

**ALEXANDRE NICOLAU SCHUBERT**

**MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO DA VELOCIDADE DOS VENTOS NO  
MUNICÍPIO DE BOTUCATU-SP**

**Botucatu**

**2021**



**ALEXANDRE NICOLAU SCHUBERT**

**MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO DA VELOCIDADE DOS VENTOS NO  
MUNICÍPIO DE BOTUCATU-SP**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Sérgio Augusto Rodrigues

Coorientador: Alexandre Dal Pai

**Botucatu**

**2021**

S384m

Schubert, Alexandre Nicolau

Modelagem e caracterização da velocidade dos ventos no município de Botucatu-SP / Alexandre Nicolau Schubert. -- Botucatu, 2021

68 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Sérgio Augusto Rodrigues

Coorientador: Alexandre Dal Pai

1. Energia Eólica. 2. Modelos Probabilísticos. 3. Estação Meteorológica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO DA VELOCIDADE DOS VENTOS NO MUNICÍPIO DE BOTUCATU-SP

**AUTOR:** ALEXANDRE NICOLAU SCHUBERT

**ORIENTADOR:** SERGIO AUGUSTO RODRIGUES

**COORIENTADOR:** ALEXANDRE DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

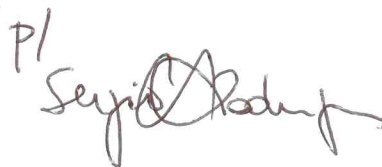
Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Virtual)  
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participação Virtual)  
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

P/ 

Prof. Dr. PAULO ANDRÉ DE OLIVEIRA (Participação Virtual)  
Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

P/ 

Botucatu, 23 de julho de 2021



À minha família,  
dedico,



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Sérgio Augusto Rodrigues, pela orientação, ensinamentos, paciência e amizade.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, pela coorientação, pela introdução no caminho da pesquisa científica, incentivo e compartilhamento de seus conhecimentos.

À todos os professores e funcionários da UNESP Botucatu.



“Aquilo que persistimos em fazer torna-se mais fácil de realizar; não que a natureza da tarefa mude, mas nossa capacidade aumenta”.

A IGREJA DE JESUS CRISTO DOS SANTOS DOS  
ÚLTIMOS DIAS. **Ensinamentos dos Presidentes da Igreja:**  
**Heber J. Grant.** São Paulo: Intellectual Reserve, Inc, 2003.



## RESUMO

Conhecer como o vento se comporta é importante em diversas áreas, na agricultura interfere diretamente em seus processos. De uma forma geral, este trabalho teve por objetivo descrever e caracterizar os ventos a dois e dez metros do solo do município de Botucatu-SP, quanto a sua direção predominante e intensidade de sua velocidade, avaliando seu comportamento sazonal, bem como ajustar modelos probabilísticos para determinar as probabilidades de ocorrência de diferentes velocidades, verificar horários e períodos favoráveis para a pulverização agrícola e consequentemente, fornecer subsídios para trabalhos futuros que visem o melhor aproveitamento eólico para fins agrícolas e geração de energia. Foram utilizados dados da velocidade do vento a 2 metros da superfície do solo de uma estação meteorológica analógica (EMA) e de 2 e 10 metros da superfície do solo de uma estação meteorológica digital (EMD), ambas localizadas na Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Botucatu, SP. A velocidade média do vento a dois metros no município de Botucatu foi de 1,80 m/s, enquanto a velocidade mínima foi de 0,0 m/s e a máxima de 5,91 m/s. A direção predominante no período estudado foi a direção SE (Sudeste), com a ocorrência de 41,92 %, enquanto a menor ocorrência (2,79 %) de ventos foi na direção NE (Nordeste). O horário que apresenta condições de velocidade do vento ideais para a pulverização agrícola considerando o intervalo de velocidade entre 0,83 e 2,78 m/s em todos os meses é das 12 h as 18 h (>65%). A probabilidade de ocorrer um vento com velocidade acima de 2,5 m/s em um determinado dia no município de Botucatu/SP é de aproximadamente 9,46%.

**Palavras-chave:** energia eólica; modelos probabilísticos; estação meteorológica.



## ABSTRACT

Knowing how the wind behaves is important in several areas, in agriculture it directly interferes in its processes. In general, this work aimed to describe and characterize the winds at two and ten meters above the ground in the municipality of Botucatu-SP, regarding their predominant direction and intensity of their speed, evaluating their seasonal behavior, as well as adjusting probabilistic models to determine the probability of occurrence of different speeds, check favorable times and times for agricultural spraying and, consequently, provide subsidies for future work aimed at better wind use for agricultural purposes and energy generation. Wind speed data at 2 meters from the ground surface of an analog meteorological station (EMA) and from 2 and 10 meters from the ground surface of a digital meteorological station (EMD) were used, both located at the Faculty of Agronomic Sciences of Unesp, Botucatu, SP. The average wind speed at two meters in the municipality of Botucatu was 1.80 m/s, while the minimum speed was 0.0 m/s and the maximum was 5.91 m/s. The predominant direction in the studied period was the SE direction (Southeast), with the occurrence of 41.92%, while the lowest occurrence (2.79%) of winds was in the NE direction (Northeast). The time that presents ideal wind speed conditions for agricultural spraying considering the speed range between 0.83 and 2.78 m/s every month is from 12:00 to 18:00 (>65%). The probability of occurring a wind with speed above 2.5 m/s on a given day in the municipality of Botucatu/SP is approximately 9.46%.

**Keywords:** wind energy; probabilistic models; weather station.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### FIGURAS

|                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 - Definição dos Ventos. ....                                                                                                                                                | 23  |
| Figura 2 - Localização da área de estudo no município de Botucatu, SP. ....                                                                                                          | 27  |
| Figura 3 - Anemômetro analógico da EMA.....                                                                                                                                          | 28  |
| Figura 4 - Pluviômetro modelo Ville de Paris da EMA.....                                                                                                                             | 28  |
| Figura 5 - Anemômetro MET One 034B Wind Set. ....                                                                                                                                    | 29  |
| Figura 6 - Sensor Temperatura do Ar HC2S3. ....                                                                                                                                      | 30  |
| Figura 7 - Pluviômetro - TB4 Rain Gage. ....                                                                                                                                         | 300 |
| Figura 8 - Datalogger CR1000 .....                                                                                                                                                   | 31  |
| Figura 9 - Médias diárias por ano (barras) e média diária geral da velocidade dos ventos (linha vermelha) no período de 1971 a 2013. ....                                            | 37  |
| Figura 10 - Precipitação anual (barras) e média diária por ano de temperatura (linha) no período de 1971 a 2013. ....                                                                | 38  |
| Figura 11 - Coeficiente de Variação da velocidade média diária anual das medições analógicas à 2 metros do solo no período de 1971 a 2013.....                                       | 39  |
| Figura 12 - Média por mês (barras), média geral (linha vermelha) de ventos diários a dois metros (m/s).....                                                                          | 40  |
| Figura 13 - Coeficiente de Variação de ventos diários a dois metros (m/s).....                                                                                                       | 40  |
| Figura 14 - Histograma da velocidade média diária por mês das medições analógicas à 2 metros do solo no período de 1971 a 2013.....                                                  | 41  |
| Figura 15 - Histograma e polígono de frequência acumulado dos dados de velocidade de ventos diários a dois metros (m/s).....                                                         | 42  |
| Figura 16 - Histograma dos dados de velocidade de ventos diários a 2m (m/s) e curvas ajustadas das distribuições Gama, LogNormal, Weibull. ....                                      | 43  |
| Figura 17 - Direção e velocidade do vento médio a 2m de altura do solo em Botucatu, SP, durante o período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021. ....                      | 45  |
| Figura 18 - Velocidade média do vento em função das direções cardeais a 2m de altura do solo em Botucatu, SP, durante o período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021..... | 46  |

|                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 19 - Médias diárias por ano (barras) e média diária geral da velocidade dos ventos (linha vermelha) de 2 m (EMD) no período de 2015 a 2020. ....                                                         | 47 |
| Figura 20 - Coeficiente de Variação da velocidade média anual das medições digitais à 2 metros do solo no período de 2015 a 2020 .....                                                                          | 48 |
| Figura 21 - Média por mês (barras), média geral (linha vermelha) de ventos diários a dois metros (m/s). ....                                                                                                    | 49 |
| Figura 22 - Coeficiente de Variação de ventos diários a dois metros (m/s) .....                                                                                                                                 | 49 |
| Figura 23 - Calendário diário da velocidade média do vento a 2 m .....                                                                                                                                          | 51 |
| Figura 24 - Calendário diário do desvio padrão do vento a 2 m .....                                                                                                                                             | 52 |
| Figura 25 - Histograma e polígono de frequência acumulado dos dados de velocidade de ventos horário a dois metros (m/s). ....                                                                                   | 54 |
| Figura 26 - Direção e velocidade do vento médio a 2m de altura do solo em Botucatu, SP, durante o período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021 por estação climática. ....                           | 55 |
| Figura 27 - Velocidade média do vento em função das direções cardeais a 2m de altura do solo em Botucatu, SP, durante o período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021 por estação climática.....      | 56 |
| Figura 28 - Velocidade média do Vento a 2 metros de altura. ....                                                                                                                                                | 57 |
| Figura 29 - Coeficiente de Variação horário das medições digitais realizadas a cada 5 minutos .....                                                                                                             | 58 |
| Figura 30 - Histograma da Velocidade Média Mensal (m/s) dos ventos a 2m por estações. ....                                                                                                                      | 59 |
| Figura 31 - Condições de velocidade do vento ideais (%) para a pulverização agrícola em diferentes horários média estação/mensal, considerando o intervalo de velocidade entre 0,83 e 2,78 m/s (3 e 10 km/h)... | 61 |

## QUADROS

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Escala Beaufort.....              | 24 |
| Quadro 2 - Relação de rumos e o azimuth..... | 35 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Médio, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação (CV), Mediana, Mínimo e Máximo das médias anuais de Velocidade do Vento a 2 metros, Temperatura e Precipitação anual (EMA) .....                                             | 38 |
| Tabela 2 - Estimativa das distribuições ajustadas, erro padrão e resultado do critério AIC .....                                                                                                                                      | 43 |
| Tabela 3 - Probabilidade de ocorrência (em %) de um dia com ventos a 2 metros acima dos diferentes valores de velocidades estipulados em x (m/s) ....                                                                                 | 43 |
| Tabela 4 - Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação (CV), Mediana, Mínimo e Máximo das médias anuais de Velocidade do Vento a 2 metros (EMD)                                                                                     | 47 |
| Tabela 5 - Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação (CV), Mediana, Mínimo e Máximo por mês de Velocidade do Vento a 2 metros (EMD) .....                                                                                         | 53 |
| Tabela 6 - Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação (CV), Mediana, Mínimo e Máximo das médias Horárias de Velocidade do Vento a 2 metros (EMD) .....                                                                             | 53 |
| Tabela 7 - Condições de velocidade do vento ideais (%) para a pulverização agrícola em diferentes horários do dia/mês, considerando o intervalo de velocidade entre 0,83 e 2,78 m/s (3 e 10 km/h). ....                               | 60 |
| Tabela 8 - Comparativo de favorabilidade da velocidade do vento para pulverização agrícola entre Botucatu/SP e São Luiz Gonzaga/RS, (FERNANDES,2019), considerando o intervalo de velocidade entre 0,83 e 2,78 m/s (3 e 10 km/h)..... | 61 |
| Tabela 9 - Estatística Descritiva, Teste T2 de Hotelling, Teste de Box e ICS .....                                                                                                                                                    | 62 |



## SUMÁRIO

|              |                                                                                                                                                 |           |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                                                          | <b>21</b> |
| <b>1.1</b>   | <b>Objetivos.....</b>                                                                                                                           | <b>22</b> |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>                                                                                                               | <b>23</b> |
| <b>3</b>     | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                                                                                                  | <b>27</b> |
| <b>3.1</b>   | <b>Estação meteorológica e clima local.....</b>                                                                                                 | <b>27</b> |
| <b>3.2</b>   | <b>Instrumentos de Medição.....</b>                                                                                                             | <b>28</b> |
| <b>3.2.1</b> | <b>Estação meteorológica analógica (EMA).....</b>                                                                                               | <b>28</b> |
| <b>3.2.2</b> | <b>Estação meteorológica digital (EMD).....</b>                                                                                                 | <b>29</b> |
| <b>3.3</b>   | <b>Caracterização da base de dados e procedimentos de análise.....</b>                                                                          | <b>32</b> |
| <b>3.3.1</b> | <b>Estação meteorológica analógica (EMA).....</b>                                                                                               | <b>32</b> |
| <b>3.3.2</b> | <b>Estação meteorológica digital (EMD).....</b>                                                                                                 | <b>32</b> |
| <b>3.3.3</b> | <b>Softwares para análises e gráficos.....</b>                                                                                                  | <b>36</b> |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                                                                                              | <b>37</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>Estação meteorológica analógica (EMA).....</b>                                                                                               | <b>37</b> |
| <b>4.1.1</b> | <b>Evolução temporal da velocidade dos ventos a dois metros de<br/>altura no município de Botucatu (dados analógicos).....</b>                  | <b>37</b> |
| <b>4.1.2</b> | <b>Ajustes de modelos probabilísticos para caracterização da<br/>velocidade dos ventos no município de Botucatu (dados<br/>analógicos).....</b> | <b>42</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>Estação meteorológica digital (EMD).....</b>                                                                                                 | <b>44</b> |
| <b>4.2.1</b> | <b>Caracterização da direção e velocidade do vento a dois metros de<br/>altura em Botucatu-SP (dados digitais).....</b>                         | <b>44</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b>Caracterização sazonal da velocidade média horária do vento a<br/>dois metros de altura em Botucatu-SP (dados digitais).....</b>             | <b>54</b> |
| <b>4.2.3</b> | <b>Aplicação dos dados na pulverização de defensivos agrícolas<br/>(dados digitais).....</b>                                                    | <b>59</b> |
| <b>4.2.4</b> | <b>Estatística multivariada para comparação da velocidade dos ventos<br/>entre dois períodos de medição a 2m e 10m do solo.....</b>             | <b>61</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÕES.....</b>                                                                                                                          | <b>63</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                                                         | <b>65</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

Desde o início de sua existência o homem tem observado as forças da natureza que tem grande influência em sua vida cotidiana, de tal forma que a humanidade procurou utilizá-las em seu favor, tal como a força do vento, a qual tem sido aproveitada de inúmeras formas ao longo de milhares de anos (DUTRA, 2008).

Povos e civilizações da antiguidade associavam o vento às divindades. Da mitologia grega, Éolo era o Deus supremo dos ventos e subordinados a ele existiam divindades para cada ponto cardinal (SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2017). Dessa forma, dependendo da direção do vento, diferentes divindades eram associadas a diferentes estações e condições climáticas (CANDIDO, NUNES, 2012; SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2017)).

O vento é uma fonte de energia motriz podendo mover moinhos, veleiros, bombas de água e geradores de energia elétrica (DUTRA, 2008). Interfere no bem estar pessoal, aliviando a sensação de calor ou intensificando a sensação de frio (LEAL et al, 2017). Da mesma forma que pode dispersar poluentes, carregar poeira, terra, areia, fumaça e propagar o fogo. Impulsiona as ondas, modifica a topografia movendo dunas, esculpindo arenitos. Nas suas formas mais poderosas, furacões e ciclones, podem causar grandes destruições (SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2017).

Entre as diversas características meteorológicas que influencia em muitos processos agrícolas, destaca-se também a importância do vento. Especialmente a velocidade dos ventos próxima a superfície (dois metros do solo) apresenta interação com a evapotranspiração (LEMOS FILHO et al, 2010; ROCHA JUNIOR et al., 2020), com a polinização de espécies de algumas plantações (SOUZA DA SILVA JÚNIOR et al., 2020) e com sistemas de irrigação por aspersão, provocando distribuição não uniforme de água. Já a caracterização quanto a velocidade e direção dos ventos a dez metros possibilita avaliar o potencial da energia eólica. (CHAVES FILHO, 2016).

Neste cenário, destaca-se a importância de mensurar e caracterizar a direção e velocidade dos ventos em Botucatu para compreender melhor seu impacto na agricultura e seu potencial eólico local, justificando a necessidade de mensurar e

comparar suas características em diferentes estações no ano, bem como a avaliação de suas características temporais.

### **1.1 Objetivos**

De uma forma geral, este trabalho teve por objetivo descrever e caracterizar os ventos a dois e dez metros do solo do município de Botucatu-SP, quanto a sua direção predominante e intensidade de sua velocidade, avaliando seu comportamento sazonal, bem como ajustar modelos probabilísticos para determinar as probabilidades de ocorrência de diferentes velocidades e, conseqüentemente, fornecer subsídios para trabalhos futuros que visem o melhor aproveitamento eólico para fins agrícolas e geração de energia.

Assim, os objetivos específicos são:

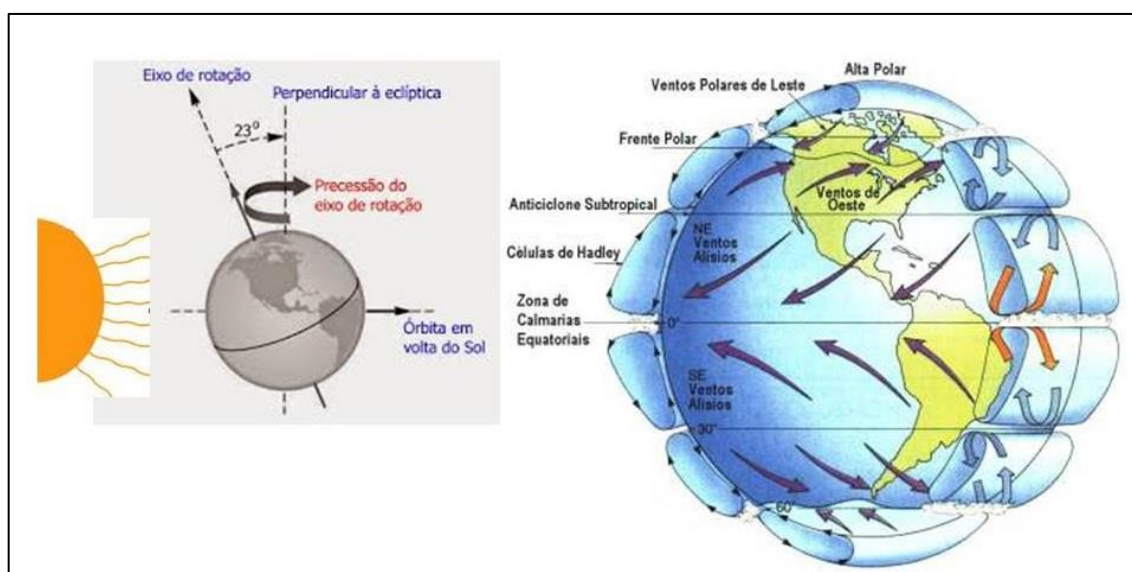
- 1) Avaliar a evolução temporal nos dados diários de ventos a dois e dez metros na cidade de Botucatu- SP.
- 2) Analisar o comportamento dos ventos junto ao solo (a dois metros de altura) no município de Botucatu-SP, verificando sua intensidade ao longo de 24 horas e sua direção predominante em diferentes estações climáticas. Pretende-se aqui, fornecer subsídios para novos trabalhos visando um melhor aproveitamento dos ventos na agricultura.
- 3) Ajustar algumas distribuições de probabilidade para descrever a velocidade dos ventos junto ao solo (a dois metros de altura) no município de Botucatu-SP, possibilitando determinar as probabilidades de ocorrência de diferentes velocidades e, conseqüentemente, fornecer subsídios para trabalhos futuros que visem o melhor aproveitamento eólico para fins agrícolas;
- 4) Apresentar um procedimento estatístico multivariado para comparar simultaneamente a velocidade do vento (a 2 e 10 metros) em dois momentos distintos (verão/primavera e outono/inverno).
- 5) Verificar horários e períodos favoráveis para a pulverização agrícola.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A energia fornecida pelo Sol à Terra e, conseqüentemente, ao sistema atmosférico gera, através do aquecimento, o movimento dos gases presentes na atmosfera (Figura 1), o que é designado genericamente como vento (VIANELLO; ALVES, 2012; SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2017).

Devido ao movimento de rotação da Terra, o vento é desviado da direção perpendicular às isóbaras, seu caminho teórico. O desvio é para a direita no hemisfério norte (HN) e para a esquerda no hemisfério sul (HS), qualquer que seja a direção inicial de deslocamento da massa de ar. Esse desvio é causado pela ação da força defletora de rotação da Terra ou força de Coriolis (VAREJÃO-SILVA, 2006; SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2017).

**Figura 1 - Definição dos Ventos**



**Fonte:** Varejão-Silva (2006), composto pelo Autor.

Até aproximadamente 500 metros de altura, dependendo das condições topográficas e meteorológicas locais, o efeito do atrito com a superfície é mais pronunciado. A resultante da força de atrito é oposta ao deslocamento do vento (OLIVERA, 2014; SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2017).

Uma das variáveis meteorológicas mais importante e pouco estudada quanto a sua influência nos processos agrícolas e no meio ambiente é o vento, especialmente, quando ocorre junto à superfície da Terra, atua na propagação de

sementes, grãos de pólen e patógenos; intensificando a transferência de água para a atmosfera quando quente e seco; promovendo a polinização das plantas (polinização anemófila); alterando a distribuição de água dos sistemas de irrigação por aspersão, causando danos mecânicos às plantas (quebra-ventos em áreas agrícolas) e erosão do solo (erosão eólica), velocidade que acarretam danos de toda natureza. Nas plantas, o vento afeta o crescimento ao interferir na transpiração, absorção de CO<sub>2</sub> e podem causar algum efeito mecânico sobre as folhas e ramos, dependendo da espécie (MUNHOZ; GARCIA, 2008; OLIVERA, 2014; SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2017).

Junto ao solo os efeitos do vento, na camada superficial, são de caráter normalmente turbulento e a extrema variabilidade na natureza da superfície faz com que as camadas de ar em contato com o solo frequentemente mostrem consideráveis trocas diurnas no gradiente da massa específica, afetando de maneira complexa as globais características do fluxo (DANTAS; SILVA, 2004; SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2017).

A ação do vento sobre a superfície do vento e do mar provoca efeitos que através da observação possibilita estimar a velocidade do vento de um forma empírica (Quadro 1).

**Quadro 1 - Escala Beaufort**

| Grau | Designação          | m/s         | km/h      | nós     | Efeitos em terra                                                                                       | Aspecto do mar                                        |
|------|---------------------|-------------|-----------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 0    | Calmo               | <0,3        | <1        | <1      | Fumaça sobe na vertical                                                                                | Espelhado                                             |
| 1    | Aragem              | 0,3 a 1,5   | 1 a 5     | 1 a 3   | Fumaça indica direção do vento                                                                         | Pequenas movimentações na superfície do mar           |
| 2    | Brisa leve          | 1,6 a 3,3   | 6 a 11    | 4 a 6   | As folhas das árvores movem; os moinhos começam a trabalhar                                            | Ligeira ondulação sem rebentação                      |
| 3    | Brisa fraca         | 3,4 a 5,4   | 12 a 19   | 7 a 10  | As folhas agitam-se e as bandeiras desfaldam ao vento                                                  | Ondulação até 60 cm, com alguns carneiros             |
| 4    | Brisa moderada      | 5,5 a 7,9   | 20 a 28   | 11 a 16 | Poeira e pequenos papéis levantados; movem-se os galhos das árvores                                    | Ondulação até 1 m, carneiros frequentes               |
| 5    | Brisa forte         | 8 a 10,7    | 29 a 38   | 17 a 21 | Movimentação de grandes galhos e árvores pequenas                                                      | Ondulação até 2,5 m, com cristas e muitos carneiros   |
| 6    | Vento fresco        | 10,8 a 13,8 | 39 a 49   | 22 a 27 | Movem-se os ramos das árvores; dificuldade em manter um guarda chuva aberto; assobio em fios de postes | Ondas grandes até 3,5 m; borrifos                     |
| 7    | Vento forte         | 13,9 a 17,1 | 50 a 61   | 28 a 33 | Movem-se as árvores grandes; dificuldade em andar contra o vento                                       | Mar revolto até 4,5 m com espuma e borrifos           |
| 8    | Ventania            | 17,2 a 20,7 | 62 a 74   | 34 a 40 | Quebram-se galhos de árvores; dificuldade em andar contra o vento; barcos permanecem nos portos        | Mar revolto até 5 m com rebentação e faixas de espuma |
| 9    | Ventania forte      | 20,8 a 24,4 | 75 a 88   | 41 a 47 | Danos em árvores e pequenas construções; impossível andar contra o vento                               | Mar revolto até 7 m; visibilidade precária            |
| 10   | Tempestade          | 24,5 a 28,4 | 89 a 102  | 48 a 55 | Árvores arrancadas; danos estruturais em construções                                                   | Mar revolto até 9 m; superfície do mar branca         |
| 11   | Tempestade violenta | 28,5 a 32,6 | 103 a 117 | 56 a 63 | Estragos generalizados em construções                                                                  | Mar revolto até 11 m; pequenos navios sobem nas vagas |
| 12   | Furacão             | >32,7       | >118      | >64     | Estragos graves e generalizados em construções                                                         | Mar todo de espuma, com até 14 m; visibilidade nula   |

## 2.1 Caracterização da velocidade e direção dos ventos

O estudo do vento em uma região contribui para elaboração de projetos mais eficientes, tal como projetos de irrigação, arquitetônico, rodoviário, de aeroportos e portos, bem como de geração e distribuição de energia elétrica, e de instalação industrial (LIBERATO, 2019). Nos últimos anos, observam-se diversos trabalhos buscando caracterizar e avaliar o comportamento da velocidade e direção dos ventos diferentes localidades brasileiras (LIBERATO, 2019).

Munhoz e Garcia (2008) descreveram a direção e velocidade predominante do vento para a região de Ituverava, SP. Os dados diários de velocidade e direção foram coletados por meio de um anemógrafo, tipo Universal, instalado a 2 m acima da superfície do solo. Na análise utilizaram a frequência das observações diárias, para cada um dos doze meses do ano. Verificaram que a maior parte do ano há predominância de ventos vindos de sudeste. De agosto a novembro os ventos sopram com intensidade superior à média, sendo o mês de setembro aquele com velocidades mais elevadas 2,76 m/s (diurno) e 1,76 (noturno) e o outono com as menores velocidades 1,91m/s (diurno) e 1,06 m/s (noturno). A velocidade média anual observada, durante o período diurno, foi de 2,20 m/s e para o período noturno foi de 1,25 m/s, indicando um aumento médio de 40% nas velocidades dos ventos diurnos em relação aos noturnos.

Castelhana e Roseghini (2018) analisaram a característica dos ventos na cidade de Curitiba, PR, utilizando dados de direção e velocidade dos ventos (10 metros de altura) no período de 12 anos em escala horária. Por meio da análise de boxplots observaram oscilações na velocidade dos ventos em escala mensal e horária e os gráficos em rosa dos ventos indicaram as direções predominantes, novamente em escala horária e mensal. Concluíram que os ventos predominantes em Curitiba provêm dos setores leste e nordeste o ano todo e que, ao longo do dia, se alternam, com velocidades ficando abaixo de 6 m/s em todas as estações, com medianas oscilando entre 1,7 m/s e 2,4 m/s. Os limites superiores dos meses com menores valores (abril, maio, junho e julho) ficaram abaixo de 5 m/s.

Liberato (2019) analisou dados coletados (10 metros de altura) no período de 21 de março de 2018 a 06 de abril de 2019 na estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, em Cuiabá, MT. Verificou que a direção

predominante do vento, durante o período seco (inverno), foi de sul-sudeste. Com maior frequência de ventos médios na faixa 0,50 a 2,10 m/s (72,5%) e rajadas maior ou igual a 11,1 m/s (0,4%). Durante o período chuvoso (verão), a direção predominante do vento foi de noroeste, com maior frequência de ventos médios variando entre 0,50 a 2,10 m/s (80,9%) e rajadas maior ou igual a 11,1 m/s (0,6%).

Morais et al. (2014) tiveram como objetivo caracterizar a velocidade e a direção predominante do vento para Mossoró, RN, considerando o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2012. Os autores avaliaram dados da velocidade dos ventos a 10 metros e 2 metros de altura, além da direção predominante do vento para o período de 24 horas. Neste estudo foi verificado que os valores da velocidade média do vento tendem a aumentar no segundo semestre do ano, apresentando uma queda nos seus valores no primeiro semestre. Os valores médios de velocidade do vento para o período estudado foram de 3,32 m/s para 10 m e de 2,30 m/s para 2 m de altura. Já as velocidades máximas instantânea do período estudado foram de 13,04 m/s para 10 m e de 9,40 m/s para 2 m de altura. A direção predominante do vento ficou na maioria dos meses entre sudeste (SE) e leste (E).

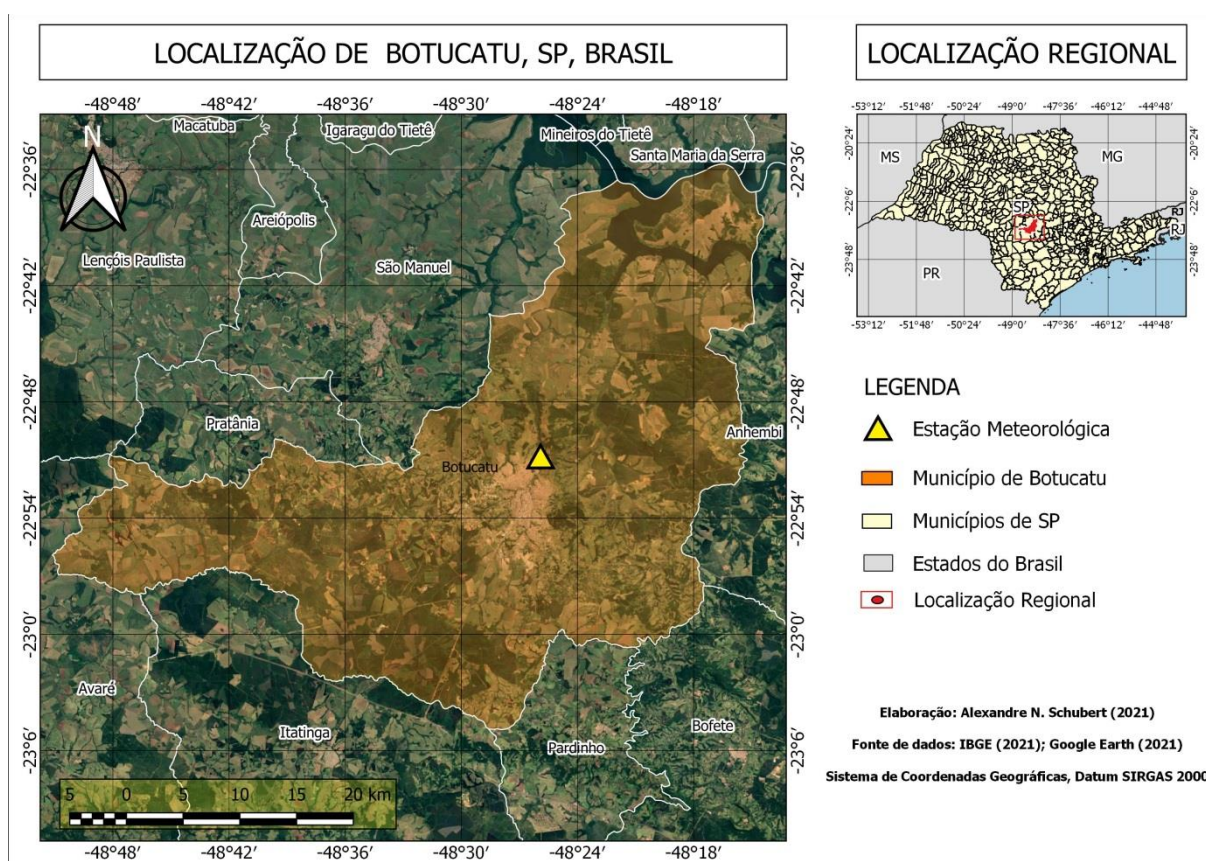
Santos et al. (2019) fizeram uma análise estatística da velocidade do vento em Petrolina, PE utilizando as distribuições Weibull e a Burr. Os dados de velocidade do vento (10 metros de altura) foram obtidos da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, da cidade de Petrolina-PE para o período compreendido entre 01/01/2015 e 31/12/2016, com registro a cada três horas. Neste estudo, a distribuição Weibull-2p forneceu melhor modelagem aos dados analisados. A direção predominante dos ventos encontrada foi a sudeste, com variação entre  $105^\circ$  e  $135^\circ$  e velocidade média de 8,4m/s. Com os resultados obtidos, a região estudada alcançou, segundo classificação do NREL (*National Renewable Energy Laboratory* (EUA) ou Laboratório Nacional de Energia Renovável), avaliação esplêndida para a viabilidade de geração de energia eólica.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Estação meteorológica e clima local

Os dados brutos do vento medido a dois e dez metros de altura do solo foram extraídos de medidas da estação meteorológica da Faculdade de Ciências Agrônômicas - Fazenda Experimental Lageado, UNESP - Câmpus de Botucatu, localizada no município de Botucatu, São Paulo, com as coordenadas geográficas: Latitude  $22^{\circ} 50'$  Sul, Longitude  $48^{\circ} 25'$  Oeste e altitude média de 786 m acima do nível do mar (Figura 2), a qual segue todas as diretrizes e normas recomendadas pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM).

**Figura 2 - Localização da área de estudo no município de Botucatu, SP**



A estação meteorológica Lageado possui um histórico de 49 anos de informações de características climáticas obtidas de forma analógica, na estação meteorológica analógica (EMA) e, a partir de 2014, passou a mensurar estas características de forma digital, caracterizando a estação meteorológica digital

(EMD).

De acordo com Sarnighausen et al. (2021), o município de Botucatu apresenta a seguinte classificação climática, segundo Método de Köppen (1936): Cwa (clima subtropical úmido), com verão quente, úmido e chuvoso e inverno seco e com temperaturas amenas, com temperatura média do mês mais quente de 23,1°C em fevereiro e 17,1°C em julho o mês mais frio, sendo a estação seca nos meses de inverno e outono, com a precipitação média anual acumulada é de 1.494,1 mm.

### 3.2 Instrumentos de medição

#### 3.2.1 Estação meteorológica analógica (EMA)

O instrumento de medida da velocidade dos ventos de forma analógica, utilizado na EMA, foi um anemômetro instalado a dois metros de altura da superfície (Figura 3), a partir do qual se pode observar dados correspondentes à medição diária, coletados manualmente às 8 horas em uma escala de km/dia.

**Figura 3 - Anemômetro analógico da EMA**



A temperatura do ar foi medida por meio de um Termômetro de bulbo seco abrigado em veneziana e a precipitação foi mensurada por um pluviômetro modelo Ville de Paris (Figura 4).

**Figura 4 - Pluviômetro modelo Ville de Paris da EMA**



### **3.2.2 Estação meteorológica digital (EMD)**

Quando aos dados digitais (EMD), os instrumentos de mediação da estação automática para o vento são dois anemômetros (Figura 5), sendo um instalado a dois metros de altura e outro a dez metros, os quais são do modelo “MET One 034B Wind Set”; Fabricante Campbell Scientific, INC, com as especificações técnicas:

- a) Velocidade do vento: Acurácia:  $\pm 0,12 \text{ m/s}$  para velocidades do vento abaixo de  $10,1 \text{ m/s}$  e  $\pm 1,1\%$  da leitura para velocidades acima de  $10,1 \text{ m/s}$ , com Intervalo de operação de 0 a  $75 \text{ m/s}$ .
- b) Direção do Vento: Acurácia:  $\pm 4^\circ$ , intervalo de operação de 0 a  $360^\circ$  (azimute).

**Figura 5- Anemômetro MET One 034B Wind Set**



**Fonte:** Campbell Scientific (2017).

A Temperatura foi medida pelo Sensor Temperatura do Ar HC2S3 (Figura 6), fornecido pela Campbell Scientific, INC, com as especificações técnicas:

PT100 RTD, IEC 751 1/3 classe B.

Acurácia:  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  a  $23^{\circ}\text{C}$ .

Intervalo de operação:  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 6- Sensor Temperatura do Ar HC2S3**



**Fonte:** Campbell Scientific (2018).

A chuva foi medida pelo pluviômetro - TB4 Rain Gage (Figura 7), fornecido pela Campbell Scientific, INC, com as especificações técnicas: Resolução de 0,254 mm e acurácia de 2% no intervalo de operação.

**Figura 7 - Pluviômetro - TB4 Rain Gage**

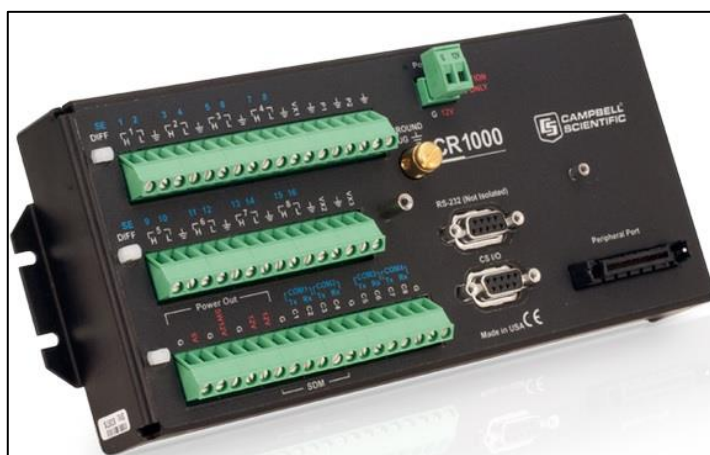


**Fonte:** Campbell Scientific (2019).

A varredura dos sensores da estação automática é realizada a cada cinco segundos, sendo os dados coletados, em metros por segundo (m/s), processados e armazenados com a média a cada cinco minutos na memória de um aparelho automatizado de coletas conhecido como sistema de aquisição de dados ou “Datalogger” (Figura 8), Fabricante Campbell Scientific, INC, com as especificações técnicas:

- Faixa de operação padrão de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$  ou faixa estendida de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ .
- Conexão direta com a porta USB do computador.
- Alta sensibilidade a variação de medidas analógicas a uma taxa de 300+ Hz.
- Diferenciação de pequenas alterações nos valores dos dados com alta resolução (A/D 24 bits).
- Inclui dois canais de entrada de corrente não isolados para sensores de corrente de 0 a 20 mA ou 4 a 20 mA saídas.
- Contém uma porta CPI integrada para hospedar sensores de alta velocidade Campbell e módulos externos (CDM).
- Conecta-se diretamente à Ethernet.
- Entrada para cartão microSD para expansão da memória e requisitos.
- Fornece integração e medição de sensores seriais com SDI-12, RS-232 e /ou RS-485.
- Suporte completo para rede PakBus.
- Inclui página da web incorporada para conexão direta via navegador de rede.

**Figura 8 - Datalogger CR1000**



**Fonte:** Campbell Scientific (2021).

Após este processamento preliminar, estes dados (médias a cada 5 minutos) são transmitidos e armazenados em um computador do Laboratório de Radiometria Solar junto ao departamento de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP-Câmpus de Botucatu.

### **3.3 Caracterização da base de dados e procedimentos de análise**

#### **3.3.1 Estação meteorológica analógica (EMA)**

Para a estação meteorológica analógica foram considerados somente dados de velocidade do vento a 2 metros do solo. Para complementar e entender a alteração de velocidade média do vento em alguns anos foram utilizados também dados de temperatura média e precipitação.

Os dados analógicos foram avaliados no período de 01 de janeiro de 1971 a 31 de dezembro de 2013, sendo disponível somente dados em escala diária mensurados às 8 horas da manhã, totalizando 15.706 medidas no período, sendo uma medida diária e 366 medidas anuais, durante 42 anos.

Inicialmente, os dados de velocidade do vento deste período foram avaliados de forma descritiva por meio de distribuições de frequências, histogramas, polígonos de frequências e medidas resumo, apontando como os mesmos se caracterizam em relação à posição, dispersão e forma. Esta caracterização foi realizada considerando todo o período e segmentado por ano e mês.

Posteriormente, modelos de distribuições de probabilidade, entre os quais os modelos baseados na distribuição Gama, Log-normal e Weibull, foram ajustados aos dados analógicos diários, utilizando estimadores de máxima verossimilhança dos parâmetros das respectivas funções densidades de probabilidade (fdp).

Para a escolha do modelo de melhor ajuste, foi utilizado o critério de informação de Akaike (AIC), definido por Akaike (1983), (SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2016).

#### **3.3.2 Estação meteorológica digital (EMD)**

Já para a estação meteorológica digital foram considerados os dados de velocidade e direção do vento a 2 e 10 metros do solo.

A estação meteorológica digital entrou em operação somente a partir de 15 de dezembro de 2014, assim, os dados digitais utilizados foram do período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021, totalizando 674.136 medidas a cada 5 minutos (histórico de 6 anos, 4 meses e 25 dias, em um total de 2340 dias.), sendo 12 medidas por hora, 288 registros diários e 105.264 medidas anuais.

Os dados digitais, disponíveis em medidas a cada 5 minutos, foram analisados de forma horária, diária e mensal. Para isso, sendo  $v_j$  (para  $j = 1, \dots, n_1$ , com  $n_1 = 674.136$  registros) a velocidade média dos ventos a cada 5 minutos, a velocidade média horária dos ventos ( $VMH_i$ ) foi obtida por:

$$VMH_i = \frac{\sum_{j=1}^{12} v_j}{12}$$

sendo  $VMH_i$  a velocidade média dos ventos da  $i$  – ésima hora do período de estudo, com  $i = 1, \dots, n_2$  e  $n_2 = 56.178$  registros horários.

A partir dos dados horários, a velocidade média diária ( $VMD_k$ ) foi obtida por:

$$VMD_k = \frac{\sum_{i=1}^{24} VMH_i}{24}$$

sendo,  $VMD_k$  a velocidade média do  $k$  – ésimo dia do período, com  $k = 1, \dots, n_3$  e  $n_3 = 2.340$  registros diários da velocidade média dos ventos.

Já a para a velocidade média mensal dos ventos ( $VMM$ ) é dada por:

$$VMM_w = \frac{\sum_{k=1}^{n_5} VMD_k}{n_5}$$

sendo  $VMM_w$  a velocidade média do  $w$  – ésimo mês do período de estudo, com  $w = 1, \dots, n_4$ , sendo que  $n_4 = 24$  meses, e  $n_5$  representando o número de dias em cada mês avaliado.

Após a organização das bases de dados digitais da velocidade média dos ventos, os mesmos foram avaliados e caracterizados quanto ao seu comportamento médio ( $\overline{VMH}_l$ ) e de variação ( $CV_l$ ) entre as horas, dias e meses.

A variação da velocidade média horária dos ventos nos diferentes intervalos do período analisado foi caracterizada por meio do desvio padrão ( $S_l$ ) e coeficiente

de variação ( $CV_l$ ) dados respectivamente por:

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nl} (VMH_i - \overline{VMH_l})^2}{nl}}$$

$$CV_l = \frac{S_l}{\overline{VMH_l}} \times 100$$

Sendo  $\overline{VMH_l}$  representando a média da velocidade média horária dos ventos no intervalo  $l$ , com  $l$  podendo representar intervalos de hora, dia, mês ou ano, e  $nl$  representando número de dados horário naquele intervalo do período total de análise (22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021).

Já para avaliação e caracterização da direção dos ventos serão consideradas médias horárias, como critério de divisão de  $360^\circ$  em 8 intervalos (ou classes) de  $45^\circ$  cada um, obtidas junto a estação meteorológica digital. Com base nos dados digitais a cada 5 minutos, de forma similar a velocidade dos ventos, a direção média diária dos ventos é obtida por:

$$DD_k = \frac{\sum_{i=1}^{24} DH_i}{24}$$

em que  $DH_i$  é a direção média, em graus, da  $i$  – ésima hora obtida a partir das direções a cada 5 minutos e  $DD_k$  é a direção média do  $k$  – ésimo dia do período analisado.

Utilizando os dados de direção angular do vento, variando de 0 a 360 graus (azimute), foram determinadas as direções do vento em oito coordenadas geográficas (rumos) correspondentes aos pontos cardeais (N, E, S, W) e colaterais (NE, SE, SW, NW). No Quadro 2 observa-se a relação dos rumos com o azimute.

**Quadro 2 - Relação de rumos e o azimute**

| Rumo |          | Azimute | Azimute (range) |
|------|----------|---------|-----------------|
| N    | Norte    | 0       | 337,5 - 22,5    |
| NE   | Nordeste | 45      | 22,5 - 67,5     |
| E    | Leste    | 90      | 67,5 - 112,5    |
| SE   | Sudeste  | 135     | 112,5 - 157,5   |
| S    | Sul      | 180     | 157,5 - 202,5   |
| SW   | Sudoeste | 225     | 202,5 - 247,5   |
| W    | Oeste    | 270     | 247,5 - 292,5   |
| NW   | Noroeste | 315     | 292,5 - 337,5   |

Foram determinadas a porcentagem de ocorrência de cada direção, para determinar a direção predominante, além da velocidade média do vento em cada direção, considerando todo o período e segmentada por estação do ano (primavera, verão, outono e inverno).

Os dados da estação meteorológica digital (EMD) foram utilizados em duas situações. Na primeira procurou-se realizar a caracterização sazonal da velocidade média horária do vento a dois metros de altura, verificando como essa característica se distribui durante os anos, mensalmente, nas diferentes estações climáticas e ao longo de 24 horas, considerando intervalos de hora (0 às 23 horas).

Para caracterização das estações do ano foram utilizados somente os dados de médias horárias ( $VMH_i$ ). No entanto, para se definir o início e o final, comum para todos os anos analisados, de cada estação climática, foi calculada utilizada a mediana da data de início dos solstícios, 22 de dezembro (Verão), 21 de junho (Inverno) e equinócios, 20 de março (Outono) e 23 de setembro (Primavera) entre 1950 e 2025 (75 anos). Assim, cada estação climática foi caracterizada por meio das médias e medidas de variação, dada pelo desvio padrão ( $S1_i$ ) e seu respectivo coeficiente de variação ( $CV_i$ ), das velocidades médias horárias dos ventos.

A caracterização da velocidade dos ventos foi realizada por meio de medidas resumo (médias, desvio padrão, CV, mediana, mínimo e máximo).

Portanto, foi possível caracterizar a velocidade média dos ventos, bem como seu comportamento de variação em cada horário, por meio de gráficos com as séries temporais de cada estação climática.

Na outra situação em que os dados da estação digital foram utilizados, procurou-se apresentar um procedimento estatístico multivariado para comparar simultaneamente a velocidade do vento (a dois e dez metros do solo) em dois períodos distintos, denominados de grupo 1 (estações primavera/verão) e de grupo 2 (estações outono/inverno). Assim, para cada grupo/período avaliado foi utilizada a média mensal das medições realizadas a cada 5 minutos no período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021.

A comparação das características do vento dos períodos, grupo 1 (primavera + verão) e grupo 2 (outono + inverno), considerando simultaneamente o vento a 2 e 10 m, foi realizada por meio do procedimento multivariado para diferença entre vetores de médias considerando a estatística  $T^2$  de Hotelling (HOTELLING, 1931 citado por JOHNSON e WITCHEN, 2007) dada por:

$$T^2 = n(\bar{y} - \mu_0)' S^{-1}(\bar{y} - \mu_0)$$

A homocedasticidade das matrizes de variâncias-covariâncias foi avaliada pelo teste de Bartlett/Box (BOX, 1949 citado JOHNSON e WITCHEN, 2007), dada por:

$$M = (n - 2) \ln|S| - (n_1 - 1) \ln|S_1| - (n_2 - 1) \ln|S_2|$$

### 3.3.3 Softwares para análises e gráficos

Para as análises e gráficos foram utilizados o ambiente R-GUI, versão 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018), Planilha Eletrônica e WRPLOT View<sup>TM</sup>-Versão 8.0.2.

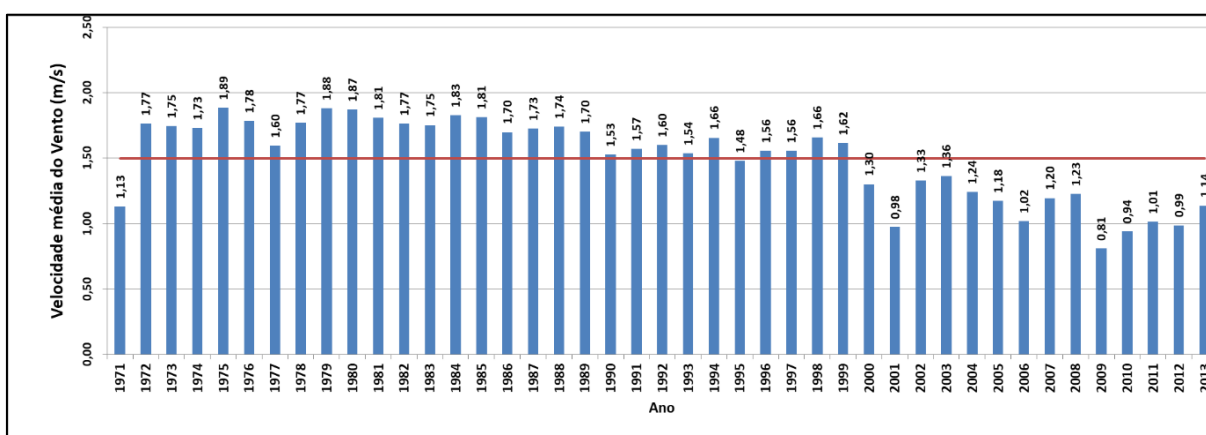
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estação meteorológica analógica (EMA)

#### 4.1.1 Evolução temporal da velocidade dos ventos a dois metros de altura no município de Botucatu (dados analógicos)

Observando as médias anuais dos dados analógicos diários da velocidade dos ventos a dois metros de altura, apresentadas na Figura 9, percebe-se uma pequena queda na velocidade média dos ventos a partir do ano de 1999.

**Figura 9 - Médias diárias por ano (barras) e média diária geral da velocidade dos ventos (linha vermelha) no período de 1971 a 2013**



Pode-se observar na Tabela 1 as médias, desvios padrões, coeficiente de variações (CV), medianas, valores mínimo e máximo das médias diárias da velocidade do vento a dois metros, temperatura média e precipitação mensuradas na estação meteorológica analógica (EMA).

A velocidade média diária dos ventos a dois metros em Botucatu, entre os anos de 1971 a 2013, foi de 1,50 m/s, com um desvio padrão de 0,72 m/s (CV=48,0%), sendo que a velocidade diária mínima encontrada foi de 0 m/s e a máxima foi 6,97 m/s. Percebe-se também uma mediana de 1,38 m/s. No período de 1971 até 1999 a média diária foi de 1,68 m/s e o desvio padrão de 0,69 m/s (CV=41,25%), com mediana de 1,54 m/s, enquanto que, a partir do ano de 2000 a intensidade média do vento foi de 1,11 m/s, com um desvio padrão de 0,61

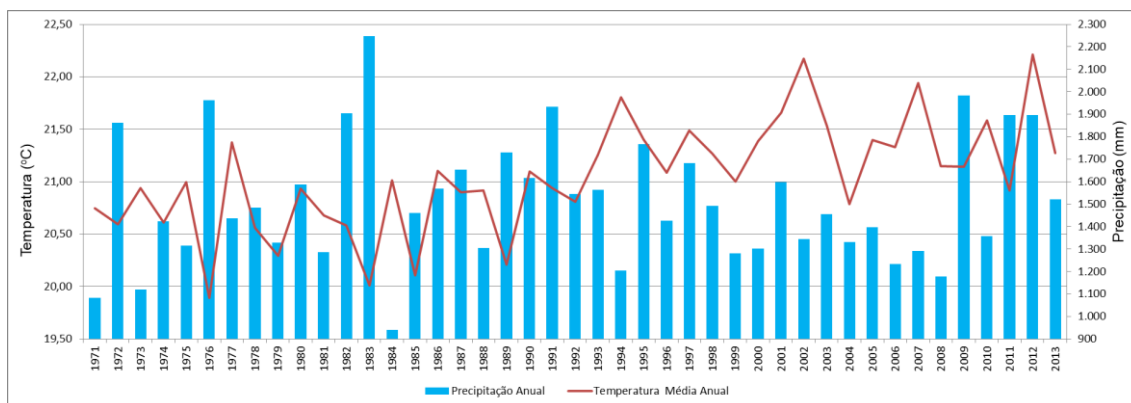
(CV=54,6%) e mediana de 1,00 m/s. Estes resultados apontam que a média deste período foi 33% menor que a média de 1971 a 1999 (Tabela 1).

**Tabela 1 - Médio, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação (CV), Mediana, Mínimo e Máximo das médias anuais de Velocidade do Vento a 2 metros, Temperatura e Precipitação anual (EMA)**

|                         | Ano       | Média | DesvPadr | CV    | Mediana | Mínimo | Máximo |
|-------------------------|-----------|-------|----------|-------|---------|--------|--------|
| <b>Vento<br/>(m/s)</b>  | 1971-1999 | 1,68  | 0,69     | 41,3% | 1,54    | 0,0    | 5,97   |
|                         | 2000-2013 | 1,11  | 0,61     | 54,6% | 1,00    | 0,0    | 5,55   |
|                         | 1971-2013 | 1,50  | 0,72     | 48,0% | 1,38    | 0,0    | 5,97   |
| <b>Temp.<br/>(°C)</b>   | 1971-1999 | 20,85 | 3,38     | 16,2% | 21,20   | 5,20   | 30,50  |
|                         | 2000-2013 | 21,46 | 3,75     | 17,5% | 21,80   | 8,00   | 30,80  |
|                         | 1971-2013 | 21,05 | 3,51     | 16,7% | 21,40   | 5,20   | 30,80  |
| <b>Precip.<br/>(mm)</b> | 1971-1999 | 1.525 | 292      | 19,1% | 1.491   | 939    | 2.247  |
|                         | 2000-2013 | 1.485 | 263      | 17,7% | 1.376   | 1.178  | 1.983  |
|                         | 1971-2013 | 1.511 | 280      | 18,5% | 1.460   | 939    | 2.247  |

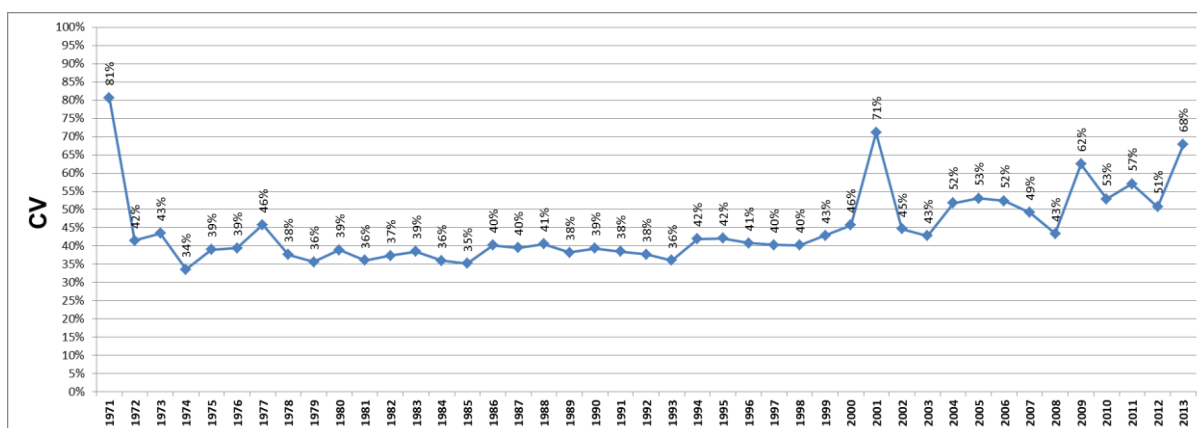
Observado a precipitação anual e a média diária por ano de temperatura (Figura 1010), verifica-se que a temperatura média aumentou a partir de 1999. De 1971 a 1999 tem-se uma média de 20,85 °C e no período de 2000 a 2013 a média foi para 21,46 °C (aumento de 0,61°C), enquanto, ao considerar o período total de 1971 a 2013, tem-se uma média de 21,05 °C (Figura 10 e Tabela 1). Quanto a precipitação anual percebe-se que houve uma diminuição no período de 2000 a 2013, onde observa-se uma média de 1.485 mm, enquanto que no período de 1971 a 1999 a média de 1.525 mm (queda de 40 mm entre os dois períodos).

**Figura 10 - Precipitação anual (barras) e média diária por ano de temperatura (linha) no período de 1971 a 2013**



Conforme Figura 11, pode-se observar que o coeficiente de variação da velocidade média diária anual das medições analógicas à 2 metros do solo teve um intervalo de variação menor nos períodos, de 1972 - 2000, variando de 34% a 46%, enquanto que de 2002 - 2008, variando observa-se uma variação entre 45% a 53%. Exceto o ano de início da coleta dos dados, 1971 com CV=81%, as maiores variações do período ocorreu no ano de 2001 (CV=71%) e 2009 - 2013, onde o coeficiente de variação ficou entre 51% a 68%.

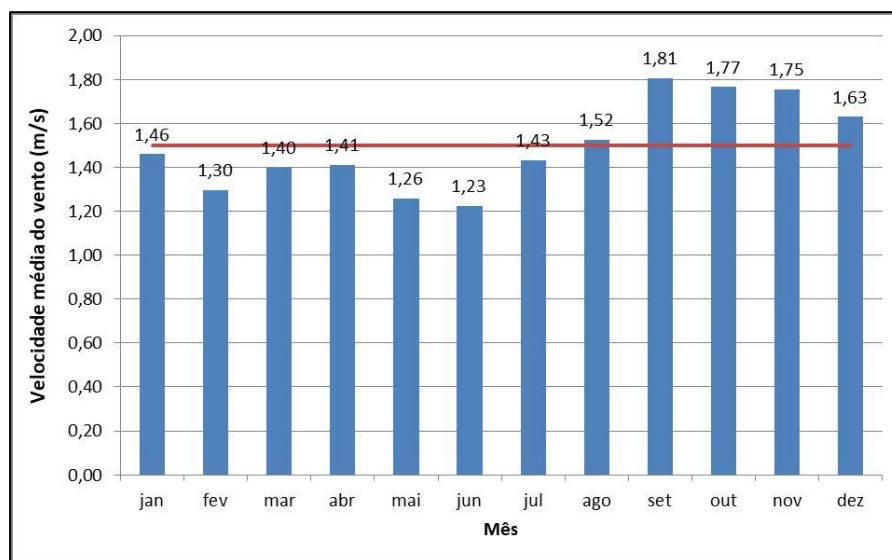
**Figura 11 - Coeficiente de Variação da velocidade média diária anual das medições analógicas à 2 metros do solo no período de 1971 a 2013**



Analisando na Figura 12 as velocidades médias dos ventos em cada mês, destaca-se que a partir do mês de agosto os ventos são mais intensos, sendo que o mês de setembro tem a maior média (1,81m/s), enquanto de janeiro a julho os ventos são de menor intensidade, com o mês de junho apresentando a menor média

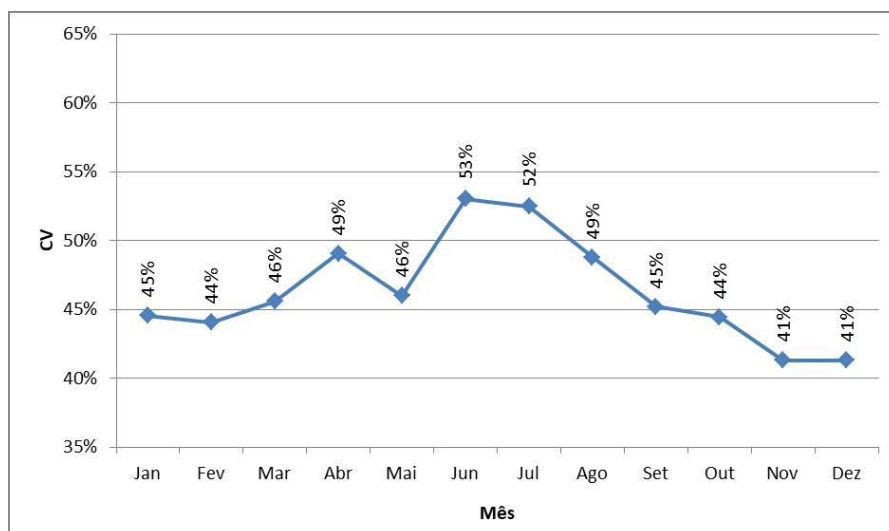
(1,23 m/s). Destaca-se também que os meses de agosto a dezembro apresentaram médias acima da média geral (1,5 m/s - linha Vermelha), enquanto de janeiro a julho apresentaram médias abaixo da média geral.

**Figura 12 - Média por mês (barras), média geral (linha vermelha) de ventos diários a dois metros (m/s)**



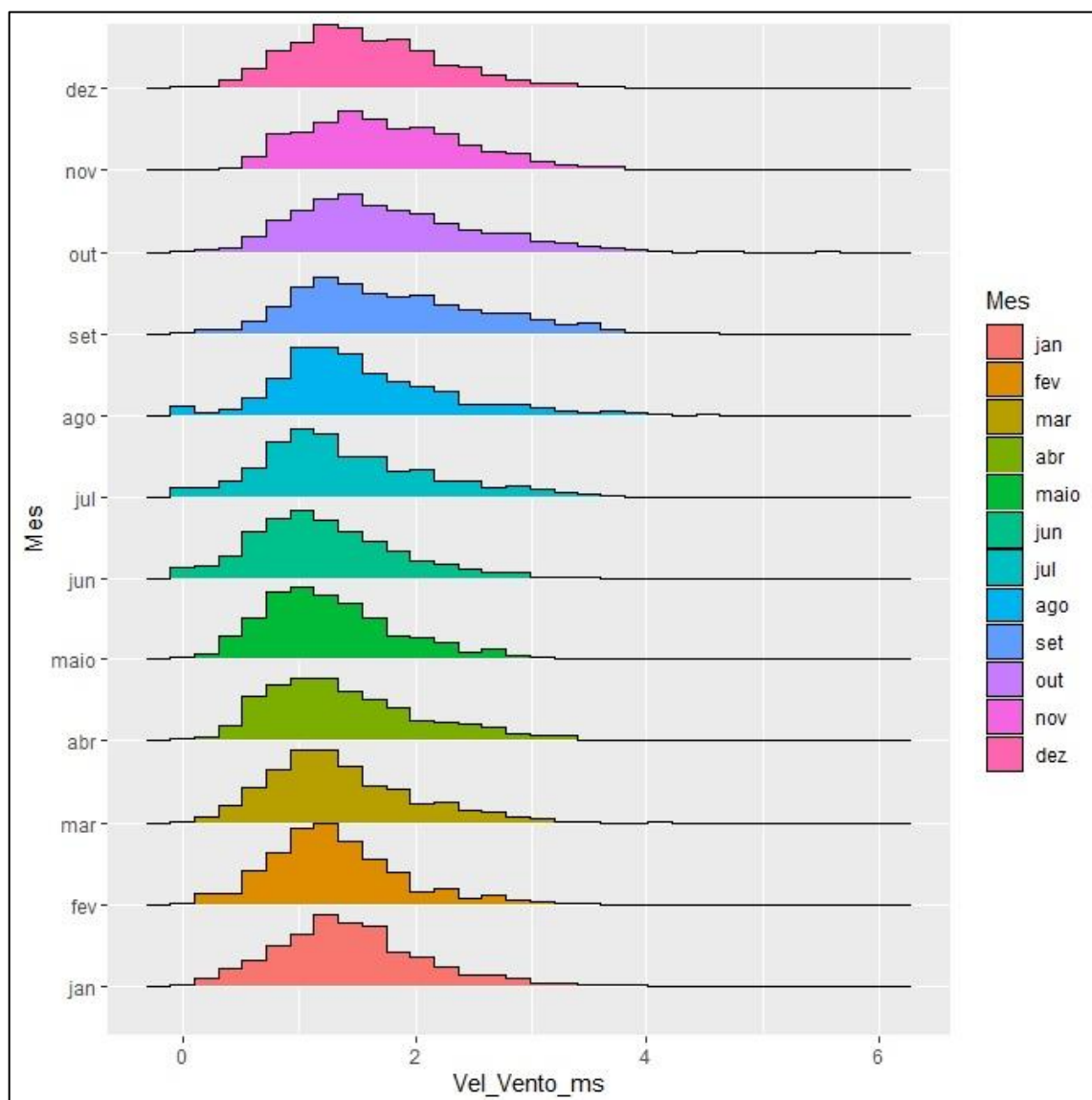
Conforme Figura 13 pode-se observar que o coeficiente de variação da velocidade média diária é semelhante nos meses analisados, variando de 41% (Novembro e Dezembro) a 53% (Junho), ou seja, o mês com uma maior variação da velocidade diária dos ventos foi Junho e os meses com menor variação foi Novembro e Dezembro.

**Figura 13 - Coeficiente de Variação de ventos diários a dois metros (m/s)**



Analisando o histograma da velocidade média diária por mês, entre 1971 a 2013 (Figura 14), pode-se observar que a velocidade média dos ventos fica distribuída entre 0 a 3,0 m/s de janeiro a junho e que a partir de setembro observa-se a ocorrência de velocidades médias diárias mais elevadas.

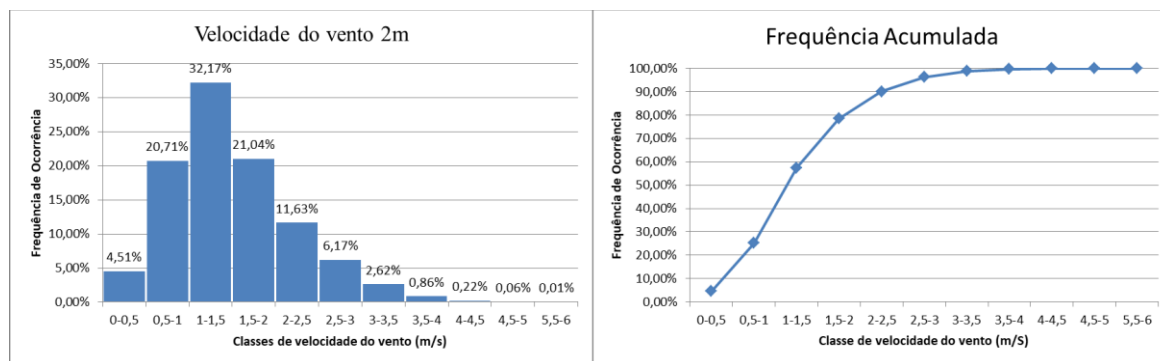
**Figura 14 – Histograma da velocidade média diária por mês das medições analógicas à 2 metros do solo no período de 1971 a 2013**



Observa-se na Figura 15 o histograma e o polígono de frequência acumulado dos dados diários da velocidade dos ventos para o período de 1971 a 2013, a partir dos quais nota-se que os dados apresentam uma certa assimetria à direita (histograma). Além disso, destaca-se, avaliando o polígono de frequência

acumulado, que 90,5% dos dias apresentaram velocidade dos ventos de no máximo 2,5 m/s.

**Figura 15 - Histograma e polígono de frequência acumulado dos dados de velocidade de ventos diários a dois metros (m/s)**

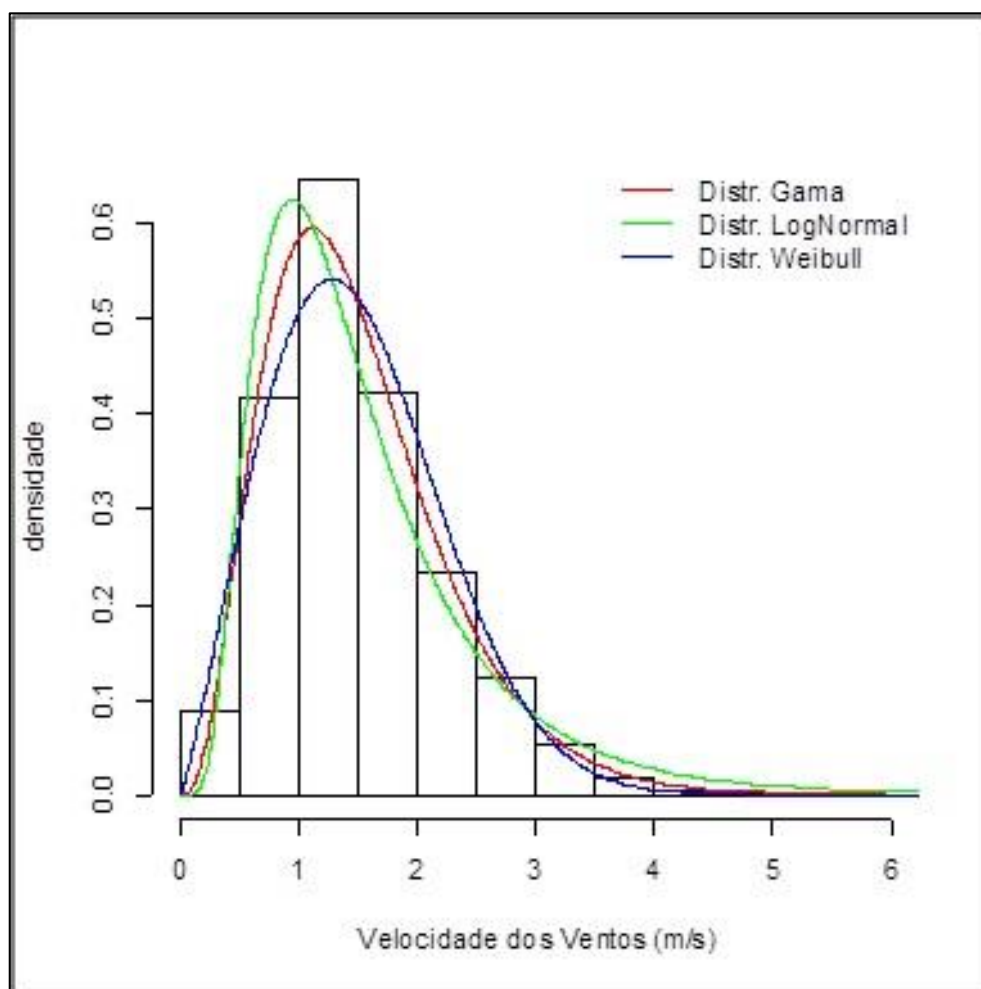


#### 4.1.2 Ajustes de modelos probabilísticos para caracterização da velocidade dos ventos no município de Botucatu (dados analógicos)

Após a análise descritiva inicial realizada com os dados diários analógicos da velocidade dos ventos a 2 metros e, baseando na distribuição de frequências aparentemente assimétrica, procurou-se ajustar os modelos probabilísticos Gama, LogNormal e Weibull.

Na Figura 1616 pode-se observar as funções densidades de probabilidade (fdp) das distribuições Gama, LogNormal, Weibull, ajustadas para os dados de velocidade dos ventos, podendo observar visualmente que a três distribuições não se distanciam muito da distribuição de frequência apresentada no histograma.

**Figura 16 - Histograma dos dados de velocidade de ventos diários a 2m (m/s) e curvas ajustadas das distribuições Gama, LogNormal, Weibull**



As estimativas de máxima verossimilhança dos parâmetros das distribuições gama, Weibull e Log-Normal, bem como seus respectivos erros padrões são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Estimativa das distribuições ajustadas, erro padrão e resultado do critério AIC**

| Modelo     | $\alpha$         | $\beta$          | $\mu$            | $\sigma$         | AIC      |
|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------|
| Gama       | 3,919<br>(0,043) | 2,616<br>(0,030) |                  |                  | 16460,41 |
| Log-normal |                  |                  | 0,271<br>(0,005) | 0,575<br>(0,003) | 17842,81 |
| Weibull    | 2,193<br>0,013   | 1,691<br>(0,006) |                  |                  | 16354,21 |

O AIC procura entre as distribuições avaliadas o melhor modelo e quanto mais adequado o modelo para os dados, menor é o valor do AIC (Tabela 2). Assim, o modelo que apresentou melhor ajuste, baseado nos valores do AIC de cada modelo ajustado, foi a distribuição Weibull, apresentando o valor de AIC igual 16354,21.

Desta forma, a partir da distribuição Weibull, as probabilidades de ocorrência de ventos com determinadas velocidades são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Probabilidade de ocorrência (em %) de um dia com ventos a 2 metros acima dos diferentes valores de velocidades estipulados em  $x$  (m/s)**

| <b>X=Velocidade dos ventos a 2 metros</b> |       |       |       |       |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| <b><math>x</math></b>                     | 0,5   | 1,0   | 1,5   | 2,0   | 2,5  | 3,0  | 3,5  | 4,0  |
| <b><math>P(X \geq x)</math></b>           | 93,32 | 72,90 | 46,34 | 23,57 | 9,46 | 2,97 | 0,72 | 0,13 |

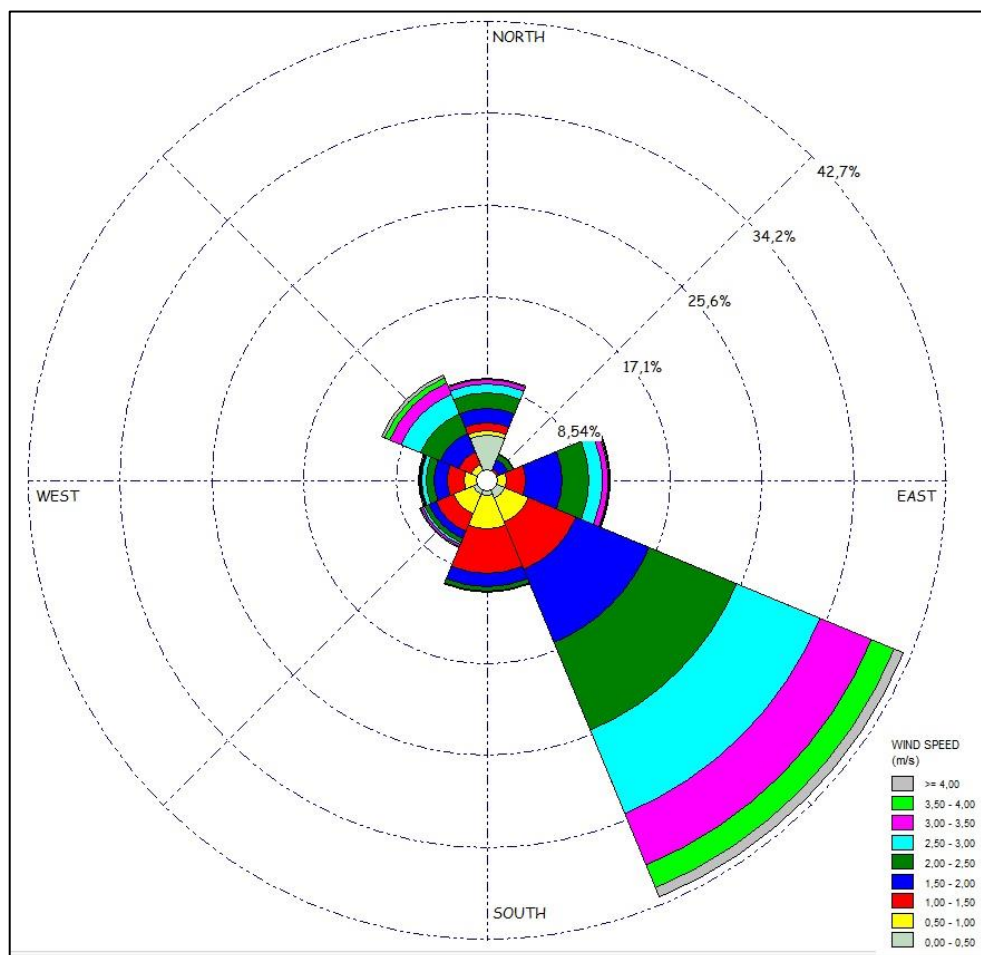
De acordo com a Tabela 3 a probabilidade de ocorrer um vento diário a dois metros com velocidade acima de 2,5 m/s em um determinado dia no município de Botucatu é baixa, ou seja, a chance deste evento ocorrer é de aproximadamente 9,46%.

## **4.2 Estação meteorológica digital (EMD)**

### **4.2.1 Caracterização da direção e velocidade do vento a dois metros de altura em Botucatu-SP (dados digitais)**

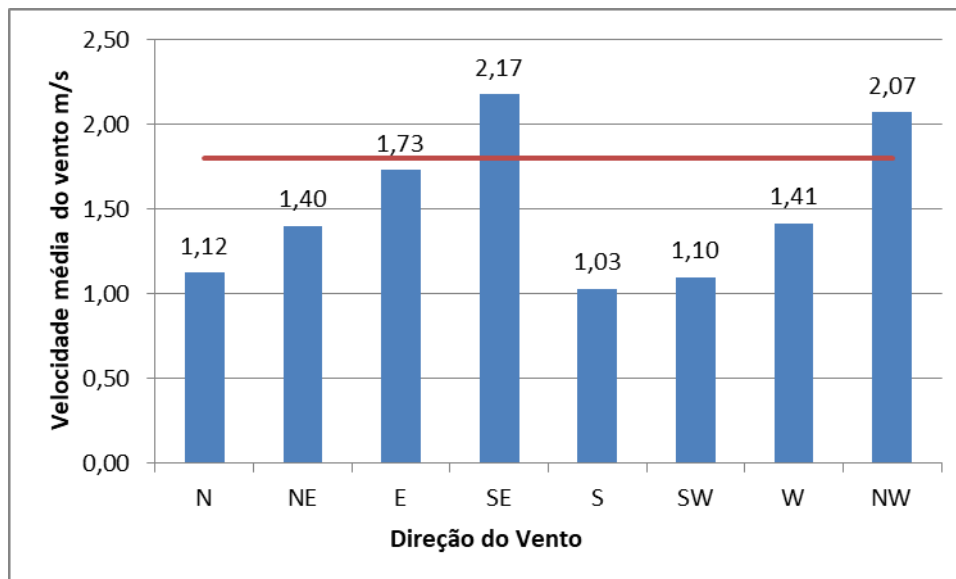
A Figura 17 apresenta a direção e velocidade do vento médio a 2 m de altura do solo em Botucatu, SP, durante o período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021. Verifica-se que a direção predominante no período estudado foi a direção SE (Sudeste) com a ocorrência de 41,92 %, enquanto a menor ocorrência (2,79 %) de ventos foi na direção NE (Nordeste).

**Figura 17 - Direção e velocidade do vento médio a 2m de altura do solo em Botucatu, SP, durante o período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021**



Pode-se também observar (Figura 18) que a maior velocidade média foi de 2,17 m/s na direção SE (Sudeste). A menor velocidade media foi de 1,03 m/s na direção S (Sul).

**Figura 18 - Velocidade média do vento em função das direções cardeais a 2m de altura do solo em Botucatu, SP, durante o período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021**



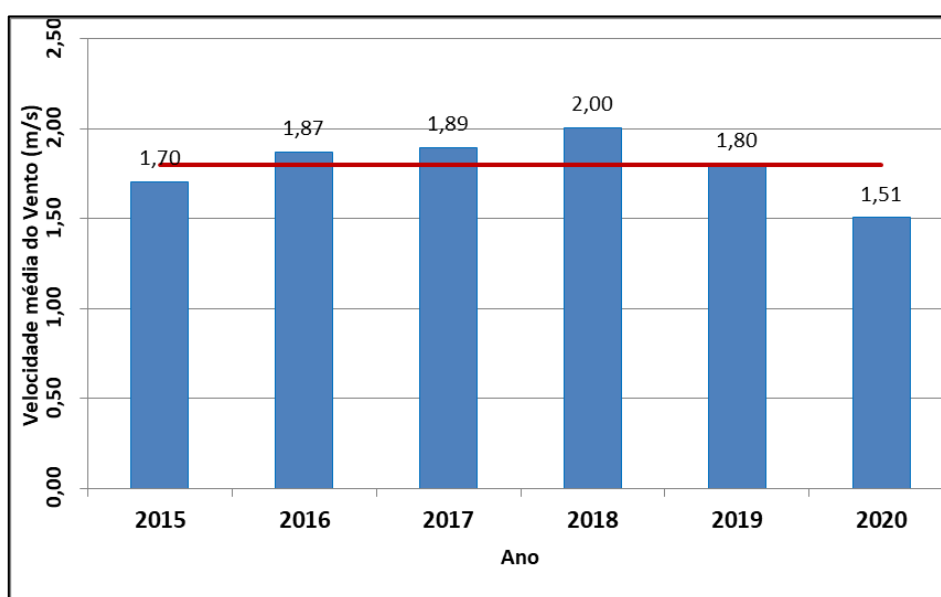
Verifica-se na Tabela 4 que a velocidade média horária dos ventos a dois metros em Botucatu, entre os anos de 2015 a 2020, foi de 1,80 m/s, com um desvio padrão de 0,98 m/s (CV=55%), sendo que a velocidade horária mínima encontrada foi de 0 m/s e a máxima foi 5,91 m/s. Percebe-se também uma mediana de 1,78 m/s. O ano com a maior velocidade máxima do vento foi 2018 com 5,91 m/s, com a velocidade média de 2,00 m/s e o desvio padrão de 0,87 m/s (CV=43 %), com mediana de 1,95 m/s, enquanto que, a menor velocidade máxima do vento foi 2019 com 5,16 m/s, com a velocidade média de 1,80 m/s e o desvio padrão de 0,99 m/s (CV=55 %), com mediana de 1,77 m/s.

**Tabela 4 - Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação (CV), Mediana, Mínimo e Máximo das médias anuais de Velocidade do Vento a 2 metros (EMD)**

| Ano       | Média | DesvPadr | CV  | Mediana | Máximo | Mínimo |
|-----------|-------|----------|-----|---------|--------|--------|
| 2015      | 1,70  | 0,91     | 53% | 1,64    | 5,65   | 0,0    |
| 2016      | 1,87  | 0,93     | 50% | 1,82    | 5,48   | 0,0    |
| 2017      | 1,89  | 0,95     | 50% | 1,87    | 5,48   | 0,0    |
| 2018      | 2,00  | 0,87     | 43% | 1,95    | 5,91   | 0,0    |
| 2019      | 1,80  | 0,99     | 55% | 1,77    | 5,16   | 0,0    |
| 2020      | 1,51  | 1,15     | 76% | 1,51    | 5,62   | 0,0    |
| 2015-2020 | 1,80  | 1,01     | 56% | 1,78    | 5,55   | 0,0    |

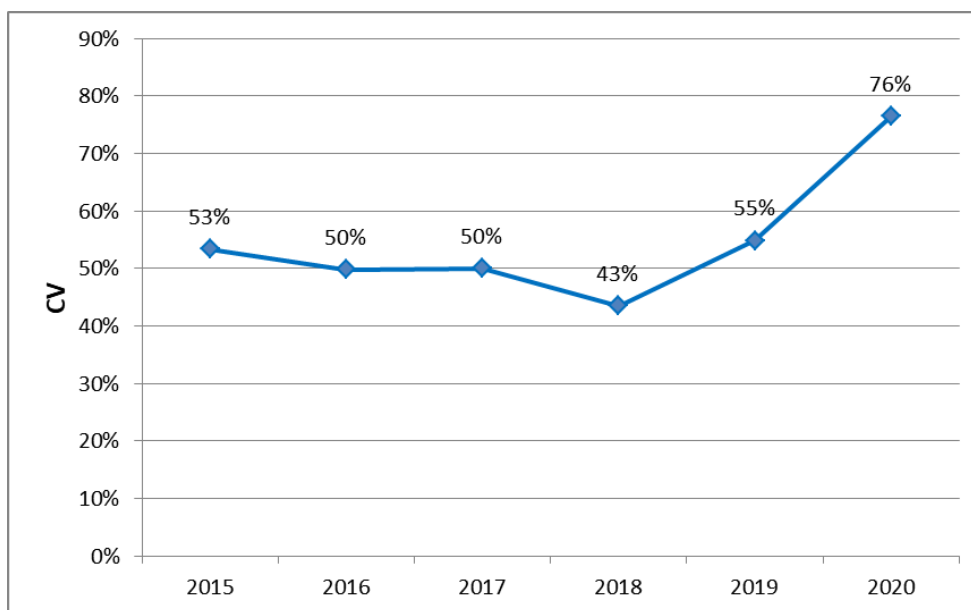
Observando as médias em cada ano dos dados digitais da velocidade dos ventos a dois metros de altura, apresentadas na Figura 19, percebe-se que a velocidade média dos ventos de todo o período foi de 1,80 m/s (linha vermelha), destacando a maior velocidade média observada no ano de 2018 (2,0 m/s) e a menor velocidade média foi no ano de 2020, com 1,15 m/s.

**Figura 19 - Médias diárias por ano (barras) e média diária geral da velocidade dos ventos (linha vermelha) de 2 m (EMD) no período de 2015 a 2020**



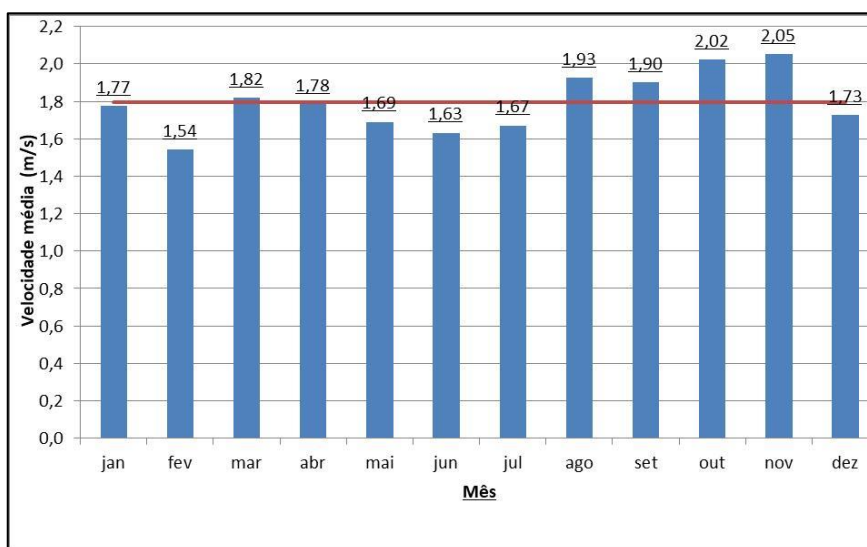
Conforme Figura 20, pode-se observar que o coeficiente de variação da velocidade média anual das medições digitais à 2 metros do solo (período de 2015 a 2020), variou de 43% a 55%, com exceção de 2020 em que o CV foi de 76%.

**Figura 20 - Coeficiente de Variação da velocidade média anual das medições digitais à 2 metros do solo no período de 2015 a 2020**



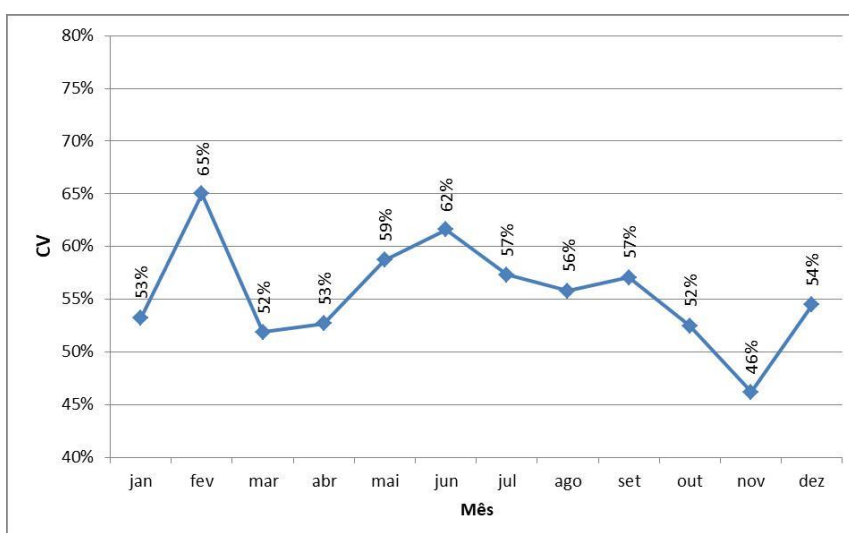
A Figura 21 destaca as velocidades médias dos ventos em cada mês, na qual pode-se observar que a partir do mês de agosto os ventos são mais intensos, sendo que o mês de novembro tem a maior média (2,05 m/s), enquanto de janeiro a julho os ventos são de menor intensidade, com o mês de fevereiro apresentando a menor média (1,54 m/s). Destaca-se também que os meses de agosto a dezembro apresentaram médias acima da média geral (1,80 m/s - linha Vermelha), chegando a 2,05 m/s em novembro, enquanto de janeiro a julho apresentaram médias abaixo da média geral, com o mês de março apresentando a maior média horária entre janeiro a julho (1,82 m/s).

**Figura 21 - Média por mês (barras), média geral (linha vermelha) de ventos diários a dois metros (m/s)**



Já na Figura 22 pode-se observar que o coeficiente de variação da velocidade média horária é semelhante nos meses analisados, variando de 52% a 62%, ou seja, a velocidade média horária dos ventos apresentou uma variação semelhante entre os meses, com exceção do mês de fevereiro (CV=65%) e novembro (CV=46%) que variaram nos extremos.

**Figura 22 - Coeficiente de Variação de ventos diários a dois metros (m/s)**



A Tabela 5 apresenta o resumo descritivo da velocidade média horária em cada mês. Observa-se que a maior velocidade máxima ocorreu no mês de setembro,

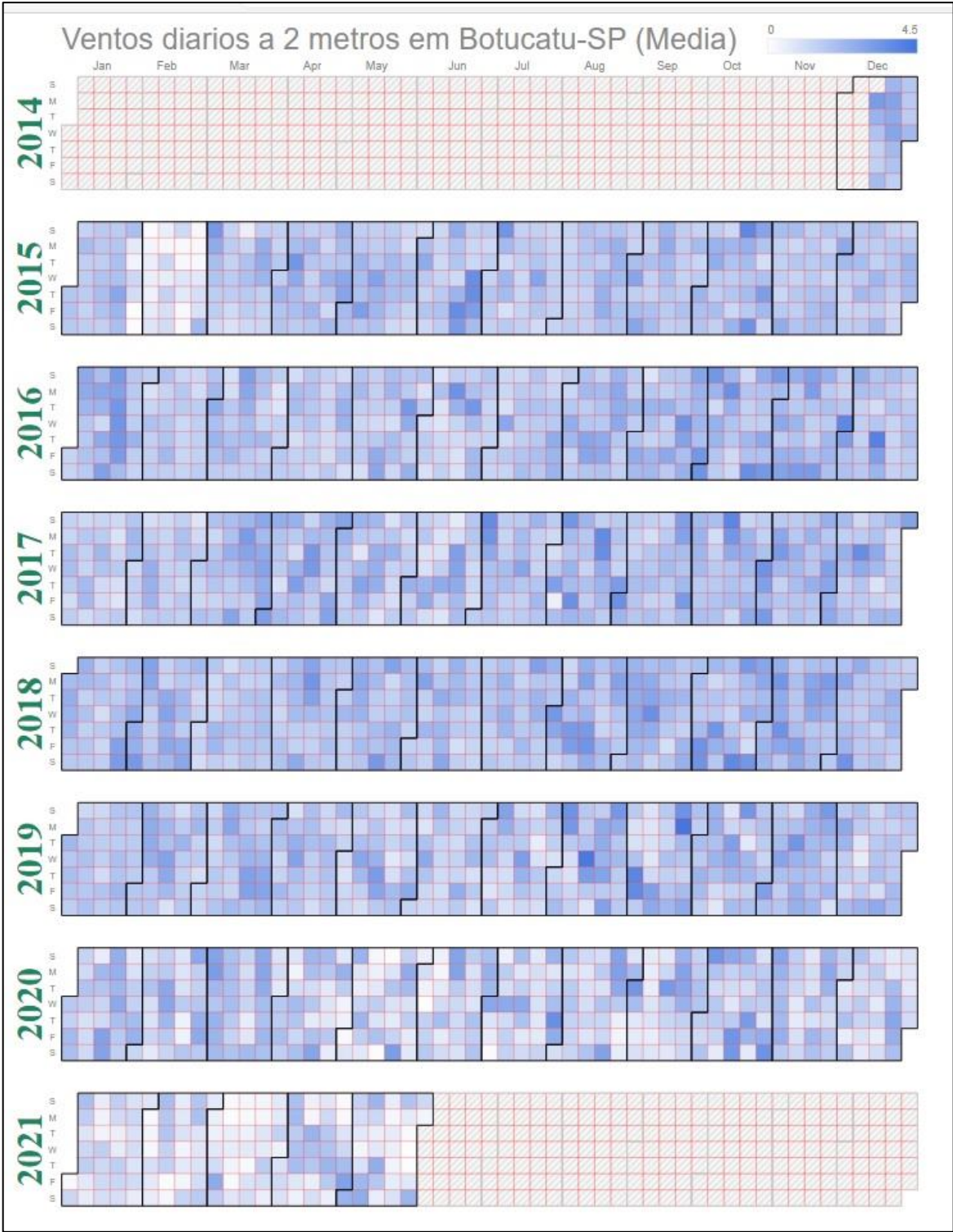
com 5,91 m/s e o desvio padrão de 1,09 m/s (CV=57 %), além de uma mediana de 1,88 m/s.

**Tabela 5 - Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação (CV), Mediana, Mínimo e Máximo por mês de Velocidade do Vento a 2 metros (EMD)**

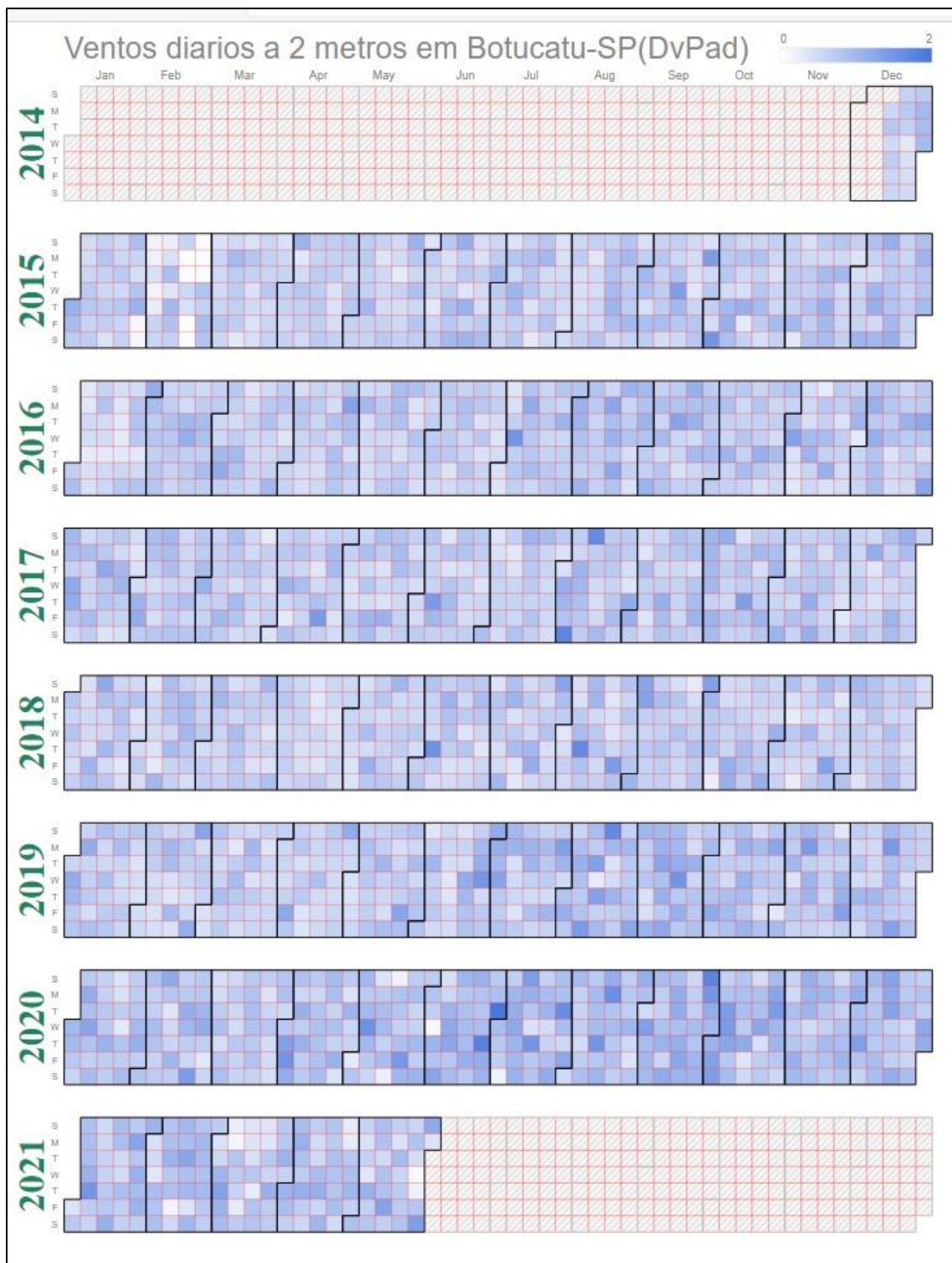
| Mês | Média | DesvPadr | CV  | Mediana | Máximo | Mínimo |
|-----|-------|----------|-----|---------|--------|--------|
| Jan | 1,77  | 0,94     | 53% | 1,80    | 4,77   | 0      |
| Fev | 1,54  | 1,00     | 65% | 1,58    | 4,18   | 0      |
| Mar | 1,82  | 0,94     | 52% | 1,84    | 4,26   | 0      |
| Abr | 1,78  | 0,94     | 53% | 1,81    | 4,82   | 0      |
| Mai | 1,69  | 0,99     | 59% | 1,70    | 4,81   | 0      |
| Jun | 1,63  | 1,00     | 62% | 1,49    | 5,26   | 0      |
| Jul | 1,67  | 0,96     | 57% | 1,55    | 5,48   | 0      |
| Ago | 1,93  | 1,07     | 56% | 1,83    | 5,59   | 0      |
| Set | 1,90  | 1,09     | 57% | 1,88    | 5,91   | 0      |
| Out | 2,02  | 1,06     | 52% | 2,02    | 5,17   | 0      |
| Nov | 2,05  | 0,95     | 46% | 2,10    | 5,14   | 0      |
| Dez | 1,73  | 0,94     | 54% | 1,75    | 4,70   | 0      |

A velocidade dos ventos a 2 metros, a partir das medições horárias realizadas pela estação meteorológica digital, pode ser visualizado na Figura 23 e Figura 24, as quais resumem respectivamente a velocidade média diária e o desvio padrão diário no período analisado.

Figura 23 - Calendário diário da velocidade média do vento a 2 m



**Figura 24 - Calendário diário do desvio padrão do vento a 2 m**



Verifica-se na Tabela 6 que o maior valor das velocidades máximas observadas em cada hora ocorreu às 15 horas, com 5,91 m/s. Destaca-se também, neste horário, uma velocidade média de 2,15 m/s e desvio padrão de 0,80 m/s

(CV=37 %), com mediana de 2,08 m/s. A menor velocidade média, de 1,27 m/s, foi as 19 horas, enquanto a maior ocorreu as 11 e 12 horas com 2,35 m/s.

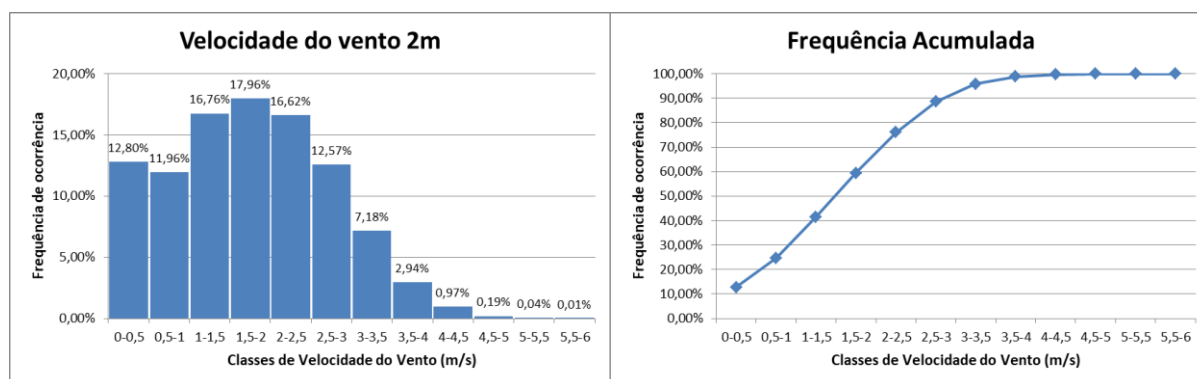
A menor velocidade registrada foi de 0 m/s. Podemos observar Observa-se também que a partir das 6 horas inicia um acréscimo de velocidade média até as 11 horas e as 13 horas vai decrescendo até as 19 horas, a partir do qual começa um pequeno acréscimo até as 0 horas.

**Tabela 6 - Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação (CV), Mediana, Mínimo e Máximo das médias Horárias de Velocidade do Vento a 2 metros (EMD)**

| Hora | Média | DesvPadr | CV  | Mediana | Máximo | Mínimo |
|------|-------|----------|-----|---------|--------|--------|
| 0    | 1,71  | 0,99     | 58% | 1,64    | 5,49   | 0      |
| 1    | 1,71  | 0,98     | 57% | 1,63    | 5,65   | 0      |
| 2    | 1,67  | 0,97     | 58% | 1,57    | 4,76   | 0      |
| 3    | 1,63  | 0,98     | 60% | 1,52    | 4,71   | 0      |
| 4    | 1,59  | 0,99     | 62% | 1,47    | 4,93   | 0      |
| 5    | 1,57  | 0,99     | 63% | 1,43    | 4,75   | 0      |
| 6    | 1,54  | 0,99     | 64% | 1,41    | 4,67   | 0      |
| 7    | 1,59  | 1,00     | 63% | 1,44    | 4,69   | 0      |
| 8    | 1,82  | 1,05     | 58% | 1,77    | 4,94   | 0      |
| 9    | 2,12  | 1,02     | 48% | 2,10    | 5,26   | 0      |
| 10   | 2,29  | 0,94     | 41% | 2,25    | 5,17   | 0      |
| 11   | 2,35  | 0,87     | 37% | 2,26    | 5,04   | 0      |
| 12   | 2,35  | 0,82     | 35% | 2,28    | 5,15   | 0      |
| 13   | 2,30  | 0,82     | 35% | 2,19    | 5,14   | 0      |
| 14   | 2,24  | 0,82     | 36% | 2,14    | 5,59   | 0      |
| 15   | 2,15  | 0,80     | 37% | 2,08    | 5,91   | 0      |
| 16   | 2,00  | 0,79     | 39% | 1,91    | 4,90   | 0      |
| 17   | 1,74  | 0,81     | 46% | 1,67    | 4,80   | 0      |
| 18   | 1,38  | 0,84     | 60% | 1,27    | 5,14   | 0      |
| 19   | 1,27  | 0,84     | 66% | 1,11    | 4,81   | 0      |
| 20   | 1,34  | 0,88     | 66% | 1,17    | 5,36   | 0      |
| 21   | 1,48  | 0,95     | 64% | 1,29    | 4,76   | 0      |
| 22   | 1,59  | 0,99     | 62% | 1,39    | 5,48   | 0      |
| 23   | 1,67  | 1,00     | 60% | 1,53    | 5,43   | 0      |

O histograma e o polígono de frequência acumulado dos dados horários da velocidade dos ventos, entre 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021, indica que os dados apresentam uma certa assimetria à direita (histograma). Além disso, destaca-se, avaliando o polígono de frequência acumulado, que 95,9% das horas avaliadas apresentaram velocidade dos ventos de no máximo 3,5 m/s (Figura 25). Na pulverização segundo OZKAN(1998 citado por CHECHETTO, 2011), a aplicação de defensivos agrícolas deve ocorrer com uma velocidade do vento entre 3 a 10 km/h (0,83 a 2,78 m/s), sendo assim 63,89% das horas são propícias para aplicação.

**Figura 25 - Histograma e polígono de frequência acumulado dos dados de velocidade de ventos horário a dois metros (m/s)**



#### 4.2.2 Caracterização sazonal da velocidade média horária do vento a dois metros de altura em Botucatu-SP (dados digitais)

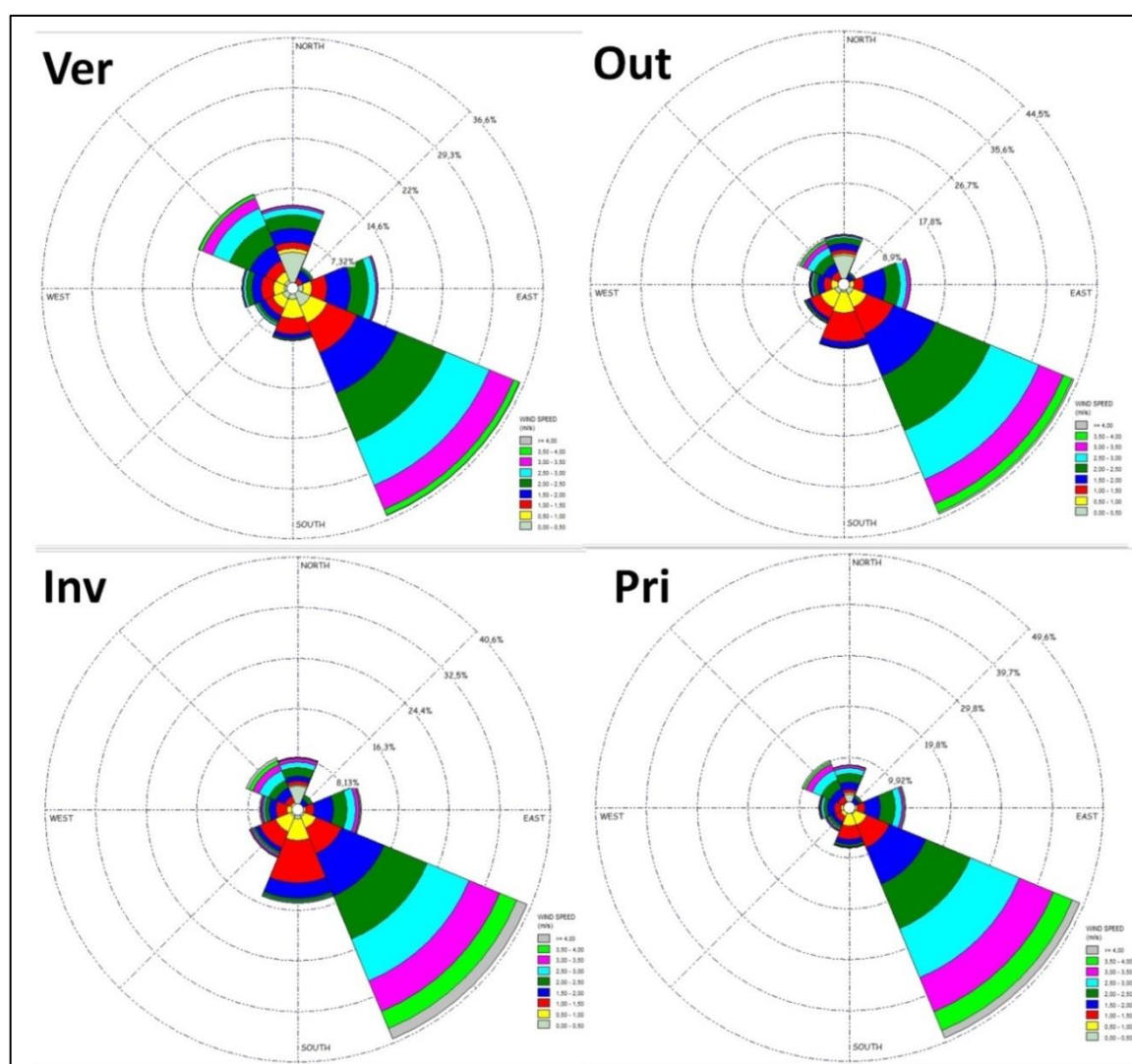
Verificar o comportamento da velocidade dos ventos durante 24 horas e comparar com diferentes estações do ano é importante, pois o conhecimento deste comportamento pode ajudar a entender o seu impacto na agricultura. No entanto, essa avaliação somente é possível a partir das medições realizadas pela estação meteorológicas digitais, com dados para Botucatu somente a partir do final do ano de 2014 (SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2017).

Destaca-se também que cada estação do ano tem sua influência na agricultura (SCHUBERT, DAL PAI, RODRIGUES, 2017) e, para isso, procurou-se estudar como a velocidade dos ventos se comporta durante o dia no início de cada uma das quatro estações.

A Figura 26 apresenta a direção e velocidade do vento médio a 2 m de altura do solo em Botucatu, SP, em cada estação (Verão, Outono, Inverno, Primavera) durante o período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021. Verifica-se que a direção predominante em todas as estações foi a direção SE (Sudeste), com a ocorrência de 48,60 % na Primavera e 35,88 % no Verão, o que coincide com a direção predominante do período total, sem considerar as estações climáticas, no qual 41,92 % dos ventos ocorreram na direção SE (Sudeste) (Figura 17).

A segunda maior ocorrência é a direção NW (Noroeste), 14,91% no verão e 11,67% no inverno, já no outono, 11,79% e primavera, 11,02 % é a direção E (Este).

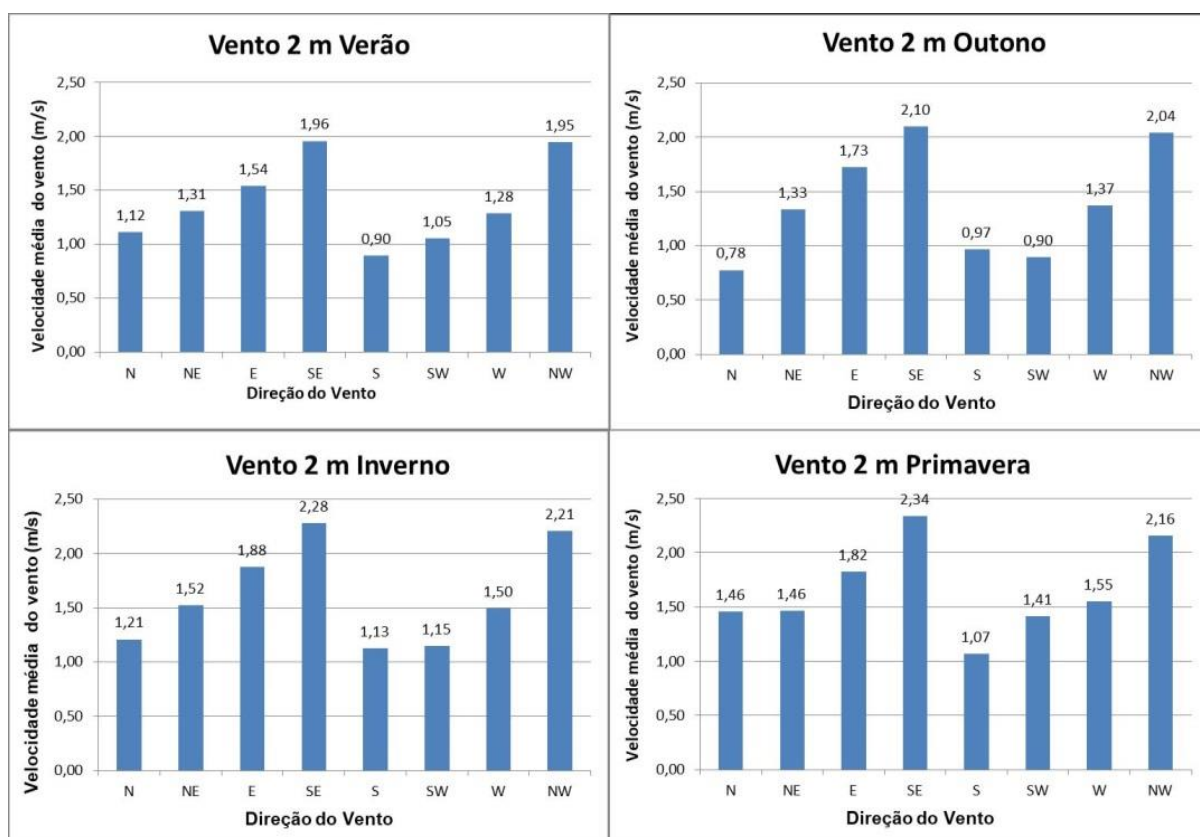
**Figura 26 - Direção e velocidade do vento médio a 2m de altura do solo em Botucatu, SP, durante o período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021 por estação climática**



Pode-se também observar (Figura 28) que durante as estações climáticas a velocidade média do vento tem comportamento semelhante nas direções, com exceção do outono, onde observa-se uma velocidade média atípica, em relação as demais estações, na direção SW (Sudoeste). Este comportamento coincide com o comportamento do período total sem considerar as estações climáticas (Figura 18).

Considerando a direção de maior ocorrência dos ventos nas quatro estações, ou seja, a direção SE (Sudeste), a maior velocidade média observada foi de 2,34 m/s na primavera, seguida de 2,28 m/s no inverno, 2,10 m/s no outono e 1,96 m/s no verão. Já a menor velocidade média pode ser observada na direção S (Sul) com exceção do Outono a direção SW (Sudoeste) apresentou a menor velocidade, ou seja, 0,90 m/s.

**Figura 27 - Velocidade média do vento em função das direções cardeais a 2m de altura do solo em Botucatu, SP, durante o período de 22 de dezembro de 2014 a 19 de março de 2021 por estação climática**



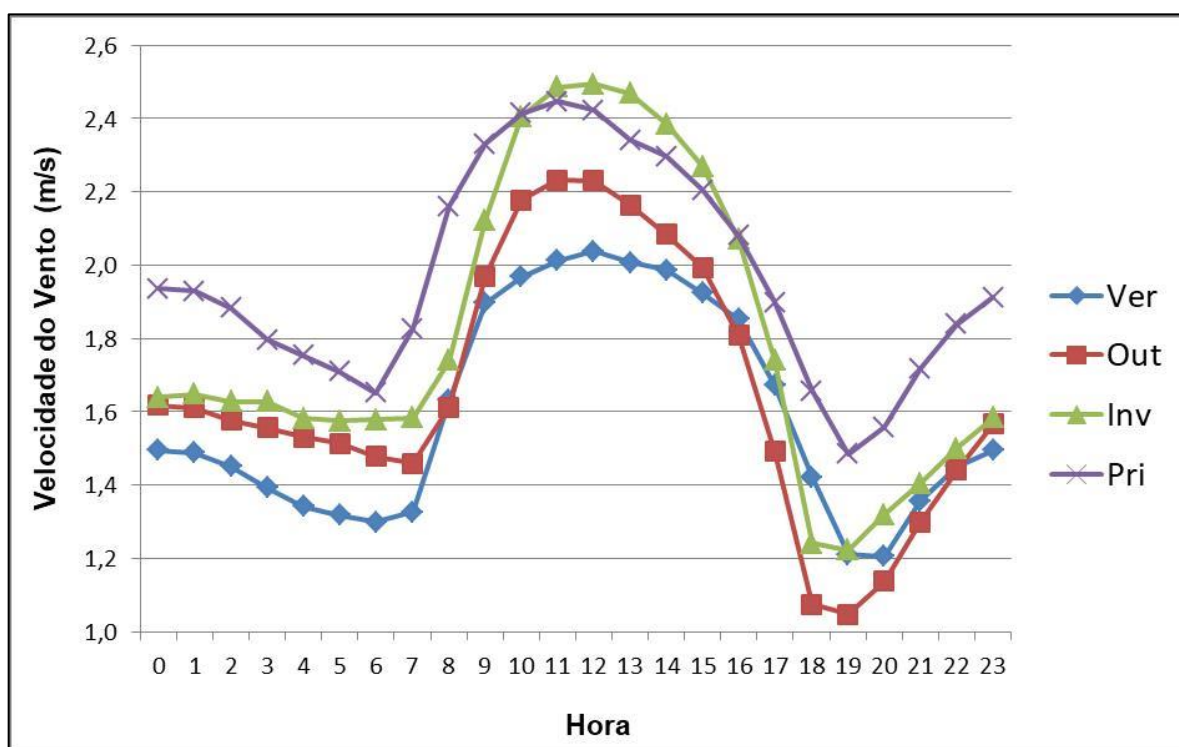
Considerando as médias horárias, observou-se que a velocidade média do vento no Verão foi de 1,59 m/s, enquanto a maior velocidade média horária foi observada às 12 horas da manhã (2,04 m/s) e a menor às 20 horas (1,21m/s), conforme (Figura 28).

Também observando a Figura 28, no Outono a velocidade média foi de 1,65 m/s, enquanto a maior velocidade média foi observada às 12 horas da manhã (2,23 m/s) e a menor às 19 horas (1,05 m/s).

No Inverno observou-se uma velocidade média de 1,80 m/s, com a maior velocidade às 12 horas da manhã (2,49 m/s) e a menor (1,22 m/s) às 19 horas, enquanto que na Primavera a velocidade média foi de 1,97 m/s, com a maior velocidade média horária observada às 11 horas da manhã (2,45 m/s) e a menor às 19 horas (1,48 m/s), conforme (Figura 28).

No Inverno e Primavera o perfil em 24 horas da velocidade média dos ventos foi maior do que o perfil médio observado no Outono e Verão.

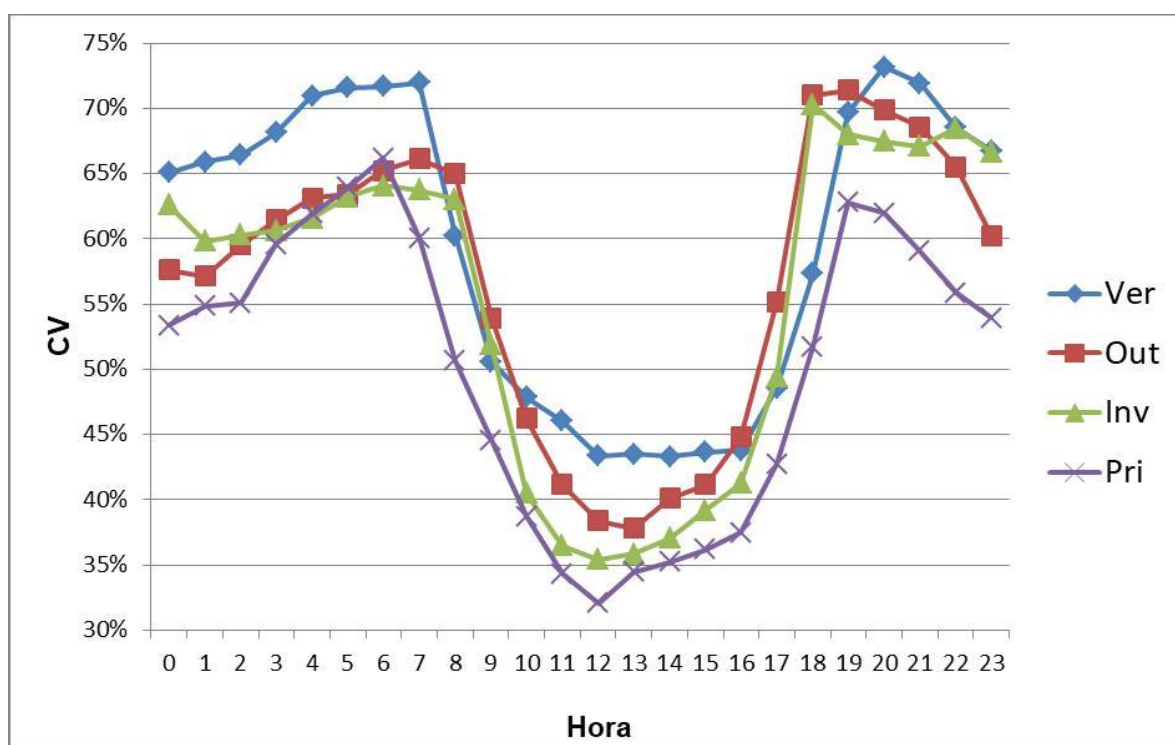
**Figura 28 - Velocidade média do Vento a 2 metros de altura**



Em geral, apesar de uma velocidade média superior no Inverno e Primavera, pode-se dizer que em todas as quatro estações o perfil do comportamento da velocidade em 24 horas foi semelhante.

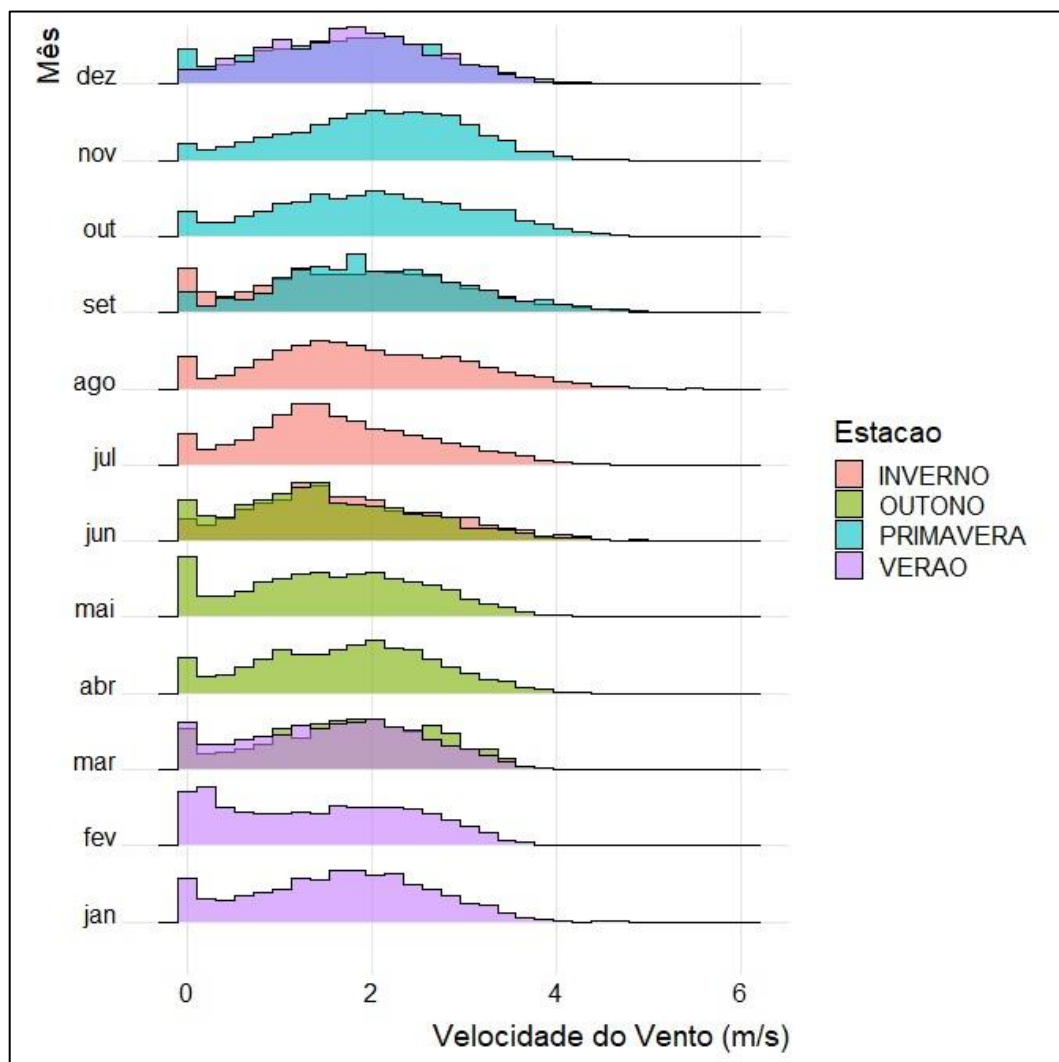
Na Figura 29 pode-se observar que o coeficiente de variação da velocidade média entre as horas do dia. Das 0h as 8h observa-se um aumento da variabilidade das velocidades dos ventos e, a partir das 9h até as 12h ocorre uma diminuição das variabilidade; Entre as 12 h e 16 h observa-se os níveis de variação mais baixo e partir da 17 h começa aumentar coeficiente de variação ate as 18h e 20 h. Nas quatro estações do ano, a velocidade média dos ventos neste horário apresentou uma variação semelhante. O Verão possui variação entre (65% e 72%) a partir da 0h até 7h e um pico de variação às 20h (73%). Também se pode observar que em todas as estações o menor CV ocorre entre as 12h e as 14h, variando de 32% as 12 h na Primavera até 43% as 14h no Verão.

**Figura 29 - Coeficiente de Variação horário das medições digitais realizadas a cada 5 minutos**



Analisando o histograma da velocidade média mensal (m/s) dos ventos a 2m por estações (Figura 3030), pode-se observar a distribuição da velocidade média mensal entre as estações climáticas do ano e em especial nos meses de transição, dezembro (primavera/verão), março (verão/outono), junho (outono/inverno) e setembro (inverno/primavera).

**Figura 30 - Histograma da Velocidade Média Mensal (m/s) dos ventos a 2m por estações**



#### 4.2.3 Aplicação dos dados na pulverização de defensivos agrícolas (dados digitais)

Conhecer como o vento se comporta é importante em diversas áreas da agricultura, uma delas é a de pulverização de defensivos agrícolas. Segundo OZKAN (1998 citado por CHECHETTO, 2011), a aplicação de defensivos agrícolas deve ocorrer com uma velocidade do vento entre 3 a 10 km/h (0,83 a 2,78 m/s).

Observado a Tabela 7, verifica-se que os meses julho (68,19%), abril (67,82%) e dezembro (67,11%) apresentam as maiores porcentagens de condições de velocidade do vento ideais para a pulverização agrícola considerando o intervalo

de velocidade entre 0,83 e 2,78 m/s (3 e 10 km/h), enquanto os meses de fevereiro (56,25%) e outubro (60,01%) a menor.

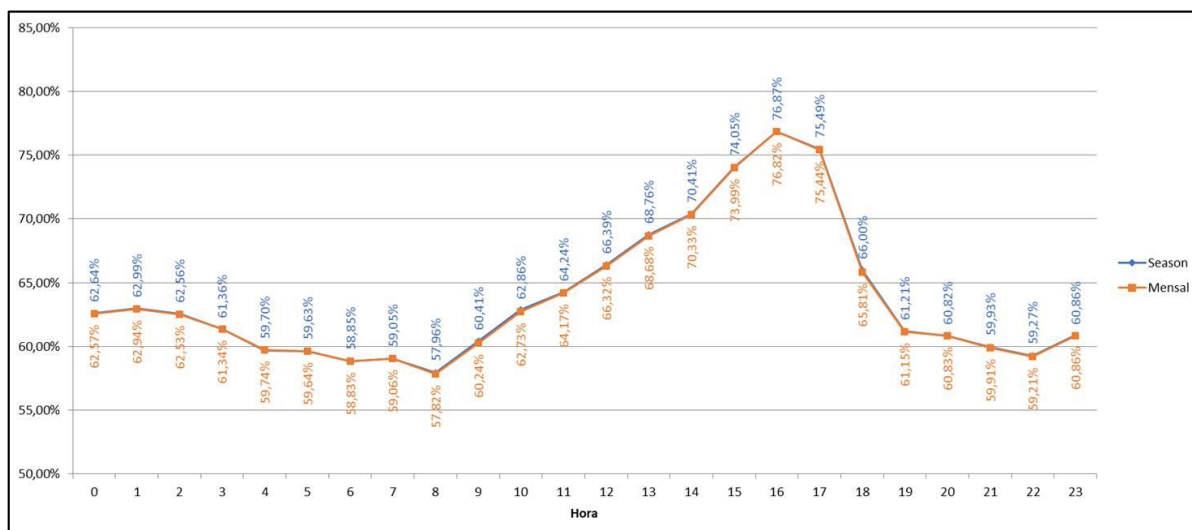
Podemos verificar também que 12 h as 18 h apresentam a melhor porcentagem (>65%) em todos os meses (Tabela 7).

**Tabela 7 - Condições de velocidade do vento ideais (%) para a pulverização agrícola em diferentes horários do dia/mês, considerando o intervalo de velocidade entre 0,83 e 2,78 m/s (3 e 10 km/h)**

| Hora   | Jan    | Fev    | Mar    | Abr    | Mai    | Jun    | Jul    | Ago    | Set    | Out    | Nov    | Dez    | Geral  |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0      | 60,83% | 55,56% | 65,90% | 73,81% | 64,06% | 59,44% | 66,67% | 61,83% | 60,56% | 61,08% | 62,22% | 58,91% | 62,57% |
| 1      | 63,13% | 51,01% | 62,67% | 74,29% | 63,59% | 62,22% | 68,82% | 65,59% | 61,67% | 58,92% | 60,56% | 62,87% | 62,94% |
| 2      | 61,29% | 53,03% | 62,67% | 68,10% | 62,21% | 62,22% | 72,04% | 66,13% | 61,67% | 60,00% | 61,11% | 59,90% | 62,53% |
| 3      | 60,37% | 52,02% | 62,67% | 66,19% | 58,53% | 61,67% | 73,12% | 60,22% | 59,44% | 55,14% | 63,89% | 62,87% | 61,34% |
| 4      | 56,22% | 51,52% | 61,75% | 68,10% | 59,91% | 56,67% | 69,89% | 61,29% | 55,56% | 56,76% | 62,78% | 56,44% | 59,74% |
| 5      | 64,06% | 46,97% | 61,29% | 67,62% | 55,76% | 59,44% | 70,43% | 63,44% | 50,56% | 55,68% | 65,00% | 55,45% | 59,64% |
| 6      | 58,99% | 50,00% | 61,75% | 65,71% | 59,91% | 57,22% | 66,13% | 59,89% | 52,78% | 53,23% | 60,00% | 60,40% | 58,83% |
| 7      | 58,06% | 50,00% | 59,45% | 65,71% | 58,99% | 59,44% | 66,67% | 59,14% | 57,22% | 51,35% | 63,33% | 59,41% | 59,06% |
| 8      | 66,36% | 50,51% | 58,99% | 61,90% | 54,84% | 52,78% | 64,52% | 56,45% | 53,33% | 48,92% | 54,44% | 70,79% | 57,82% |
| 9      | 73,27% | 53,54% | 64,52% | 59,52% | 53,92% | 54,44% | 68,28% | 55,38% | 53,89% | 58,06% | 57,78% | 70,30% | 60,24% |
| 10     | 72,81% | 56,06% | 69,12% | 57,62% | 62,21% | 65,00% | 67,74% | 59,14% | 58,01% | 53,76% | 58,89% | 72,41% | 62,73% |
| 11     | 70,97% | 62,63% | 67,74% | 64,29% | 64,52% | 66,67% | 63,98% | 55,38% | 61,67% | 58,60% | 62,22% | 71,43% | 64,17% |
| 12     | 70,97% | 61,62% | 70,51% | 74,29% | 65,90% | 68,33% | 65,59% | 55,38% | 60,00% | 62,90% | 68,89% | 71,43% | 66,32% |
| 13     | 74,19% | 65,15% | 70,97% | 76,19% | 71,43% | 67,78% | 67,74% | 56,45% | 66,67% | 66,67% | 70,00% | 70,94% | 68,68% |
| 14     | 74,19% | 66,67% | 72,81% | 75,24% | 72,81% | 69,44% | 66,13% | 63,44% | 69,44% | 67,20% | 72,22% | 74,38% | 70,33% |
| 15     | 75,58% | 71,72% | 76,50% | 80,95% | 76,04% | 73,89% | 69,35% | 67,38% | 72,22% | 68,82% | 76,67% | 78,82% | 73,99% |
| 16     | 79,72% | 72,22% | 78,80% | 82,86% | 76,96% | 79,44% | 75,27% | 73,12% | 76,11% | 68,28% | 77,78% | 81,28% | 76,82% |
| 17     | 76,04% | 75,25% | 78,34% | 74,76% | 69,12% | 71,67% | 80,65% | 72,04% | 77,22% | 71,51% | 78,89% | 79,80% | 75,44% |
| 18     | 74,19% | 64,14% | 70,97% | 60,48% | 55,76% | 57,78% | 56,45% | 63,98% | 65,56% | 64,52% | 75,56% | 80,30% | 65,81% |
| 19     | 66,36% | 52,53% | 60,83% | 55,24% | 55,76% | 61,67% | 65,59% | 61,29% | 64,44% | 61,83% | 62,78% | 65,52% | 61,15% |
| 20     | 59,45% | 51,01% | 56,22% | 60,95% | 58,53% | 62,78% | 70,97% | 62,90% | 63,33% | 60,75% | 60,56% | 62,56% | 60,83% |
| 21     | 57,60% | 45,96% | 60,83% | 60,00% | 58,99% | 62,78% | 70,97% | 63,98% | 56,11% | 63,44% | 56,67% | 61,58% | 59,91% |
| 22     | 58,99% | 44,95% | 59,45% | 65,71% | 60,83% | 60,00% | 61,83% | 61,29% | 60,00% | 58,60% | 57,78% | 61,08% | 59,21% |
| 23     | 58,99% | 45,96% | 61,29% | 68,10% | 64,06% | 63,89% | 67,74% | 59,68% | 62,78% | 54,05% | 62,22% | 61,58% | 60,86% |
| Mês    | 66,36% | 56,25% | 65,67% | 67,82% | 62,69% | 63,19% | 68,19% | 61,87% | 61,68% | 60,01% | 64,68% | 67,11% |        |
| Máximo | 79,72% | 75,25% | 78,80% | 82,86% | 76,96% | 79,44% | 80,65% | 73,12% | 77,22% | 71,51% | 78,89% | 81,28% | 76,82% |
| Mínimo | 56,22% | 44,95% | 56,22% | 55,24% | 53,92% | 52,78% | 56,45% | 55,38% | 50,56% | 48,92% | 54,44% | 55,45% | 57,82% |

A Figura 31 apresenta em porcentagem as condições de velocidade do vento ideais para a pulverização agrícola em diferentes horários média estação/mensal, considerando o intervalo de velocidade entre 0,83 e 2,78 m/s (3 e 10 km/h), constata-se que não existe diferença significativa entre as meses do ano e as estações climáticas (verão, outono, inverno, primavera) durante as 24 horas do dia.

**Figura 31 - Condições de velocidade do vento ideais (%) para a pulverização agrícola em diferentes horários média estação/mensal, considerando o intervalo de velocidade entre 0,83 e 2,78 m/s (3 e 10 km/h)**



Comparando os resultados encontrados por Fernandes(2019) (Tabela 8), podemos verificar que a cidade Botucatu/SP, em todos os meses possui melhores condições favoráveis da velocidade do vento para pulverização agrícola considerando o intervalo de velocidade entre 0,83 e 2,78 m/s (3 e 10 km/h) do que a cidade São Luiz Gonzaga/RS.

**Tabela 8 - Comparativo de favorabilidade da velocidade do vento para pulverização agrícola entre Botucatu/SP e São Luiz Gonzaga/RS, (FERNANDES,2019), considerando o intervalo de velocidade entre 0,83 e 2,78 m/s (3 e 10 km/h)**

| Cidade   | Jan    | Fev    | Mar    | Abr    | Mai    | Jun    | Jul    | Ago    | Set    | Out    | Nov    | Dez    |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S. L. G. | 49,40% | 54,10% | 57,60% | 55,30% | 52,00% | 48,50% | 41,40% | 35,90% | 40,50% | 41,30% | 44,70% | 49,50% |
| Botucatu | 66,36% | 56,25% | 65,67% | 67,82% | 62,69% | 63,19% | 68,19% | 61,87% | 61,68% | 60,01% | 64,68% | 67,11% |

#### 4.2.4 Estatística multivariada para comparação da velocidade dos ventos entre dois períodos de medição a 2m e 10m do solo

A Tabela 9 apresenta o resumo descritivo (média e desvio padrão) das variáveis em cada grupo/período, caracterizando as estações primavera/verão

(grupo 1) e outono/inverno (grupo2), bem como o resultado do teste  $T^2$  de Hotelling e os intervalos de confiança (ICS).

**Tabela 9 - Estatística Descritiva, Teste T2 de Hotelling, Teste de Box e ICS**

| Variável                                   | Grupos       |              | *Intervalos de<br>Confiança (ICS) | Teste de Bartlet/Box |
|--------------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|
|                                            | Grupo 1      | Grupo 2      |                                   |                      |
|                                            | Média (DP)   | Média (DP)   |                                   |                      |
| Vento 2 m                                  | 1,768(0,228) | 1,742(0,140) | [-0,310;0,363]                    | MC=1,48(p> 0,05)     |
| Vento 10 m                                 | 2,432(0,208) | 2,222(0,175) | [-0,131;0,551]                    |                      |
| T <sup>2</sup> de Hotelling 8,92 (p> 0,05) |              |              |                                   |                      |

\*Como o zero está entre o ICS, prova que não existe diferença estatística entre o grupo 1 (estações primavera/verão) e grupo 2 (outono/inverno) em relação a velocidade dos ventos considerando simultaneamente a 2 m e 10 m da superfície.

O teste  $T^2$  de Hotelling, mostrou-se eficiente para comparação de vetores de médias sendo mais apropriado utilizá-lo em situações em que se deseja comparar dois grupos considerando simultaneamente diversas características.

Os meses de primavera e verão (Grupo 1) não apresentaram uma variabilidade diferente na velocidade dos ventos em relação aos meses de outono e inverno (Grupo 2), de acordo com o teste de Box, quanto a velocidade média, com base no teste  $T^2$  de Hotelling não foi possível observar diferença estatística significativa entre os meses de outono e inverno (Grupo 1) e primavera e verão (Grupo 2).

## 5 CONCLUSÕES

A velocidade média anual do vento a dois metros no município de Botucatu foi de 1,5 m/s com um desvio padrão 0,92 m/s, enquanto a velocidade mínima foi de 0,1 m/s e a máxima de 5,97m/s, quando considerados os dados analógicos (EMA)

O modelo probabilístico que apresentou melhor ajuste para a distribuição dos dados analógicos (EMA) da velocidade dos ventos a dois metros, baseado no critério de Informação de Akaike, foi a distribuição Weibull podendo ser usada para simulações de cenários de intensidade do vento. Observou-se que 90,5% dos dias analisados apresentaram velocidade diária dos ventos a dois metros de até 2,5m/s (dados reais), enquanto a partir do modelo de Weibull ajustado, a probabilidade de se observar uma velocidade de até 2,5 m/s foi de 90,54% (estimativa), indicando um bom ajuste.

Quando considerados os dados digitais (EMD), a velocidade média do vento a dois metros no município de Botucatu foi de 1,80 m/s, enquanto a velocidade mínima foi de 0,0 m/s e a máxima de 5,91 m/s. A direção predominante no período estudado foi a direção SE (Sudeste), com a ocorrência de 41,92 %, enquanto a menor ocorrência (2,79 %) de ventos foi na direção NE (Nordeste).

Na estação meteorológica digital (EMD), a velocidade média dos ventos em cada estação climática possuem comportamento semelhantes entre as horas do dia, sendo os meses de novembro e outubro, agosto e setembro (primavera e inverno) apresentando maior velocidade média. Em relação aos valores máximos de velocidade média do vento, verificou-se que estes ocorreram por volta das 12h para todos os meses analisados. Verificou-se também, para este horário, os menores valores do coeficiente de variação em relação às demais horas do dia.

A direção predominante em todas as estações foi a direção SE (Sudeste) com a ocorrência variando de 48,60 % na Primavera a 35,88 % no Verão, o que coincide com a direção predominante do período total sem considerar as estações climáticas (41,92%).

Em Botucatu foi verificado uma previsibilidade da direção dos ventos que facilita as aplicações que necessitem entender a direção dos ventos.

A porcentagens de condições de velocidade do vento ideais para a pulverização de defensivos agrícolas considerando o intervalo de velocidade entre

0,83 e 2,78 m/s no horário 12 h as 18 h apresentam a melhor porcentagem (>65%) em todos os meses.

Este trabalho é uma pesquisa de base que poderá dar subsídios para estudos futuros de ventos a dois metros e dez metros, tanto na área agrícola, como irrigação, pulverização, conforto térmico, construção civil, geração de energia.

## REFERÊNCIAS

A IGREJA DE JESUS CRISTO DOS SANTOS DOS ÚLTIMOS DIAS. **Ensinaamentos dos Presidentes da Igreja: Heber J. Grant**. São Paulo: Intellectual Reserve, Inc, 2003.

AKAIKE, H. **Information measures and model selection**. Amsterdam: International Statistical Institute, 1983.

CAMPBELL SCI. **CR1000X Measurement and Control Datalogger: Product Manual**. Logan: Campbell, 2021.

CAMPBELL SCI. **HC2S3 Temperature and Relative Humidity Probe: Product Manual**. Logan: Campbell, 2018..

CAMPBELL SCI. **Met One 034B Wind Set: Instruction Manual**. Logan: Campbell, 2017.

CAMPBELL SCI. **TB4, TB4MM, CS700, CS700H : Tipping Bucket Rain Gages: Product Manual**. Logan: Campbell, 2019.

CANDIDO, Daniel Henrique; NUNES, Lucí Hidalgo. Mitologia e cimatologia: um estudo das divindades relacionadas à ocorrência de tempo severo. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s.l.], v. 11, dez. 2012. issn 2237-8642. disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/27788>>. Acesso em: 30 set. 2018.

CASTELHANO, F. J.; ROSEGHINI, W. F. F. Caracterização da dinâmica dos ventos em Curitiba-PR. **Geosp espaço e tempo** (online), [s. L.], v. 22, n. 1, p. 227-240, 2018. Doi: 10.11606/ issn. 2179-0892. Geosp. 2018. 123088. Disponível em: <<https://www.Revistas.Usp.Br/geosp/article/view/123088>>. Acesso em: 20 maio. 2021.

CHAVES FILHO, J. B. **Variabilidade da velocidade do vento a 10 metros para a região nordeste do Brasil**. Campina Grande, 2016. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, 2016.

CHECHETTO, R G. **Potencial de da deriva em função de adjuvantes e pontas de pulverização**. Dissertação (mestrado em energia na Agricultura) Unesp, 2011. Disponível em <<http://www.pg.fca.unesp.br/teses/pdfs/arq0674.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2021.

DANTAS, R. T; SILVA, V.P. R. Estudo da velocidade do vento em Botucatu através da distribuição gama incompleta. In: ENCONTRO LATINOAMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8., 2004, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, SP: UNIVAP, 2004. p. 8-11.

Dutra, R. Energia Eólica: Princípios e Tecnologias. **CRESESB**, Rio de Janeiro 2008. Disponível: <[http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf)>. Acesso em: 20 mai. 2018

JOHNSON, N. L.; KOTZ, S.; BALAKRISHNAN, N. **Continuous univariate distributions**. New York: John Wiley & Sons, 1995.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**, 6th Edition. New Jersey: Prentice-Hall International, 2007.

LEAL, L. R. et al. Análise de Índices de Conforto Térmico Urbano associados às Condições Sinóticas de Vitória ( ES ), Brasil. In: II ENCONTRO NACIONAL SOBRE REABILITAÇÃO URBANA E CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL: DO EDIFÍCIO PARA A ESCALA URBANA, 363-372., 2017, Portugal . **Anais...** Disponível em: <https://lpp.ufes.br/an%c3%a1lise-de-%c3%adndices-de-conforto-t%c3%a9rmico-urbano-associados-%c3%a0s-condi%c3%a7%c3%b5es-sin%c3%b3ticas-de-vit%c3%b3ria-es-brasil>. Acesso em 19 mai. 2021.

LEMOS FILHO, Luis C. A. et al. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, Campina Grande , v. 14, n. 12, p. 1294-1303, Dec. 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662010001200007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010001200007&lng=en&nrm=iso)> Acesso em: 21 mai. 2021.

LIBERATO, Ailton Marcolino. Direção e velocidade do vento em Cuiabá - MT / Brasil. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, Ano 6, Volume 1, 2019, Pamas. **Anais do Contecc 2019** ... Palmas, CONFEA, 2019. Disponível em: <<https://www.confea.org.br/sites/default/files/uploads-imce/contecc2019/agronomia/dire%c3%87%c3%83o%20e%20velocidade%20do%20vento%20em%20cuiaba-mt-brasil.pdf>> Acesso em: 19 abr. 2021.

MORAIS, Giuliana Mairana de et al.. Caracterização da Velocidade e Direção do Vento em Mossoró/RN. 2014. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 7, n. 4, p. 746-754, nov. 2014. ISSN 1984-2295. <Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233257>> . Acesso em: 20 mai. 2021.

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, 30-34, 2008. <Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v23n1/03.pdf>> . Acesso em: 27 ago. 2019

OLIVERA, S. de. Fundamentos de meteorologia e climatologia. Capítulo 8 - Movimentos Atmosféricos .2014. Disponível em: < <https://www.ufrb.edu.br/neas/documento/category/8-cca-035-meteorologia-e-climatologia-agricola?download=45:cap-9-vento>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R **Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. 2014. Disponível em: < URL <http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

ROCHA JUNIOR, Rodrigo Lins da et al . Mudança de Longo Prazo e Regionalização da Evapotranspiração de Referência no Nordeste Brasileiro. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo , v. 35, n. spe, p. 891-902, Dec. 2020 . Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862020000500891&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862020000500891&lng=en&nrm=iso)> . Acesso em: 17 mai. 2021.

Santos, Fábio et al. Análise estatística da velocidade do vento em Petrolina-PE utilizando as distribuições Weibull e a Burr. **Journal of Environmental Analysis and Progress**. 4. 057. 10.2422, 2019. Disponível em: <Journal of Environmental Analysis and Progress. 4. 057. 10.24221/jeap.4.1.2019.2057.057-064.> Acesso em: 20 maio 2021.

SARNIGHAUSEN, Valéria Cristina Rodrigues et al.. Estimativa da evapotranspiração de referência para Botucatu-SP por meio de modelos de regressão. **Revista Brasileira de Climatologia**, São José dos Campos, 2021. Disponível em:< <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14911/7810>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

SCHUBERT, A.N.; DAL PAI, A.; RODRIGUES, S. A. Evolução temporal da velocidade dos ventos a dois metros de altura no município de Botucatu. In: V JORNACITEC, 2016, Botucatu. **Anais ... Botucatu: Fatec Botucatu**, 2016. Disponível em: < <http://www.jornacitec.fatecbt.edu.br/index.php/VJTC/VJTC/paper/viewFile/811/1081> >. Acesso em: 23 jan. 2020.

SCHUBERT, A.N.; DAL PAI, A.; RODRIGUES, S. A. Ajustes de modelos probabilísticos para caracterização da velocidade dos ventos no Município de Botucatu. In: V JORNACITEC, 2016, Botucatu. **Anais ... Botucatu: Fatec Botucatu**, 2016. Disponível em: < <http://www.jornacitec.fatecbt.edu.br/index.php/VJTC/VJTC/paper/viewFile/807/1032> >. Acesso em: 23 jan. 2020.

SCHUBERT, A.N.; DAL PAI, A.; RODRIGUES, S. A. Caracterização sazonal da velocidade média horária do vento a dois metros de altura em Botucatu-SP. In: VI JORNACITEC, 2017, Botucatu. **Anais ... Botucatu: Fatec Botucatu**, 2017. Disponível em: < <http://www.jornacitec.fatecbt.edu.br/index.php/VIJTC/VIJTC/paper/viewFile/1061/1526> >. Acesso em: 23 jan. 2020.

SCHUBERT, A.N.; DAL PAI, A.; RODRIGUES, S. A. Estatística multivariada para avaliação de características do vento em dois períodos. In: VII JORNACITEC, 2018, Botucatu. **Anais ... Botucatu: Fatec Botucatu**, 2018. Disponível em: < <http://www.jornacitec.fatecbt.edu.br/index.php/VIIJTC/VIIJTC/paper/viewFile/1607/1858>>. Acesso em: 17 fev. 2020.

SOUZA DA SILVA JÚNIOR, Oseias et al. Síndromes de dispersão e polinização em uma unidade de conservação na Amazônia. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S.l.], v. 9, n. 2, p. 765-782, jul. 2020. ISSN 2238-8753. Disponível em: <[http://portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao\\_ambiental/article/view/8157](http://portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/8157)>. Acesso em: 17 mai. 2021.

VAREJÃO-SILVA, M, A. Meteorologia e Climatologia. **Esalaq**, Versão digital 2. Recife, Pernambuco: 2006, 449p. .<Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/>

aulas/lce5702/ Meteorologia \_e\_ Climatologia\_ VD2 \_ Mar\_2006.pdf> . Acesso em: 10 ago. 2019.

Vianello, R. L, Alves, A. R.. **Meteorologia básica e Aplicações**. Viçosa: Ed. UFV, 2012.

WMO, World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. **WMO**, No. 8, 5th edition, Geneva, Switzerland, 1983. Disponível em: <[https:// www.wmo.int/ pages/ prog/ gcos/ documents/ gruanmanuals /CIMO/ CIMO\\_ Guide-7th\\_Edition-2008.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf)>. Acesso em: 17 jul. 2019.