

Análise das medições de campo na Serra do Perdigão

Francisco Miguel Matos Mendes

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. José Manuel Laginha Mestre da Palma



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho/2020

Resumo

O objetivo principal desta tese foi a análise das medições dos anemômetros ultrassônicos instalados nas 50 torres meteorológicas da experiência de campo na Serra do Perdigão, denominada “Perdigão 2017”. A intensidade e direção do vento foram medidas com uma taxa de amostragem de 20 Hz a alturas de 10, 20, 30, 60 e 100 metros acima do nível do solo. A Serra do Perdigão, formada por duas colinas paralelas, localiza-se no concelho de Vila Velha de Rodão. O período em estudo corresponde ao IOP (em inglês, *Intensive Observational Period*), de 1 de maio até 15 de junho de 2017.

Numa primeira fase da dissertação foi utilizado o programa MATLAB para obter e organizar os dados de acordo com a localização das torres meteorológicas, altura do anemómetro e direção do vento desejada. Com os dados filtrados e com recurso ao programa de análise estatística espacial GeoDa, analisou-se a dependência espacial da velocidade média do vento; ou seja, em função das torres meteorológicas, altura dos anemómetros e direção do vento. Devido à existência de poucas torres meteorológicas com anemómetros a alturas de 60 e 100 metros, foram feitos diversos estudos estatísticos para complementar estas situações, recorrendo ao programa SPSS.

Os resultados obtidos (distribuição espacial da velocidade média e direção do vento) estão de acordo com estudos prévios. Verificou-se a presença de dependência espacial, concluiu-se que a velocidade aumenta com a altura dos anemómetros e os anemómetros instalados nas torres nas cumeadas têm valores da velocidade do vento superiores e apresentam maior variabilidade quando comparados com os valores dos instalados nas torres no vale.

Abstract

The main objective of this work was the analysis of the measurements of the ultrasonic anemometers, in the 50 meteorological towers of the field experience in the Serra do Perdigão, called “Perdigão 2017”. The intensity and direction of the wind are measured with a sampling rate of 20 Hz at heights of 10, 20, 30, 60 and 100 meters above ground level. Serra do Perdigão, formed by two parallel hills, is in the municipality of Vila Velha de Rodão. The period under study corresponds to the IOP (Intensive Observational Period), from May 1 to June 15, 2017.

In the first phase of the dissertation, the MATLAB program was used to obtain and organize the data according to the location of the meteorological towers, the height of the anemometer and the wind direction used. With the filtered data and with the use of the GeoDa statistical analysis program, was analyzed the spatial dependence of the average wind speed; that is, depending on the weather towers, height of anemometers and wind direction. Due to the presence of a few meteorological towers with anemometers of heights of 60 and 100 meters, several statistical studies were performed to complement these situations following the SPSS program.

The results obtained (spatial distribution of average speed and wind direction) are in accordance with previous studies. It was concluded that the speed increases with the height of the anemometers and the anemometers installed in the towers in the ridge have higher values of wind speed when compared with the values of the towers available in the valley.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grato.

Ao professor José Manuel Laginha Mestre da Palma, pela sua orientação, disponibilidade, conhecimentos que me transmitiu, opiniões e críticas e que tornou possível a concretização e conclusão da dissertação.

À minha mãe, por toda a ajuda e apoio no esclarecimento de dúvidas com o *software* SPSS e que tornou possível a concretização de uma análise estatística rigorosa e com qualidade no SPSS.

Ao colega Pedro Morgado, pela paciência, ajuda, partilha e explicação do *software* usado na tese em MATLAB, que permitiu um arranque inicial na concretização da dissertação.

Aos meus pais e irmã por terem investido na minha educação, por todo o apoio, compreensão e motivação ao longo deste percurso.

Aos meus amigos, José Pedro, Filipe Santos e Gonçalo Silva, entre outros que não menciono o nome, mas que sabem quem são. Amigos que estiveram sempre ao meu lado, pelo companheirismo, força, apoio e motivação em todo o decorrer deste percurso árduo.

Índice de Conteúdos

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento do projeto e motivação	2
1.2 - Descrição mais pormenorizada da Serra e do projeto (Instrumentação no terreno)	2
1.3 - Objetivos da dissertação	5
1.4 - Estrutura da dissertação	5
Capítulo 2 - Metodologia.....	6
2.1 - Recolha e análise dos dados	6
2.2 - Métodos e Técnicas de Análise de Dados	7
2.2.1 - Autocorrelação espacial	8
Capítulo 3 - Análise de resultados e discussão.....	13
3.1 - Condições gerais	13
3.2 - Estudo para altura de anemómetros 10, 20 e 30 m	14
3.2.1 - Análise descritiva dos dados	14
3.2.2 - Análise autocorrelações espaciais	20
3.3 - Estudo para a altura dos anemómetros a 60 m	30
3.3.1 – Análise das autocorrelações espaciais	31
3.3.2 - Relação entre valores médios diários	32
3.4 - Estudo para a altura dos anemómetros a 100 m	36
3.4.1 - Análise autocorrelações espaciais	36
3.4.2 - Relação entre valores médios diárias do período em estudo	38
Capítulo 4 - Conclusões e trabalhos futuros.....	41
4.1 - Conclusões	41
4.2 - Trabalhos futuros	42
Referências	43
ANEXO A: Material de apoio à análise estatística.....	45

Siglas

ANOVA - Análise de Variância

DTU - Universidade Técnica da Dinamarca

EMP - Extensive Measurements Period

EOL - Earth Observation Laboratory

I - Índice de Moran

INEGI - Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

IOP - Intensive Observation Period

ISFS - Integrated Surface Flux System

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MATLAB - MATrix LABoratory

NCAR - National Center for Atmospheric Research

NEWA - New European Wind Atla

RASS - Radio Acoustic Sounding System

SPSS - Statistical Package for the Social Sciences

Índice de Figuras

Figura 1 - Serra do Perdigão.....	2
Figura 2 - Localização dos instrumentos na Serra do Perdigão (Imagem reproduzida de https://perdigao.fe.up.pt/stations)	4
Figura 3 - Localização das 50 torres na Serra do Perdigão	7
Figura 4 - Diferentes casos de autocorrelação (Druck, S. <i>et al.</i> , 2004).....	8
Figura 5 - Teste de pseudo significância (Druck, S. <i>et al.</i> , 2004)	10
Figura 6 - Diagrama de espalhamento de Moran (Druck, S. <i>et al.</i> , 2004).....	10
Figura 7 - Diferentes metodologias para definição de vizinhança (Carrijo, 2015)	11
Figura 8 - Direções do vento	13
Figura 9 - Altura dos anemómetros	14
Figura 10 - Diagrama de extremos e quartis: 47 torres em anemómetros à altura de 10 m	15
Figura 11 - Diagrama de extremos e quartis: 34 torres em anemómetros à altura de 20 m	17
Figura 12 - Diagrama de extremos e quartis: 12 torres em anemómetros à altura de 30 m	18
Figura 13 - Mapas de quantis: (a1) e (a2) altura de 10 metros para uma direção de 45°e 225° respetivamente; (b1) e (b2) altura de 20 metros para uma direção de 45°e 225° respetivamente; (c1) e (c2) corresponde à altura de 30 metros para uma direção 45°e 225° respetivamente	20
Figura 14 - Direção 45°, altura 10 m. Critério de distância mínima.....	21
Figura 15 - Direção 45°, altura 10 m. Diagrama de espalhamento de Moran	21
Figura 16 - Correlograma e tabela: índice de Moran em função da distância.....	22
Figura 17 - Direção 45°, altura 10 m. Critério dos k-vizinhos mais próximos (k=1).....	22
Figura 18 - Direção 45°, altura 10 m. Diagrama de espalhamento de Moran	23
Figura 19 - Correlograma e tabela: índice de Moran em função do número de vizinhos	23
Figura 20 - Direção 45°, altura 20 m. Critério de distância mínima.....	24
Figura 21 - Direção 45°, altura 20 m. Diagrama de espalhamento de Moran	24
Figura 22 - Correlograma e tabela: índice de Moran em função da distância.....	25
Figura 23 - Direção 45°, altura 20 m. Critério dos k- vizinhos mais próximos (k=1).....	25
Figura 24 - Direção 45°, altura 20 m. Diagrama de espalhamento de Moran	25
Figura 25 - Correlograma e tabela: índice de Moran em função do número de vizinhos	26
Figura 26 - Mapa com as coordenadas das torres com alturas de 30 metros em estudo	26
Figura 27 - Direção 45°, altura 10 m, primeiro vizinho mais próximo	27
Figura 28 - Direção 45°, altura 20 m, primeiro vizinho mais próximo	27
Figura 29 - Direção 45°, altura 30 m, primeiro vizinho mais próximo	28
Figura 30 - Direção 225°, altura 10 m, primeiro vizinho mais próximo	28
Figura 31 - Direção 225°, altura 20 m, primeiro vizinho mais próximo	29

Figura 32 - Direção 225°, altura 30 m, primeiro vizinho mais próximo	29
Figura 33 - Torres com anemómetros colocados a 60 metros	30
Figura 34 - Mapa de quantil: altura 60 m, direção 45°	31
Figura 35 - Mapa de quantil: altura 60 m, direção 225°	32
Figura 36 - Registos médios diários dos ventos para a direção 45°	33
Figura 37 - Registos médios diários dos ventos para a direção 225°	35
Figura 38 - Comparações por Método Pairwise	35
Figura 39 - Torres com anemómetros colocados a 100 metros	36
Figura 40 - Mapa de conectividade torres 100 metros	37
Figura 41 - Diagramas de espalhamento: a) direção 45°; b) direção 225°	37
Figura 42 - Valores médios diários da velocidade do vento para a direção de 45°	38
Figura 43 - Valores médios diários da velocidade do vento para a direção de 225°	40

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Média e desvio padrão para as 47 torres à altura de 10 m.....	16
Tabela 2 - Média e desvio padrão para as 34 torres à altura de 20 m.....	16
Tabela 3 - Média e desvio padrão para as 12 torres à altura de 30 m.....	18
Tabela 4 - Índice de Moran em função do número de vizinhos	31
Tabela 5 - Tabela ANOVA (torres 60 metros direção 45°)	33
Tabela 6 - Teste de Tuckey.....	34
Tabela 7- Teste Kolmogorov Smirnov	34
Tabela 8 - Registos médios altura 100 metros.....	36
Tabela 9 - Correlações de Pearson	38
Tabela 10 - Tabela ANOVA (torres 100 metros direção 45°)	39
Tabela 11 - Testes de comparações múltiplas de Tuckey para 45°	39
Tabela 12 - Testes de comparações múltiplas de Tuckey para 225°	40

Índice de Tabelas e Figuras em anexos

Figura A1: Gráfico dos resíduos do modelo da ANOVA para as torres a 100 m, 45°49

Figura A2: Gráfico dos resíduos do modelo da ANOVA para as torres a 100 m, 225°51

Tabela A1: Coeficientes de correlação de Pearson para as torres de altura a 60 metros, direção de 45°45

Tabela A2: Coeficientes de correlação de Pearson para as torres de altura a 60 metros, direção de 225°46

Tabela A3: Teste de Friedman para as torres a 60 metros, direção 225°47

Tabela A4: Testes de comparação múltipla para as torres a 60 metros, direção 225°48

Tabela A5: Testes de Normalidade dos resíduos do modelo da ANOVA para as torres a 100 m, 45°49

Tabela A6: Tabela ANOVA (torres 100 metros direção 225°)50

Tabela A7: Testes de Normalidade dos resíduos do modelo da ANOVA para as torres a 100 m, 225°50

Capítulo 1 - Introdução

O Novo Atlas Europeu do Vento (NEWA) (<https://www.neweuropeanwindatlas.eu/>) foi um projeto que teve como objetivo criar novas metodologias de avaliação e gestão do recurso eólico, e fazer o mapa do vento nos países da União Europeia tendo como base cinco campanhas de medições de campo, em que uma delas teve lugar em Portugal na Serra do Perdigão, no concelho de Vila Velha de Ródão, distrito de Castelo Branco (Mann *et al*, 2017).

O projeto NEWA teve a participação de quatro instituições nacionais: a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), o Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

A Serra de Perdigão, Figura 1, tem características propícias para o estudo realizado; devido à sua orografia de duas cumeadas paralelas e a região plana em redor da Serra ser plana, a aproximação do vento faz-se de uma forma uniforme, que facilita a análise dos resultados. A campanha de medições na Serra do Perdigão ([Perdigão-2017](#)) teve como principal finalidade estudar como uma colina a montante afeta a velocidade média do vento e a turbulência em uma colina a jusante (Fernando, 2019).

Até à data deste projeto na Serra do Perdigão, a avaliação das características do vento com fins energéticos tinha como base o Atlas Europeu do Vento de 1989. O estado do conhecimento em 1989 assentava em experiências de campo dessa época, tal como “The Askervein hill project” (Taylor and Teunissen, 1987) realizado numa ilha ao largo da Escócia. Embora relevante, foi um projeto que não pode ser comparável ao dos dias de hoje. Os procedimentos estabelecidos são hoje insuficientes devido à maior dimensão e potência dos aerogeradores atuais e à sua instalação em terrenos de maior complexidade do que a inicialmente prevista. O projeto na Serra do Perdigão, com equipamento científico e conhecimentos mais atuais, permitiu a recolha de uma base de dados experimentais de grande utilidade em estudos futuros, em que inclui a validação de modelos de modelação computacional do vento sobre regiões montanhosas.

O trabalho realizado no projeto da Serra do Perdigão, apesar de inicialmente estar vocacionado para estudos de energia eólica, alargou-se a outras áreas de conhecimento e aplicações, como por exemplo investigações sobre poluição atmosférica, navegação de *drones* e aeronaves ou estudos de fogos florestais.



Figura 1 - Serra do Perdigão

1.1 - Enquadramento do projeto e motivação

O projeto na Serra do Perdigão decorreu de 15 de dezembro de 2016 a 15 de junho de 2017, foi dividido em dois períodos: *Intensive Observational Period* (IOP), em português, “Período Intensivo de Observação” e *Extensive Measurements Period* (EMP), “Período Extensivo de Medições”, que decorreu entre 15 de dezembro de 2016 e 30 de abril de 2017. É sobre o primeiro período (IOP), com maior número de instrumentos e sensores a funcionar, que decorreu entre 1 de maio e 15 de junho de 2017, que incide o estudo desta dissertação.

O projeto, que representou um marco no campo da energia eólica e micrometeorologia (PerdigaoNature, 2017), foi possível graças a um consórcio de instituições europeias e americanas. A importância do projeto é ainda refletida não só na quantidade do equipamento científico usado, mas também no grande número de investigadores europeus e norte-americanos que participaram e apoiaram o projeto.

Todo o conhecimento que se retira do projeto da serra portuguesa, constituirá uma ferramenta importante para os investidores que estudam a localização de novos parques eólicos. Os dados obtidos em Perdigão permitirão avaliar, testar e aperfeiçoar os modelos que estão na base destas escolhas. Contribuir para o incremento deste conhecimento e desenvolvimento de futuros modelos é sem dúvida uma mais valia.

1.2 - Descrição mais pormenorizada da Serra e do projeto (Instrumentação no terreno)

A orografia da Serra, com duas cumeadas paralelas, praticamente da mesma altura, com o Vale do Cobrão pelo meio, são condições ideais para o estudo do escoamento do vento. O vale apresenta um comprimento de cerca de 6 quilómetros e largura de 2 quilómetros, terreno irregular e complexo com vegetação. O estudo do escoamento no vale permite uma melhor

análise e compreensão da forma como o escoamento do vento ocorre em qualquer vale, imerso em zona de escoamento separado.

A orografia do terreno e o clima têm uma influência relevante na velocidade média do vento e outras propriedades. Um estudo prévio foi realizado para determinar a localização das torres, nas quais foram colocados sensores para medições de vários parâmetros de interesse, e outros instrumentos de medição de modo a se recolherem dados com qualidade.

Os instrumentos instalados (Figura 2) foram os seguintes:

- 50 torres meteorológicas (10, 30, 60 e 100 m de altura), com sensores de temperatura, humidade, barómetros, anemómetros ultrassónicos para medir a velocidade e direcção do vento, ...
- 22 instrumentos que estudam, usando a técnica laser, a flutuação do vento em pequena escala e a três dimensões.
- 2 radares, 3 Radio Acoustic Sounding System (RASS) e balões climáticos.

Para a concretização deste projeto, a Serra do Perdigão foi eletrificada.

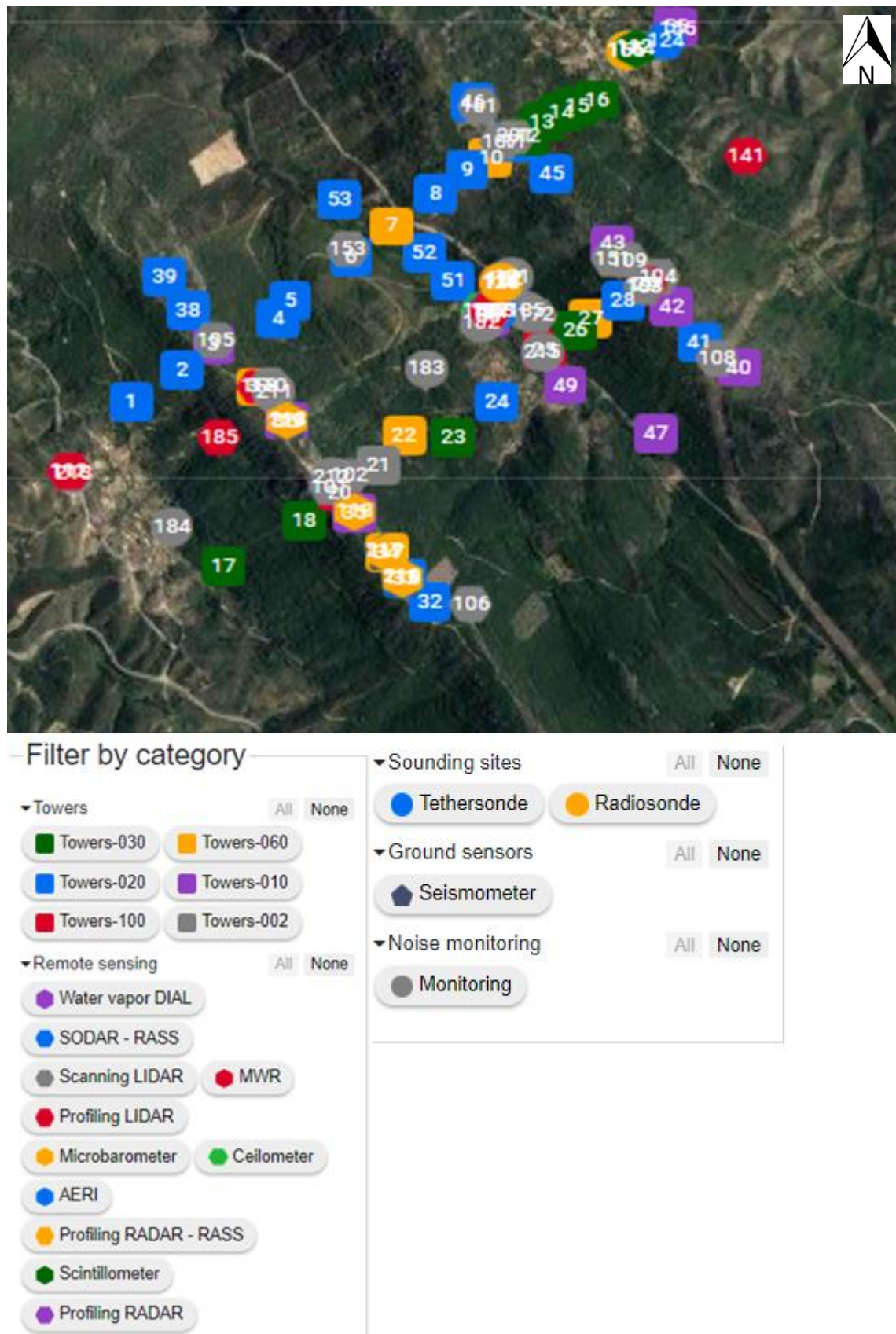


Figura 2 - Localização dos instrumentos na Serra do Perdigão (Imagem reproduzida de <https://perdigao.fe.up.pt/stations>)

1.3 - Objetivos da dissertação

Este trabalho visa complementar trabalhos já efetuados de análise de resultados de uma das maiores e inovadora experiência de recolha de informação de registos de vento que ocorreu na experiência de campo da Serra do Perdigão. Serão analisados registos diários da velocidade do vento a fim de analisar a variação espacial da velocidade média do vento consoante a direção do vento e altura dos anemómetros.

Identificar associações entre valores de acordo com o posicionamento geográfico de cada torre meteorológica, estudar a influência dos valores da velocidade do vento associados a uma determinada localização e reforçar a intensidade dessa influência em torres de localização vizinhas são também objetos de análise. Envolve, pois, uma análise de dados espaciais, recorrendo ao conceito de autocorrelação espacial, sendo a definição de vizinhança um critério essencial neste tipo de abordagem. É efetuado um estudo relativo a diferentes conceitos de vizinhança, abordando os critérios de vizinhança mais recomendados na literatura (Getis e Aldstadt, 2004) de modo a obter uma análise mais detalhada da dependência espacial e a incrementar a compreensão do comportamento do vento neste tipo de terrenos, vulgar na nossa crosta terrestre.

Este estudo, que incidiu na análise da variação espacial da velocidade horizontal; ou seja, o módulo das componentes da velocidade nos eixos x, y e z, visa complementar a análise e trabalhos anteriormente desenvolvidos nesta área (Morgado, 2020) e, por isso, ajudar a tecnologia eólica melhorando o conhecimento do comportamento dos ventos que pode ser útil na compreensão de fenómenos relacionados com a poluição atmosférica, navegação de drones e aeronaves, fogos florestais entre outros.

1.4 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em 4 capítulos. O capítulo 2 descreve os métodos e o trabalho prévio de estudo. No capítulo 3 apresentam-se os resultados e a análise dos dados com as devidas discussões. O capítulo 4 diz respeito às conclusões e possíveis trabalhos futuros. Nos anexos apresentam-se tabelas referentes a testes estatísticos que complementam os estudos estatísticos apresentados.

Capítulo 2 - Metodologia

Este capítulo incide na apresentação da metodologia de recolha dos dados, e técnicas e procedimentos usados no tratamento dos dados. A secção 2.1 aborda os métodos e meios para recolher os dados, aos programas e softwares usados ao longo da análise e são identificadas e caracterizadas as torres onde foram colocados os sensores que permitiram a recolha de informação. O capítulo conclui-se com a secção 2.2, com as técnicas estatísticas de análise com dados que são espacialmente arrançados dando especial atenção à correlação espacial (também designada por autocorrelação espacial), da variável de interesse existente entre as unidades amostrais vizinhas.

2.1 - Recolha e análise dos dados

O software NIDAS do National Center for Atmospheric Research (NCAR) (https://www.eol.ucar.edu/software_center/nidas) foi usado para recolher os dados em tempo real dos instrumentos de medição instalados nas torres na Serra do Perdigão. Estes dados estão arquivados nos três repositórios seguintes:

- Universidade do Porto (UPORTO; Portugal)
UPORTO (<http://perdigao.fe.up.pt/>)
- Earth Observation Laboratory (EOL; Estados Unidos)
UCAR (https://www.eol.ucar.edu/field_projects/Perdigao)
- Universidade Técnica da Dinamarca (DTU; Dinamarca)
EU (<https://www.neweuropeanwindatlas.eu/>)

Nestes arquivos temos acesso aos resultados das medições para cada dia do IOP.

Para aceder aos dados, no formato NetCFD, foi utilizado o programa desenvolvido em MATLAB por Pedro Morgado (Morgado, 2020). São dados com qualidade controlada e valores médios de 5 minutos, recolhidos a uma taxa de amostragem de 20 Hz; ou seja, 288 medições por dia. O programa permite que de entre as 288 medições da velocidade do vento, sejam selecionadas as que cumprem a direção do vento escolhida. Posteriormente, irá ser feita a média da velocidade horizontal do vento para cada dia. São estes valores médios que iremos analisar. O programa permite ainda saber quantos registos foram aproveitados para cada dia e torre, consoante a altura do anemómetro e a direção do vento.

Neste trabalho serão avaliados ventos de Nordeste (NE) e Sudoeste (SO), direções de 45° e 225°.

Para a análise de dados, exploração de padrões espaciais e cálculo da autocorrelação espacial usou-se o *GeoDa* (<https://geodacenter.github.io/>), software livre e de código aberto para análise de dados espaciais, geo-visualização, autocorrelação espacial e modelação espacial. Para um estudo estatístico mais aprofundada de modo a complementar a autocorrelação espacial, usou-se o *IBM SPSS Statistics*, V.24 (<https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-spss-statistics-24>).

Uma vez que o nosso estudo incide na análise da associação espacial, há interesse em utilizar o maior número de torres possíveis para determinação mais completa da autocorrelação espacial. Neste sentido, numa primeira fase, irá fazer-se um estudo envolvendo 50 torres. Iremos analisar os dados existentes, para cada uma das direções de vento, para três alturas dos anemómetros, verificar as medições que foram retiradas (se houver) e fazer um estudo desses dados espacialmente. Posteriormente, iremos fazer uma análise para um conjunto mais restrito de torres.

A Figura 3 mostra o posicionamento das 50 torres na Serra do Perdigão que serão alvo de análise neste trabalho.



Figura 3 - Localização das 50 torres na Serra do Perdigão

2.2 - Métodos e Técnicas de Análise de Dados

A análise de dados será feita através de técnicas de inferência estatística univariada e multivariada. Na Análise de Variância (ANOVA), por se tratar de observações relacionadas, recorreu-se à ANOVA fatorial quando as condições de aplicabilidade eram verificadas (normalidade dos resíduos e variância constante). A alternativa não paramétrica, teste de

Friedman, foi usada na impossibilidade de usar a ANOVA. Na inferência estatística foi considerado estatisticamente significativo um valor de $p \leq 0,05$.

2.2.1 - Autocorrelação espacial

De acordo com Waldo Tobler, a primeira lei da geografia é que:

“No mundo, todas as coisas se parecem; mas coisas mais próximas são mais parecidas que aquelas mais distantes” (Waldo Tobler, 1970)

A autocorrelação espacial é uma ferramenta de medição da semelhança entre observações ou medições próximas no espaço. De forma a entender melhor o conceito de autocorrelação espacial, é importante abordar em primeiro lugar o conceito de autocorrelação temporal. Se medirmos uma propriedade do mesmo objeto ao longo do tempo, é provável que duas observações próximas no tempo tenham valores semelhantes. Para medir o seu grau de associação ao longo do tempo, podemos então calcular a correlação de cada observação com a observação imediatamente anterior, ou a anterior da anterior e assim sucessivamente, andando para trás no tempo.

O conceito de autocorrelação espacial é uma extensão da autocorrelação temporal. O tempo, sendo unidimensional, só segue uma direção. Objetos espaciais têm pelo menos duas dimensões e formas complexas e pode, por vezes, não ser óbvio determinar o que está próximo. As medidas de autocorrelação vão ser o segundo grau em que as observações são semelhantes entre si dependendo dos locais espaciais (no nosso caso vão ser pontos, as torres).

Dentro da autocorrelação espacial podemos dividir os diferentes tipos de casos, já adaptados ao nosso estudo, da seguinte maneira (Druck, S. *et al.*, 2004):

- Autocorrelação positiva (Lei de Tobler) – torres similares em localização também são similares nos valores obtidos.
- Autocorrelação negativa (oposição à Lei de Tobler) – torres similares em localização tendem a ter valores menos semelhantes do que torres mais distantes.
- Ausência de autocorrelação – quando valores são independentes da localização.

A Figura 4 ilustra os casos de autocorrelação existentes.

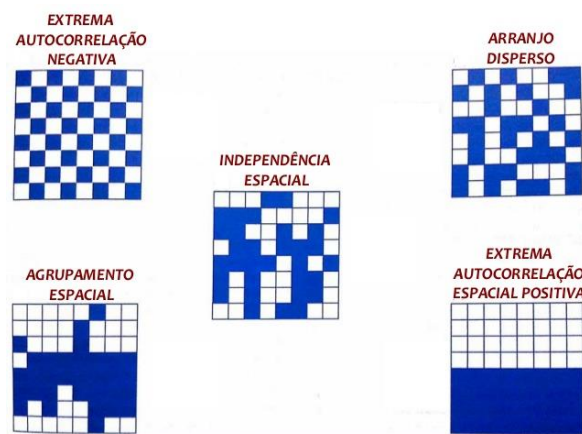


Figura 4 - Diferentes casos de autocorrelação (Druck, S. *et al.*, 2004)

Podemos dividir os índices de autocorrelação espacial em dois tipos:

1. Índices globais de associação espacial - apresenta um único valor para toda a área analisada – índice de Moran (I) ou índice de Geary
2. Índices locais de associação espacial – decomposições dos índices globais e podem ser visualizados na forma de mapas – índice local de Moran (Ii)

Para analisar a autocorrelação espacial escolheu-se um método que é muito usado, conhecido por índice de Moran, descrito abaixo. Não apresentamos a análise dos índices locais de associação espacial, porque estes índices são usados para casos em que a área em estudo está subdividida em subáreas contíguas. (Anselin, 1995). O nosso estudo incide sobre a análise da relação espacial das torres implantadas na serra que têm localização fixa, o que nos leva a trabalhar com pontos fixos da área em estudo e não com subáreas.

Índice global de Moran

O índice de Moran (I) é a medida estatística mais frequentemente usada na medição da autocorrelação espacial. Baseia-se no produto dos desvios em relação à média e funciona como medida global da autocorrelação espacial, indicando a associação espacial dos dados consoante a sua localização. O índice de Moran é definido por:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}$$

em que n é o número de observações (locais), z_i o valor do atributo considerado no local i , $\bar{z}$ o valor médio do atributo na região de estudo e w_{ij} os elementos da matriz de proximidade espacial. No caso de $I = 0$ há ausência de autocorrelação. Valores positivos (entre 0 e 1) representam autocorrelação positiva e valores negativos (entre -1 e 0) representam autocorrelação negativa.

Após calculado o índice de Moran, é importante verificar a sua validade estatística; ou seja, verificar se os valores medidos representam correlação espacial estatisticamente significativa. Deste modo, para estimar a significância do índice é necessário realizar ao índice de Moran um teste de pseudo-significância, no qual se testa a hipótese nula de inexistência de autocorrelação espacial; isto é, independência espacial.

No caso aplicado ao nosso estudo, no teste de pseudo-significância são geradas permutações diferentes dos valores da velocidade média do vento associados às torres em que cada permutação produz um novo arranjo espacial. Como apenas um dos arranjos corresponde à situação observada, pode construir-se uma distribuição empírica de I . Faremos isto 999 vezes mais o valor do índice de Moran sobre os dados observados. Com estes 1000 valores construiremos uma distribuição do índice, e se o valor do índice medido originalmente corresponder a um extremo na distribuição, então trata-se de um valor com significância estatística que permite rejeitar a hipótese em teste. A Figura 5 resume o conceito do teste de pseudo-significância.

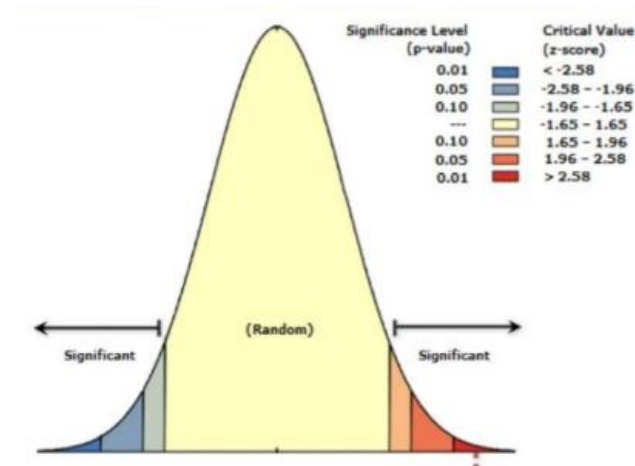


Figura 5 - Teste de pseudo significância (Druck, S. *et al.*, 2004)

Diagrama de espalhamento de Moran

O diagrama de espalhamento de Moran (Figura 6) é uma representação gráfica da dependência espacial. É um diagrama bidimensional baseado nos valores padronizados da velocidade do vento (z) com os valores médios dos seus vizinhos (wz). O diagrama é dividido em quatro quadrantes (Druck, S. *et al.*, 2004), função de z e wz :

- Q1 (Valores positivos z , médias positivas wz) e Q2 (Valores negativos z , médias negativas wz) - Torres com associação espacial positiva uma vez que possuem vizinhos com valores semelhantes.
- Q3 (Valores positivos z , médias negativas wz) e Q4 (Valores negativos z , médias positivas wz) - Torres com associação espacial negativa uma vez que possuem vizinhos com valores distintos.

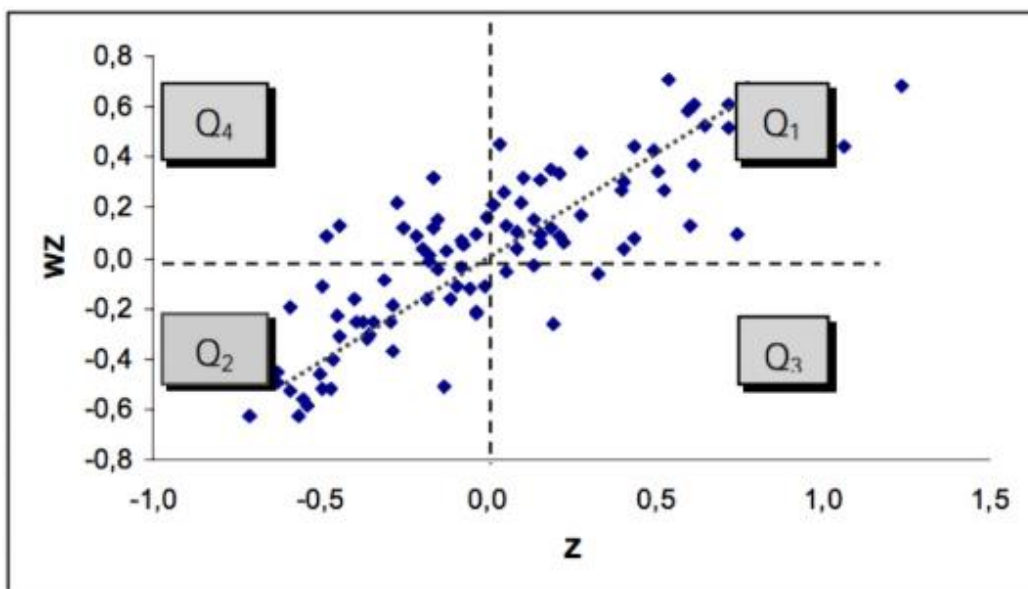


Figura 6 - Diagrama de espalhamento de Moran (Druck, S. *et al.*, 2004)

Matriz de proximidade

O cálculo do índice de Moran é fortemente influenciado pela matriz de vizinhança $[W]$, cujos elementos w_{ij} tomam valor 1 caso o local i seja vizinho de local j , e zero caso contrário.

Inicialmente, na sua forma original, o índice de Moran não apresentava uma matriz de proximidade na equação. Esta matriz, introduzida por Dacey (1968) e Cliff (1969), exprime a dependência espacial entre as torres e, por isso, a escolha de como definir os valores de W deve ser feita com rigor para evitar uma autocorrelação errada. (Arora e Brown, 1977; Anselin, 1995; Griffith, 2003).

A proximidade entre as regiões é identificada usando uma matriz de proximidade $W = w_{ij}$. Segundo Getis e Aldstadt, 2004, existem pelo menos doze metodologias para definir W , divididas de acordo com metodologias usando matriz binária e metodologias com matriz de distância.

Vizinhança definida através de uma matriz binária

Para definir quem é vizinho de quem, existem três metodologias frequentemente usadas: Rook, Queen e Bishop, ilustradas na Figura 7. A metodologia Rook procura os vizinhos por colunas e linhas da estrutura; a metodologia Queen procura ao longo de colunas, linhas e ainda nas diagonais; e a metodologia Bishop procura vizinhos apenas nas diagonais. (Cliff e Ord, 1981).

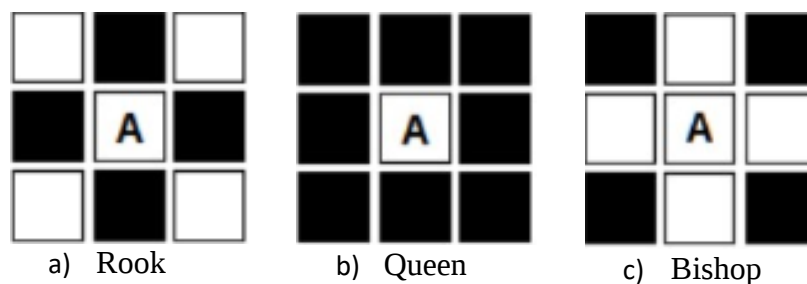


Figura 7 - Diferentes metodologias para definição de vizinhança (Carrijo, 2015)

Uma vez definida a metodologia de definição de vizinho é construída a matriz de vizinhança, sendo $w_{ij} = 1$ se i for vizinho de j e $w_{ij} = 0$ caso contrário. w_{ii} é sempre igual a 0 uma vez que uma região não pode ser vizinha de ela mesma.

Qualquer uma das metodologias é indicada para situações em que a área em estudo está dividida em subáreas. O nosso estudo não se enquadra nesta situação, porque temos apenas informação da localização onde estão implantadas as torres, o que nos leva a trabalhar com pontos bem definidos e isolados, sem qualquer partição da Serra do Perdigão em subáreas.

Poderíamos afetar a cada torre uma área de influência de modo a dividir a serra em subáreas de influência. Esta abordagem introduziria nova variável que seria a definição dessas subáreas, pelo que foi abandonada.

Vizinhança definida através de uma matriz de distância

A matriz de proximidades é definida através de $w_{ij} = g(d_{ij})$ em que $g(\cdot)$ é uma função qualquer e d_{ij} é a distância entre os centros das nossas regiões, no nosso caso as torres. As metodologias mais comuns para definir quem é vizinho de quem são: distância Max-Min e K-vizinhos mais próximos.

Distância Max-Min

Para cada ponto de interesse (torre) define-se a menor distância de forma a que tenha apenas um vizinho. Para garantir que cada torre tenha pelo menos um vizinho, escolhe-se a maior das distâncias vizinhas mais próximas: a designada *distância crítica*. No entanto, e dependendo do conjunto de dados, este critério de Máx-Min pode levar a muitos vizinhos porque a distância crítica é determinada pelos pontos mais distantes. Esse problema é frequente quando a densidade dos pontos é desigual; por exemplo, quando alguns dos pontos estão agrupados e outros espalhados. Nesse caso devemos usar outro método alternativo.

Define-se matriz de vizinhança para a distância δ de modo análogo às metodologias acima apresentadas, sendo $w_{ij} = 1$ quando $d_{ij} \leq \delta$ e $w_{ij} = 0$ caso contrário, onde δ é um valor fixo definido superior ou igual à distância crítica. Fazendo variar a distância tendo como limite inferior a maior das menores distâncias, podem construir-se matrizes de vizinhança diferentes.

K - vizinhos mais próximos

Tal como o nome sugere, neste caso, a matriz de vizinhança pode ser definida encontrando os k vizinhos mais próximos, sendo k um valor a definir. Esta definição de matriz de vizinhança evita o problema da existência de pontos (torres) isoladas sem vizinhos. Face ao critério anterior, tem a vantagem de melhor se controlar o número de vizinhos a considerar.

Para esclarecer melhor este tipo de vizinhança podemos dar o seguinte exemplo. O facto de B ser o vizinho mais próximo de A não implica que A seja o vizinho mais próximo de B; pode haver outro ponto C que seja mais próximo de B que A. No critério Max-Min seriam vizinhos de B, os pontos A e C; neste critério poderá não ser, se se optar pela escolha do vizinho mais próximo. Tal como no critério anterior podemos fazer variar o número de vizinhos a considerar (k) e obter diferentes matrizes de vizinhança.

Uma desvantagem do método de k vizinhos mais próximos é ignorar as distâncias envolvidas e contabilizar apenas o número de vizinhos predefinido independentemente da distância a que estejam.

Capítulo 3 - Análise de resultados e discussão

Após apresentar as ferramentas e os procedimentos utilizados para a análise de dados, os resultados obtidos vão ser apresentados e discutidos neste capítulo.

3.1 - Condições gerais

Para o nosso estudo iremos analisar as medições da velocidade do vento, valores em metros por segundo, consoante as alturas dos anemómetros e consoante as duas direcções do vento que descreverei em detalhe na próxima secção.

À semelhança de Morgado (2020), os ventos perpendiculares às colinas são definidos num intervalo de $12,5^\circ$, Figura 8.

- Ventos nordeste (NE) - $45^\circ \pm 12,5^\circ$
- Ventos sudoeste (SO) - $225^\circ \pm 12,5^\circ$



Figura 8 - Direcções do vento

Para cada uma das direcções foram usadas três alturas dos anemómetros: 10, 20 e 30 m, Figura 9. A escolha destas alturas deveu-se ao facto de serem as mais frequentes e as que abrangiam o maior número de torres. Por exemplo, as alturas de 10, 20 e 30 metros abrangiam 47, 34 e 12 torres, respetivamente.

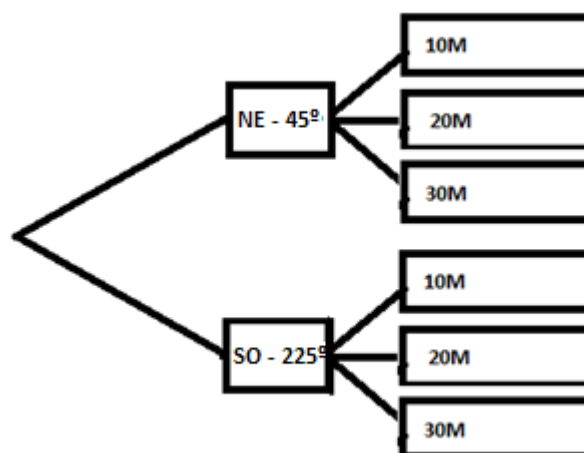


Figura 9 - Altura dos anemômetros

No entanto, para estas alturas, a rugosidade no terreno pode ter afetado os valores das medições efetuadas. Neste sentido, completamos este trabalho englobando também as torres com anemômetros a 60 e 100 metros acima do nível do solo, a que correspondem 9 e 3 registros apenas.

3.2 - Estudo para altura de anemômetros 10, 20 e 30 m

Começamos por apresentar uma análise descritiva e exploratória dos dados, comparando para as 3 alturas dos anemômetros, os valores registados para as duas direções de vento. Na secção 3.2.2 abordam-se os resultados da análise de dependência espacial, começando por apresentar os resultados que levaram à escolha do critério de seleção dos pesos para a matriz de vizinhança, seguindo-se a apresentação de resultados para todos os cenários.

3.2.1 - Análise descritiva dos dados

O registo diário da velocidade do vento mostra a variabilidade e a tendência dos valores observados. Por exemplo, observem-se as Figura 10, 11 e 12 com os diagramas de extremos e quartis para as alturas de 10, 20 e 30 metros e as Tabela 1, 2 e 3 com os valores médios e desvios padrão.

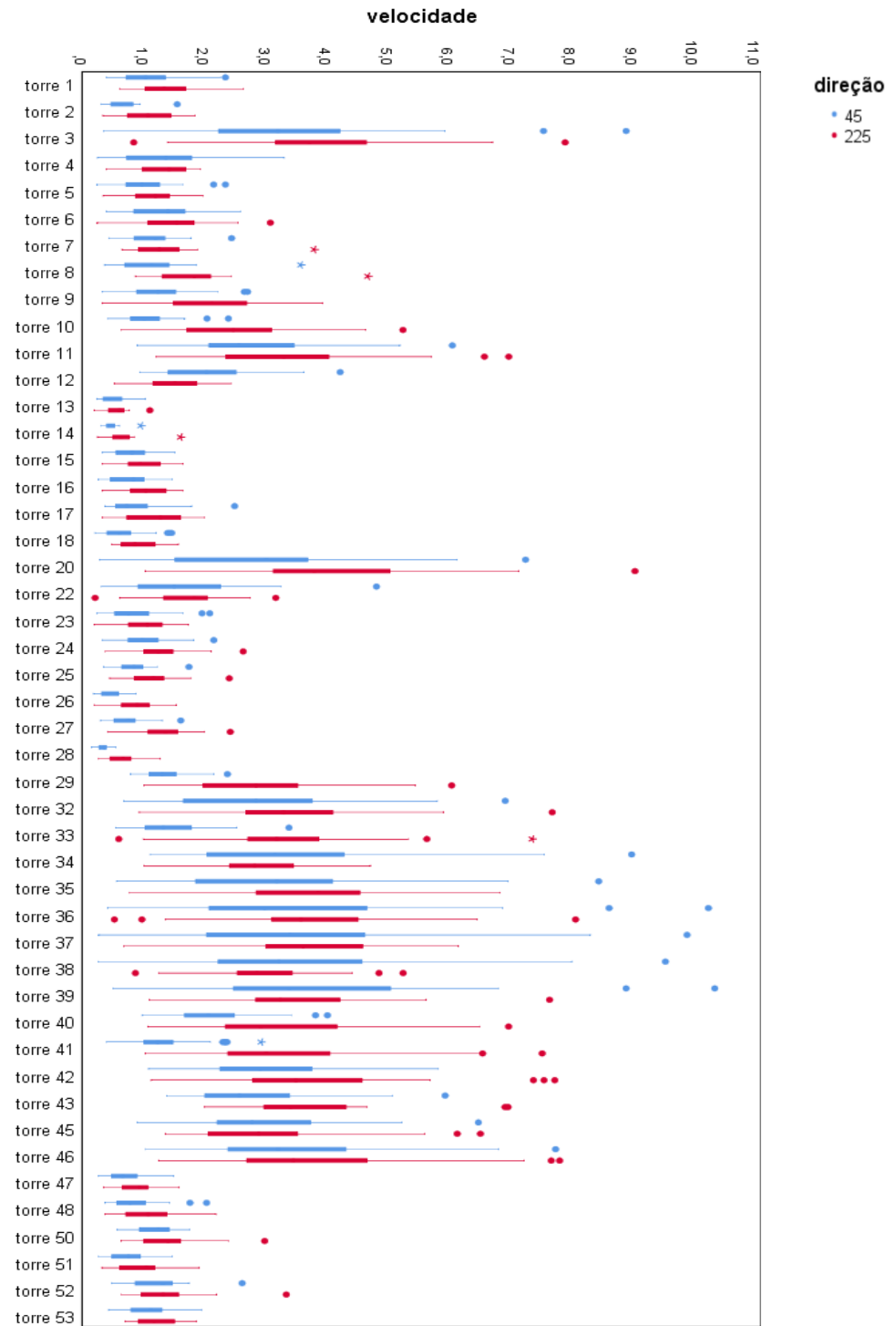


Figura 10 - Diagrama de extremos e quartis: 47 torres em anemômetros à altura de 10 m

Tabela 1 - Média e desvio padrão para as 47 torres à altura de 10 m

	torre 1	torre 2	torre 3	torre 4	torre 5	torre 6	torre 7	torre 8	torre 9	torre 10	torre 11	
Média	1,24	0,89	3,71	1,34	1,10	1,40	1,24	1,52	1,71	1,82	3,14	
Desvio Padrão	0,48	0,42	1,63	0,64	0,43	0,59	0,50	0,75	0,82	1,06	1,28	
	torre 12	torre 13	torre 14	torre 15	torre 16	torre 17	torre 18	torre 20	torre 22	torre 23	torre 24	torre 25
Média	1,83	0,54	0,57	0,89	0,91	1,05	0,80	3,53	1,69	0,95	1,15	0,98
Desvio Padrão	0,77	0,21	0,22	0,36	0,38	0,51	0,34	1,76	0,78	0,43	0,43	0,35
	torre 26	torre 27	torre 28	torre 29	torre 32	torre 33	torre 34	torre 35	torre 36	torre 37	torre 38	torre 39
Média	0,67	1,04	0,51	2,19	3,15	2,42	3,11	3,51	3,72	3,69	3,28	3,72
Desvio Padrão	0,32	0,47	0,24	1,21	1,49	1,41	1,41	1,55	1,84	1,70	1,56	1,78
	torre 40	torre 41	torre 42	torre 43	torre 45	torre 46	torre 47	torre 48	torre 50	torre 51	torre 52	torre 53
Média	2,77	2,44	3,43	3,30	3,01	3,67	0,79	0,97	1,30	0,86	1,31	1,18
Desvio Padrão	1,27	1,58	1,41	1,26	1,21	1,62	0,30	0,41	0,41	0,34	0,48	0,38

Tabela 2 - Média e desvio padrão para as 34 torres à altura de 20 m

	torre 1	torre 2	torre 4	torre 5	torre 6	torre 7	torre 8	torre 10	torre 11	torre 12	torre 13	
Média Desvio Padrão	1,70	1,54	1,73	1,50	1,57	1,67	1,73	2,33	3,69	2,57	1,65	
	0,78	0,77	0,84	0,65	0,68	0,63	0,87	1,17	1,63	0,94	0,64	
	torre 14	torre 15	torre 16	torre 20	torre 22	torre 23	torre 24	torre 25	torre 27	torre 28	torre 29	
Média Desvio Padrão	1,44	1,48	1,45	4,08	1,86	1,36	1,65	1,58	1,51	1,89	3,41	
	0,62	0,70	0,69	2,05	0,87	0,65	0,65	0,57	0,68	1,05	1,45	
	torre 32	torre 33	torre 34	torre 37	torre 38	torre 39	torre 41	torre 45	torre 46	torre 51	torre 52	torre 53
Média Desvio Padrão	3,97	3,97	3,92	4,02	3,97	3,92	3,73	3,64	3,94	1,66	1,55	1,50
	1,96	1,94	1,76	1,91	1,88	1,88	1,60	1,56	1,76	0,56	0,50	0,45

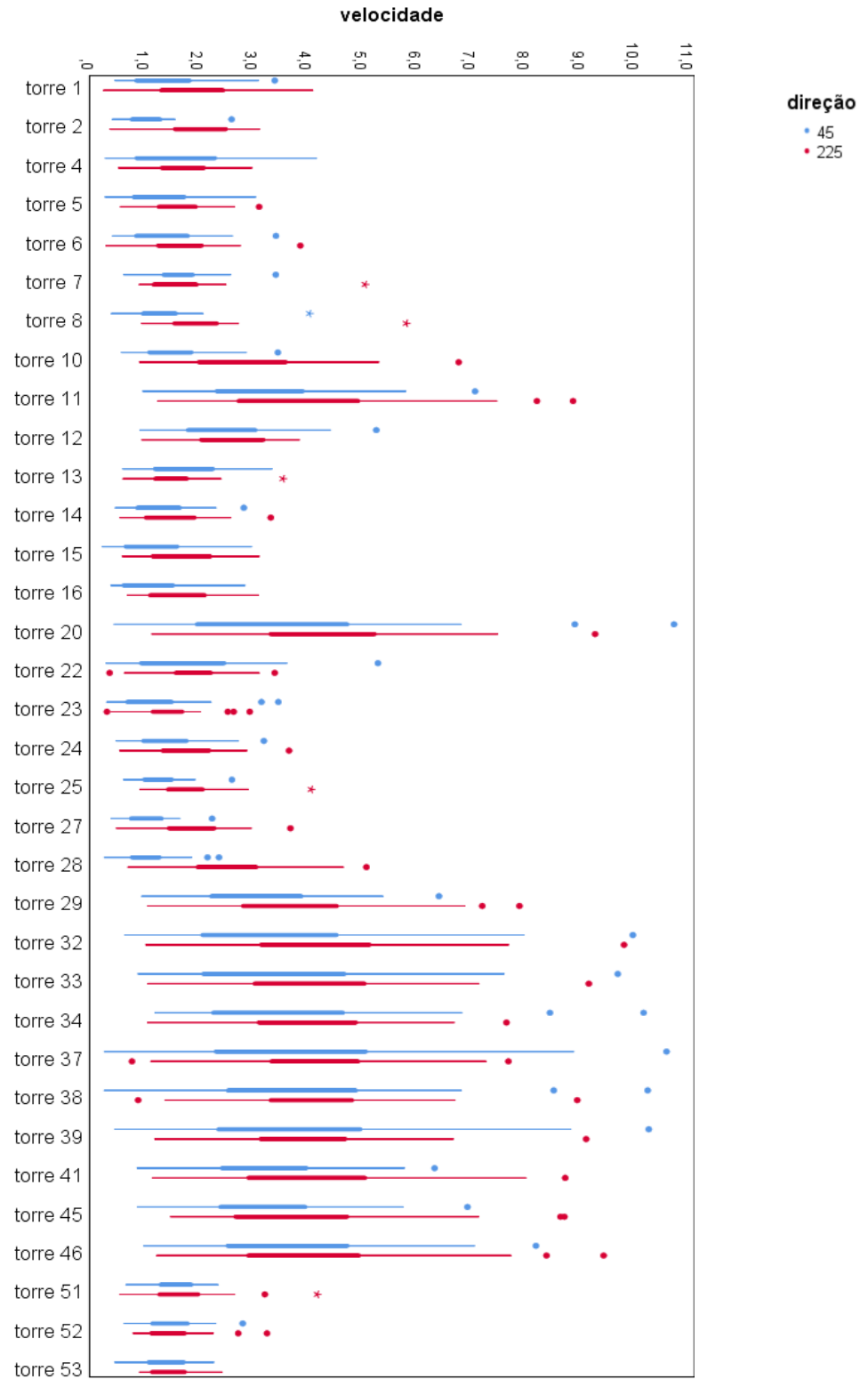


Figura 11 - Diagrama de extremos e quartis: 34 torres em anemômetros à altura de 20 m

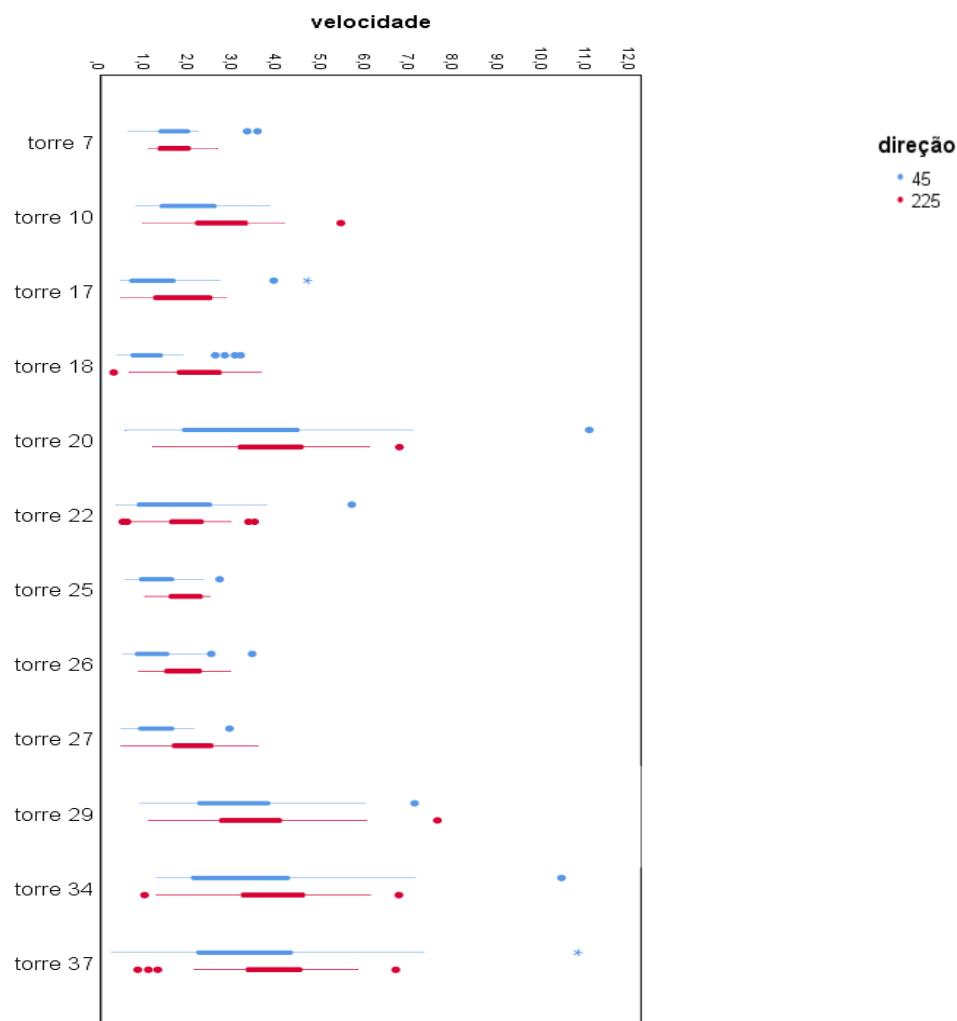


Figura 12 - Diagrama de extremos e quartis: 12 torres em anemômetros à altura de 30 m

Tabela 3 - Média e desvio padrão para as 12 torres à altura de 30 m

	torre 7	torre 10	torre 17	torre 18	torre 20	torre 22	torre 25	torre 26	torre 27	torre 29	torre 34	torre 37
Média	1,70	2,42	1,61	1,72	3,59	1,84	1,61	1,59	1,68	3,35	3,62	3,65
Desvio Padrão	0,55	0,95	0,90	0,90	1,80	0,99	0,55	0,67	0,74	1,39	1,70	1,78

A comparação dos registos das duas direções, representadas nos diagramas de extremos e quartis, permitem concluir que se obtêm os valores superiores da velocidade do vento para a direção 225°.

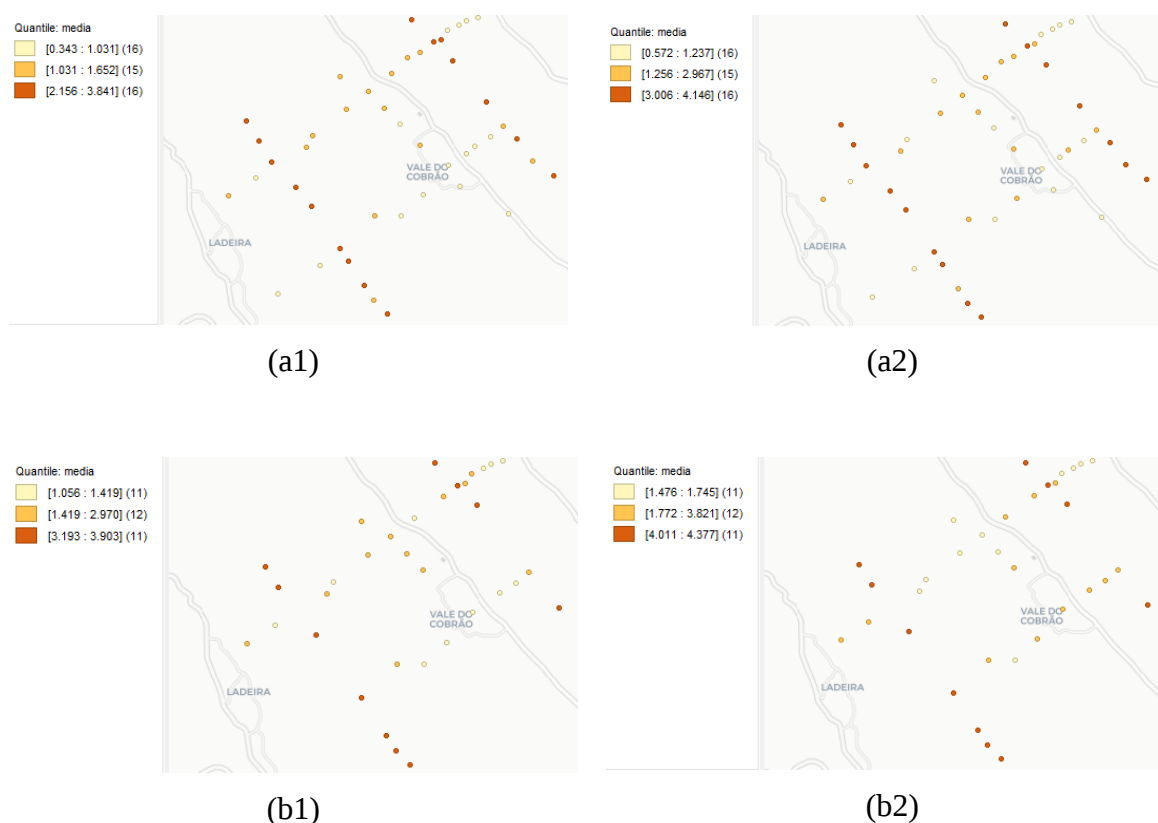
Observa-se diferença na variabilidade dos registos, sendo que são as torres com valores superiores de velocidade que apresentam maior variabilidade dos valores. Tal pode-se concluir pela observação dos gráficos de extremos e quartis através da amplitude total (diferença entre os extremos) e amplitude ou intervalo interquartil (representados pela caixa central) que

quantificam a variabilidade dos registos (Figura 10 e Figura 11). De um modo geral, as torres 13, 14, 15, 16, 23, 24, 25, 51, 52, 53 apresentam valores com menor variabilidade quando comparados com os das torres 11, 20, 29, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 41, 45, 46 (torres que apresentam maiores valores de velocidade). As Tabelas 1, Tabela 2 e Tabela 3 complementam este estudo apresentando as médias e os desvios padrões dos registos diários de cada torre. O desvio padrão é uma medida de variabilidade que mede os desvios em relação à média, complementando assim as medidas observáveis nos gráficos de extremos e quartis. A azul escuro anotámos os valores com registos médios acima das 3 unidades e azul claro os valores inferiores a 1 unidade. Mais uma vez observa-se que são as torres com maiores valores médios que apresentam maiores dispersão de valores (desvio padrão com valores superiores a 1,3) quando comparadas com as torres com menores valores médios (desvios padrões com valores inferiores a 1).

A localização destas torres é apresentada na Figura 3.

Mapas de quantis

A Figura 13 mostra os mapas de quantis que agrupam as torres em 3 grupos por ordem crescente de velocidade média dos 46 dias.



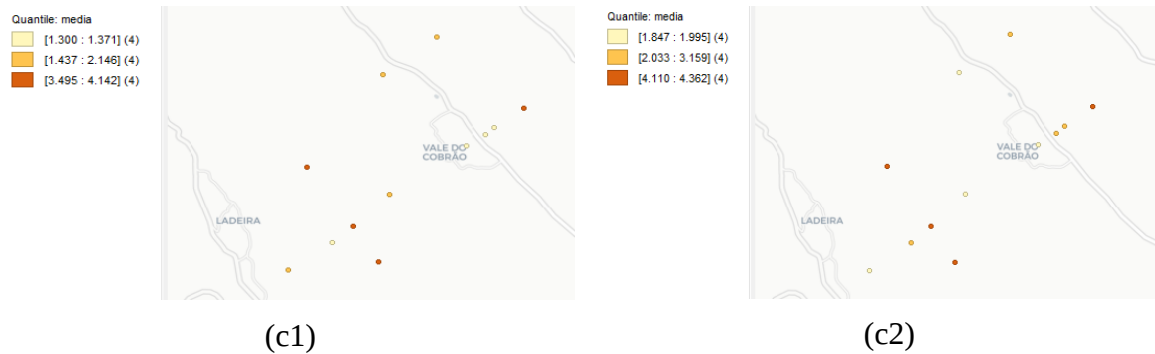


Figura 13 - Mapas de quantis: (a1) e (a2) altura de 10 metros para uma direção de 45°e 225° respectivamente; (b1) e (b2) altura de 20 metros para uma direção de 45°e 225° respectivamente; (c1) e (c2) corresponde à altura de 30 metros para uma direção 45°e 225° respectivamente

À medida que a altura aumenta, há um menor número de torres com registros e consequentemente menos medições, tornando a análise menos relevante. Para as medições de 10 e 20 metros verificamos que as torres com registros de velocidade do vento mais elevadas são as localizadas nas colinas e as que apresentam menor velocidade do vento são as torres no vale e fora das colinas. Por outro lado, comparando os valores das legendas dos mapas da Figura 13, à medida que a altura dos anemômetros aumenta, a velocidade do vento vai aumentar também, como seria esperado.

3.2.2 - Análise autocorrelações espaciais

Para analisar a dependência espacial dos ventos médios das torres localizadas na Serra do Perdigão, foi necessário definir o critério de vizinhança para quantificação dos pesos a usar no índice de Moran. Para tal usamos as duas metodologias: Max-Min em que os vizinhos foram determinados de acordo com a distância, e K-vizinhos mais próximo, em função do número de vizinhos mais próximos. Aquela que melhor identificou a dependência espacial foi a adotada.

Altura dos anemômetros e critério de vizinhança a adotar

Fez-se uma análise para as alturas dos anemômetros com mais registros (10 metros e 20 metros) usando os dois critérios de definição de vizinho, para averiguar qual o critério que melhor identifica a autocorrelação espacial: o critério da distância Max-Min e o critério dos K-vizinhos mais próximos. No primeiro critério iremos apresentar os valores de índice de Moran para a menor distância que garanta que todas as torres tenham uma torre vizinha (distância Max-Min) seguindo-se um estudo em que essa distância será aumentada. No segundo critério vamos fazer algo análogo ao critério das distâncias, iniciando pelo critério que garanta que cada torre tenha um vizinho, e complementa-se com o estudo de 2, 3, 4...vizinhos.

Temos de ter em atenção que à medida que aumentamos a altura, o número de torres com medições diminui. Não tem grande interesse ter poucas medições. Iremos, portanto, tentar encontrar um equilíbrio.

- **Altura 10 metros**

Da observação das Figura 14 e Figura 15, esquema de vizinhança entre torres e diagrama de espalhamento de Moran para a altura de 10 metros, note-se o seguinte

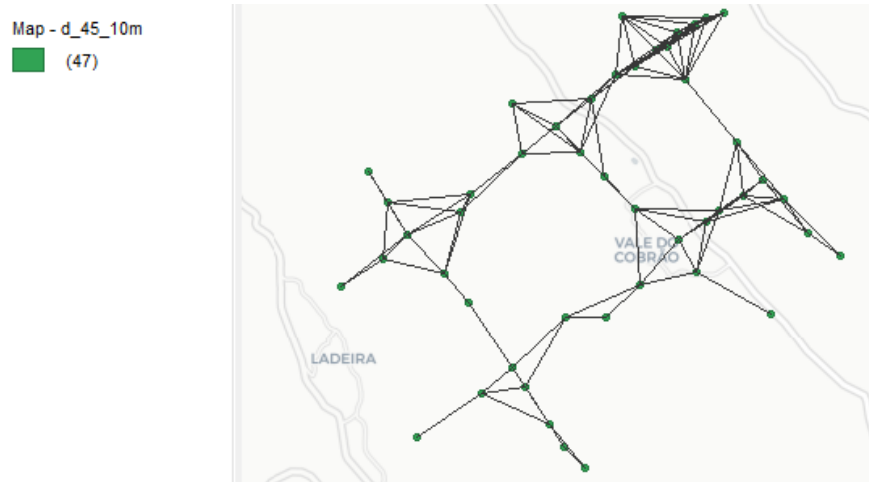


Figura 14 - Direção 45°, altura 10 m. Critério de distância mínima

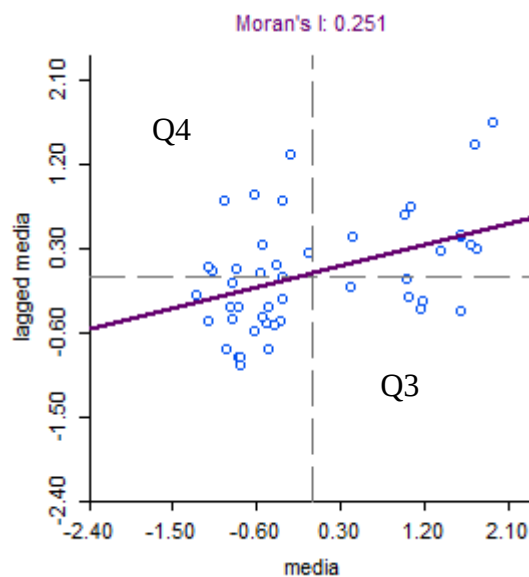
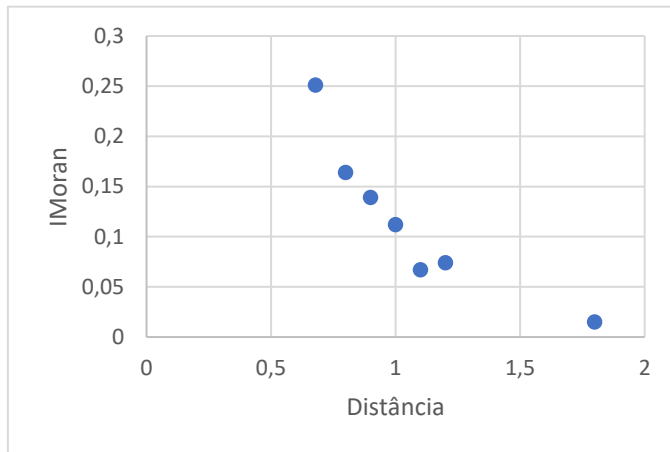


Figura 15 - Direção 45°, altura 10 m. Diagrama de espalhamento de Moran

A distância mínima euclidiana que garante um vizinho a cada torre é igual 0,679 (Figura 14). O índice de Moran, igual a 0,251 (Figura 15), embora se possa considerar não muito elevado, o teste de pseudo-significância revela haver evidência estatística de dependência espacial. O diagrama de espalhamento de Moran, Figura 15, permite verificar a existência de vários pontos no quadrante Q3 e Q4 que correspondem a torres com associação espacial negativas uma vez que possuem vizinhos com valores distintos. Por outro lado, nos outros dois quadrantes, encontram-se as torres com associação espacial positiva. O índice de Moran, que reflete o ajuste de uma reta a estes pontos, é baixo (0,251), sendo, no entanto, estatisticamente significativo o que reflete a existência de dependência espacial entre as torres. Ao aumentar a distância iremos obter os outros valores para o índice de Moran - representados no correlograma da Figura 16. Verificamos que, aumentando a distância, diminui o coeficiente de Moran

deixando de haver evidência estatística da existência de autocorrelação espacial a partir da distância euclidiana de 1,1 cujo índice de Moran é de 0,067.

O correlograma da Figura 16 comprova a existência de uma forte dependência espacial na medida em que a função de autocorrelação não se estabiliza com a distância, mas continua sempre decrescendo com o aumento da distância. Em outras palavras, se uma torre tem um vizinho a uma distância pequena, é altamente provável que essa torre vizinha tenha valores semelhantes da velocidade média do vento.



Distância	IMoran	Teste p
0,679	0,251	0,009
0,8	0,164	0,031
0,9	0,139	0,036
1,0	0,112	0,042
1,1	0,067	0,088
1,2	0,074	0,058
1,8	0,015	0,134

Figura 16 - Correlograma e tabela: índice de Moran em função da distância

Considerando altura de 10 metros, seguindo o critério dos k-vizinhos mais próximos:



Figura 17 - Direção 45°, altura 10 m. Critério dos k-vizinhos mais próximos (k=1)

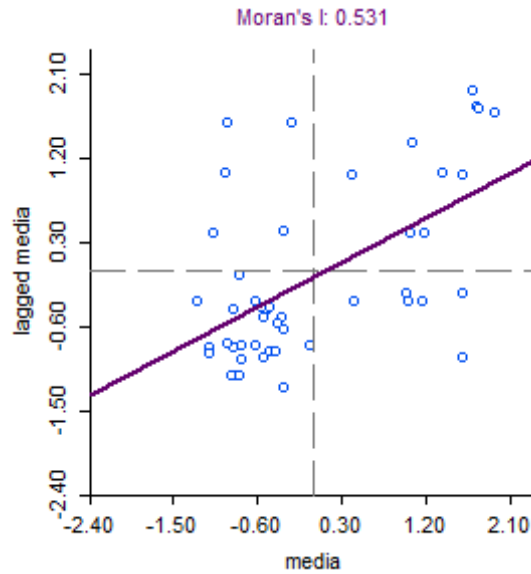
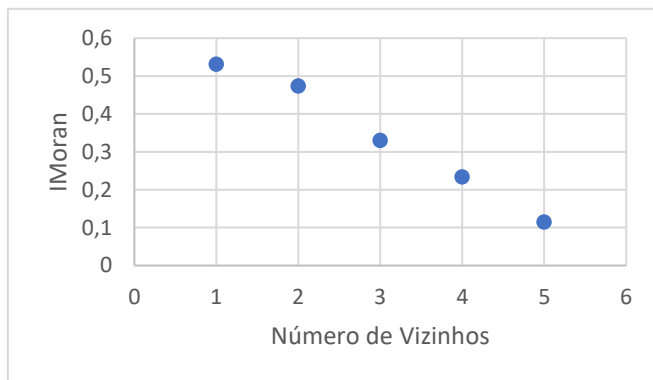


Figura 18 - Direção 45°, altura 10 m. Diagrama de espalhamento de Moran



Vizinhos	IMoran	Teste p
1	0,531	0,001
2	0,474	0,002
3	0,330	0,004
4	0,234	0,013
5	0,115	0,077

Figura 19 - Correlograma e tabela: índice de Moran em função do número de vizinhos

Comparando a Figura 14 e a Figura 17, observamos que existem grandes diferenças quanto à estrutura de vizinhança. Por exemplo, enquanto que as torres 2, 3 e 4 na Figura 14 têm 4, 7 e 5 vizinhos respectivamente, pelo critério de um vizinho mais próximo têm apenas um vizinho.

A análise dos correlogramas da Figura 16 e Figura 19 permite concluir que os valores do índice de Moran são superiores, usando o critério de k-vizinhos mais próximos, quando comparado com os valores obtidos pelo critério da distância. Verificamos também que, aumentando o número de vizinhos, diminui o coeficiente de Moran deixando de haver evidência estatística da existência de autocorrelação espacial a partir de 5 vizinhos do índice de Moran de 0,115.

- **Altura 20 metros**

Para uma altura de 20 metros, seguindo o critério de distância mínima e garantindo que cada torre tenha um vizinho, iremos obter o seguinte esquema de vizinhanças:

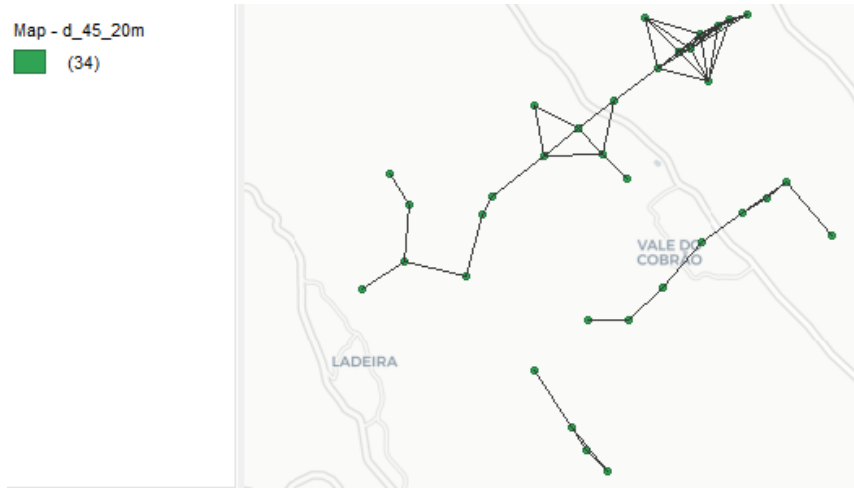


Figura 20 - Direção 45°, altura 20 m. Critério de distância mínima.

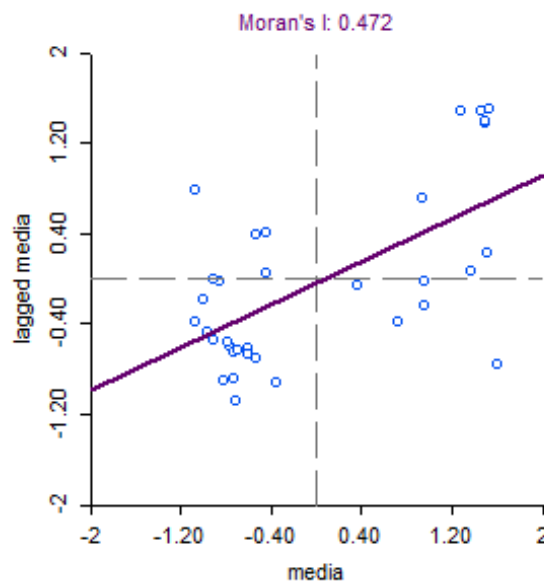
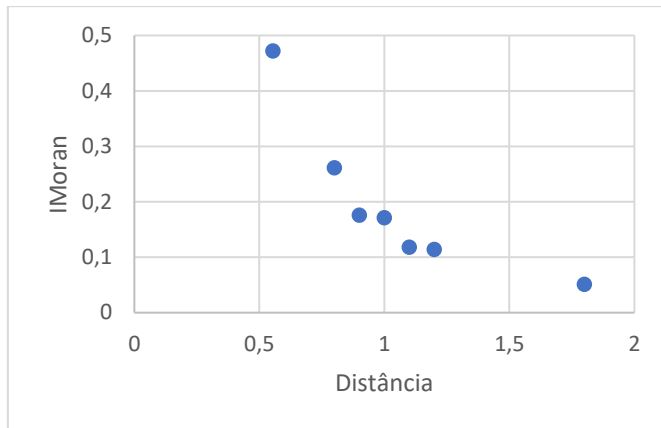


Figura 21 - Direção 45°, altura 20 m. Diagrama de espalhamento de Moran

O índice de Moran (Figura 21), é igual a 0,472, superior ao índice para a altura de 10 metros, igual a 0,251. Ao aumentar a distância entre vizinhos iremos obter o correlograma da Figura 22. Como seria de esperar, aumentando a distância, o índice de Moran baixa, deixando de haver evidência estatística da existência de autocorrelação espacial a partir da distância euclidiana entre torres superior ou igual a 1,1, tal como no estudo feito para as medições aos 10 metros. Esta tendência decrescente do correlograma é mais um fator que corrobora com a presença de dependência espacial.



Distância	IMoran	Teste p
0,555	0,472	0,002
0,8	0,261	0,015
0,9	0,176	0,045
1,0	0,171	0,045
1,1	0,118	0,071
1,2	0,114	0,068
1,8	0,051	0,059

Figura 22 - Correlograma e tabela: índice de Moran em função da distância

Considerando a altura de 20 metros e o critério de vizinhos mais próximos:



Figura 23 - Direção 45°, altura 20 m. Critério dos k- vizinhos mais próximos (k=1)

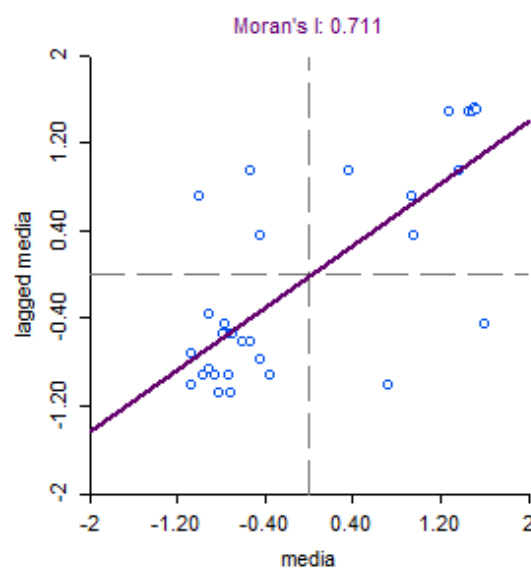


Figura 24 - Direção 45°, altura 20 m. Diagrama de espalhamento de Moran

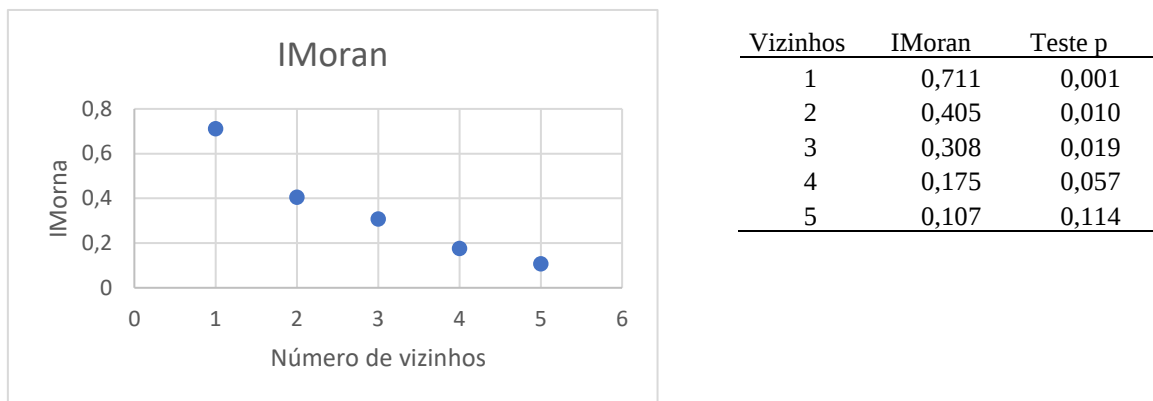


Figura 25 - Correlograma e tabela: índice de Moran em função do número de vizinhos

A Figura 20 e Figura 23 realçam as diferenças na estrutura de vizinhança dos dois critérios. Conseguimos verificar um ligeiro aumento do índice de Moran usando o critério dos k-vizinhos mais próximos relativamente ao critério da distância e, de modo geral, valores superiores quando comparados aos de altura de 10 metros.

- **Altura 30 metros**

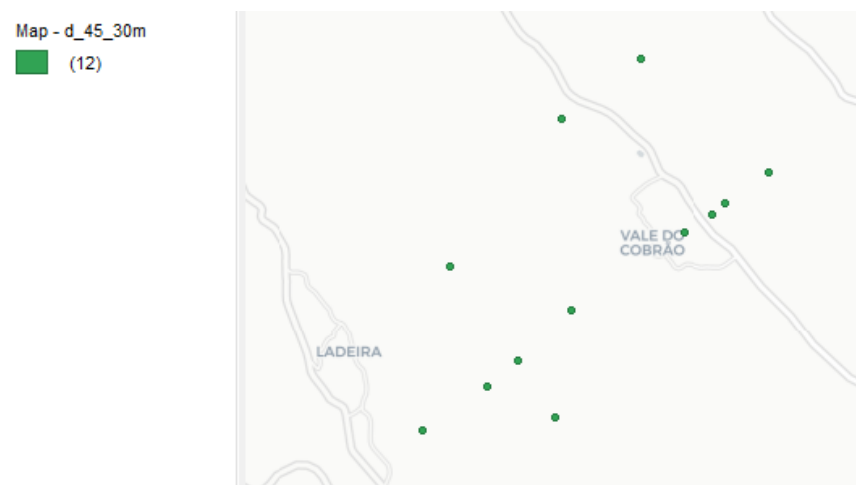


Figura 26 - Mapa com as coordenadas das torres com alturas de 30 metros em estudo

Como, para a altura de 30 metros, existem poucas torres com registo de medições, Figura 26, optou-se por não analisar este cenário.

Com este estudo, concluímos que quer para as medições a 10 e a 20 metros, independentemente do critério de escolha de vizinhança, existe dependência espacial estatisticamente significativa dos valores médios da velocidade do vento entre as torres. Verificamos que cada torre está fortemente relacionada com o seu primeiro vizinho mais próximo. Iremos usar o critério de vizinhança do primeiro vizinho mais próximo no estudo que se segue, na construção das matrizes de pesos.

Estudo para todas as direções e torres

Nesta secção iremos mostrar os resultados da análise da autocorrelação espacial para as duas direções em que cada uma delas contém as três alturas dos anemómetros.



Figura 27 - Direção 45°, altura 10 m, primeiro vizinho mais próximo



Figura 28 - Direção 45°, altura 20 m, primeiro vizinho mais próximo

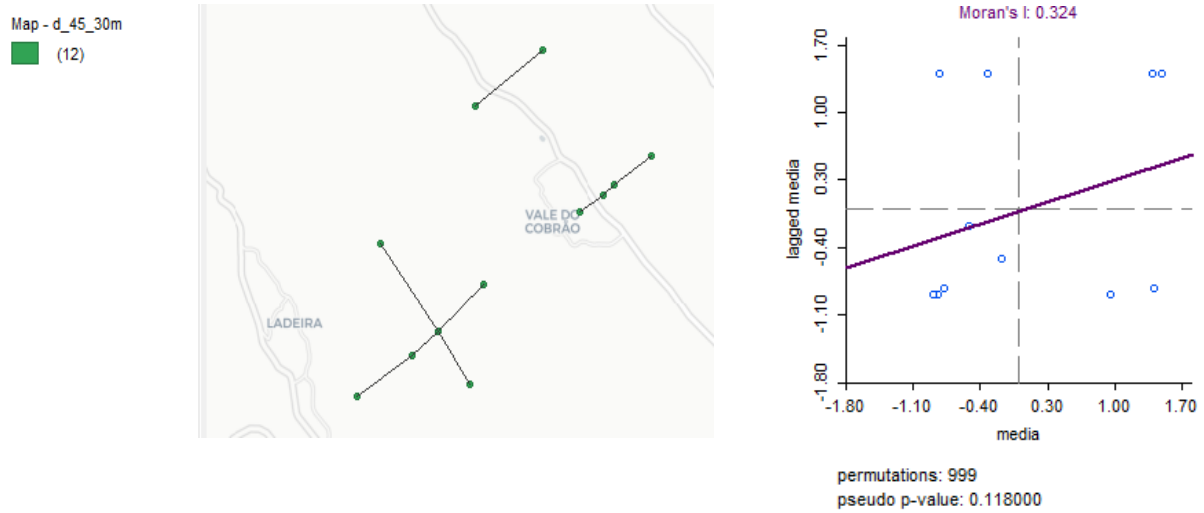


Figura 29 - Direção 45°, altura 30 m, primeiro vizinho mais próximo



Figura 30 - Direção 225°, altura 10 m, primeiro vizinho mais próximo

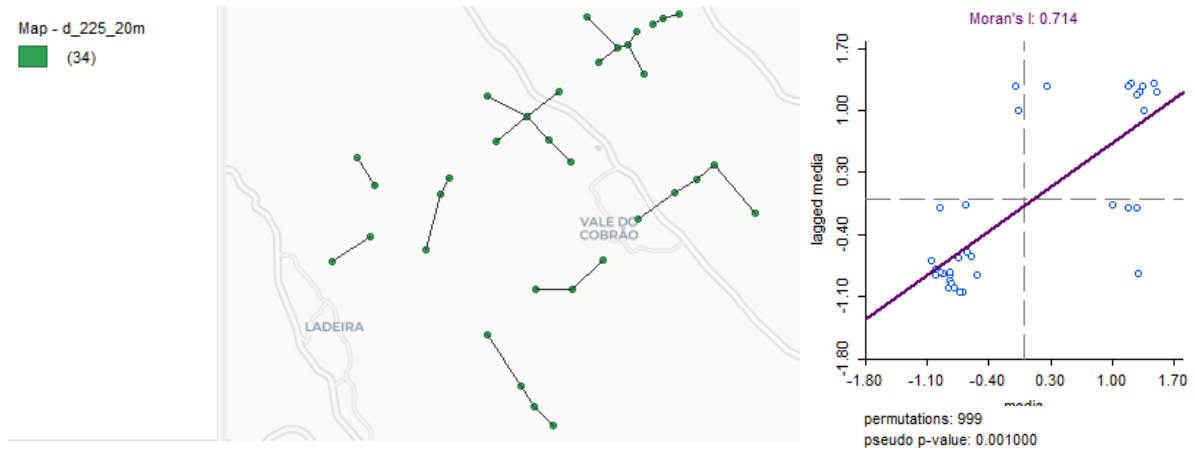


Figura 31 - Direção 225°, altura 20 m, primeiro vizinho mais próximo



Figura 32 - Direção 225°, altura 30 m, primeiro vizinho mais próximo

Como observamos no diagrama da Figura 31, a maior parte das torres estão localizadas nos quadrantes Q1 e Q2, que apresentam associação espacial positiva. Os pontos localizados nos quadrantes Q3 e Q4 podem ser vistos como torres que não seguem o mesmo processo de dependência espacial das restantes observações. Evidentemente, o diagrama reflete a estrutura espacial nas duas escalas de análise: vizinhança e tendência.

Para a altura de 30 metros, para as duas direções (Figura 29 e Figura 32), os valores de p do teste de pseudo-significância são superiores a 0,05, não se podendo concluir que haja autocorrelação espacial estatisticamente significativa. As poucas torres com registos a 30 metros e a sua localização pode ser o motivo de não se conseguir identificar dependência espacial entre elas. Por outro lado, verificamos que para as alturas de 20 metros, obtemos valores do índice de Moran mais altos quando comparados com os das alturas a 10 metros. Sugere uma dependência espacial superior à altura de 20 metros. Tal pode ser justificado pela

rugosidade do terreno, levando a valores menores para uma altura de 10 metros pois estes valores poderão estar desviados da realidade.

3.3 - Estudo para a altura dos anemómetros a 60 m

A Figura 33 mostra as torres equipadas com anemómetros ultrassónicos a 60 metros do solo.



Figura 33 - Torres com anemómetros colocados a 60 metros

Na secção anterior (altura dos anemómetros 10, 20 e 30 metros) o número de torres com registos de medições variava entre 12 e 47, o que permitiu um estudo mais detalhado recorrendo à média do período em estudo. Para a altura de 60 metros pretendemos não só analisar autocorrelação espacial recorrendo ao diagrama de espalhamento e o índice de Moran para as 9 torres com registos (usando a média do período em estudo), como também analisar os valores médios diários dos 46 dias do período de observação intensiva (1 de maio a 15 de junho de 2017). Será investigada a correlação dos registos diários medidos pelos anemómetros entre as 9 torres e comparados os valores médios das nove torres utilizando à técnica de inferência estatística paramétrica Análise de Variância (ANOVA).

3.3.1 - Análise das autocorrelações espaciais

Neste caso específico, as torres com anemômetros colocados a 60 metros são poucas e estão dispersas (Figura 33). Através do software GeoDa, obtemos os índices de Moran indicados na Tabela 4 relativamente ao número de vizinhos:

Tabela 4 - Índice de Moran em função do número de vizinhos

Vizinhos	IMoran	Teste p
1	0,267	0,209
2	-0,216	0,448
3	-0,078	0,339
4	-0,046	0,273
5	-0,071	0,254

a) Direção 45°

Vizinhos	IMoran	Teste p
1	0,489	0,104
2	0,009	0,281
3	0,077	0,167
4	0,048	0,149
5	-0,009	0,165

b) Direção 225°

Ao testar a hipótese nula de inexistência de autocorrelação espacial através do teste de pseudo-significância para 999 permutações obtivemos valores de p superiores a 0,05. Assim, ao nível de significância de 5%, não rejeitamos a hipótese nula, não se podendo afirmar que haja dependência espacial dos valores médios do vento entre as torres em estudo. Sendo assim, não faz sentido analisar os mapas de conectividade nem os diagramas de espalhamento.

Analisando os mapas de quantis da Figura 34 e Figura 35, para ambas as direções, observou-se valores superiores dos quantis na direção 225°, que vai de encontro ao que já tínhamos observado nos anemômetros de menor altura. Adicionalmente, verificamos um ligeiro aumento da velocidade média do vento relativamente às alturas de 10 m, 20 m e 30 m.

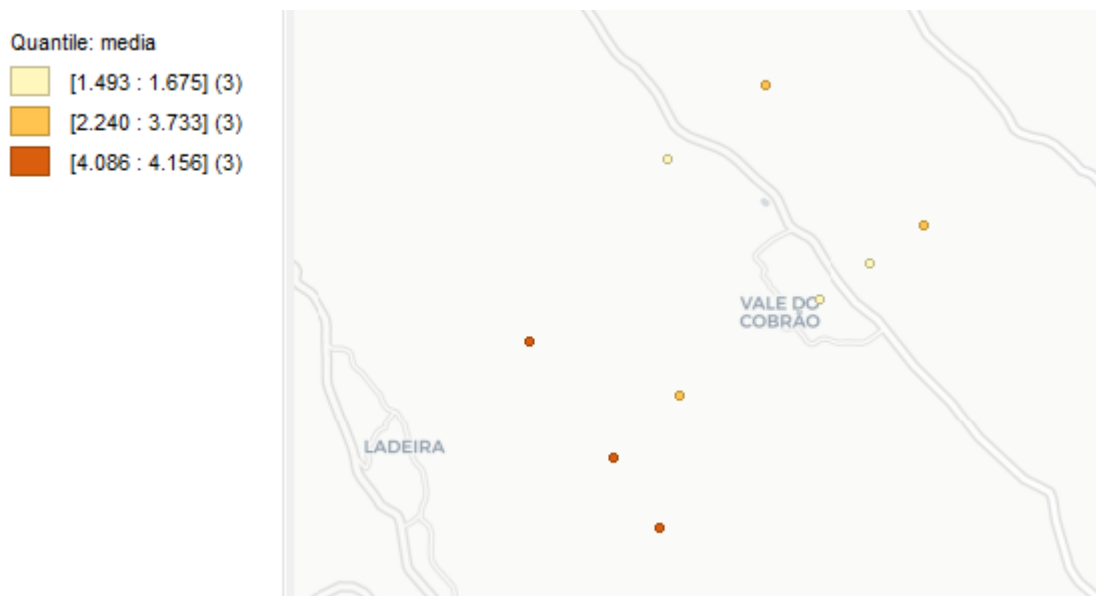


Figura 34 - Mapa de quantil: altura 60 m, direção 45°

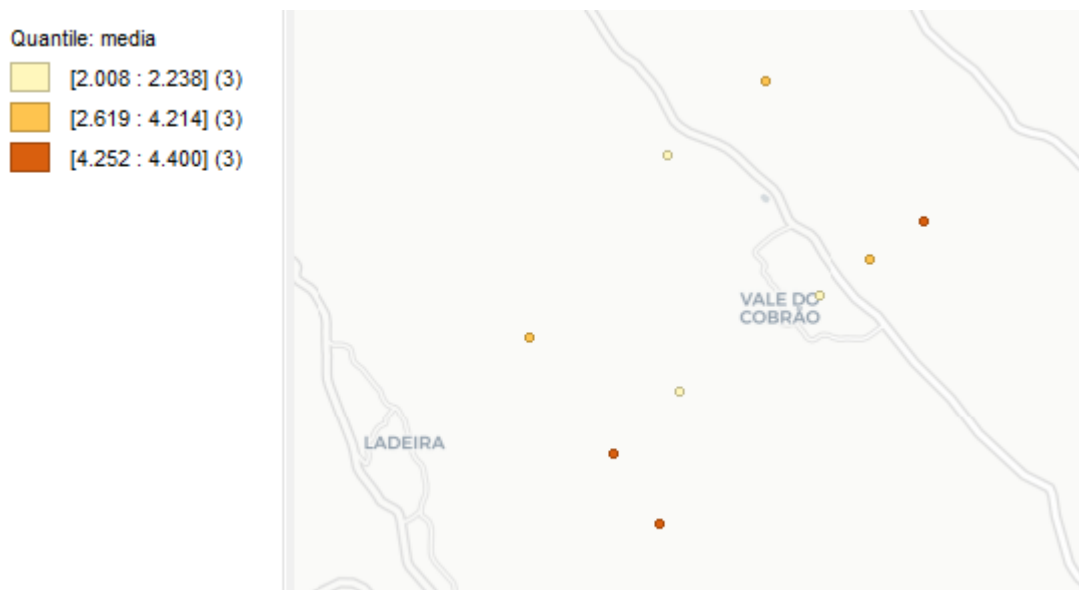


Figura 35 - Mapa de quantil: altura 60 m, direção 225°

3.3.2 - Relação entre valores médios diários

A Figura 36, com os registros médios diários dos ventos para a direção 45° das nove torres, mostra que as torres 7, 25 e 27 são aquelas com os valores mais baixos na generalidade dos dias do período de observação intensiva. As correlações dos valores diários entre torres, calculadas pelo coeficiente de correlação de Pearson (ver Tabela A1 em anexo) permite concluir a existência de correlação estatisticamente significativa entre a maioria dos pares de torres. Os valores mais elevados de correlação obtêm-se entre o par de torres 34 e 20 e o par 34 e 37 sendo $r = 0,996$ e $r = 0,995$, significando que para estes pares de torres cerca de 99% ($r^2 = 0,99$ em ambos os casos) da variação dos valores do vento de uma torre é explicado pelos valores da outra. Também se destaca a inexistência de correlação estatisticamente significativa os valores da torre 27, quando comparada com os valores das torres 10, 20, 22, 29, 34 e 37.

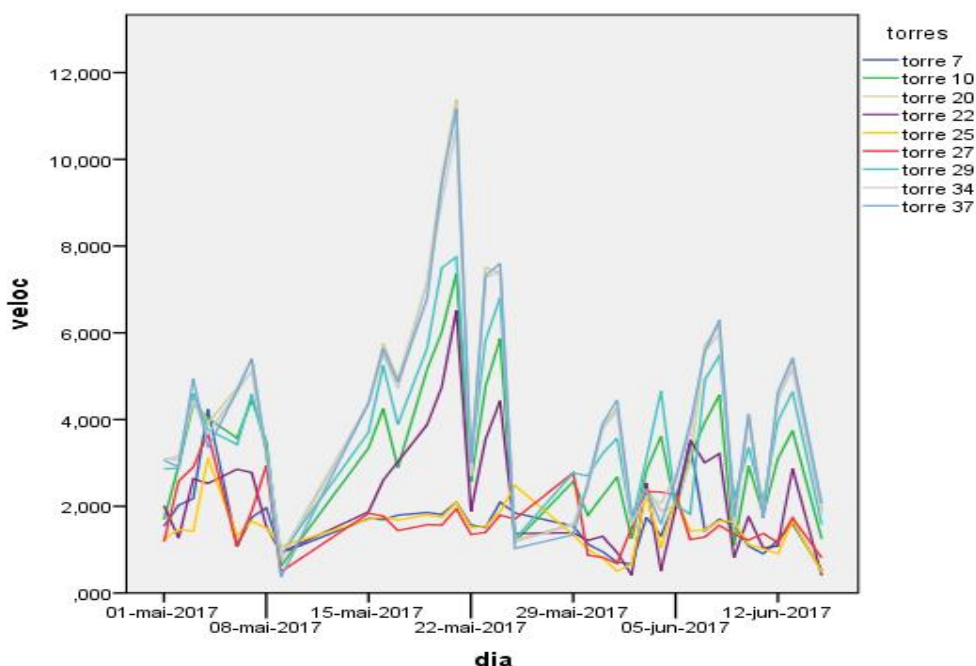


Figura 36 - Registos médios diários dos ventos para a direção 45°

Um método paramétrico da inferência estatística que permite comparar médias é a Análise de Variância (ANOVA). Pretende-se comparar os valores médios da velocidade dos ventos entre as nove torres. Atendendo à não independência dos registos, pois trata-se de valores diários, houve necessidade de recorrer à análise de variância a dois fatores: o fator torre e o fator dia (Tabela 5). A hipótese nula da igualdade dos valores médios do vento das nove torres é rejeitada ($p=1,2717E-42$), sendo necessário proceder aos testes de comparação múltipla para averiguar em que torres se observam as diferenças.

A Tabela 6 representa os grupos de torres com valores médios homogêneos obtidos pelo teste de comparações múltiplas de Tuckey. Destaca-se o grupo das torres 34, 37 e 20 com valores médios estatisticamente superiores aos das outras torres; por outro lado, as torres 7, 22, 25 e 27 são as que apresentam evidência estatística de valores médios menores quando comparados com todas as outras torres.

Tabela 5 - Tabela ANOVA (torres a 60 metros, direção 45°)

Variável dependente: velocidade

Origem	Tipo III Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.
Dia	534,006	34	15,706	13,498	5,1082E-41
Torres	382,636	8	47,830	41,106	1,2717E-42
Erro	315,328	271	1,164		
Total corrigido	1227,348	313			

a. R Quadrado = ,743 (R Quadrado Ajustado = ,703)

Tabela 6 - Teste de Tuckey

velocidade

Tukey HSD

Torres	N	Sub conjunto		
		1	2	3
Torre 25	35	1,49253		
Torre 7	35	1,63862		
Torre 27	34	1,67506		
Torre 22	35	2,24026		
Torre 10	35		3,23093	
Torre 29	35		3,73294	
Torre 34	35			4,08576
Torre 37	35			4,14962
Torre 20	35			4,15589
Sig.		,094	,584	,783

São exibidas as médias para os grupos em subconjuntos homogêneos.

Com base em médias observadas.

O termo de erro é Quadrado Médio (Erro) = 1,164.

Sendo a ANOVA uma técnica de análise estatística paramétrica ela pressupõe a normalidade dos resíduos. Esse pressuposto foi validado recorrendo ao teste Kolmogorov Smirnov com correção de Lilliefors (KS) (Tabela 7). O valor de p é ligeiramente inferior a 0,05, no entanto, sendo a ANOVA robusta a ligeiros desvios da normalidade, considera-se possível confiar nos resultados obtidos na ANOVA.

Tabela 7- Teste Kolmogorov Smirnov

	Kolmogorov-Smirnov		
	Estatística	gl	Sig.
Resíduo para velocidade	,058	314	,012

Procedendo a um estudo análogo, mas agora para a direção 225°, obtém-se o gráfico da Figura 37 com os registos médios diários dos ventos. O estudo das correlações dos valores diários entre torres, calculadas pelo coeficiente de correlação de Pearson (Tabela A2 em anexo), permite concluir a existência de correlação estatisticamente significativa entre todos os pares de torres à exceção da torre 22, que quando comparada com as torres 7, 10 e 29 não se observa correlação significativa. Os valores mais elevados de correlação obtêm-se entre as torres 37 e 34, sendo $r = 0,974$, ou seja, $r^2 = 0,949$, isto é 94,9% da variação dos valores do vento de uma torre é explicado pelos valores da outra.

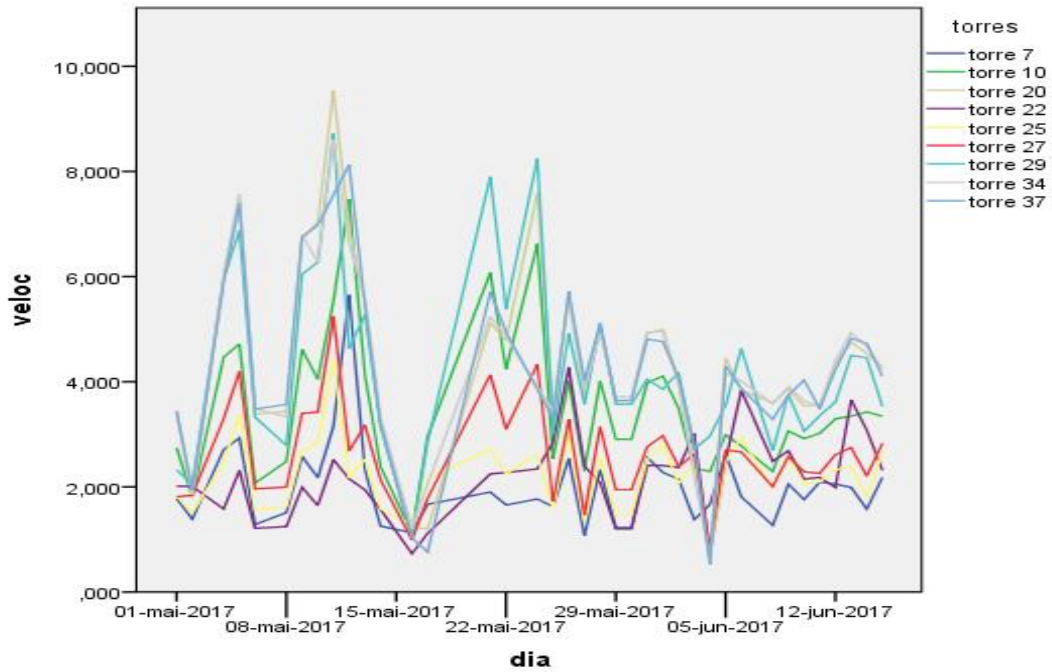


Figura 37 - Registos médios diários dos ventos para a direção 225°

A comparação de médias através da ANOVA a dois fatores obriga à validação da normalidade dos resíduos do modelo. Este pressuposto verificado através do teste Kolmogorov-Smirnov não é validado, pois rejeita-se a hipótese nula de normalidade da distribuição. Recorre-se à alternativa não paramétrica recorrendo ao teste ANOVA de Friedman. A não rejeição da igualdade das distribuições ($p < 0,0005$) levou à rejeição da hipótese nula de igualdade das distribuições do vento das nove torres - Tabela A3 em anexo. A Tabela A4, em anexo, representa os testes de comparação múltipla. Destaca-se o grupo das 37, 34, 29 e 20, com valores estatisticamente superiores à maioria das outras torres e o grupo das torres 7, 22 e 25, com valores inferiores às restantes. A Figura 38 esquematiza os pares de torres onde há diferenças estatisticamente significativas com ligações a azul.

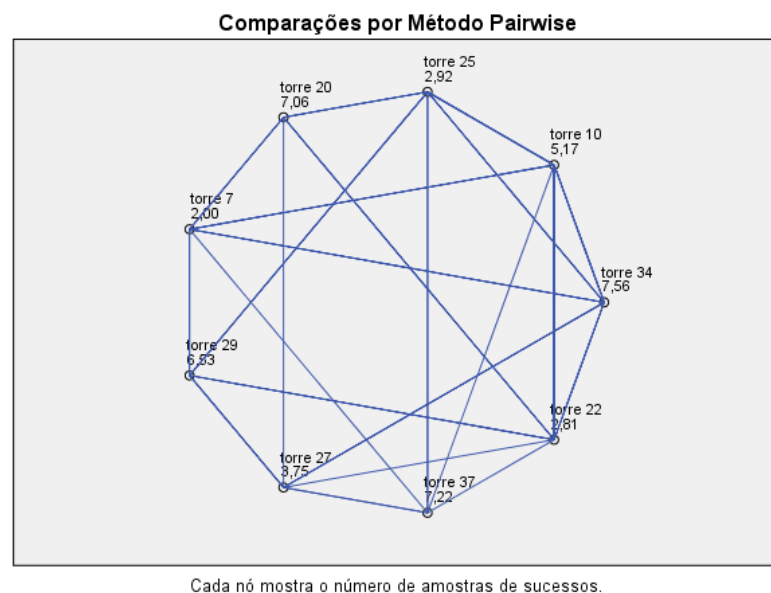


Figura 38 - Comparações por Método Pairwise

Em conclusão, para uma altura de 60 metros, qualquer que seja a direção, as torres 20, 29, 34 e 37 são as que apresentam valores mais elevados em oposição às torres 7, 22 e 25 com registos menores. Como podemos verificar, através da Figura 33, as torres que apresentam valores mais elevados estão localizadas nas colinas e as restantes no vale.

3.4 - Estudo para a altura dos anemómetros a 100 m

Temos apenas três torres com anemómetros a 100 metros: torres 20, 25 e 29 na Figura 39.



Figura 39 - Torres com anemómetros colocados a 100 metros

3.4.1 - Análise autocorrelações espaciais

A análise da dependência espacial será efetuada para a velocidade média dos ventos, considerando as direções de 45° e 225°. Os registos médios encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Registos médios altura 100 metros

			Torres		
			'20'	'25'	'29'
			Média	Média	Média
direção	45°	Velocidade diária	4,31	1,81	3,96
	225°	Velocidade diária	4,33	2,50	4,28

Através do mapa de conectividade e adotando o critério do vizinho mais próximo, Figura 40, observamos que a torre do vale (torre 25) está no meio das outras duas (torre 20 e 29) e irá ser vizinha das que estão na colina.



Figura 40 - Mapa de conectividade torres 100 metros

A Figura 41, (a) e (b) mostra os diagramas de espalhamento para a direção 45° e 225°, respetivamente.

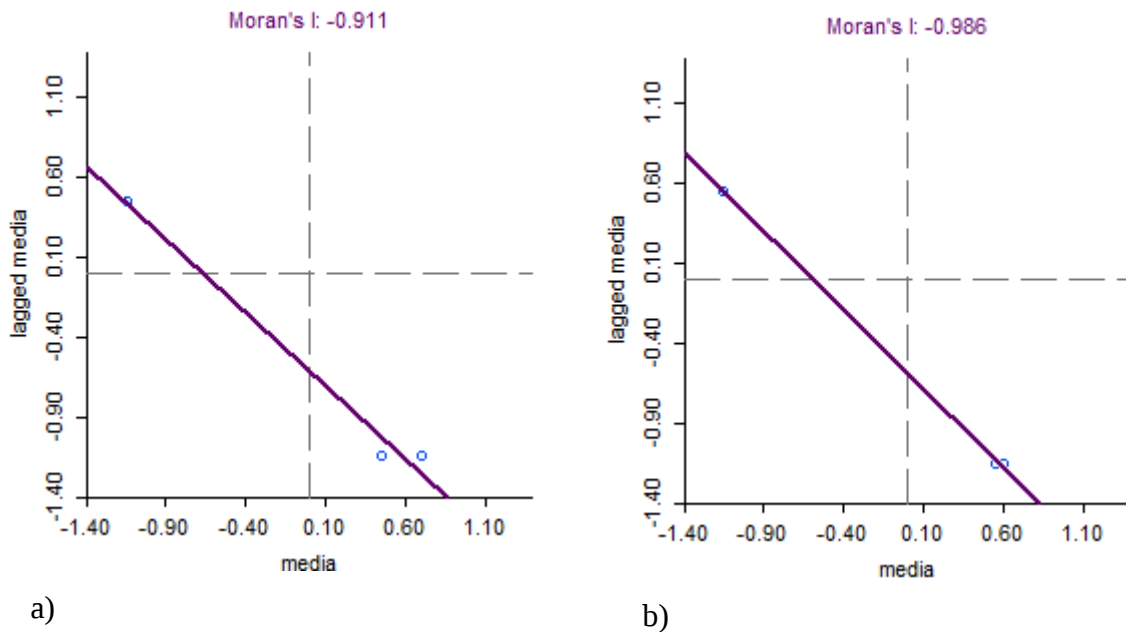


Figura 41 - Diagramas de espalhamento: a) direção 45°; b) direção 225°

Os diagramas de espalhamento da Figura 41 a) e b) mostram o índice de Moran com uma autocorrelação extremamente negativa (oposição à Lei de Tobler), uma vez que torres próximas em localização tendem a ter valores menos semelhantes do que torres mais distantes. As torres 20 e 29, nas colinas, estão distantes uma da outra e com valores da velocidade média do vento semelhante e superiores à torre 25, no vale. Esta análise ilustra o que era espectável, isto é, as torres localizadas nas colinas têm valores superiores à torre no vale.

3.4.2 - Relação entre valores médios diários do período em estudo

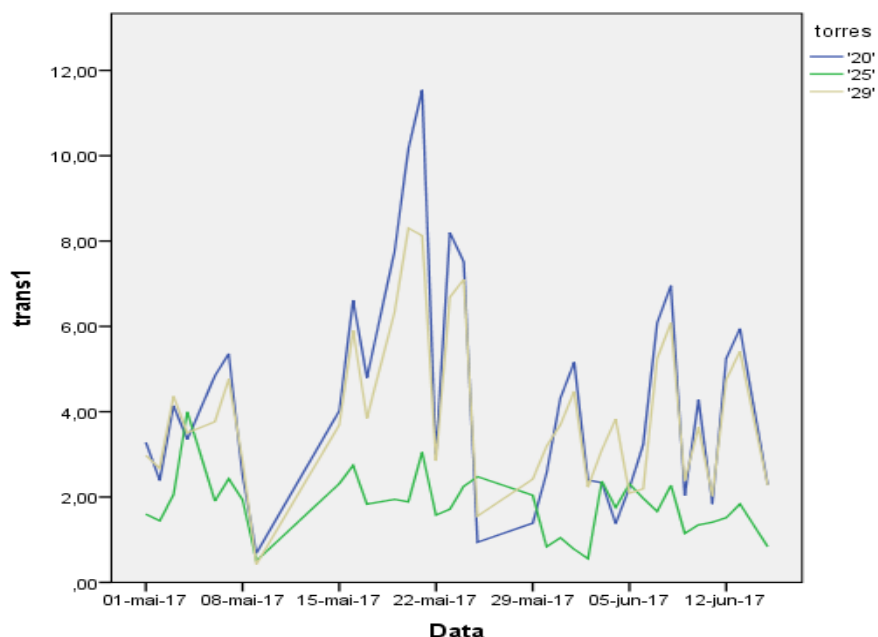


Figura 42 - Valores médios diários da velocidade do vento para a direção de 45°

A Figura 42, com as médias diárias da velocidade do vento para a direção de 45°, mostra que os valores médios diários das torres 20 e 29 são muito próximos, e os registros da torre 25 muito inferiores aos das outras duas torres. Adicionalmente verifica-se correlação estatisticamente significativa entre os valores das velocidades do vento das torres (valor de $p < 0,05$), com uma grande correlação entre os valores de velocidade do vento entre as torres 20 e 29 (coeficiente de correlação de Pearson $r = 0,957$), enquanto que os valores do coeficiente de correlação entre os valores da torre 25 com as outras torres é aproximadamente igual a 0,3.

Tabela 9 - Correlações de Pearson

Correlações		Veloc_20	Veloc_25	Veloc_29
Veloc_20	Correlação de Pearson	1	,326	,957**
	Sig. (bilateral)		,056	,000
	N	35	35	35
Veloc_25	Correlação de Pearson	,326	1	,368*
	Sig. (bilateral)	,056		,030
	N	35	35	35
Veloc_29	Correlação de Pearson	,957**	,368*	1
	Sig. (bilateral)	,000	,030	
	N	35	35	35

** . A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).

* . A correlação é significativa no nível 0,05 (bilateral).

Comparam-se os valores médios da velocidade dos ventos nas três torres recorrendo à ANOVA uma vez que os pressupostos de aplicabilidade são verificados, Tabela 10. Rejeita-se a hipótese de igualdade de valores médios das 3 torres (valor de $p < 0,005$). O valor do coeficiente de determinação $r^2 = 0,77$ permite concluir que 77 % da variação do vento é

explicado pelo fator “dia” e pelo fator “torre”. Os testes de Tuckey de comparações múltiplas (Tabela 11) demonstram que há evidência estatística de que a torre 25 apresenta valores médios inferiores quando comparados com os das torres 29 e 20. Em anexo (Tabela A5) apresenta-se o resultado do teste KS que valida a normalidade dos resíduos (valor de $p = 0,164$) e a Figura A1 com gráfico dos resíduos do modelo da ANOVA.

Tabela 10 - Tabela ANOVA (torres a 100 metros, direção 45°)

Variável dependente: velocidade

Origem	Tipo III Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.
Data	252,193	34	7,417	4,448	8,4066E-8
Torres	128,259	2	64,129	38,454	6,7308E-12
Erro	113,402	68	1,668		
Total corrigido	493,854	104			

a. R Quadrado = ,770 (R Quadrado Ajustado = ,649)

Tabela 11 - Testes de comparações múltiplas de Tuckey para 45°

Tukey HSD

torres	N	Sub conjunto	
		1	2
'25'	35	1,8097	
'29'	35		3,9639
'20'	35		4,3067
Sig.		1,000	,511

Efetando um estudo análogo para a direção 225° (Figura 43) obtêm-se coeficientes de correlação para os valores do vento entre cada par de torres em estudo estatisticamente significativo, sendo o valor mais elevado entre a torre 20 e a 29 ($r = 0,91$) seguindo-se entre a torre 25 e 29 ($r = 0,80$) e posteriormente entre a torre 20 e 25 ($r = 0,751$).

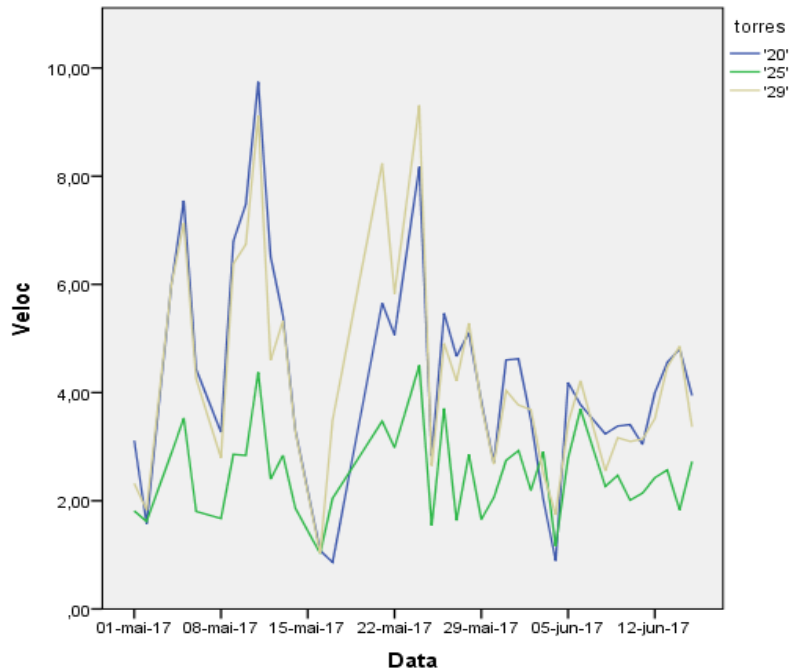


Figura 43 - Valores médios diários da velocidade do vento para a direção de 225°

Recorrendo ao teste F da análise de variância (Tabela A6 em anexo), rejeita-se a hipótese nula em teste de igualdade de valores médios das torres em estudo (valor de $p < 0,0005$). O agrupamento resultante dos testes de comparações múltiplas de Tuckey (Tabela 12), demonstra valores inferiores para as velocidades da torre 25, quando comparadas com as outras duas.

Tabela 12 - Testes de comparações múltiplas de Tuckey para 225°

Tukey HSD			
Torres	N	Subset	
		1	2
'25'	38	2,4956	
'29'	38		4,2821
'20'	38		4,3322
Sig.		1,000	,968

Comparando os valores médios observados dos agrupamentos da Tabela 11 e Tabela 12 mais uma vez observam-se médias superiores na direção 225°. Deste modo conclui-se que, quer para a direção de 45° quer para a direção de 225°, a velocidade do vento da torre 25 é inferior ao nas torres 29 e 20. Atendendo a que esta análise controlou os efeitos de variabilidade ao englobar os registos diários, fazendo apenas variar o fator localização das torres, a diferença dos valores deve-se essencialmente ao fator localização, o que é concordante com a análise feita na secção anterior.

Capítulo 4 - Conclusões e trabalhos futuros

4.1 - Conclusões

- De um modo geral, para as alturas dos anemômetros em estudo, a velocidade do vento é mais elevada na direção 225° quando comparada com a direção 45°.
- Quanto à variação da velocidade, são as torres com valores superiores de velocidade do vento que apresentam maior variabilidade de registros.
- As torres com velocidades mais elevadas do vento são as localizadas nas colinas e as com menor velocidade do vento são as que estão localizadas no vale e fora das colinas.
- À medida que a altura dos anemômetros aumenta, a velocidade do vento vai aumentar também, como seria esperado.
- Se uma torre tem um vizinho a uma distância pequena, é altamente provável que este par de torres tenha valores semelhantes da velocidade média do vento.
- Obtêm-se valores de índice de Moran superiores usando o critério de k-vizinhos mais próximos quando comparado com os valores obtidos pelo critério da distância.
- Aumentando o número de vizinhos, diminui o coeficiente de Moran, deixando de haver evidência estatística da existência de autocorrelação espacial.
- Aumentando a distância entre torres, o índice de Moran baixa.
- Para as medições a 10 e a 20 metros, independentemente do critério de escolha de vizinhança, existe dependência espacial estatisticamente significativa dos valores médios da velocidade do vento entre as torres.
- Para as torres a 30 metros, não se pode concluir que há autocorrelação espacial estatisticamente significativa. As poucas torres com registros a 30 metros e a sua localização pode ser o motivo de não se conseguir identificar dependência espacial entre elas.

- Para as alturas de 20 metros, obtemos valores do índice de Moran mais altos quando comparados com os das alturas a 10 metros. Sugere uma dependência espacial superior à altura de 20 metros. Tal pode ser justificado pela rugosidade do terreno, levando a valores menores para uma altura de 10 metros pois estes valores poderão estar desviados da realidade.

4.2 - Trabalhos futuros

- Realizar um estudo análogo para diferentes direções do vento e verificar qual a direção do vento que proporciona melhores registos da velocidade média do vento.
- Analisar a influência da turbina eólica nas medições ou mesmo a influência de obstáculos significativos existentes no terreno que possam afetar as medições.
- Integrar a dependência espacial em estudos mais complexos, que integrem várias variáveis de modo a testar e aperfeiçoar os modelos que estão na base na escolha de futuros locais de implementação de parques eólicos.

Referências

- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association – LISA. *Geographical Analysis* 27: 91-115.
- Anselin, L. (1996). The Moran scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association. In: Fischer, M., Scholten, H., and Unwin, D., editors, *Spatial Analytical Perspectives on GIS in Environmental and Socio-Economic Sciences*, :111-125. Taylor and Francis, London.
- Arora, S. S. & Brown, M. (1977). Alternative approaches to spatial autocorrelation: An improvement over current practice. *International Regional Science Review*, 2: 67-78.
- Carrijo, T. (2015). Relação entre o Índice I de Moran e a Quantidade de Dados Observados. Tese de Mestrado, Universidade de Brasília.
- Cliff, A. D. (1969). Some Measures of Spatial Association in Areal Data. University of Bristol. Tese de Doutorado.
- Cliff, A. D. & Ord, J. K. (1981). Spatial processes: models and applications. Pion Limited.
- Dacey, M. F. (1968). A review of measures of contiguity for two and k-colors maps. In: B. J. L. Berry & D. F. Marble, editors. *Spatial Analysis: a Reader in Statistical Geography*, :479-495. Prentice- Hall.
- Druck, S. *et al.* (2004). “Análise Espacial de Dados Geográficos (Capítulo 5 – Análise Espacial de Áreas)”, A.V.M. ed., Brasília, EMBRAPA.
- Fernando, H. J. S. *et al.* (2019). The Perdigão: Peering into Microscale Details of Mountain Winds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 100, 799–819, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0227.1>.
- Getis, A. & Aldstadt, J. (2004). Constructing the spatial weights matrix using a local statistic, *Geographical Analysis*, 36(2):90-104.

Griffith, D. A. (2003). *Spatial Autocorrelation and Spatial Filtering*. Springer-Verlag.

Mann, J. *et al.* (2017). Complex terrain experiments in the New European Wind Atlas. *Phil. Trans. R. Soc. A* 375: 20160101. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0101>.

Marôco, J. (2018). *Análise estatística com o SPSS statistics - 7ª ed. - Pêro Pinheiro: ReportNumber- XII*.

Morgado, P. (2020). *Análise de Dados de Medição de Campo na Serra do Perdigão*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Tobler, W. (1970). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46, 234-240. doi:10.2307/143141.

Witze, A. (2017). World's largest wind-mapping project spins up in Portugal. *Nature* 542(7641):282-283. doi:10.1038/542282a.

.

ANEXO A: Material de apoio à análise estatística

Tabela A1: Coeficientes de correlação de Pearson para as torres de altura a 60 metros, direção de 45°

		Correlações								
		torre 7	torre 10	torre 20	torre 22	torre 25	torre 27	torre 29	torre 34	torre 37
torre 7	Correlação de Pearson	1	,394*	,206	,464**	,771**	,664**	,205	,231	,214
	Sig. (bilateral)		,019	,235	,005	,000	,000	,238	,183	,217
	N	35	35	35	35	35	34	35	35	35
torre 10	Correlação de Pearson	,394*	1	,917**	,862**	,382*	,323	,947**	,920**	,909**
	Sig. (bilateral)	,019		,000	,000	,024	,062	,000	,000	,000
	N	35	35	35	35	35	34	35	35	35
torre 20	Correlação de Pearson	,206	,917**	1	,881**	,263	,019	,932**	,996**	,994**
	Sig. (bilateral)	,235	,000		,000	,127	,914	,000	,000	,000
	N	35	35	35	35	35	34	35	35	35
torre 22	Correlação de Pearson	,464**	,862**	,881**	1	,514**	,137	,791**	,889**	,885**
	Sig. (bilateral)	,005	,000	,000		,002	,439	,000	,000	,000
	N	35	35	35	35	35	34	35	35	35
torre 25	Correlação de Pearson	,771**	,382*	,263	,514**	1	,628**	,276	,263	,240
	Sig. (bilateral)	,000	,024	,127	,002		,000	,108	,128	,165
	N	35	35	35	35	35	34	35	35	35
torre 27	Correlação de Pearson	,664**	,323	,019	,137	,628**	1	,181	,014	-,005
	Sig. (bilateral)	,000	,062	,914	,439	,000		,305	,936	,980
	N	34	34	34	34	34	34	34	34	34
torre 29	Correlação de Pearson	,205	,947**	,932**	,791**	,276	,181	1	,926**	,917**
	Sig. (bilateral)	,238	,000	,000	,000	,108	,305		,000	,000
	N	35	35	35	35	35	34	35	35	35
torre 34	Correlação de Pearson	,231	,920**	,996**	,889**	,263	,014	,926**	1	,995**
	Sig. (bilateral)	,183	,000	,000	,000	,128	,936	,000		,000
	N	35	35	35	35	35	34	35	35	35
torre 37	Correlação de Pearson	,214	,909**	,994**	,885**	,240	-,005	,917**	,995**	1
	Sig. (bilateral)	,217	,000	,000	,000	,165	,980	,000	,000	
	N	35	35	35	35	35	34	35	35	35

*. A correlação é significativa no nível 0,05 (bilateral).

**. A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).

Tabela A2: Coeficientes de correlação de Pearson para as torres de altura a 60 metros, direção de 225°

		Correlações								
		torre 7	torre 10	torre 20	torre 22	torre 25	torre 27	torre 29	torre 34	torre 37
torre 7	Correlação de Pearson	1	,743**	,630**	,201	,519**	,489**	,431**	,667**	,696**
	Sig. (bilateral)		,000	,000	,227	,001	,002	,007	,000	,000
	N	38	38	38	38	38	38	38	37	36
torre 10	Correlação de Pearson	,743**	1	,819**	,206	,611**	,785**	,828**	,817**	,832**
	Sig. (bilateral)	,000		,000	,216	,000	,000	,000	,000	,000
	N	38	38	38	38	38	38	38	37	36
torre 20	Correlação de Pearson	,630**	,819**	1	,320*	,778**	,888**	,869**	,991**	,986**
	Sig. (bilateral)	,000	,000		,050	,000	,000	,000	,000	,000
	N	38	38	38	38	38	38	38	37	36
torre 22	Correlação de Pearson	,201	,206	,320*	1	,505**	,369*	,250	,342*	,343*
	Sig. (bilateral)	,227	,216	,050		,001	,023	,130	,038	,041
	N	38	38	38	38	38	38	38	37	36
torre 25	Correlação de Pearson	,519**	,611**	,778**	,505**	1	,903**	,731**	,788**	,672**
	Sig. (bilateral)	,001	,000	,000	,001		,000	,000	,000	,000
	N	38	38	38	38	38	38	38	37	36
torre 27	Correlação de Pearson	,489**	,785**	,888**	,369*	,903**	1	,913**	,879**	,817**
	Sig. (bilateral)	,002	,000	,000	,023	,000		,000	,000	,000
	N	38	38	38	38	38	38	38	37	36
torre 29	Correlação de Pearson	,431**	,828**	,869**	,250	,731**	,913**	1	,868**	,806**
	Sig. (bilateral)	,007	,000	,000	,130	,000	,000		,000	,000
	N	38	38	38	38	38	38	38	37	36
torre 34	Correlação de Pearson	,667**	,817**	,991**	,342*	,788**	,879**	,868**	1	,974**
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,038	,000	,000	,000		,000
	N	37	37	37	37	37	37	37	37	36
torre 37	Correlação de Pearson	,696**	,832**	,986**	,343*	,672**	,817**	,806**	,974**	1
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,041	,000	,000	,000	,000	
	N	36	36	36	36	36	36	36	36	36

** . A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).

* . A correlação é significativa no nível 0,05 (bilateral).

Tabela A3: Teste de Friedman para as torres a 60 metros, direção 225°

Sumarização de Teste de Hipótese			
	Hipótese nula	Teste	Sig. Decisão
1	As distribuições de torre 7, torre 10, torre 20, torre 22, torre 25, torre 27, torre 29, torre 34 e torre 37 são iguais.	Análise de Variância de Dois Fatores de Friedman por Postos de Amostras Relacionadas	,000 Rejeitar a hipótese nula.

São exibidas significâncias assintóticas. O nível de significância é ,050.

Tabela A4: Testes de comparação múltipla para as torres a 60 metros, direção 225°

Comparações por Método Pairwise					
Sample 1-Sample 2	Estatística do teste	Erro Padrão	Estatística do teste Padrão	Sig.	Adj. Sig. ^a
torre 7-torre 22	-,806	,645	-1,248	,212	1,000
torre 7-torre 25	-,917	,645	-1,420	,156	1,000
torre 7-torre 27	-1,750	,645	-2,711	,007	,241
torre 7-torre 10	-3,167	,645	-4,906	,000	,000
torre 7-torre 29	-4,528	,645	-7,014	,000	,000
torre 7-torre 20	-5,056	,645	-7,832	,000	,000
torre 7-torre 37	-5,222	,645	-8,090	,000	,000
torre 7-torre 34	-5,556	,645	-8,607	,000	,000
torre 22-torre 25	-,111	,645	-,172	,863	1,000
torre 22-torre 27	-,944	,645	-1,463	,143	1,000
torre 22-torre 10	2,361	,645	3,658	,000	,009
torre 22-torre 29	-3,722	,645	-5,766	,000	,000
torre 22-torre 20	4,250	,645	6,584	,000	,000
torre 22-torre 37	-4,417	,645	-6,842	,000	,000
torre 22-torre 34	-4,750	,645	-7,359	,000	,000
torre 25-torre 27	-,833	,645	-1,291	,197	1,000
torre 25-torre 10	2,250	,645	3,486	,000	,018
torre 25-torre 29	-3,611	,645	-5,594	,000	,000
torre 25-torre 20	4,139	,645	6,412	,000	,000
torre 25-torre 37	-4,306	,645	-6,670	,000	,000
torre 25-torre 34	-4,639	,645	-7,187	,000	,000
torre 27-torre 10	1,417	,645	2,195	,028	1,000
torre 27-torre 29	-2,778	,645	-4,303	,000	,001
torre 27-torre 20	3,306	,645	5,121	,000	,000
torre 27-torre 37	-3,472	,645	-5,379	,000	,000
torre 27-torre 34	-3,806	,645	-5,896	,000	,000
torre 10-torre 29	-1,361	,645	-2,109	,035	1,000
torre 10-torre 20	-1,889	,645	-2,926	,003	,124
torre 10-torre 37	-2,056	,645	-3,184	,001	,052
torre 10-torre 34	-2,389	,645	-3,701	,000	,008
torre 29-torre 20	,528	,645	,818	,414	1,000
torre 29-torre 37	-,694	,645	-1,076	,282	1,000
torre 29-torre 34	-1,028	,645	-1,592	,111	1,000
torre 20-torre 37	-,167	,645	-,258	,796	1,000
torre 20-torre 34	-,500	,645	-,775	,439	1,000
torre 37-torre 34	,333	,645	,516	,606	1,000

Cada linha testa a hipótese nula em que as distribuições Amostra 1 e Amostra 2 são iguais.

As significâncias assintóticas (teste de dois lados) são exibidas. O nível de significância é ,05.

a. Os valores de significância foram ajustados pela correção Bonferroni para vários testes.

Tabela A5: Testes de Normalidade dos resíduos do modelo da ANOVA para as torres a 100 m, 45°

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Resíduo para veloc	,076	105	,164	,982	105	,155

a. Lilliefors Significance Correction

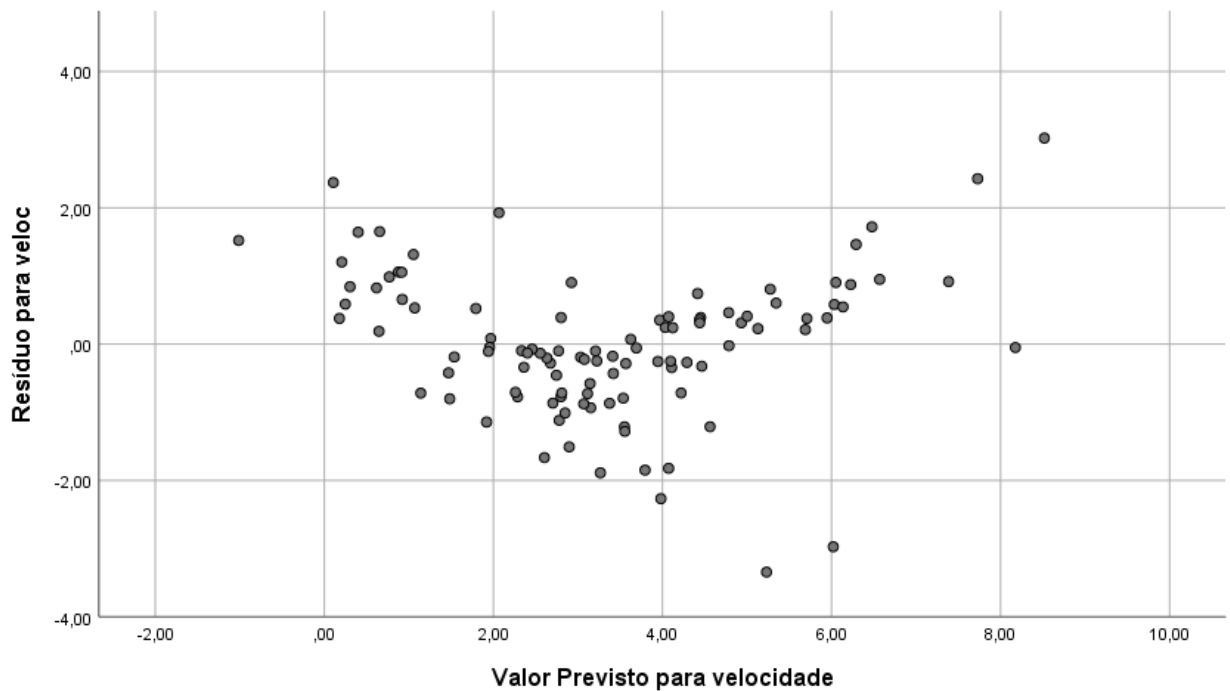


Figura A1: Gráfico dos resíduos do modelo da ANOVA para as torres a 100 m, 45°

Tabela A6: Tabela ANOVA (torres 100 metros direção 225°)

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Veloc

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
torres	83,180	2	41,590	51,957	,000
Data	251,443	37	6,796	8,490	,000
Error	59,234	74	,800		
Corrected Total	393,857	113			

a. R Squared = ,850 (Adjusted R Squared = ,770)

Tabela A7: Testes de Normalidade dos resíduos do modelo da ANOVA para as torres a 100 m, 225°

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Resíduo para Veloc	,042	114	,200*	,991	114	,628

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

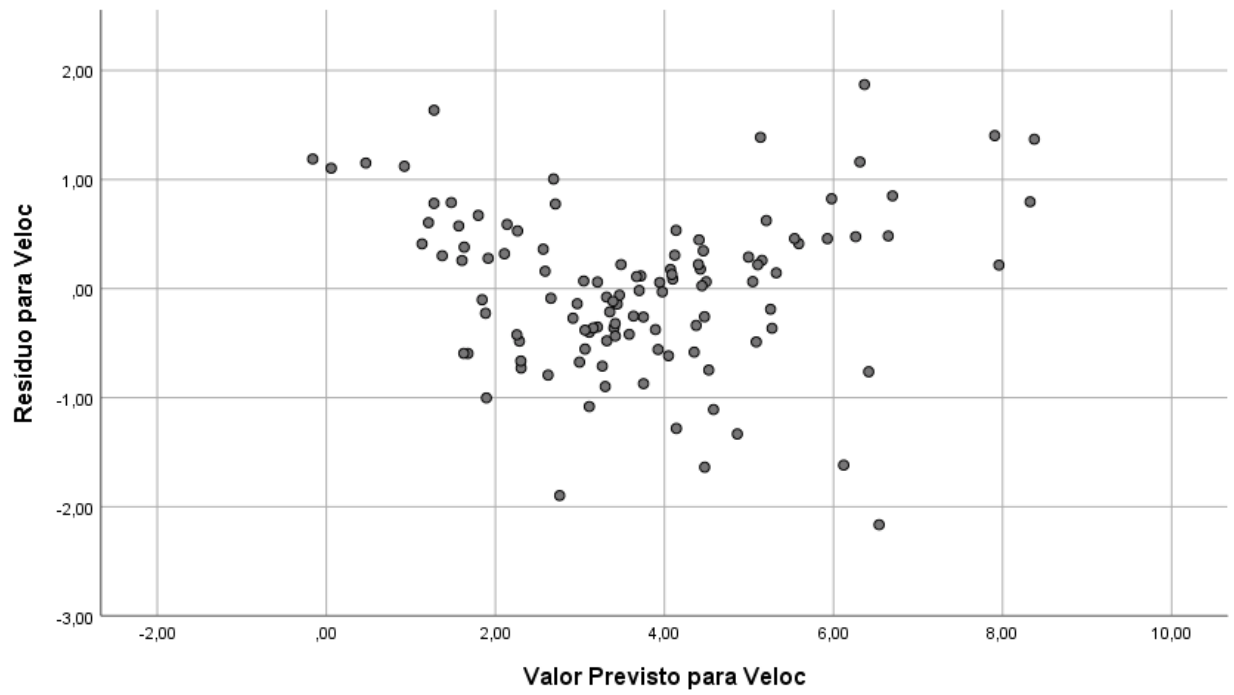


Figura A2: Gráfico dos resíduos do modelo da ANOVA para as torres a 100 m, 225°