

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA E  
MODELAGEM QUANTITATIVA

Helen da Silva Costa Benaduce

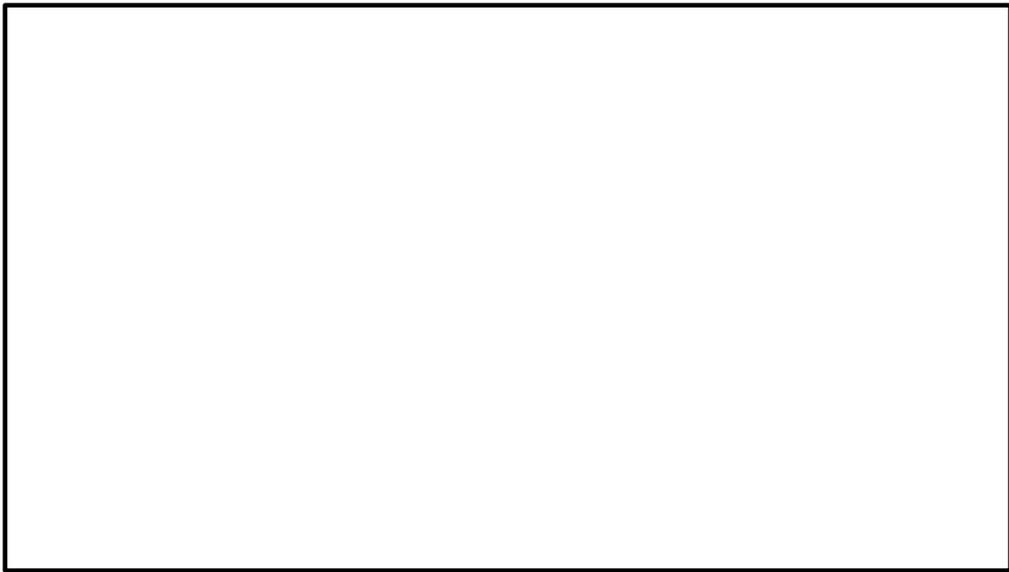
**INFERÊNCIA E CARACTERIZAÇÃO ATRAVÉS DE  
ESTATÍSTICA CIRCULAR PARA DADOS DE  
DIREÇÃO DO VENTO**

**Helen da Silva Costa Benaduce**

**INFERÊNCIA E CARACTERIZAÇÃO ATRAVÉS DE ESTATÍSTICA  
CIRCULAR PARA DADOS DE DIREÇÃO DO VENTO**

Monografia de especialização  
apresentado ao Curso de  
Especialização em Estatística  
e Modelagem Quantitativa da  
Universidade Federal de Santa  
Maria (UFSM), como  
requisito parcial para a  
obtenção do título de  
**Especialista em Estatística e  
Modelagem Quantitativa.**

Orientador: Dr. Augusto Maciel da Silva

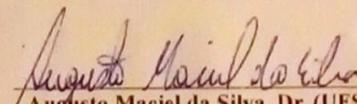


Helen da Silva Costa Benaduce

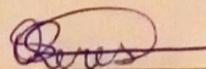
**INFERÊNCIA E CARACTERIZAÇÃO ATRAVÉS DE ESTATÍSTICA CIRCULAR PARA DADOS  
DE DIREÇÃO DO VENTO**

Monografia de especialização apresentada ao Curso de Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Especialista em Estatística e Modelagem Quantitativa**.

Aprovado em 20 de março de 2020:

  
Augusto Maciel da Silva, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

  
Ana Lucia Souza Mateus, Dra. (UFSM)

  
Vanessa Siqueira Peres da Silva, Dra. (UFSM)

## DEDICATÓRIA

*To all who came before me.*

*To all helped me get here*

*[Aos que vieram antes de mim.*

*Aos que me apoiaram a estar aqui hoje]*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço:*

- Aos meus pais Marlene e Flávio, pelas oportunidades, apoio e por todo esforço para que eu pudesse seguir estudando; ao meu irmão Victor pela amizade; à minha avó Chica por ser uma entusiasta dos meus estudos.*
- Ao meu marido Guilherme, pelo amor, respeito, companheirismo diário e também por ser meu revisor de texto.*
- A Carla Daniela pelo incentivo, torcida e amizade.*
- Ao Prof. Dr. Augusto Maciel da Silva pela orientação, interminável paciência e tranquilidade.*
- Aos membros da banca, pela disponibilidade.*
- À professores e funcionários do Departamento de Estatística da Universidade Federal de Santa Maria.*
- Aos colegas, pela convivência e amizade.*

*“Que estranho ver a chama de um mortal arder;  
E depois, dia a dia esmaecer.  
Saber que é graveto essa alma a luzir  
E que o vento fará dela o que bem decidir”  
Patrick Rotfuss*

## RESUMO

### INFERÊNCIA E CARACTERIZAÇÃO ATRAVÉS DE ESTATÍSTICA CIRCULAR PARA DADOS DE DIREÇÃO DO VENTO

AUTOR: Helen da Silva Costa Benaduce

ORIENTADOR: Augusto Maciel da Silva

Os dados angulares geralmente são mensurados em graus ou radianos e requerem técnicas de Estatística Circular para caracterização e inferência. Um ponto em um círculo de raio unitário ou um vetor unitário indicando direção pode ser definido como uma observação circular. Essa observação é especificada pelo ângulo formado entre a direção inicial do círculo e o ponto no círculo correspondente à mesma, desde que haja uma direção inicial e uma orientação do círculo definidas. A direção dos ventos é um exemplo que compreende as medidas angulares, podendo ser dada em graus, tendo o ponto cardinal Norte como direção inicial. O estudo sobre a direção dos ventos no Brasil pode ser muito útil na instalação de um parque eólico, por exemplo. O objetivo do presente trabalho é caracterizar a direção dos ventos, obtida em graus para a Região Sul do Brasil, que compreende o Rio grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Paraná (PR). Para tal foram utilizadas ferramentas gráficas, medidas descritivas circulares e testes de hipóteses a fim de comparar a direção dos ventos nas três regiões e subdivisões de relevo em cada estado. Foram utilizados dados diários, coletados de hora em hora, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Os dados foram analisados por estado no período de 1 de abril de 2019 até 31 de abril de 2019.

Palavras-chave: Dados angulares, Uniformidade Circular, Teste de Watson.

## **ABSTRACT**

### **INFERENCE AND CHARACTERIZATION THROUGH CIRCULAR STATISTICS FOR WIND DIRECTION DATA**

AUTHOR: Helen da Silva Costa Benaduce

ADVISOR: Augusto Maciel da Silva

Angular data is usually measured in degrees or radians and requires Circular Statistics techniques for characterization and inference. A point in a circle of unit radius or a unit vector indicating direction can be defined as a circular observation. This observation is specified by the angle formed between the initial direction of the circle and the point on the circle corresponding to it, provided that there is a defined initial direction and orientation of the circle. The wind direction is an example that includes angular measurements, which can be given in degrees, with the North cardinal point as the initial direction. The study of wind direction in Brazil can be very useful in the installation of a wind farm, for example. The objective of this study is to characterize the direction of the winds, obtained in degrees to the south of Brazil, comprising the Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) and Paraná (PR). For this purpose, graphic tools, circular descriptive measures and hypothesis tests were used in order to compare the wind direction in the three regions and relief subdivisions in each state. Daily data were used, collected hourly, made available by the National Institute of Meteorology – INMET. The data were analyzed by state from April 1, 2019 to April 31, 2019.

Keywords: Angular data, Circular uniformity, Watson's Test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica de uma amostra com medidas angulares. ....	14
Figura 2 – Representação gráfica do centro de gravidade de uma amostra com medidas angulares.....	16
Figura 3 – Mapa das estações meteorológicas presentes na Região Sul do Brasil.....	21
Figura 4 – Diagrama e histograma circular do Rio Grande do Sul, abril de 2019 .....	24
Figura 5 – Diagrama e histograma circular de Santa Catarina, abril de 2019.....	25
Figura 6 – Diagrama e histograma circular do Paraná, abril de 2019 .....	26
Figura 7 – Diagrama circular para o estado do Paraná, abril de 2019.....	27
Figura 8 – Diagrama circular para o estado de Santa Catarina, abril de 2019 .....	28
Figura 9 – Diagrama circular para o estado do Rio Grande do Sul, abril de 2019.....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correspondência do valor em graus e a direção do vento. ....	23
Tabela 2 – Medidas descritivas da direção dos ventos por estado da Região Sul do Brasil para o mês de abril de 2019 .....	26
Tabela 3 – Medidas descritivas para as subdivisões para cada estado. ....	29

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 OBJETIVO .....	12
1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
1.1 JUSTIFICATIVA .....	13
<b>2 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>13</b>
2.1 REVISÃO DE LITERATURA .....	14
<b>2.1.1 Estatística para Dados Direcionais .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2 Momentos trigonométricos amostrais .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.3 Média Circular .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.4 Mediana .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.5 Variância Circular .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.6 Desvio padrão .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.7 Amplitude Circular .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.8 Dispersão .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.9 Teste de Rayleigh .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.10 Teste Não Paramétrico para grandes amostras de Watson .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.11 Vento.....</b>	<b>19</b>
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
<b>3 CONCLUSÃO.....</b>	<b>30</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>30</b>

## INTRODUÇÃO

Medidas angulares ocorrem em várias áreas do conhecimento tais como geografia, biologia, medicina, meteorologia, etc. (MARDIA, 1972). Um ponto em um círculo de raio unitário ou um vetor unitário indicando direção pode ser definido como uma observação circular. Cada observação circular pode ser especificada pelo ângulo formado entre a direção inicial do círculo e o ponto no círculo correspondente à observação, desde que uma direção inicial e uma orientação do círculo sejam definidas.

As medidas angulares são obtidas a partir de uma origem arbitrária, já as observações lineares tem referência definida, assim, necessita-se de uma metodologia estatística diferente daquela utilizada para variáveis lineares para a análise de dados direcionais (LEAL e SOUZA, 2003).

A direção dos ventos é um dado que compreende as medidas angulares, pode ser dada em graus, com orientação nos pontos cardeais. Porém, no Brasil, pouco se tem estudado sobre o vento, sua direção e velocidade predominantes.

O Brasil é favorecido em termos de ventos, que se caracterizam por uma presença duas vezes superior à média mundial e por uma volatilidade de apenas 5%, o que dá maior previsibilidade ao volume a ser produzido (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020). O estudo sobre a direção dos ventos no Brasil poderia ser muito útil para localizar e hospedar um parque eólico, por exemplo. Segundo informações cedidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020), de toda energia produzida no país, apenas 9,06% é gerada pelas usinas eólicas. A Região Sul, em particular, tem grande potencial de energia eólica.

Em ordem cronológica, encontram-se estudos sobre o comportamento da direção dos ventos em algumas regiões.

Em Munhoz et al. (2008) a caracterização da direção e velocidade do vento foi estudada para a localidade de Ituverana – SP. Através de estudo, concluiu-se que o comportamento dos ventos foi muito variável no período estudado.

A proposta em Muniz et al. (2008) avaliou, em Campos dos Goytacazes – RJ, a direção e velocidade do vento. O estudo tratou sobre a direção em níveis de monitoramento e em quais meses, no período estudado, encontram-se as maiores e menores velocidades dos ventos.

Em Alves et al. (2011), escolheu-se uma floresta de transição Amazônia-Cerrado no Norte de Mato Grosso para desenvolver o estudo da direção e da velocidade do vento. Esse estudo tem interesse em fornecer subsídios às investigações relacionadas à dinâmica dessa

floresta. Também destaca o vento como uma variável importantíssima no transporte de calor latente, calor sensível, umidade e CO<sub>2</sub> na região.

A velocidade e direção dos ventos foi estudada para a cidade de Sinop – MT por Soares et al. (2016). O estudo concluiu a respeito do mês com as maiores velocidades médias dos ventos e encontrando indícios de que a velocidade média durante o dia é superior à noite.

No mesmo ano, Rockett et al. (2016) desenvolveram um estudo para analisar o comportamento espaço-temporal dos ventos no extremo norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. A pesquisa concluiu que as de maiores velocidades ocorrem no período de inverno em todas as estações meteorológicas observadas no estudo. Os autores apontam para as diversas possibilidades de utilização dos resultados deste estudo, sendo uma delas a utilização como ferramenta de apoio a tomada de decisão para o planejamento ambiental. Cita-se ainda que a compreensão do comportamento morfodinâmico das dunas da região exige o conhecimento dos padrões de circulação dos ventos.

Mais recentemente, Pontes et al. (2017) caracterizaram a velocidade e direção predominantes dos ventos no Litoral do Nordeste Paraense referentes aos padrões da velocidade do vento horários, diários e mensais, bem como a direção do vento de acordo com os períodos secos e chuvosos dos anos em estudo.

Na presente revisão de literatura não encontramos nenhum trabalho que caracterize a direção dos ventos para grandes regiões territoriais.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é caracterizar a direção dos ventos, obtida em graus para a Região Sul do Brasil, que compreende Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Esta é a menor das cinco regiões do país, possui área territorial de 576 774,31 km<sup>2</sup>.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Obter medidas descritivas circulares para cada um dos estados separadamente e também dentro dos mesmos, usando de referência uma divisão por unidades geomorfológicas.

Avaliar a uniformidade de distribuição dos ventos de cada estado.

Verificar através de teste de hipótese se existe diferença na direção média dos ventos entre os estados.

Verificar através de teste de hipótese se existe diferença na direção média dos ventos dentro dos estados nas diferentes regiões geomorfológicas.

Divulgar as metodologias de aplicação da estatística circular.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Antes de proceder uma análise estatística, por vezes é necessário tomar conhecimento sobre determinadas características dos dados a serem analisados. Algumas técnicas, mesmo as mais consagradas, não se adequam a alguma restrição que esse conjunto de dados possam apresentar.

Em virtude disso, dados estatísticos podem ser classificados de acordo com a sua topologia distribucional. Dados lineares podem ser representados considerando uma reta. No entanto, a circunferência é apropriada para representar um conjunto de medidas angulares, que podem se referir a observações mensuradas, por exemplo, como ângulos, distribuídos geralmente em graus ou radianos (ABUZOID et al., 2012).

Como as medidas angulares são encontradas em diversas áreas do conhecimento e são obtidas a partir de uma origem arbitrária, necessita-se ampliar os estudos de uma metodologia estatística diferente daquela utilizada para variáveis lineares para a análise de dados direcionais (LEAL & SOUZA, 2003).

A periodicidade relacionada a esse tipo de medida acarreta situações que não ocorrem em observações na reta. Sendo assim, existem técnicas estatísticas específicas para tratar esses tipos de dados, sendo necessárias definições de medidas de posição e dispersão, bem como modelos probabilísticos apropriados que são tratados pela estatística circular, justificando a elaboração deste estudo.

O vento é uma variável meteorológica de extrema importância para as ciências agroambientais. No caso da agricultura, é conhecida a sua influência na aplicação de defensivos e em estudos voltados à propagação de doenças, polinização e práticas com quebra-ventos (ALVES et al., 2011). A irrigação também é afetada pelas características do vento, sendo necessário o conhecimento de sua direção e velocidade, para que o manejo seja mais efetivo (MUNIZ et al. 2008). Pode-se destacar o seu potencial de geração de energia limpa e renovável, a energia eólica. E ainda pesquisas de controle de poluição e previsões climáticas.

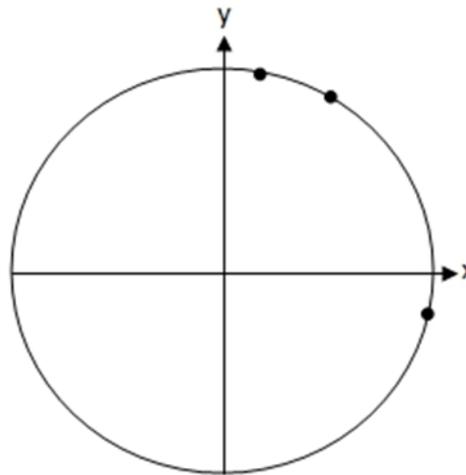
### **DESENVOLVIMENTO**

## 2.1 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1.1 Estatística para Dados Direcionais

As medidas angulares possuem uma periodicidade que não ocorre em observações na reta. Por este motivo, são necessárias algumas técnicas específicas para análise dos dados angulares, que englobam desde estatística descritiva até modelos probabilísticos apropriados, que são tratados pela estatística circular (SILVA, 2013). Barriga (1997) ilustrou o problema do cálculo da direção média apresentado na Figura 1 três observações para os dados circulares. Considerando os ângulos  $\theta_1: 80^\circ$ ,  $\theta_2: 350^\circ$  e  $\theta_3: 50^\circ$ , pela ilustração espera-se que o ângulo médio assumira valores entre  $0^\circ$  e  $50^\circ$ . Contudo, se a média aritmética for calculada, obtém-se  $(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)/3 = 160^\circ$ , que é um valor não correspondente à situação.

Figura 1 - Representação gráfica de uma amostra com medidas angulares.



Fonte: Silva (2013)

### 2.1.2 Momentos trigonométricos amostrais

Seja uma amostra aleatória de observações circulares de tamanho  $n$ . Para  $p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , o momento trigonométrico da  $n$ -ésima amostra da direção zero é expressa por

$$t_{p,0} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j^p = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e^{ip\theta_j} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\cos p\theta_j + i \sin p\theta_j) = a_p + ib_p \quad (1)$$

onde

$$a_p = \bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \cos p\theta_j, \quad b_p = \bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sin p\theta_j \quad (2)$$

$a_{-p} = a_p$ ,  $b_{-p} = -b_p$ ,  $\theta_j$  são o conjunto de observações circulares e  $z_j$  são números complexos.

Podemos notar que, se  $p = 0$  então  $t_{0,0} = 1$ .

O número complexo  $t_{p,0}$  define um vetor média resultante em um plano complexo, com comprimento expresso por

$$\bar{R}_p = (a_p^2 + b_p^2)^{1/2} \in [0,1] \quad (3)$$

E direção

$$\bar{\theta}_p = \text{atan2}(b_p, a_p) \quad (4)$$

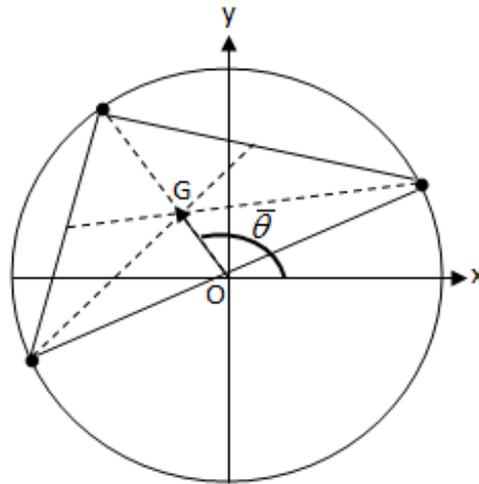
Para mais informações, Pewsey et al. 2013.

### 2.1.3 Média Circular

As medidas angulares tem sempre uma orientação, logo, a média circular indica a direção média para os dados circulares. Tendo em vista o problema ilustrado por Barriga (1997) na Figura 1, podemos perceber de que a média aritmética para dados na reta não se aplica para dados circulares, pois a média calculada para os ângulos  $\theta_1: 80^\circ$ ,  $\theta_2: 350^\circ$  e  $\theta_3: 50^\circ$  seria  $160^\circ$ .

Contudo, considerando a representação gráfica da disposição dos ângulos de uma amostra em um círculo, pode-se associar a cada ponto uma massa de igual valor  $M$  e encontrar seu centro de massa  $G$  ou centro de gravidade (BARRIGA, 1997). O vetor  $\overrightarrow{OG}$  que aponta para o centro de gravidade é definido como vetor médio amostral e determina uma direção média amostral que é o ângulo médio  $\bar{\theta}$ .

Figura 2 - Representação gráfica do centro de gravidade de uma amostra com medidas angulares



Fonte: Adaptado de Barriga (1997)

Existem duas formas de calcular a direção média: através de álgebra vetorial e de funções trigonométricas. Neste trabalho usaremos funções trigonométricas, utilizando o pacote *Circular* do software *R* (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2011).

Seja  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  um conjunto de observações circulares dadas em ângulos, considere ainda que a transformação de coordenada polar para retangular, feita através das funções trigonométricas seno e cosseno (JAMMALAMADAKA e SENGUPTA, 2001) dada por

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\theta_i) = \bar{C} \quad \text{e} \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sen}(\theta_i) = \bar{S} \quad (5)$$

O comprimento do vetor média

$$\bar{R} = (\bar{C}^2 + \bar{S}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

E assim, podemos obter a direção média da seguinte forma:

$$\bar{\theta} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{\bar{S}}{\bar{C}}\right) & \text{se } \bar{S} > 0, \bar{C} > 0 \\ 180^\circ + \arctan\left(\frac{\bar{S}}{\bar{C}}\right) & \text{se } \bar{C} < 0 \\ 360^\circ + \arctan\left(\frac{\bar{S}}{\bar{C}}\right) & \text{se } \bar{S} < 0, \bar{C} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

Existem alguns casos específicos que devem ser tratados da seguinte forma:

$$\bar{\theta} = \begin{cases} 90^\circ & \text{se } \bar{S} > 0, \bar{C} = 0 \\ 270^\circ & \text{se } \bar{S} < 0, \bar{C} = 0 \\ \text{não determinado} & \text{se } \bar{S} = 0, \bar{C} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

#### 2.1.4 Mediana

A direção mediana é definida como qualquer ângulo  $\Phi$  para o qual metade dos pontos da amostra estão compreendidos no arco  $[\Phi, \Phi + \pi]$ . A maioria dos pontos da amostra são mais próximos de  $\Phi$  do que de  $\Phi + \pi$ . Semelhante a mediana na reta, se  $N$  é ímpar a mediana é um dos pontos da amostra, se  $N$  é par a mediana está entre dois pontos.

#### 2.1.5 Variância Circular

A variância é construída através da relação com o comprimento do vetor média  $R$ . À medida que aumenta a dispersão dos pontos, diminui o comprimento do vetor média  $r$ . Como  $\bar{R} \in [0,1]$ , sendo  $\bar{R}=1$  implica em todos os pontos coincidentes e  $\bar{R}=0$  implica em dispersão uniforme, o comportamento do vetor média pode ser considerado como uma medida de concentração em torno do ângulo.

A variância circular amostral é então definida como:

$$V_c = 1 - \bar{R} \quad (9)$$

Sendo  $0 \leq V_c \leq 1$ , e  $r$  o comprimento do vetor média

#### 2.1.6 Desvio padrão

O desvio padrão amostral é definido como (MARDIA, 1972)

$$s_c = [-2 \ln(1 - V_c)]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

onde  $V_c$  é a variância circular.

O desvio padrão não pode ser obtido da mesma forma que em dados na reta, simplesmente como a raiz quadrada da variância.

### 2.1.7 Amplitude Circular

A amplitude circular é o comprimento do menor arco que contém todos os pontos amostrais (MARDIA, 1972). Consideram-se os  $n$  ângulos  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  no intervalo  $0 \leq \theta_i \leq 2\pi$ , sendo  $\theta_{(1)} \leq \dots \leq \theta_{(n)}$  as estatísticas de ordem de  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ . O comprimento do arco é dado por

$$T_i = \theta_{(i+1)} - \theta_{(i)}, \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (11)$$

$$T_n = 360^\circ - \theta_{(n)} + \theta_{(1)} \quad (12)$$

onde  $T_i$  são medidas dos comprimentos de arco entre os pontos consecutivos. Tendo as medidas de comprimento, a amplitude circular  $w$  é dada por

$$w = 360^\circ - \max(T_1, \dots, T_n) \quad (13)$$

### 2.1.8 Dispersão

A dispersão circular amostral é dada por

$$\hat{\delta} = \frac{1 - \bar{R}_2}{2\bar{R}^2} \quad (14)$$

onde  $\bar{R}_2$  é o comprimento do vetor média conforme o segundo momento amostral.

### 2.1.9 Teste de Rayleigh

Este teste é aplicado quando temos interesse em verificar se os dados correspondem a uma amostra de população unimodal (BARRIGA, 1997). A hipótese nula conclui sobre a distribuição ser uniforme, já a hipótese alternativa conclui sobre a distribuição ser unimodal.

Este procedimento baseia-se no fato de que o comprimento do vetor média amostral,  $\bar{R}$ , dá uma ideia de concentração em torno de uma única média. A hipótese nula do teste é de que a distribuição da amostra é uniforme. Quando a amostra segue uma distribuição uniforme circular, o valor de  $\bar{R}$  geralmente é pequeno. Para valores grandes de  $\bar{R}$ , a hipótese nula é rejeitada (MARDIA, 1972).

Quando o tamanho da amostra é muito grande, a estatística

$$Z = n\bar{R}^2 \quad (15)$$

pode ser usada para testar a hipótese de uniformidade. Neste caso, rejeita-se  $H_0$  se o valor observado de  $Z$  é grande. Os valores críticos para o teste podem ser encontrados em Batschelet (1981).

### 2.1.10 Teste Não Paramétrico para grandes amostras de Watson

A hipótese nula do teste é de que a direção média das amostras é igual.

O procedimento de teste depende dos valores da dispersão circular. Calcula-se os valores da dispersão circular, equação 14, para cada uma das  $g$  amostras,  $\hat{\delta}_1, \dots, \hat{\delta}_g$ . O teste possui dois caminhos, o P e o M. Se a razão entre o maior valor  $\hat{\delta}_i$  dividida pelo menor for inferior a 4, o procedimento P deve ser usado; caso contrário, o Procedimento M é o escolhido.

A estatística de teste para P é dada por

$$Y_g = \frac{2(N - R_P)}{\hat{\delta}_0} \quad (16)$$

$$\text{onde } R_P = \sqrt{\hat{C}_P^2 + \hat{S}_P^2}, \quad \hat{C}_P = \sum_{k=1}^g n_k \cos \bar{\theta}_k, \quad \hat{S}_P = \sum_{k=1}^g n_k \sin \bar{\theta}_k,$$

$$\hat{\delta}_0 = \sum_{k=1}^g \frac{n_k \hat{\delta}_k}{N}$$

A estatística de teste para M é dada por

$$Y_g = 2 \left( \sum_{k=1}^g \frac{n_k}{\hat{\delta}_k} - R_M \right) \quad (17)$$

$$\text{onde } R_M = \sqrt{\hat{C}_M^2 + \hat{S}_M^2}, \quad \hat{C}_M = \sum_{k=1}^g \frac{n_k \cos \bar{\theta}_k}{\hat{\delta}_k}, \quad \hat{S}_M = \sum_{k=1}^g \frac{n_k \sin \bar{\theta}_k}{\hat{\delta}_k}$$

O p-valor do teste é estabelecido comparando-se os valores obtidos pelo procedimento P ou M com os quantis da distribuição  $\chi_{g-1}^2$ .

### 2.1.11 Vento

O sentido do vento é indicado pela direção de onde o vento é proveniente, ou seja, de onde ele vem. O sentido é expresso tanto em termos da direção de onde ele provém como em termos de azimute, isto é, do ângulo que o vetor da direção forma como o Norte geográfico local. Assim, um vento de SE terá um ângulo de 135°.

A direção predominante do vento é a que ocorre em maior frequência e é decorrente da posição do local em relação aos centros de pressão atmosférica, variando no tempo e no espaço, sofrendo influência da geomorfologia e de obstáculos naturais e artificiais junto ao solo. O relevo tem um efeito pronunciado, podendo definir a direção predominante do vento (TUBELIS e NASCIMENTO, 1980; VENDRAMINI, 1986).

## 2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

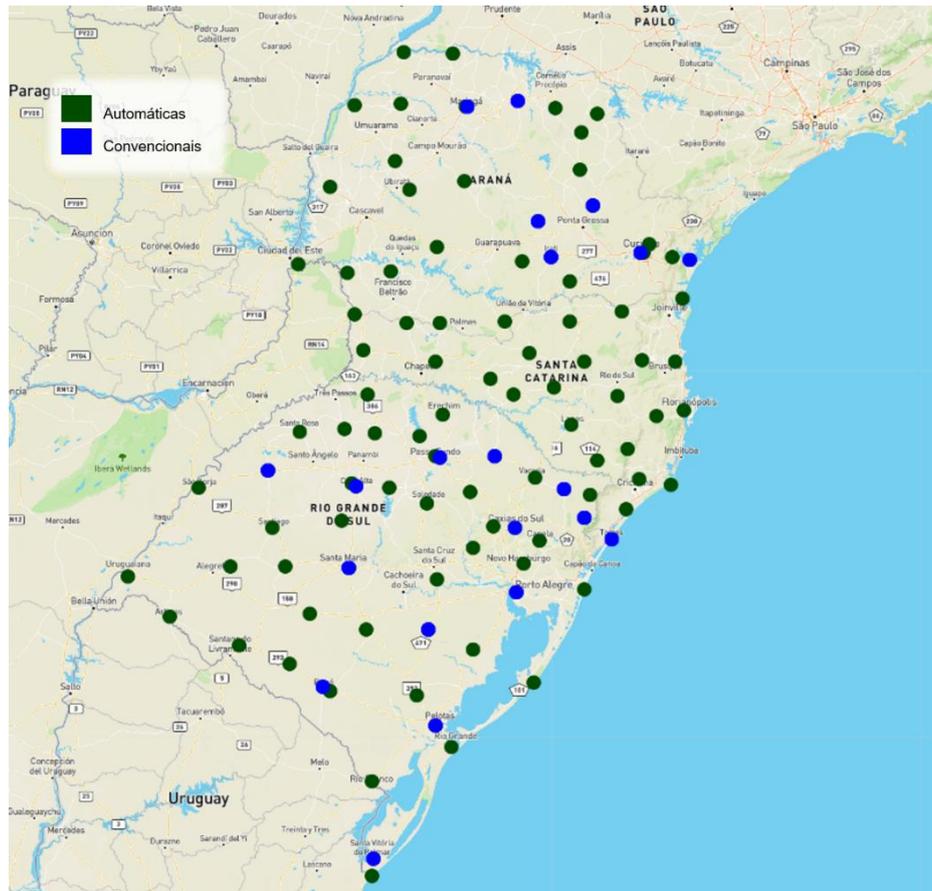
Foram utilizados dados diários de direção dos ventos, coletados de hora em hora, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2020) da direção dos ventos. O INMET possui dois tipos de estações meteorológicas: as convencionais e as automáticas. Uma Estação Meteorológica de Observação de Superfície Convencional, ou simplesmente Estação Convencional, é composta de vários sensores isolados que registram continuamente os parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), que são lidos e anotados por um observador a cada intervalo e este os envia a um centro coletor por um meio de comunicação qualquer. Já uma Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática, ou simplesmente Estação Automática, é composta de uma unidade de memória central ("*data logger*"), ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), que integra os valores observados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora. Na Figura 3 podemos ver as estações que se encontram na região sul do Brasil. Optou-se por trabalhar apenas com os dados obtidos através das estações automáticas.

Os dados extraídos de cada estação meteorológica compreendem o período de 1 de abril de 2019 até 30 de abril de 2019. Em alguns casos, não foi possível obter as 24 medições diárias, ou seja, uma medição para cada hora do dia. No entanto, isso não é um problema devido ao grande volume de dados.

O estado do Paraná tem área de 199.315 km<sup>2</sup>. Segundo o Atlas geomorfológico do Estado do Paraná, as unidades morfoesculturais presentes na região são: serra do mar, primeiro planalto paranaense, segundo planalto paranaense e terceiro planalto paranaense (ATLAS GEOMORFOLOGICO). Mais de 52% do território do Paraná localiza-se numa altitude superior a 600m e 89% superiores a 300m; apenas três por cento localiza-se numa altitude

inferior a 200m. Existem 25 estações meteorológicas automáticas instaladas em seu território, porém não foi possível obter os dados de duas estações devido a algum problema no sistema, não foram divulgados os dados para este período. Trabalhou-se, então, com 23 estações meteorológicas, compreendendo 14.900 medidas de direção de vento.

Figura 3 – Mapa das estações meteorológicas presentes na Região Sul do Brasil



Fonte: INMET, 2020

O estado de Santa Catarina tem área de 95.736,165 km<sup>2</sup>. Quatro unidades geomorfológicas, que vão do litoral ao interior, formam o relevo estadual: baixada litorânea, serra do Mar, planalto paleozoico e planalto basáltico (GARSCHAGEN, 1998). Seu território está 77% localizado em altitude superior a 300 metros e 52% com altitudes superiores a 600 metros. Santa Catarina destaca-se dentre as unidades federativas brasileiras de relevo mais alto. Há 24 estações meteorológicas automáticas instaladas em seu território. Porém não foi possível obter os dados de uma estação, devido a algum problema no sistema, não foram divulgados os dados para esse período. Outra estação foi descartada por ter a mesma medida de direção para

o mês inteiro, o que acreditar-se tratar de erro de medição. Trabalhou-se com 22 estações meteorológicas, compreendendo 15.310 medidas de direção de vento.

O estado do Rio Grande do Sul tem área de 282.062 km<sup>2</sup>. O Rio Grande do Sul possui quatro unidades geomorfológicas: Planalto Norte-Rio-Grandense, Depressão Central, Escudo Sul-Rio-Grandense e Planície Costeira. Apresenta, em sua maior parte, relevo baixo, com 70% de seu território a menos de 300m de altitude. A única porção elevada, com mais de 600m de altitude, compreende 11% da superfície total. Existem 44 estações meteorológicas automáticas instaladas em seu território, porém dez estações foram descartadas por apresentarem aparente erro de medida ou os dados não estarem disponíveis no sistema. Com isso, trabalhou-se com 24.460 medidas de direção de vento.

Para identificar se o relevo influencia na direção dos ventos, foram feitas subdivisões de cada estado em duas partes. Uma parte a leste, corresponde à áreas mais próximas do Oceano Atlântico e a outra parte a oeste, corresponde às áreas mais afastadas do mar. Essa subdivisão foi baseada em características geomorfológicas, afim de caracterizar a ação do relevo na direção do vento. O estado de Santa Catarina foi dividido em dois, juntou-se a baixada litorânea e a serra do mar como Leste e planalto paleozoico e planalto basáltico como Oeste. Para o estado do Paraná separa-se como subdivisão leste a serra do mar, o primeiro planalto paranaense e o segundo planalto paranaense, como subdivisão oeste temos o terceiro planalto paranaense. Para o Rio Grande do Sul, essa divisão entre leste e Oeste não foi inteiramente possível, já que o relevo do estado é muito variado. Optou-se, então, manter para homogeneidade referente à geomorfologia, separou-se Planalto Norte-Rio-Grandense ao Norte do estado como sendo “Oeste” e Depressão Central, Escudo Sul-Rio-Grandense e Planície Costeira com sendo o “Leste”.

No corpo do trabalho, todas as medidas de direção do vento estão em graus. Podemos encontrar na Tabela 1 a equivalência do valor em graus e a direção do vento correspondente para os pontos cardeais e colaterais.

Inicialmente, observou-se a distribuição dos pontos através do diagrama circular, juntamente com o histograma circular, com intuito de identificar se existe alguma direção predominante dos ventos para cada estado.

Com interesse de verificar se os dados correspondem a uma amostra de uma população unimodal (BARRIGA, 1997), pois não é possível determinar tal informação apenas pela observação da análise gráfica, utilizou-se o teste de uniformidade de Rayleigh em cada estado.

Tabela 1 – Correspondência do valor em graus e a direção do vento

<b>Direção do vento</b>	<b>Simbologia</b>	<b>Valor em graus</b>
<b>Norte</b>	N	0°
<b>Nordeste</b>	NE	45°
<b>Leste</b>	E	90°
<b>Sudeste</b>	SE	135°
<b>Sul</b>	S	180°
<b>Sudoeste</b>	SW	225°
<b>Oeste</b>	W	270°
<b>Noroeste</b>	NW	315°

Fonte: Próprio autor

Para cada estado analisam-se as medidas descritivas de média, mediana, variância, desvio padrão e amplitude. O mesmo foi realizado para cada subdivisão de relevo aplicada em cada estado.

O teste não paramétrico para grandes amostras de Watson foi aplicado para identificar se existe diferença na direção média entre os 3 estados. Aplicou-se o mesmo teste, dois a dois, para identificar onde encontra-se a diferença. Assim como para as medidas descritivas, avaliou-se também se existe diferença entre as subdivisões de relevo em cada estado.

Observando que nas regiões, as medidas de direção de vento são muito variáveis, surgiu o questionamento sobre a influência da distribuição espacial das estações meteorológicas.

Todas as análises foram feitas utilizando o pacote *Circular* do *software R* (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

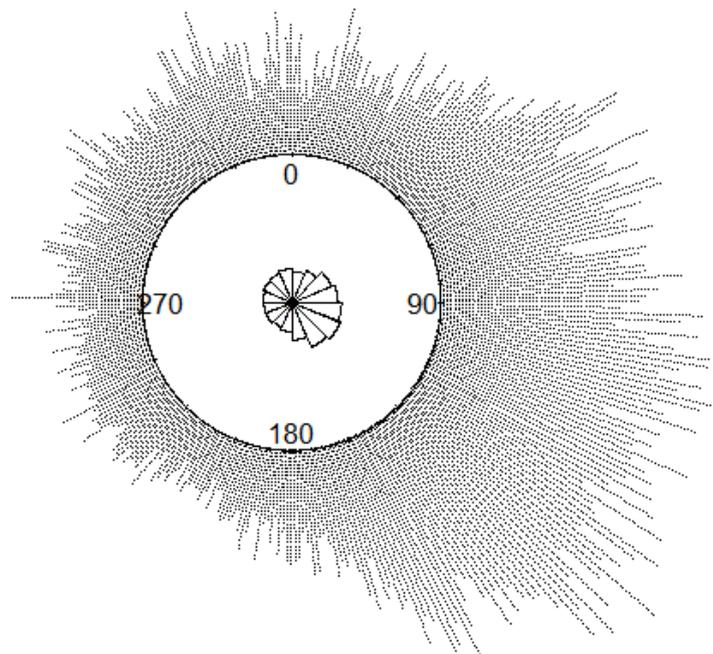
### 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, realizou-se uma análise gráfica dos dados. Essa análise foi feita para observar como os pontos distribuem-se ao longo da circunferência e também fazer a primeira verificação de uniformidade dos dados. Na Figura 4, podemos observar o Diagrama circular e o histograma circular para o Rio Grande do Sul e identificar que os dados se concentram entre 90° e 135° e, visualmente, não apresentam uniformidade. Na Figura 5, observamos o Diagrama de rosa e o histograma circular para Santa Catarina. Não é possível concluir sobre em qual direção os dados estão mais concentrados. No máximo, pode-se dizer que há mais observações no arco 180° a 360°. Também não é possível concluir a respeito da uniformidade. Na Figura 6,

temos o Diagrama circular e o histograma circular para o Paraná e assim como para Santa Catarina, não é possível concluir em qual direção os dados estão mais concentrados e nem mesmo se apresentam uniformidade ou não.

Figura 4 – Diagrama e histograma circular do Rio Grande do Sul, abril de 2019.

### Rose Diagram

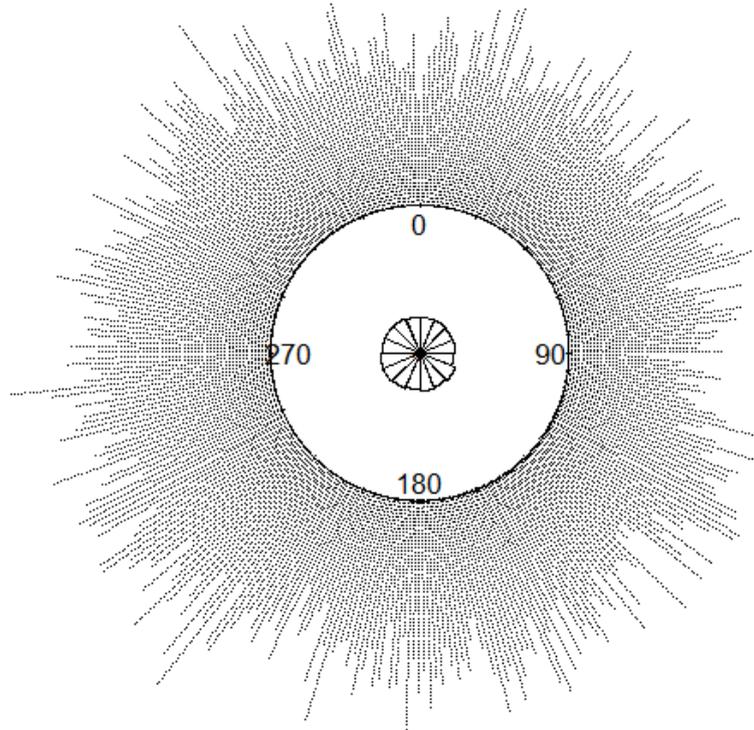


Fonte: Próprio autor

Note, na Figura 4, que tanto o Diagrama de rosa quanto o histograma circular indicam que os pontos concentram-se mais na direção leste/sudeste. Pela distribuição dos pontos, parece tratar-se de dados com distribuição unimodal, porém só podemos afirmar acerca disso através de teste específico.

Figura 5 - Diagrama e histograma circular de Santa Catarina, abril de 2019.

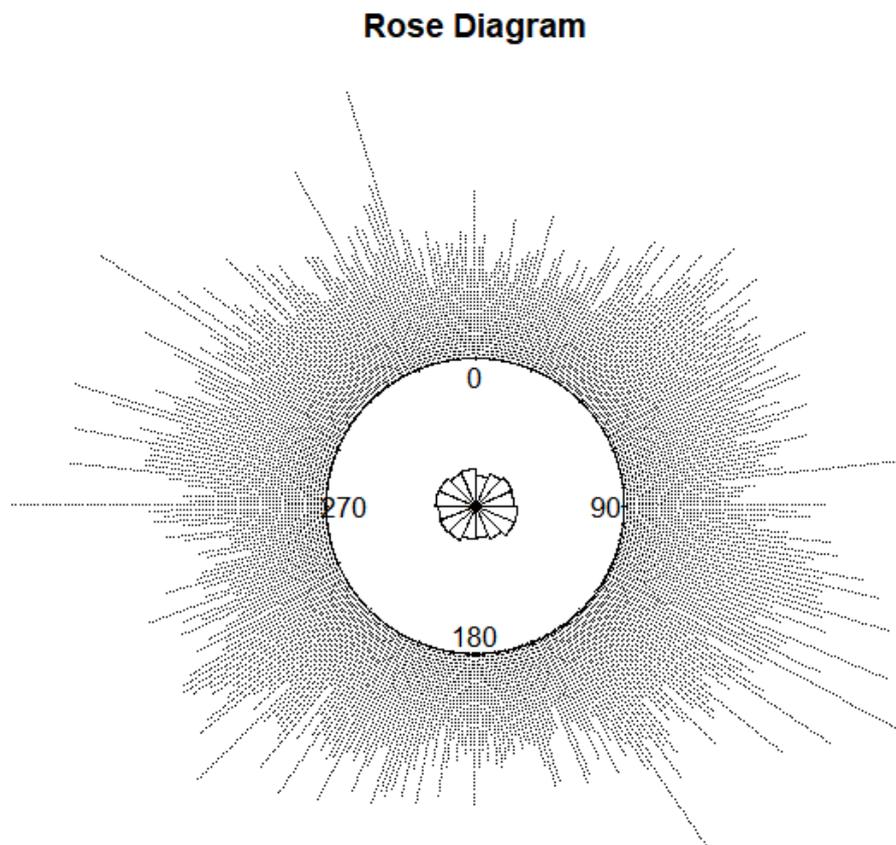
### Rose Diagram



Fonte: Próprio autor

Observando a Figura 5, não podemos precisar qual direção é predominante e nem mesmo se trata-se de dados com distribuição unimodal.

Figura 6 - Diagrama e histograma circular do Paraná, abril de 2019.



Fonte: Próprio autor

Para caracterizar a direção do vento para a Região Sul do Brasil, usou-se as medidas de posição e as medidas de dispersão apresentadas em graus na Tabela 2.

Tabela 2 – Medidas descritivas da direção dos ventos por estado da Região Sul do Brasil para o mês de abril de 2019

<b>Estado</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Variância</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>RS</b>	106,80°	108°	0.7325	1.6240
<b>SC</b>	243,70°	243°	0.9533	2.4758
<b>PR</b>	78,84°	79.50°	0.9797	2.7916

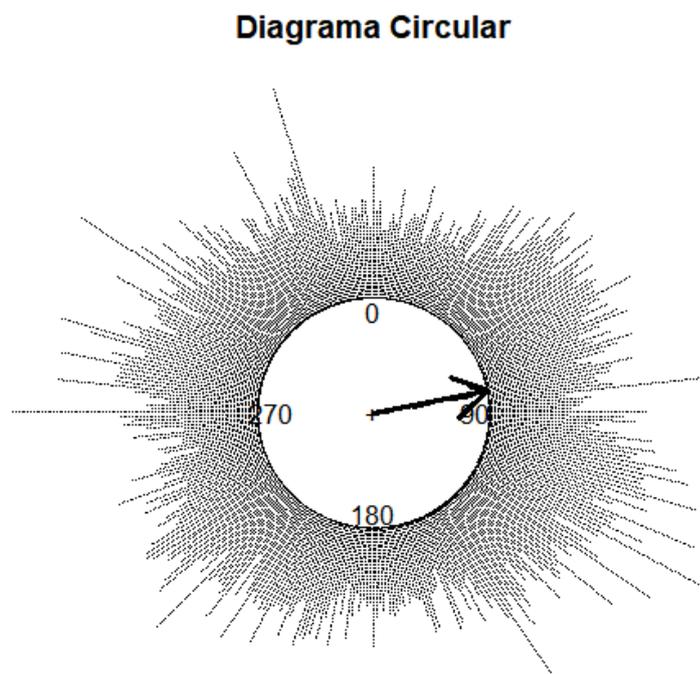
Fonte: Próprio autor

As amplitudes, ou seja, comprimento do menor arco que contém todos os pontos amostrais, dos estados são iguais, mediando 359°. Isso é plausível, pois os ventos apresentam

direções muito variáveis, tendo observação de direção dos ventos em todas as direções na circunferência.

Ao analisar a direção média dos ventos no estado do Rio Grande do Sul, para o mês de abril de 2019, identifica-se que os ventos são na direção Leste e a variabilidade em torno do ângulo médio é  $0,7325^\circ$ , o estado com menor variabilidade. O estado de Santa Catarina tem como direção média dos ventos, para o mesmo período, ventos na direção Sudoeste e a variabilidade em torno do ângulo médio é  $0,9533^\circ$ . Assim como o estado do Rio Grande do Sul, o Estado do Paraná tem direção média indicadas na direção Leste, porém com uma variabilidade em torno do ângulo médio maior do que os outros dois estados. A direção média é apontada no Diagrama Circular nas Figuras 7,8 e 9 que correspondem, respectivamente, ao Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Figura 7 - Diagrama circular para o estado do Paraná, abril de 2019

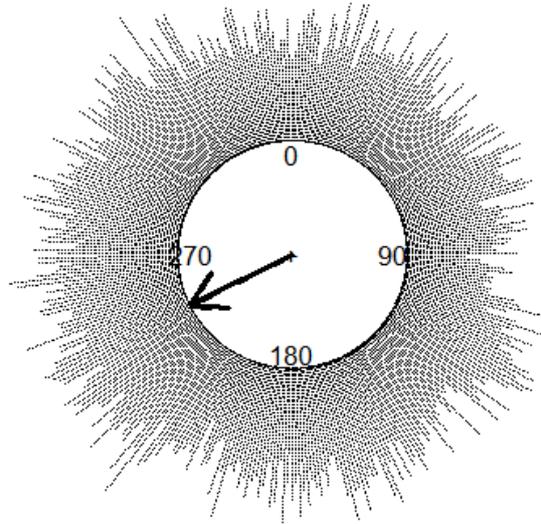


Fonte: Próprio autor

Na Figura 7 temos a distribuição dos pontos e a indicação da média para o estado do Paraná.

Figura 8- Diagrama circular para o estado de Santa Catarina, abril de 2019

### Diagrama Circular

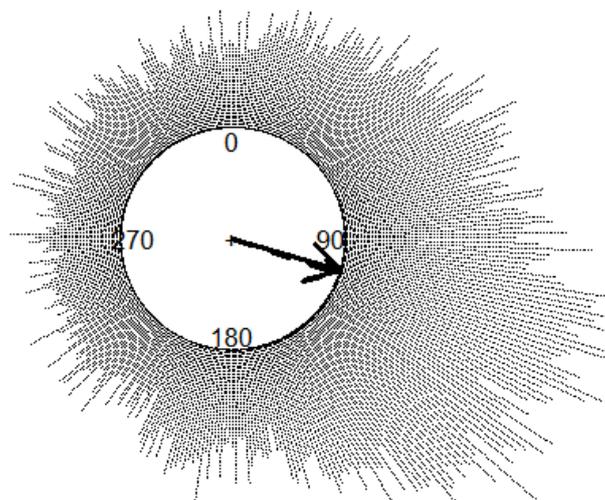


Fonte: Próprio autor

Na Figura 8, temos a distribuição dos pontos e a indicação da média para o estado de Santa Catarina.

Figura 9- Diagrama circular para o estado do Rio Grande do Sul, abril de 2019

### Diagrama Circular



Fonte: Próprio autor

Na Figura 9, temos a distribuição dos pontos e a indicação da média para o estado do Rio Grande do Sul

Como somente com a avaliação gráfica não é possível concluir sobre a uniformidade, aplicou-se o teste Rayleigh de uniformidade para os três estados. Os três testes apontaram que os dados de RS, SC e PR não seguem distribuição uniformes, apontando assim para distribuição unimodal dos dados.

Com o intuito de verificar se a direção média dos três estados tem diferença entre si, utilizou-se o teste não paramétrico de grandes amostras de Watson. Não é necessário que os estados tenham o mesmo número de observações, o teste leva em conta o tamanho individual de cada estado. A hipótese nula do teste é de que a direção média dos grupos é igual. A estatística de teste retornada é 290.3475, e o p-valor menor do que 0,00001, logo rejeita-se  $H_0$ , a direção média dos estados difere entre si. Como o teste indicou que existe diferença entre os estados, realizou-se o teste dois a dois para identificar onde encontra-se a diferença.

Para os estados Paraná e Santa Catarina, verificou-se pelo teste que existe diferença entre a direção média do PR e de SC. O mesmo verifica-se entre Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Porém, ao compararmos os estados de Paraná e Rio Grande do Sul, não se rejeita  $H_0$ , concluindo que não existe diferença entre a direção média de PR e RS.

A investigação acerca da hipótese de influência do relevo na direção do vento é testada através do teste não paramétrico de grandes amostras de Watson. Para as subdivisões analisadas, todas apresentaram diferença dentro de cada estado. Em estudo, Vendramini et. al. (1986) apontou-se que a direção dos ventos é diretamente influenciada pelo relevo da região.

A caracterização da direção dos ventos das subdivisões de cada estado pode ser observada na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Medidas descritivas para as subdivisões para cada estado

<b>Subdivisão</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Variância</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Amplitude</b>
<b>Leste – SC</b>	88,78°	114°	0,8608	1,9858	359
<b>Oeste – SC</b>	244°	243°	0,9656	2,5962	359
<b>Leste – PR</b>	85,33°	78°	0,9082	2,1857	359
<b>Oeste – PR</b>	185,3°	203°	0,9781	2,7651	359
<b>Leste – RS</b>	116,8°	116°	0,7001	1,5530	359
<b>Oeste – RS</b>	89,33°	90°	0,7443	1,6515	359

Fonte: Próprio autor

Muniz et al. (2008) apontam que a direção do vento pode ter sido influenciada pela rugosidade do terreno, fato que apontado no presente trabalho através do teste de hipótese entre as subdivisões de cada estado.

No período que compreende esse estudo, a direção média dos ventos para a subdivisão Leste – RS é de direção Leste, corroborando com o estudo de Rocket et al. (2012), que aponta o arco  $[0^\circ, 90^\circ]$  como origem das maiores ocorrências de ventos em todas as estações meteorológicas.

## CONCLUSÃO

Através do diagrama circular e histograma circular foi possível identificar que os ventos no mês de abril são bem variáveis dentro de cada estado.

A direção do vento, quando comparada estado a estado não apresenta diferença na direção média para os estados do Rio Grande do Sul e Paraná. Porém o Estado de Santa Catarina difere-se dos demais estados

O relevo influencia na direção dos ventos, visto que o teste de hipótese corrobora que existe impacto da geomorfologia sobre a direção dos ventos.

Assim, a estatística circular fornece meios adequados para o conhecimento e caracterização dos ventos em determinada região. Essa caracterização é importantíssima para estudos que envolvam previsões do tempo, controle de poluição, agricultura e instalação de usinas eólicas.

## REFERÊNCIAS

ABUZOID, A. H.; HUSSIN, A.G.; RAMBLI, A.; MOHAMED I. Statistics for a New Test of Discordance in Circular Data. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**. v. 41, n. 10, p. 1882-1890, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Capacidade de Geração do Brasil**. Brasil, 2020. Disponível em <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 26 de fev. 2020.

ALVES, E. D. L. et al. Direção e velocidade do vento em uma floresta de transição Amazônia-Cerrado no Norte de Mato Grosso, MT. *Boletim Goiano de Geografia*. Goiânia, v. 31, n. 1, p. 63-74, 2011.

ATLAS GEOMORFOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ – Escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000/ Minerais do Paraná; Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

BARRIGA, G.D.C. Inferência sobre medidas de posição e dispersão em dados circulares. 1997. 124 p. Dissertação.(Mestrado em Estatística) - Instituto de Matemática e Estatística, USP, São Paulo, 1997.

BATSDIELET, E. Circular Statistics in Biology. Academic Press, London, 1981

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA-CCEE. Fontes. Brasil, 2020. Disponível em <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/fontes?\\_afzLoop=397550159727221&\\_adf.ctrl-state=1d67rmszn2\\_1#!%40%40%3F\\_afzLoop%3D397550159727221%26\\_adf.ctrl-state%3D1d67rmszn2\\_5](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_afzLoop=397550159727221&_adf.ctrl-state=1d67rmszn2_1#!%40%40%3F_afzLoop%3D397550159727221%26_adf.ctrl-state%3D1d67rmszn2_5)>. Acesso em: 26 de fev. 2020 às 11:20.

GARSCHAGEN, DONALDSON M. Santa Catarina. **Nova Enciclopédia Barsa. 13.** São Paulo: *Encyclopaedia Britannica* do Brasil Publicações Ltda. pp. 82–83, 1998.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 8 de março de 2020.

JAMMALAMADAKA, S.R.; SENGUPTA, A. **Topics in circular statistics.** World Scientific Publication, 2001

LEAL, G. M. G.; SOUZA F. A. M. Análise descritiva de dados de vento visando aplicações em plataformas. In: 2o Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo & Gás, 2003.

MARDIA, K.V.; **Statistics of Directional Data**, Academic Press, 1972.

MUNIZ, R. de A. et al. Caracterização preliminar da direção e velocidade do vento em Campos dos Goytacazes, RJ. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 22- 25, 2009- Belo Horizonte – MG

MUNHOZ, F.C; GARCIA, A. Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Ituverava - SP. Revista Brasileira de Meteorologia, v.23, n.1, p.30-34, 2008.

PEWSEY, Arthur; NEUHÄUSER, Markus; RUXTON, Graeme D. Circular statistics in R. Oxford University Press, 2013.

PONTES. A. et al. Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos no litoral do Nordeste Paraense. Revista Brasileira de Iniciação Científica, Itapetininga, v.5, n.1, p. 33-42, 2017.

R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3 – 900051 – 07 – 0, URL <http://www.R-project.org/>.

ROCKETT. G. B. et al. Análise espaço-temporal dos ventos no extremo norte da Planície costeira do Rio Grande do Sul.

SILVA, A.M.; Medidas angulares em componentes principais reparametrizados em amostras com valores discrepantes. Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal de Lavras, 2013.

SOARES, M. B. et al. Estudo da velocidade e direção predominante dos ventos em Sinop – MT. Revista Científica- Cultural, MT, v.1, n.1, p.10, 2016

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo: Livraria Nobel, Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 1980.

VENDRAMINI, E. Z. Distribuições probabilísticas de velocidades do vento para avaliação do potencial energético eólico. 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Unesp, Botucatu, 1986.