pressão. A Tabela 5 apresenta o resumo estatístico dessa variável.

**Tabela 7** – Resultados estatísticos da validação da Pressão Atmosférica (hPa) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET

Estação	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	Correlação	Viés
Caçapava do Sul (A812)	0,40	0,35	0,98	0,98	3,42
Encruzilhada do Sul (A893)	0,75	0,98	0,98	0,98	2,06
Jaguarão (A836)	0,96	0,96	0,98	0,98	0,16
Dom Pedrito (A881)	0,94	0,94	0,98	0,98	0,84
Bagé (A827)	0,82	0,82	0,98	0,98	1,96
Canguçu (A811)	0,03	0,03	0,98	0,98	4,55
São Gabriel (A832)	0,97	0,97	0,98	0,98	2,15
Capão do Leão (A887)	0,95	0,95	0,98	0,98	-0,23

A precipitação (Tabela 6) foi a variável que apresentou os maiores erros relativos, refletindo a complexidade dos processos físicos envolvidos e as limitações inerentes à representação da convecção em modelos numéricos. O RMSE variou entre 2 mm e 4,6 mm, com correlações modestas, geralmente inferiores a 0,4. Mesmo assim, o modelo foi capaz de representar a ocorrência e distribuição geral das chuvas, ainda que com discrepâncias na intensidade. Os maiores erros ocorreram em São Gabriel e Bagé, enquanto Encruzilhada do Sul apresentou o melhor ajuste. A Tabela 6 apresenta o resumo estatístico da precipitação.

**Tabela 6** – Resultados estatísticos da validação da Precipitação (mm) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET

Estação	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	Correlação	Viés
Caçapava do Sul (A812)	3,42	2,01	0,45	0,45	4,05
Encruzilhada do Sul (A893)	2,03	1,43	0,30	0,30	2,50
Jaguarão (A836)	3,26	1,96	0,35	0,35	3,25
Dom Pedrito (A881)	3,34	1,82	0,36	0,36	3,34
Bagé (A827)	4,02	2,01	0,39	0,39	2,94
Canguçu (A811)	2,85	1,68	0,41	0,41	2,85
São Gabriel (A832)	4,60	0,76	0,17	0,17	4,60
Capão do Leão (A887)	3,19	1,67	0,38	0,38	3,19

A precipitação (Tabela 6) foi a variável que apresentou os maiores erros relativos, refletindo a complexidade dos processos físicos envolvidos e as limitações inerentes à representação da convecção em modelos numéricos. O RMSE variou entre 2 mm e 4,6 mm,

com correlações modestas, geralmente inferiores a 0,4. Mesmo assim, o modelo foi capaz de representar a ocorrência e distribuição geral das chuvas, ainda que com discrepâncias na intensidade. Os maiores erros ocorreram em São Gabriel e Bagé, enquanto Encruzilhada do Sul apresentou o melhor ajuste. A Tabela 6 apresenta o resumo estatístico da precipitação.

## 9. Caracterização Meteorológica da Estação Candiota-RS (2020-2024)

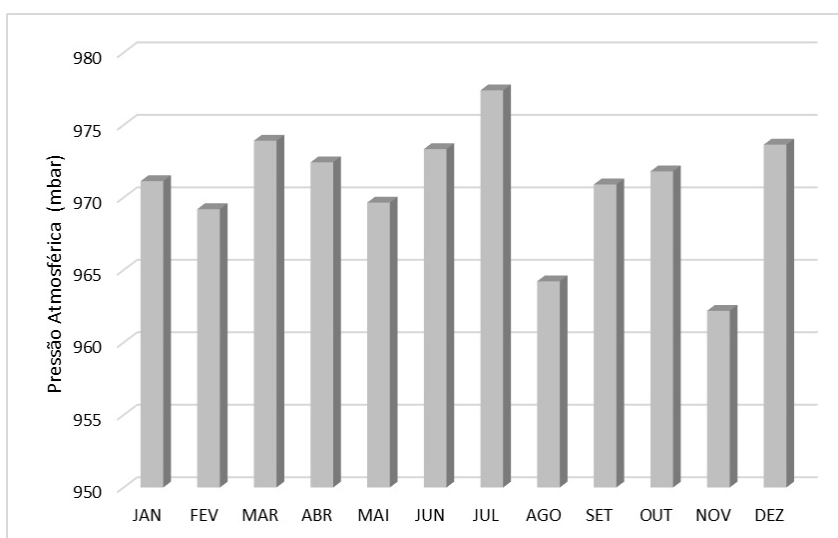
A caracterização das condições meteorológicas foi realizada com base nas médias mensais e sazonais observadas na estação do empreendimento localizada em Candiota-RS, no período de 2020 a 2024. As variáveis analisadas incluíram pressão atmosférica, radiação solar global, temperatura do ar, umidade relativa e precipitação pluviométrica. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 16 a 25, correspondentes às variações mensais e sazonais de cada parâmetro.

Apesar de haver falhas nos registros de dados de meteorologia, pode-se observar na Tabela 4 que o percentual de dados válidos no ano de 2024 é superior a 90% em todas as EQAs. Esse resultado é importante para aplicações em Estudos de Dispersão Atmosférica (EDA), uma vez que a Agência Ambiental Americana (US EPA) indica que para aplicações em controle da qualidade do ar e modelo de dispersão, é necessário que as séries de dados meteorológicos sejam representativas no local (dentro de um raio não maior do que 50 km) e possuam, pelo menos, 90% de dados válidos ( )

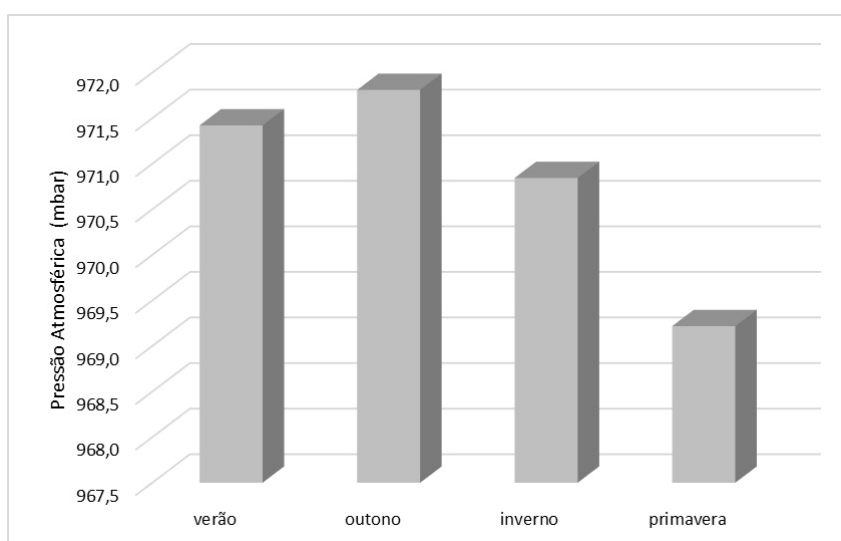
**Tabela 7** – Percentual de dados válidos de meteorologia na rede de monitoramento.

<b>Estação</b>	<b>Variável</b>	<b>Dados Válidos (%)</b>
Aeroporto	direção do vento	97,07
	pressão atmosférica	97,03
	radiação solar	97,03
	temperatura do ar	96,74
	umidade relativa	96,08
	velocidade do vento	97,07
	precipitação	97,01
Candiota	direção do vento	-
	pressão atmosférica	-
	radiação solar	-
	temperatura do ar	-
	umidade relativa	-
	velocidade do vento	-
	precipitação	94,71
Três Lagoas	direção do vento	91,53
	pressão atmosférica	91,51
	radiação solar	91,51
	temperatura do ar	91,51
	umidade relativa	91,53
	velocidade do vento	91,58
	precipitação	91,42

A pressão atmosférica média mensal (Figura 16) variou entre aproximadamente 962 e 977 mbar. Os maiores valores ocorreram no mês de julho, correspondendo ao inverno, período em que predominam sistemas de alta pressão e massas de ar mais estáveis. Os menores valores foram observados em agosto e novembro, meses marcados por maior instabilidade e passagem de frentes frias. De forma sazonal (Figura 17), o outono apresentou a maior pressão média, seguido do verão, enquanto a primavera registrou as menores médias, refletindo a transição entre diferentes sistemas atmosféricos.

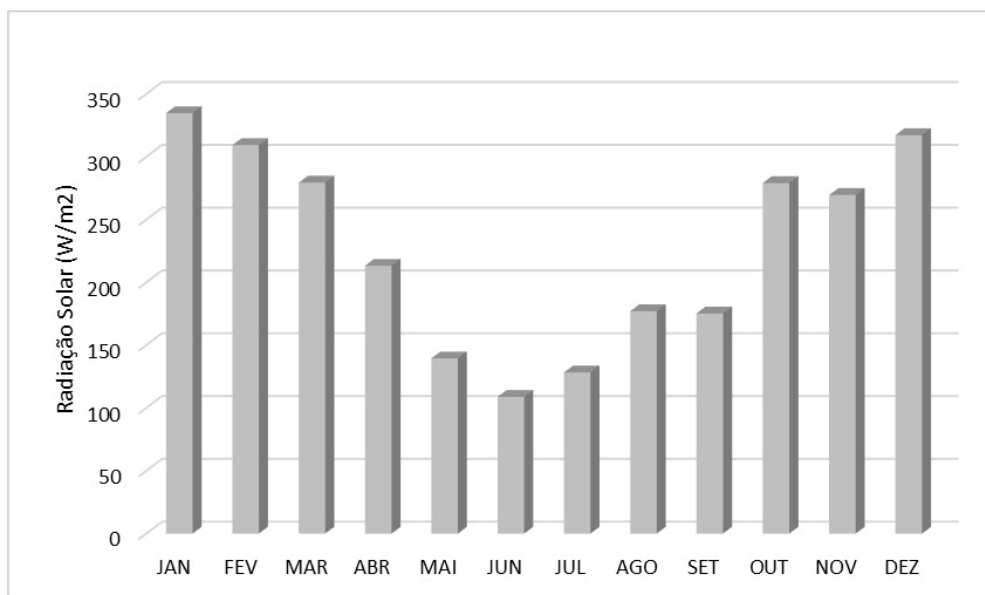


**Figura 16** – Variação mensal da pressão atmosférica média (2020–2024).

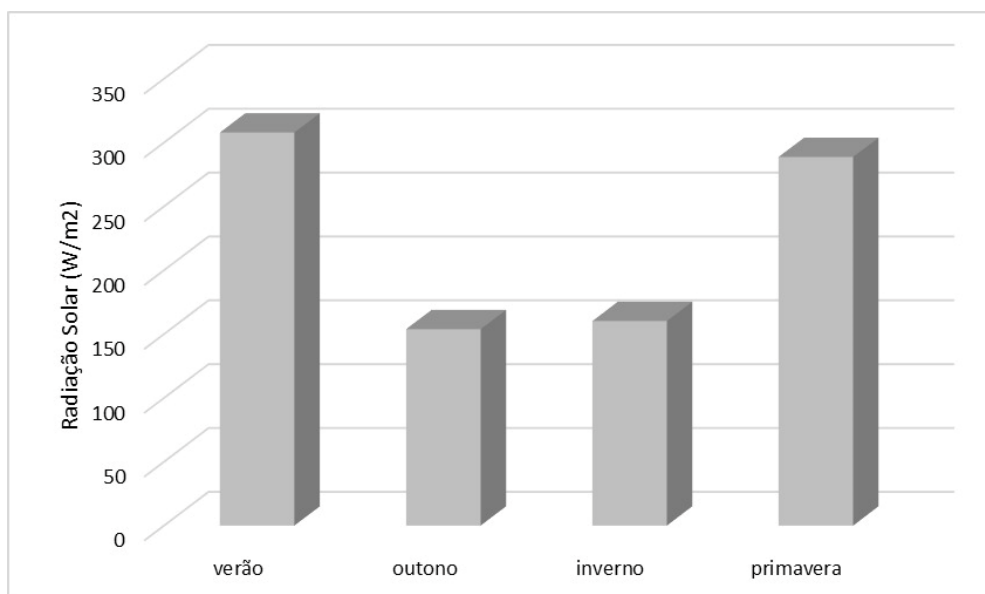


**Figura 17** – Variação sazonal da pressão atmosférica média (2020–2024).

A radiação solar global (Figura 18) apresentou comportamento típico da região subtropical, com valores mais elevados durante o verão e redução acentuada no inverno. As médias mensais variaram entre cerca de 120 W/m<sup>2</sup> em junho e 340 W/m<sup>2</sup> em janeiro, acompanhando o aumento da duração do dia e do ângulo solar. Em termos sazonais (Figura 19), o verão apresentou a maior média de radiação, seguido da primavera, enquanto o inverno apresentou os menores valores, refletindo a influência direta da insolação sobre o balanço de energia da superfície.

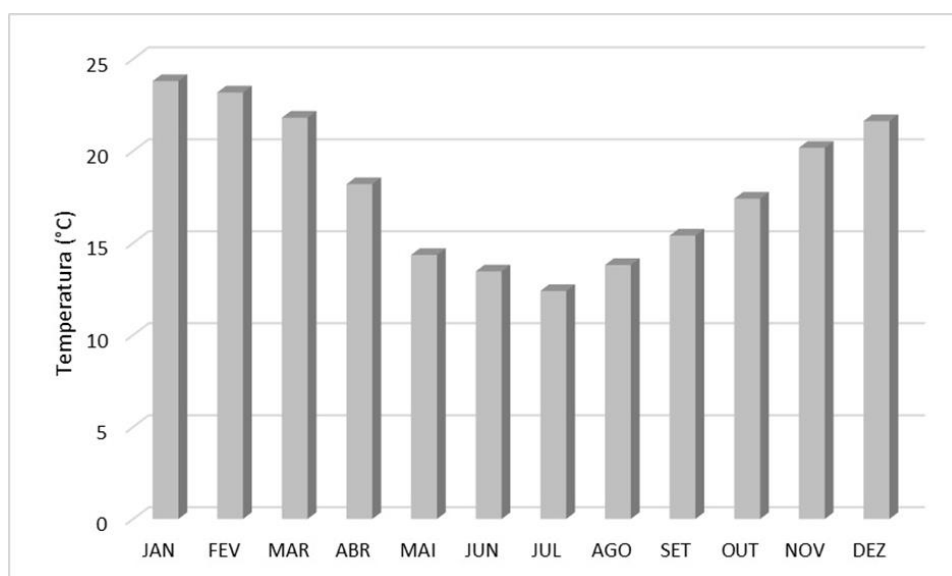


**Figura 18** – Variação mensal da radiação solar global média (2020–2024).

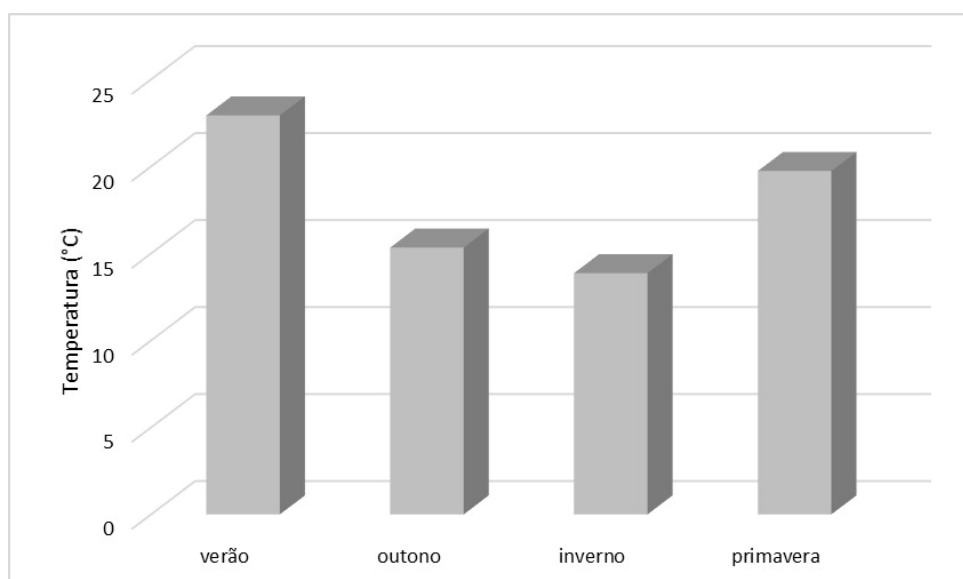


**Figura 19** – Variação sazonal da radiação solar global média (2020–2024).

A temperatura média do ar (Figura 20) apresentou padrão sazonal bem definido, com os valores mais elevados entre dezembro e fevereiro e os menores entre junho e julho. As médias mensais variaram de aproximadamente 13°C a 24°C, indicando uma amplitude térmica anual significativa. Sazonalmente (Figura 21), o verão apresentou médias entre 24 e 25°C, o outono entre 17 e 18°C, o inverno entre 15 e 16°C e a primavera cerca de 21°C. Esse comportamento confirma a predominância de verões quentes e invernos frios, característicos do clima subtropical úmido do sul do Brasil.

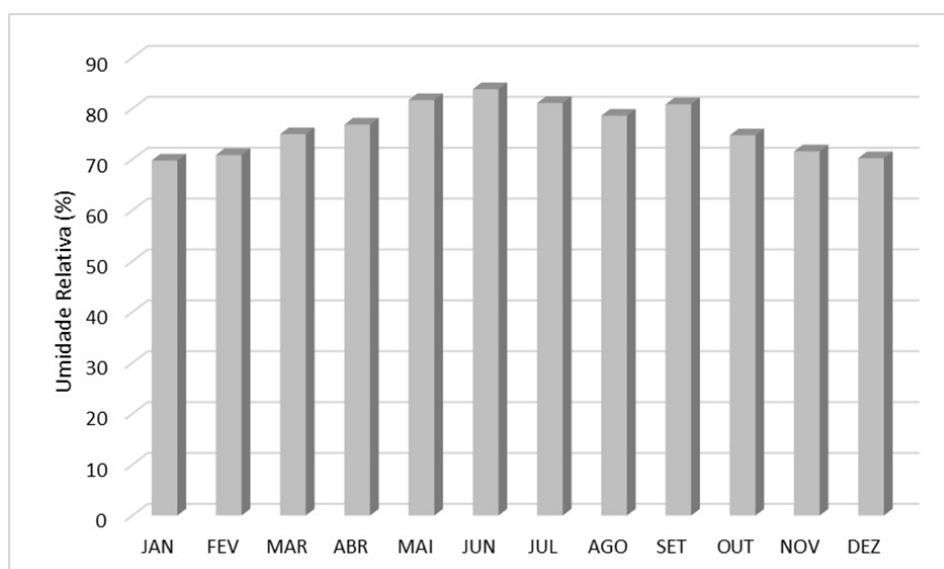


**Figura 20** – Variação mensal da temperatura média do ar (2020–2024).

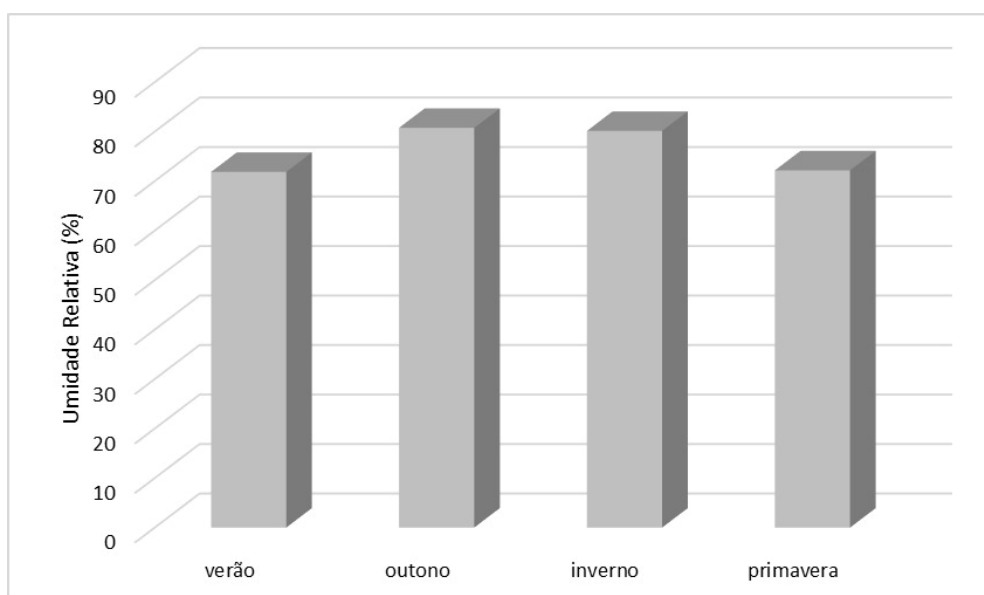


**Figura 21** – Variação sazonal da temperatura média do ar (2020–2024).

A umidade relativa do ar (Figura 22) apresentou comportamento inverso ao da temperatura e da radiação solar, com valores mais elevados nos meses frios e menores nos meses quentes. As médias mensais oscilaram entre 72% e 87%, com máximos observados entre junho e agosto e mínimos entre dezembro e janeiro. Na análise sazonal (Figura 23), o outono e o inverno apresentaram as maiores médias, próximas de 86 a 87%, enquanto o verão e a primavera registraram valores inferiores, próximos de 77 a 78%. Esse padrão evidencia a influência das menores temperaturas e da maior estabilidade atmosférica sobre a elevação da umidade relativa.

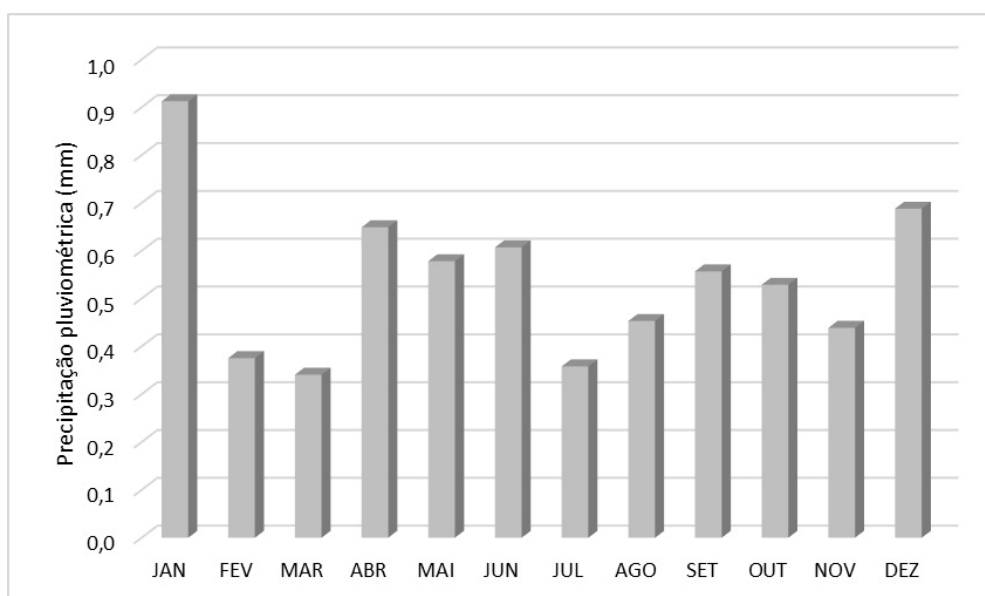


**Figura 22** – Variação mensal da umidade relativa média (2020–2024).

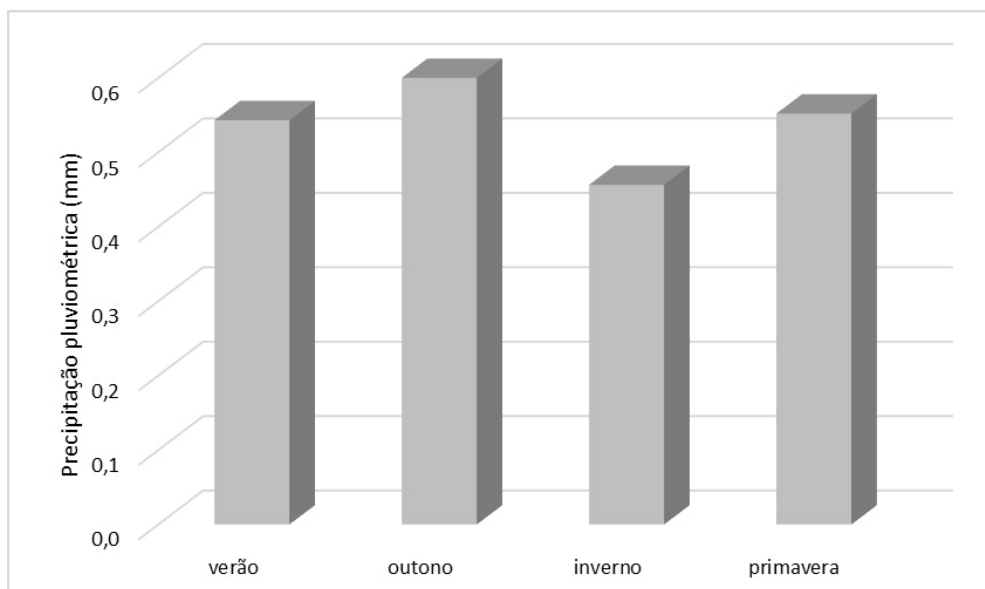


**Figura 23** – Variação sazonal da umidade relativa média (2020–2024).

A precipitação pluviométrica apresentou médias mensais entre 0,3 e 0,9 mm, com pico no mês de janeiro e valores mínimos em abril e agosto. Embora as chuvas ocorram ao longo de todo o ano, observa-se leve concentração durante o verão e o outono, coerente com o regime subtropical úmido da região. Em termos sazonais, o outono apresentou a maior média de precipitação, seguido da primavera e do verão, enquanto o inverno foi o período mais seco.



**Figura 24** – Variação mensal da precipitação média (2020–2024).



**Figura 25** – Variação sazonal da precipitação média (2020–2024).

De modo geral, o período analisado reflete as características típicas do clima subtropical úmido de Candiota-RS, com verões quentes e de elevada radiação solar, invernos frios e úmidos e estações de transição marcadas por grande variabilidade térmica e atmosférica. A distribuição pluviométrica mostrou-se relativamente homogênea ao longo do ano, com leve predominância das chuvas nos meses quentes, enquanto a pressão atmosférica e a umidade relativa tendem a se elevar durante o inverno, quando há maior estabilidade e menor aquecimento solar. Esses resultados evidenciam o comportamento climático esperado para a região, coerente com sua localização geográfica e influência dos sistemas meteorológicos atuantes no sul do Brasil.