

**MAÍRA DE OLIVEIRA SANTOS**

**CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES  
TEMPORAIS DA VELOCIDADE E DA DIREÇÃO DO VENTO**

RECIFE-PE - MAIO/2010



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

## **CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS DA VELOCIDADE E DA DIREÇÃO DO VENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada como exigência parcial à obtenção do título de Mestre.

**Área de Concentração: Modelagem Estatística e Computacional**

Orientadora: Profa. Dra. Tatijana Stošić

RECIFE-PE - MAIO/2010.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

**CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS DA VELOCIDADE E  
DA DIREÇÃO DO VENTO**

Maíra de Oliveira Santos

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 07/06/2010 pela Comissão Examinadora.

Orientadora:

---

Profa. Dra. Tatijana Stošić  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Lucian Bogdan Bejan  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Pedro Hugo de Figueirêdo  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Wilson Rosa de Oliveira Junior  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico, com amor, aos meus pais.

## Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, sem o qual nada disto seria possível.

Expresso minha gratidão às seguintes pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Aos meus pais pelo exemplo de vida, pelo amor incondicional, pela paciência e pelo carinho da minha mãe, Jacira Oliveira, pelos conselhos e cuidados do meu pai, Armando Santos, por sempre apoiarem meus estudos e minha formação e sempre disponibilizando as melhores condições possíveis para o meu crescimento intelectual.

Ao meu irmão Alan por freqüentemente interromper meus estudos com seus causos e piadas, sempre muito engraçados, fazendo com que eu relaxasse do estresse dos estudos (apesar da raiva inicial por ter sido interrompida).

Ao meu amado Cristiano, pela felicidade que me proporciona, pelo companheirismo, pela paciência, pelo apoio aos meus estudos e à minha carreira, por compartilhar todas as felicidades e tristeza da minha vida, fazendo cada vitória ser, não somente minha, mas sim, nossa.

A todos da minha família que me apoiaram e torceram sempre por mim.

À minha orientadora Tatijana Stosic, pela confiança, pelo apoio científico, pelo incentivo, pela dedicação, pela presteza, pelos conselhos pessoais e pela amizade. Acima de tudo por ter verdadeiramente me orientado em cada passo deste trabalho, ajudando em tudo o que fosse possível.

Às amigas do ensino médio, Kelly, Caroline, Andressa e Janaína, que estão comigo até hoje e sempre me incentivaram em tudo. Em especial a Kelly, a primeira a quem eu recorria quando meu computador parava de funcionar.

Às amigas e amigos que conquistei durante a graduação e o mestrado. Em especial Vanessa pelos conselhos, a Juliana pela presteza e mais fortemente agradeço a Amanda, entre outras coisas, pela paciência de instalar o TEX três vezes nos computadores, quando quebravam ou eram roubados, para que eu pudesse continuar preparando a dissertação.

Ao Programa de Pós-graduação em Biometria e Estatística por me acolher e a todos

os professores e coordenadores que me apioaram.

E, por fim, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro.

"Aquele que não é capaz de lutar pelo que quer, não é merecedor daquilo que deseja."

**Autor Desconhecido**

## Resumo

O estudo do clima e dos seus elementos tem grande importância econômica e ambiental, visto que uma grande e inesperada variação em ao menos um dos elementos do clima pode devastar plantações, cidades, e assim mudar a economia de uma região e a vida das pessoas que ali habitam. O clima pode ser influenciado por diversos fatores, tais como latitude, altitude, massas do ar, continentalidade, maritimidade, correntes marítimas, relevo, vegetação, etc. Os elementos mais importantes do clima são temperatura, umidade, pressão atmosférica, radiação solar, precipitação e vento. O vento é gerado pelo movimento de massas do ar na atmosfera e pode influenciar vários fenômenos, como erosão do solo, dispersão de poluentes, transporte de pólen e sementes, propagação de doenças e geração da energia eólica. A velocidade do vento na superfície é um exemplo natural do fenômeno de turbulência, que representa um processo estocástico caracterizado pela invariância de escala temporal e espacial. Neste trabalho foram estudadas as correlações de longo alcance em séries temporais da velocidade e direção do vento registradas em quatro estações meteorológicas, nas cidades Arcoverde, Cabrobó, Garanhuns e Petrolina em Pernambuco. Foi utilizado o método Detrended fluctuation analysis (DFA), desenvolvido para quantificar as correlações de longo alcance em séries temporais não estacionárias. Foram analisadas as séries originais da velocidade do vento e as séries dos valores absolutos dos incrementos (volatilidade) da direção do vento. Todas as séries analisadas possuem as correlações de longo alcance persistentes, com expoente de escala acima de 0,5. Em todos os casos os valores dos expoentes são menores para a direção do que para a velocidade do vento, indicando que a persistência é mais fraca para a direção do vento. Não foi detectada a correlação entre os valores dos expoentes de escala e os parâmetros geográficos: longitude, latitude e altitude da estação. Os resultados destas análises vão ajudar a entender melhor a natureza dos processos estocásticos geradores da dinâmica do vento. Este entendimento é necessário para desenvolvimento dos modelos teóricos e computacionais mais precisos cujos resultados servirão como base para modelagem dos vários fenômenos influenciados pelas condições climáticas.

**Palavras-chave:** Detrended fluctuation Analysis, Correlações de Longo Alcance, Velocidade e direção do vento.

## Abstract

The study of climate has great economic and environmental importance, given that a single large and unexpected variation of a climatic element may devastate plantations or cities, and thus affect the economy of a region and life of the inhabitants. Climate can be influenced by diverse factors, such as latitude, altitude, air mass, proximity to sea, sea currents, terrain topology, vegetation, etc. The most important climate elements are temperature, humidity, atmospheric pressure, solar radiation, precipitation and wind. The wind is generated by atmospheric air mass movement, and may influence various phenomena such as soil erosion, pollutant dispersal, transport of pollen and seeds, propagation of diseases, as well as generation of eolic energy. Surface wind velocity is a natural example of the phenomenon of turbulence, which represents a stochastic process characterized by temporal and spatial scale invariance. In this work we study long range correlations in temporal series of wind speed and direction registered at four meteorological stations in the cities of Arcoverde, Cabrobro, Garanhuns and Petrolina, in the state of Pernambuco, Brazil. To this end we apply Detrended Fluctuation Analysis (DFA) which was developed for quantification of long range correlations in non-stationary temporal series. We analyze the original wind speed series together with volatility (absolute value of increments) of the wind direction. All the analyzed series exhibit persistent long range correlations with the scale exponent above 0.5. In all cases the exponent values were found to be lower for wind direction than those for wind speed, indicating weaker persistence. No correlation was detected between the exponent values and the geographic parameters: longitude, latitude and altitude of the station. The results of these analyses contribute to a better understanding of the nature of stochastic processes governing wind dynamics, necessary for development of more realistic theoretical and computational models as a base for modeling diverse phenomena influenced by climatic conditions.

# Lista de Figuras

1	Fractal estocástico (Couve-Flor). . . . .	p. 11
2	Fractal determinístico (Tabuleiro de Xadrez). . . . .	p. 11
3	Processo fractal da dinâmica cardíaca. GOLDBERGER et al., (2002). . . . .	p. 13
4	Mapa do estado de Pernambuco . . . . .	p. 15
5	Exemplo da divisão de uma série temporal de tamanho 1000 em $k$ intervalos de mesmo tamanho $n$ . . . . .	p. 19
6	Série temporal da velocidade do vento em Arcoverde. . . . .	p. 25
7	Série temporal da direção do vento em Arcoverde. . . . .	p. 25
8	Série temporal da velocidade do vento em Cabrobó. . . . .	p. 26
9	Série temporal da direção do vento em Cabrobó. . . . .	p. 26
10	Série temporal da velocidade do vento em Garanhuns. . . . .	p. 27
11	Série temporal da direção do vento em Garanhuns. . . . .	p. 27
12	Série temporal da velocidade do vento em Petrolina. . . . .	p. 28
13	Série temporal da direção do vento em Petrolina. . . . .	p. 28
14	DFA1 da série original (azul), $\alpha = 0,82$ e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,47$ , da velocidade do vento em Arcoverde. . . . .	p. 29
15	DFA2 da série original (azul), $\alpha = 0,81$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,51$ , da velocidade do vento em Arcoverde. . . . .	p. 29
16	DFA3 da série original (azul), $\alpha = 0,82$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,52$ , da velocidade do vento em Arcoverde. . . . .	p. 30
17	DFA1 da série original (azul), $\alpha = 0,84$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,52$ , da velocidade do vento em Cabrobó. . . . .	p. 30
18	DFA2 da série original (azul), $\alpha = 0,79$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,49$ , da velocidade do vento em Cabrobó. . . . .	p. 31

19	DFA3 da série original (azul), $\alpha = 0,81$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,52$ , da velocidade do vento em Cabrobó. . . . .	p. 31
20	DFA1 da série original (azul), $\alpha = 0,91$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,48$ , da velocidade do vento em Garanhuns. . . . .	p. 32
21	DFA2 da série original (azul), $\alpha = 0,91$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,48$ , da velocidade do vento em Garanhuns. . . . .	p. 32
22	DFA3 da série original (azul), $\alpha = 0,92$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,51$ , da velocidade do vento em Garanhuns. . . . .	p. 33
23	DFA1 da série original (azul), $\alpha = 0,87$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,51$ , da velocidade do vento em Petrolina. . . . .	p. 33
24	DFA2 da série original (azul), $\alpha = 0,88$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,54$ , da velocidade do vento em Petrolina. . . . .	p. 34
25	DFA3 da série original (azul), $\alpha = 0,89$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,51$ , da velocidade do vento em Petrolina. . . . .	p. 34
26	DFA1 da série original (azul), $\alpha = 0,70$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,53$ , da direção do vento em Arcoverde. . . . .	p. 35
27	DFA2 da série original (azul), $\alpha = 0,68$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,52$ , da direção do vento em Arcoverde. . . . .	p. 35
28	DFA3 da série original (azul), $\alpha = 0,69$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,51$ , da direção do vento em Arcoverde. . . . .	p. 36
29	DFA1 da série original (azul), $\alpha = 0,70$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,47$ , da direção do vento em Cabrobó. . . . .	p. 36
30	DFA2 da série original (azul), $\alpha = 0,72$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,52$ , da direção do vento em Cabrobó. . . . .	p. 37
31	DFA3 da série original (azul), $\alpha = 0,73$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,51$ , da direção do vento em Cabrobó. . . . .	p. 37
32	DFA1 da série original (azul), $\alpha = 0,88$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,51$ , da direção do vento em Garanhuns. . . . .	p. 38
33	DFA2 da série original (azul), $\alpha = 0,88$ , e da série randomizada (preto), $\alpha_r = 0,50$ , da direção do vento em Garanhuns. . . . .	p. 38

- 34 DFA3 da série original (azul),  $\alpha = 0,90$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,51$ , da direção do vento em Garanhuns. . . . . p. 39
- 35 DFA1 da série original (azul),  $\alpha = 0,84$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,47$ , da direção do vento em Petrolina. . . . . p. 39
- 36 DFA2 da série original (azul),  $\alpha = 0,82$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,50$ , da direção do vento em Petrolina. . . . . p. 40
- 37 DFA3 da série original (azul),  $\alpha = 0,83$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,50$ , da direção do vento em Petrolina. . . . . p. 40

# Lista de Tabelas

1	Latitude, longitude e altitude das estações meteorológicas. . . . .	p. 15
2	Medidas descritivas da velocidade e da direção do vento das quatro estações meteorológicas. . . . .	p. 22
3	Expoentes DFA para a velocidade do vento da série original ( $\alpha$ ) e randomizada ( $\alpha_r$ ). . . . .	p. 23
4	Expoentes DFA para a direção do vento da série original ( $\alpha$ ) e randomizada ( $\alpha_r$ ). . . . .	p. 23

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	p. 1
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	p. 4
2.1	Clima . . . . .	p. 4
2.1.1	Clima e Tempo . . . . .	p. 4
2.1.2	Classificação Climática . . . . .	p. 5
2.1.3	Principais Elementos Climáticos . . . . .	p. 6
2.1.4	Principais Fatores Climáticos . . . . .	p. 8
2.1.5	Vento . . . . .	p. 10
2.2	Dinâmica Fractal . . . . .	p. 10
2.2.1	Fractais . . . . .	p. 10
2.2.2	Processos Fractais . . . . .	p. 12
2.2.3	Dinâmica Fractal em Meteorologia . . . . .	p. 14
<b>3</b>	<b>DADOS E METODOLOGIA</b>	p. 15
3.1	Dados . . . . .	p. 15
3.2	Correlações de Longo Alcance em Séries Temporais . . . . .	p. 16
3.2.1	Análise da Função da Autocorrelação . . . . .	p. 16
3.2.2	Análise Espectral . . . . .	p. 16
3.2.3	Análise do Expoente de Hurst . . . . .	p. 17
3.2.4	Análise de Flutuação . . . . .	p. 18
3.2.5	Detrended Fluctuation Analysis - DFA . . . . .	p. 19

<b>4 RESULTADOS</b>	p.21
<b>5 CONCLUSÕES</b>	p.41
<b>Referências</b>	p.44

# 1 INTRODUÇÃO

Devido a sua importância para a vida na terra, o clima é um tema vastamente estudado em diversas áreas, tais como agricultura (DIAS, 1997), atividade marítima (RODRIGUES et al., 2004), estudos sobre incêndios florestais (FIEDLER, 2004), geração de energia eólica (ROVEDDER e ELTZ, 2008), entre outras. Os estudos climáticos têm sido amplamente divulgados pelos meios de comunicação de massa, e por isto, têm atraído muito mais a atenção da população. As alterações do clima têm sido notadas e divulgadas em todo o mundo e freqüentemente causam transtornos tão graves em uma região que mudam a vida das pessoas que ali residem ou que dependem dela. Esses transtornos provenientes de mudanças climáticas também têm um impacto grande na economia da região afetada. Isto tudo indica a necessidade de estudos que ajudem a entender o funcionamento do clima para que assim se possa organizar melhor o modo como o homem ocupa e muda aspectos na terra, e assim prevenir as alterações climáticas que tanto desequilibram o ecossistema do planeta.

Existem vários fatores que influenciam o clima (latitude, altitude, massas de ar, continentalidade, maritimidade, correntes marítimas, relevo, vegetação, solo, entre outras) e também existem vários elementos que o compõem (temperatura, umidade do ar, pressão atmosférica, radiação solar, precipitação, nebulosidade, vento). Os elementos do clima, de maneira particular e conjuntamente, interferem na vida do homem, seres vivos, vegetação, solo, etc. (TORRES E MACHADO, 2008). O vento é um dos elementos mais complexos do clima, e representa o fator significativo em vários fenômenos como erosão do solo, dispersão de poluentes, transporte de pólen e sementes, propagação de doenças e geração da energia eólica. O vento é o movimento das massas do ar entre as regiões de alta pressão e regiões de baixa pressão na atmosfera. Estas regiões podem medir centenas quilômetros, e sua formação é influenciada por vários fatores, entre os mais importantes estão: a radiação solar, a umidade e a rotação da terra. A diferença de pressão em plano horizontal gera uma força horizontal que determina a velocidade e a direção inicial do vento. Uma vez que o movimento do vento está estabelecido, a direção será alterada pela influência

da força de Coriolis causada pela rotação da terra (TORRES E MACHADO, 2008). Para a meteorologia, a velocidade do vento é uma das variáveis incluída em modelos de previsão do tempo em uma escala temporal relativamente curta (até duas semanas). Para avaliar a influência do vento nos fenômenos citados e, especialmente, na geração da energia eólica, é necessário conhecer a dinâmica do vento durante um período de tempo mais prolongado. Os resultados das análises empíricas das séries temporais da velocidade e direção do vento ajudam a entender melhor a natureza dos processos estocásticos geradores deste fenômeno. Este entendimento, por sua vez, possibilita o desenvolvimento dos modelos matemáticos e computacionais necessários para estudos de vários fenômenos que incluem o vento como parte do seu funcionamento. Vários fenômenos naturais têm como propriedade comum uma dinâmica caracterizada pela existência de correlações de longo alcance (a função de autocorrelação diminui seguindo uma lei de potência). Entre os fenômenos mais estudados estão: fenômenos em fisiologia, clima e economia (PENG et al. 1993, TSONIS et al., 1999, GRAN-CHARLES, 2000). Existem vários métodos desenvolvidos para detectar esta propriedade de séries temporais, entre quais os mais usados são análise de função de autocorrelação, análise de Hurst e análise espectral (BERAN, 1994). Neste trabalho nós estudamos correlações de longo alcance em séries temporais da velocidade e direção do vento registradas em quatro estações meteorológicas nas cidades Arcoverde, Cabrobó, Garanhuns e Petrolina, no estado de Pernambuco. Foi utilizado o método Detrended fluctuation analysis (DFA), introduzido por Peng em 1994 (PENG et al., 1994) para quantificar as correlações de longo alcance em séries temporais não estacionárias. Este método tem sido amplamente aplicado em diversas áreas, tais como fisiologia (IVANOV, 2009), climatologia (KOÇAK, 2009) e economia (COSTA e VASCONCELOS, 2003). Os resultados obtidos para estações diferentes serão comparados entre si e com outros resultados publicados na literatura para avaliar uma possível influência dos fatores geográficos. Estes resultados também podem servir para avaliação de um modelo de dinâmica do vento desenvolvido para as localidades onde os dados foram coletados. Um modelo matemático apropriado deve reproduzir todos os resultados das análises empíricas dos dados, para, assim, ser usado em estudos de fenômenos influenciados pela dinâmica do vento.

No capítulo 2 será feita uma revisão de literatura dividida em duas partes: clima e dinâmica fractal. Na seção sobre clima, serão revisados os seguintes conceitos: clima, diferenças entre clima e tempo, classificação climática, principais elementos climáticos, principais fatores climáticos e vento. Na seção sobre dinâmica fractal, os temas serão: fractais, processos fractais e dinâmica fractal em meteorologia. Em seguida serão apre-

sentadas as características dos dados utilizados e as metodologias mais utilizadas em estudos do mesmo tipo: Análise da função de autocorrelação, análise espectral, análise do expoente de Hurst, análise de flutuação e detrended fluctuation analysis (DFA).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Clima

O clima é caracterizado por padrões observados durante alguns anos do comportamento de vários fenômenos climáticos, como precipitação, temperatura, vento, entre outros. Ou seja, são padrões de tempo que se repetem de acordo com a época do ano ou estações. A climatologia pode ser estudada do ponto de vista meteorológico e do geográfico, os quais se complementam. Do ponto de vista geográfico, estuda a interação entre o ambiente e o homem. Do ponto de vista meteorológico, estuda a relação entre diferentes fenômenos climáticos (MENDONÇA et al., 2007).

O clima pode ser mudado se ocorrem variações em fenômenos climáticos em relação às médias históricas. Essas variações podem ser causadas pela ação humana, pelo sistema Terra-Atmosfera, ou por forças externas, como variações na atividade solar. No Brasil, o clima é bastante diversificado em consequência da fisionomia geográfica, da extensão territorial, do relevo e da dinâmica das massas de ar. As massas de ar têm um impacto grande nessa diversificação, pois influenciam a temperatura e a pluviosidade.

Pernambuco, local onde foram coletadas as variáveis usadas nesse estudo, tem um clima diversificado devido ao relevo e às massas de ar, predominando as temperaturas altas características da zona intertropical onde está localizado. O Planalto da Borborema, no sertão pernambucano, impede maiores precipitações pluviais e também a chegada de correntes de ar seco vindas do sul da África. Estes, entre outros fatores, contribuem para a caracterização do clima semi-árido quente no sertão de Pernambuco (LACERDA, 1996).

#### 2.1.1 Clima e Tempo

Apesar de serem popularmente considerados a mesma coisa, tempo e clima são diferentes para a climatologia. O tempo é definido como um estado atmosférico caracterizado

pelo estado dos elementos climáticos num determinado momento que varia de um instante podendo se estender a no máximo 15 dias. Tanto o tempo quanto o clima são definidos de acordo com os mesmos elementos climáticos (a temperatura e a insolação, a pressão atmosférica, os ventos, a umidade do ar e as precipitações (chuvas, neve, geada, orvalho e granizo), entre outras), mas a diferença entre os dois está no tempo de observação. O clima, portanto, é obtido da observação do tempo ao longo de vários anos (A Organização Mundial de Meteorologia (WMO) recomenda 30 anos) e dá uma idéia geral do que acontece em média durante todo o ano e as variações que acontecem nas diferentes estações do ano (MENDONÇA et al., 2007).

### **2.1.2 Classificação Climática**

Um dos sistemas de classificação climática mais usados e mais abrangentes é o de Köppen-Geiger, mais conhecida por classificação climática de Köppen, introduzido pelos climatologistas Wladimir Köppen e Rudolf Geiger em 1928. Este sistema de classificação parte do pressuposto que a vegetação natural é a melhor expressão do clima de uma região (ROLIM, 2007).

- **Clima Equatorial:** Caracterizado por temperaturas médias anuais e pluviosidade elevada. A temperatura média do ar fica entre 24° C e 27° C e a precipitação anual é superior a 2000 mm. As amplitudes médias anuais são muito reduzidas, ou seja, a diferença entre a temperatura média e máxima anual e média e mínima anual é muito reduzida.
- **Clima Tropical:** Abrange os climas das regiões intertropicais. Apresenta temperatura elevada o ano inteiro. Tem duas estações bem definidas: verão, que ocorre as chuvas, e inverno ameno e seco. É considerado como transição entre o clima equatorial e o desértico. Este tipo de clima ocorre na maior parte do território brasileiro.
- **Clima Subtropical:** Apresentam grande variação de temperatura entre verão e inverno. Não possuem uma estação seca e as chuvas são bem distribuídas durante o ano. É característico das áreas geográficas a sul do Trópico de Capricórnio e a norte do Trópico de Câncer, com temperaturas médias anuais nunca superiores a 20°C. A temperatura mínima do mês mais frio nunca é menor que 0°C.
- **Clima Mediterrâneo:** Está presente em regiões quentes de clima seco no verão e brando e úmido no inverno. As chuvas são relativamente escassas. Possuem quatro estações bem marcadas (primavera, verão, outono e inverno).

- **Clima Temperado:** Caracteriza-se pela existência de quatro estações bem definidas, mas que sofrem alterações em regiões próximas a mares e oceanos. Assim, a umidade depende da localização e condições geográficas de uma dada região. Possui dois subtipos: continental e marítimo. O temperado continental apresenta invernos muito frios, longos e secos e verões quentes, curtos e relativamente pluviosos. Ocorre em regiões afastadas das grandes massas continentais e nas margens ocidentais situadas nas latitudes médias e altas. O temperado marítimo caracteriza-se por verões frescos e invernos moderados e ocorrem nas mesmas latitudes do temperado marítimo, porém com mais continentalidade.
- **Clima de altitude (ou de montanhas):** Presente em regiões de relevo elevado (montanhas, planaltos). Caracteriza-se por precipitações abundantes em todos os meses do ano com invernos muito frios e verões curtos e frescos.
- **Clima Polar:** Apresenta temperaturas baixíssimas. O sol fica sempre baixo no horizonte na época do verão, e no inverno ele nem aparece. Portanto essas regiões polares (próximas aos círculos polares Ártico e Antártico) estão sempre cobertas de neve e gelo. Os invernos são extremamente frios e longos e no verão as temperaturas chegam a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- **Clima Árido:** caracterizado por temperaturas médias muito altas e grandes variações na temperatura ao longo do dia, apresentando-se muito quente durante o dia e muito frio durante a noite. Este clima é muito seco e as precipitações são escassas.
- **Clima Semi-árido:** Possui temperatura elevada e baixa umidade. Apresenta poucas chuvas, as quais são mal distribuídas durante o ano.

### 2.1.3 Principais Elementos Climáticos

Os elementos do clima são os seus componentes principais, ou seja, são aqueles que se conjugam para formar o tempo atmosférico e o clima propriamente dito. Estes elementos influenciam de maneira individual e conjuntamente o clima de uma região (TORRES E MACHADO, 2008).

- **Radiação Solar**

É a energia recebida pela terra na forma de ondas eletromagnéticas, provenientes do sol. É a energia que o globo terrestre dispõe e é responsável direta ou indiretamente por todas as formas de vida na terra. A quantidade de radiação solar incidente sobre

a superfície depende de alguns fatores, tais como, o período do ano, o período do dia, latitude e cobertura de nuvens.

- Temperatura

Pode ser definida em termos do movimento de moléculas: quanto mais rápido este movimento mais elevada a temperatura. A variação da temperatura acontece quando o calor se desloca, e isto acontece de um corpo de maior temperatura para um de menor temperatura. O aquecimento do ar atmosférico é promovido quando parte da energia absorvida pela terra é reirradiada.

- Umidade do Ar

É o componente atmosférico mais importante na determinação do tempo e do clima, embora o vapor d'água represente somente 2% da massa total da atmosfera e 4% do seu volume. Pode variar de quase zero em áreas quentes e áridas, até um máximo de 3% nas latitudes médias e 4% nos trópicos úmidos. Resulta da evaporação das águas a partir das superfícies terrestres e hídricas e da evapotranspiração dos animais e vegetais. Portanto, depende do calor para produzir a evaporação e de água para ser evaporada. Quanto maior a temperatura, maior a capacidade do ar em reter vapor d'água, pois com maior grau de calor, o ar se torna mais quente e se expande, podendo assim, conter maior quantidade de vapor d'água. Durante o dia a temperatura aumenta implicando numa diminuição da umidade. O inverso ocorre durante a noite, quando a temperatura diminui, aumentando a umidade. Então, pode-se dizer que a umidade é inversamente proporcional à temperatura.

- Pressão Atmosférica

Qualquer ponto dentro da superfície está sujeito a uma pressão correspondente ao peso da coluna de ar que lhe fica sobreposta: a pressão atmosférica. A variação da temperatura pode implicar numa variação na pressão atmosférica, pois o calor dilata o ar, tornando-o mais leve, o que determina uma menor pressão do ar sobre a superfície. Como a temperatura diminui do equador em direção aos pólos, a pressão atmosférica aumenta, ou seja, a pressão atmosférica aumenta com a latitude.

- Vento

O vento é o movimento do ar em relação à superfície terrestre. Este movimento pode acontecer tanto no sentido horizontal como no sentido vertical. O vento se desloca das áreas de alta pressão para as áreas de baixa pressão, mantendo, em geral, as características da atmosfera de onde vieram.

- **Nebulosidade**

É a parcela do céu encoberta por nuvens. A cobertura das nuvens pode refletir, difundir e mesmo absorver a radiação solar. Esta reflexão depende da cor, espessura e constituição das nuvens. As nuvens são compostas de gotículas de água e impurezas encontradas no ar, podendo estar em forma líquida e/ou de gelo em suspensão na atmosfera. O processo que dá origem às nuvens é a condensação, que acontece quando o vapor d'água presente no ar atmosférico passa para a fase líquida. A condensação do vapor d'água inicia-se quanto as massas de ar atingem a saturação e pode dar-se, principalmente, pela redução da temperatura ou pela adição de vapor d'água.

- **Precipitação**

Num estado avançado de condensação inicia-se a precipitação, a qual ocorre quando a força gravitacional supera a força que mantém a umidade suspensa, assim, a umidade cai em direção ao solo em forma líquida (chuva, chuveiro/garofa) ou sólida (granizo, neve).

#### **2.1.4 Principais Fatores Climáticos**

Os fatores do clima trazem alterações, por vezes bastante significativas, no clima e/ou nos seus elementos. São aqueles que produzem alterações e interferências diretas e/ou indiretas nos elementos climáticos e nos tipos climáticos. Esses fatores afetam diretamente os elementos climáticos, e podem fazê-lo de maneira individual ou conjuntamente (TORRES E MACHADO, 2008).

- **Latitude**

É a distância em relação ao Equador. Ao se distanciar do equador a temperatura diminui, pois a incidência de luz solar é menor.

- **Altitude**

É a distância em relação ao nível do mar. O aumento da altitude implica uma diminuição da temperatura. O que ocorre porque a concentração de gases e de umidade diminui com a altitude, o que ocasiona uma menor retenção de calor.

- **Massas de ar**

São parte da atmosfera que possuem características em comum que refletem as características da região que se originaram, como temperatura, pressão e umidade.

Quando duas massas de ar (geralmente uma quente e outra fria) se encontram, ocorrem chuvas e o tempo muda.

- **Continentalidade**

É a distância em relação à grandes massas de água e pode influenciar a temperatura, pois a água demora a se aquecer e também demora a irradiar a energia absorvida, enquanto que os continentes se aquecem e desaquecem mais rapidamente.

- **Maritimidade**

Corresponde à proximidade de um local com o mar, e influencia a temperatura de forma semelhante à continentalidade.

- **Correntes Marítimas**

São grandes massas de água com as mesmas características (temperatura, salinidade, cor, direção, densidade) e circulam pelo oceano. Exercem grande influência nas massas de ar que se formam acima delas, pois podem acumular uma grande quantidade de calor.

- **Relevo**

Influencia na circulação das massas de ar devido a interferência de montanhas e depressões. As massas de ar, por sua vez, influenciam a temperatura.

- **Vegetação**

Influencia a temperatura, pois impede a incidência direta dos raios solares na superfície, amenizando o aquecimento. E também tem impacto no ciclo hidrológico devido à emissão de vapor de água no ar.

- **Solos**

Superfícies de cores escuras absorvem mais raios solares que as claras, retendo calor durante o dia e aquecendo o ar sobre elas. Terrenos secos, tais como os arenosos, variam rapidamente de temperatura, enquanto que terrenos mais úmidos, como os argilosos, que retêm a umidade e tendem a conservar o calor e o frio.

- **Megalópoles**

A presença de megalópoles ou de extensas áreas rurais, as quais modificaram muito a paisagem natural, como por exemplo a Grande São Paulo e a Grande Rio de Janeiro podem influenciar o clima local.

- Translação

Devido à inclinação do eixo da Terra, influencia na sazonalidade (alternância entre as estações do ano), na insolação e na formação dos ventos.

## 2.1.5 Vento

O vento já desempenhou um papel muito importante na história da humanidade quando era utilizado para mover as grandes embarcações que auxiliaram os descobrimentos de novos continentes e também foi muito utilizado para movimentar moinhos.

O vento é um elemento do clima gerado pelo movimento de massas de ar na atmosfera e é influenciado por vários fenômenos climáticos citados anteriormente, diferenças de pressão atmosférica entre duas regiões distintas, temperatura e translação, por exemplo. Esses fatores influenciam o vento tornando-o mais forte (ventania) ou suave (brisa) dentre outras características.

Além de ser afetado por vários fenômenos climáticos, o vento pode também afetar as condições atmosféricas, fazendo com que sejam importantes para a meteorologia estudos sobre este elemento do clima. Os ventos carregam grandes massas de água na forma de nuvens e distribuem o calor na atmosfera interferindo na formação das chuvas também interferindo na formação e no movimento das dunas (LIU et al., 2005).

Podem-se destacar alguns aspectos positivos e negativos do vento. Entre os positivos destacam-se a dispersão dos poluentes (DEMIRICI E CUHADAROGLY, 2000), o transporte de pólen (FRIEDMAN E BARRET, 2009) e de sementes (JONGEJANS E TELENIOUS, 2004) e também a geração de energia (PIMENTA E KEMPTON, 2008). Alguns efeitos negativos do vento são os danos à vegetação que os ventos podem causar e a propagação de doenças, em particular as bacterianas (TORRES E MACHADO, 2008; PAZ E BROZA, 2007).

## 2.2 Dinâmica Fractal

### 2.2.1 Fractais

Fractais são objetos complexos que possuem duas propriedades características: auto-similaridade (os pedaços do objeto assemelham-se ao objeto todo) e tem a dimensão não inteira (fracionária) menor do que a dimensão do espaço euclidiano no qual o frac-

tal se encontra contido. Exemplos dos fractais são: árvores, nuvens, linhas costeiras, redes arteriais, árvore traqueobronquial, ramificações de músculos cardíacos, neurônios etc. (MANDELBROT, 1982; FEDER, 1988; VICSEK, 1993; BASSINGTHWAIGHT, LIEBOVITCH, BRUCE, 1994). Os exemplos citados representam os fractais estocásticos, (Figura 1) que possuem a propriedade de auto-similaridade em sentido estatístico, dentro dos limites da escala, onde o limite inferior representa à dimensão de partículas do sistema e o limite superior à dimensão linear do sistema.

Outra classe dos fractais são os fractais determinísticos, os quais possuem propriedade de auto-similaridade em todas as escalas (Figura 2). O procedimento de construção desses objetos geométricos é um processo iterativo que consiste em substituir as unidades da estrutura (ex. triângulos, quadrados) pela estrutura básica característica para cada tipo de fractal (VICSEK, 1993).



Figura 1: Fractal estocástico (Couve-Flor).

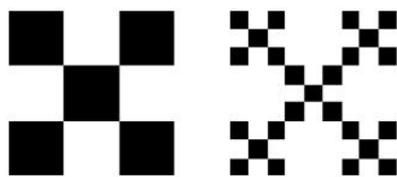


Figura 2: Fractal determinístico (Tabuleiro de Xadrez).

Para fractais estocásticos a dimensão fractal é definida pela expressão:

$$V(R) \propto R^{d_f} \quad (2.1)$$

onde  $V(R)$  é o volume da região de dimensão linear  $R$  e  $d_f$  a dimensão fractal, um número não inteiro e menor do que a dimensão euclidiana  $D$  do espaço em que o fractal está situado ( $d_f < D$ ). Os métodos mais utilizados para calcular a dimensão fractal são: contagem de caixas (box counting), raio de giração (radius of gyration) e função de correlação

(correlation function) (VICSEK, 1993).

Para fractais determinísticos o procedimento para calcular a dimensão fractal é o seguinte: se  $N(l)$  é o número de unidades da estrutura (ex. triângulos, quadrados) em escala  $l$ , a diminuição da escala  $b$  vezes resulta em um novo número de unidades,

$$N\left(\frac{l}{b}\right) = N(l)b^{d_f}. \quad (2.2)$$

A dimensão fractal  $d_f$  pode ser calculada usando a expressão:

$$d_f = \frac{\log \frac{N(\frac{l}{b})}{N(l)}}{\log b}. \quad (2.3)$$

A expressão (2.3) é válida para todas as escalas. No caso do tabuleiro de xadrez, Figura 2, a diminuição de escala três vezes resulta com aumento de unidades estruturais (quadrados) cinco vezes e a dimensão fractal calculada pela equação (2.3) tem valor  $d_f = \frac{\log 5}{\log 3} = 1.465$  (VICSEK, 1993).

## 2.2.2 Processos Fractais

O conceito fractal também se aplica em processos complexos que não possuem uma única escala do tempo. Os processos fractais geram flutuações em múltiplas escalas do tempo. Essas flutuações possuem a auto-similaridade estatística da mesma maneira que os objetos fractais possuem auto-similaridade nas várias escalas espaciais. Os exemplos são: os intervalos entre batimentos cardíacos (KOBAYASHI e MUSHI, 1982; PENG et al., 1993), intervalo entre dois passos (HAUSDORFF et al., 1995), flutuações na respiração (SZETO et al., 1992), flutuações em atividade elétrica cerebral (KULISH, et al., 2006), fenômenos climáticos (ONATE, 1997), dados financeiros (MULLIGAN, 2004), etc.

A Figura 3 representa um processo fractal da frequência cardíaca (número de batimentos cardíacos por minuto) de um indivíduo saudável mostrando a auto-similaridade estatística das flutuações nas escalas diferentes.

Uma série temporal  $y(t)$  possui propriedade de auto-similaridade com o parâmetro  $\alpha$  se:

$$y(t) = a^\alpha y\left(\frac{t}{a}\right). \quad (2.4)$$

em que " $=$ " significa a igualdade de propriedades estatísticas. Essa igualdade surge após mudanças de escalas para  $t$  e  $y(t)$  usando os fatores diferentes:  $a$  para  $t$  ( $t \rightarrow \frac{t}{a}$ ) e

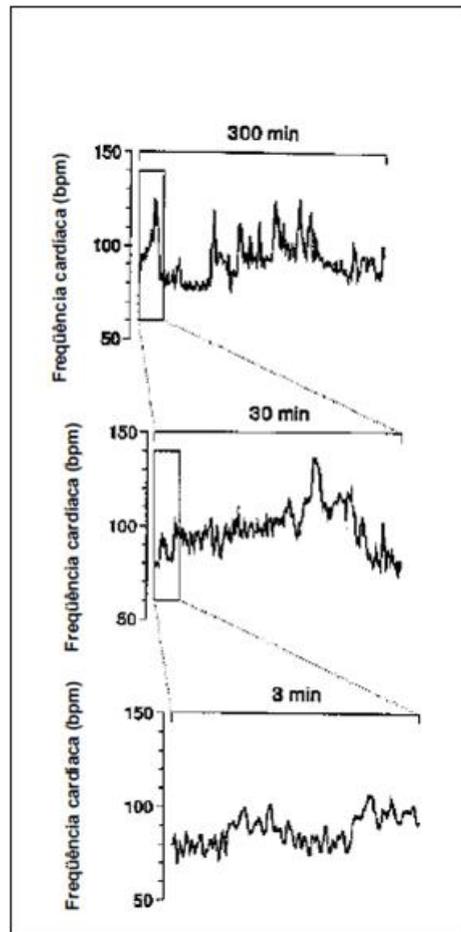


Figura 3: Processo fractal da dinâmica cardíaca. GOLDBERGER et al., (2002).

$a^\alpha$  para  $y(t)$  ( $y(t) \rightarrow a^\alpha y(t)$ ). O expoente  $\alpha$  chama-se parâmetro de auto-similaridade, ou expoente de escala (FEDER, 1988).

A característica de um processo auto-similar ( $\alpha > 0$ ) é que as flutuações dentro de um intervalo (subconjunto da série) aumentam com o tamanho do intervalo seguindo uma lei da potência, significando uma série temporal não limitada (unbounded). Por outro lado, a maioria das séries temporais de interesse (exemplo, séries temporais de batimentos cardíacos e de intervalos entre dois passos) são limitadas (bounded), tornando a aplicação da definição (2.4) difícil, porque pode resultar no mesmo valor do parâmetro de auto-similaridade ( $\alpha = 0$ ) para uma série que possui auto-similaridade e uma série que não possui auto-similaridade (GOLDBERGER et al., 2002).

Esta dificuldade pode ser superada transformando a série original em uma série integrada (semelhante a transformar deslocamentos de um movimento Browniano para uma trajetória). Quando se aplica a análise fractal em uma série integrada, o parâmetro  $\alpha$  sem-

pre é diferente para uma série auto-similar e uma série sem correlação (FEDER, 1988).

### 2.2.3 Dinâmica Fractal em Meteorologia

A previsão de variabilidade de valores diários dos parâmetros climáticos (temperatura, umidade, pressão, etc.) é possível dentro de um período de tempo limitado em aproximadamente duas semanas. Esta memória curta pode ser bem aproximada utilizando processos auto-regressivos (AMATO et al., 1989; KIRALY e JANOSI, 2002). Durante a última década vários resultados empíricos mostraram a existência de correlações de longo alcance em processos climáticos (KIRALY et al., 2006; ECHNER et al., 2003; MONETI et al., 2003; WEBER e TALKNER, 2001; CHEN et al., 2007; WANG et al., 2010; VAROTSOS et al., 2008; LIVINA et al., 2003; BERETTA et al., 2005; MATSOUKAS et al., 2000). Os resultados iniciais indicaram que o expoente de escala de séries temporais de temperatura não dependem da posição geográfica (KOSCIENLY-BUNDE et al., 1998). Por outro lado, os resultados subseqüentes mostraram a variedade de expoentes de escala de séries temporais de temperatura para várias posições geográficas (WEBER e TALKNER, 2001; EICHNER et al., 2003; KIRALY e JANOSI, 2005), indicando a necessidade da análise da distribuição espacial dos valores de expoentes. Valores diferentes de expoentes de escala foram detectados para séries temporais de temperatura máxima e temperatura mínima (PATTANTYUS-ABRAHAM et al., 2004) e em séries temporais de temperatura e umidade (CHEN et al., 2007). A análise de correlações de longo alcance em processos climáticos é importante para validar modelos climáticos. Os resultados mostraram que os principais modelos climáticos não reproduziram corretamente as propriedades de escala detectadas em dados observados e que precisam ser ajustados (GOVINDAN et al., 2002; FRAEDRICH e BLENDER, 2003; BLENDER e FRAEDRICH, 2003; VYUSHIN et al., 2004). Recentemente vários resultados mostraram que os processos climáticos possuem uma dinâmica multifractal caracterizada pela hierarquia dos expoentes de escala (LIN e FU, 2008; ASHKENAZY et al., 2003; KANTELHARDT et al., 2006; ZHANG et al., 2009). Correlações de longo alcance em séries temporais de velocidade do vento começaram a ser estudados recentemente. Os resultados mostram que semelhante a outras variáveis climáticas, como temperatura, umidade e precipitação, as séries temporais de velocidade do vento possuem correlações de longo alcance, características da dinâmica fractal (KAVASSERI, 2005; KOÇAK, 2009) e, em alguns casos, de uma dinâmica mais complexa: a dinâmica multifractal (GOVINDAN e KANTZ, 2004; KAVASSERI e NAGARAJAN, 2005; FENG et al., 2009).

## 3 DADOS E METODOLOGIA

### 3.1 Dados

Os dados estudados nesta dissertação foram obtidos na página do Instituto Nacional de meteorologia, INMET (<http://www.inmet.gov.br/>), na internet e correspondem a quatro séries temporais da velocidade do vento na superfície e quatro séries temporais da direção do vento na superfície nos municípios de Arcoverde, Cabrobó, Garanhuns e Petrolina, situados no sertão de Pernambuco. Seus valores foram medidos a cada hora durante o período de 01/01/08 a 07/04/09, totalizando 11.100 observações. A Figura 4 mostra o mapa do estado de Pernambuco indicando, entre outras, as cidades onde foram feitas as medições e na Tabela 3.1 pode-se observar a latitude, longitude e altitude de cada estação.



Figura 4: Mapa do estado de Pernambuco

Tabela 1: Latitude, longitude e altitude das estações meteorológicas.

Estação	Latitude	Longitude	Altitude
Arcoverde	-8,4333	-37,0833	680,70
Cabrobó	-8,5036	-39,3144	342,00
Garanhuns	-8,9069	-36,4972	822,00
Petrolina	-9,3833	-40,8000	370,46

## 3.2 Correlações de Longo Alcance em Séries Temporais

### 3.2.1 Análise da Função da Autocorrelação

Para séries temporais estacionárias,  $x_i, i = 1, \dots, N$ , com média e desvio padrão constantes, a função de autocovariância é dada pela equação  $C(s) = \frac{1}{N-s} \sum_{i=1}^{N-s} x_i x_{i+s}$ . A função de autocorrelação é obtida dividindo-se a função de autocovariância pela variância. Se  $x_i$  são não correlacionados, o valor esperado de  $C(s)$  é nulo para  $s > 0$ .

Se a série for estacionária, o decaimento da função de autocorrelação determinará se a série possui ou não correlação de longo alcance. Um decaimento exponencial,  $C(s) \approx \exp(-s/t_x)$  (com tempo de decaimento característico  $t_x$ ), indica que a série possui correlação de curto alcance. Por outro lado, uma função de autocorrelação com decaimento seguindo uma lei de potência,  $C(s) \propto s^{-\gamma}$ , indica que a série possui correlação de longo alcance com o expoente de correlação,  $0 < \gamma < 1$ . Para correlações de longo alcance,  $\int_0^\infty C(s) ds$  diverge no limite de séries infinitamente longas ( $N \rightarrow \infty$ ). Esta interpretação não é apropriada se a série não for estacionária, pois a média não estará bem definida (BERAN, 1994; RANGARAJAN e DING, 2000).

A existência de correlações de longo alcance foi detectada em séries temporais relacionadas aos vários fenômenos em fisiologia (HAUSDORFF et al., 1995; TONG et al., 2007; GOLDBERGER et al., 2002; NIKULIN e BRISMAR, 2005; IVANOV et al., 2009), economia (LIU et al., 1999; GRAN-CHARLES, 2000; CAJUEIRO e TABAK, 2005; WANG et al., 2009), geofísica (CURRENTI et al., 2005; ENNARTZ et al., 2008; AHN e WANLISS, 2007), engenharia (ALVAREZ-RAMIREZ et al., 2005; SHANG et al., 2008), meteorologia (TSONIS et al., 1999; ASHKENAZY et al., 2003; CHEN et al., 2007; VAROSTOS e KIRK-DAVIDOFF, 2006), etc. A seguir apresentaremos os métodos mais utilizados para detecção desta propriedade.

### 3.2.2 Análise Espectral

Utilizando a transformada de Fourier pode-se aplicar a análise espectral em séries temporais. Seja a série temporal  $x_i, i = 1, \dots, N$ , e seja  $\delta$  o intervalo entre as observações. A transformada de Fourier e a transformada inversa de Fourier são dadas, respectivamente, pelas equações abaixo.

$$X_k = \delta \sum_{n=1}^N x_n e^{2\pi i n k / N}, \quad k = 1, \dots, N. \quad (3.1)$$

$$x_n = \frac{1}{N\delta} \sum_{k=1}^N X_k e^{-2\pi i n k / N}, \quad n = 1, \dots, N. \quad (3.2)$$

A densidade de espectro de potência é dada por

$$S_k = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2|X_k|^2}{N\delta}, \quad k = 1, \dots, N/2. \quad (3.3)$$

Para séries auto-similares,  $S_k \approx f_k^{-\beta}$ , em que  $f_k = \frac{k}{N\delta}$  e  $k = 1, \dots, N/2$  e  $\beta = 1 - \gamma$  (RANGARAJAN e DING, 2000).

### 3.2.3 Análise do Expoente de Hurst

Estudando hidrologia, no rio Nilo, Egito, Harold Edwin Hurst (1880-1978) desenvolveu uma análise que permite quantificar correlações de longo alcance em séries temporais (KANTEHARDT, 2009). Para calcular o expoente de Hurst deve-se inicialmente dividir a série original  $x_i$  em  $\nu$  segmentos de tamanho  $s$  produzindo  $N_s = \text{int}(N/s)$  segmentos. Em seguida, a série original de cada segmento  $\nu = 0, \dots, N_s-1$  é integrada através da subtração da média em cada intervalo, obtendo trechos de série sem tendência:

$$Y_\nu(j) = \sum_{i=1}^j (x_{\nu s+i} - \frac{1}{s} \sum_{i=1}^j x_{\nu s+i}) = \sum_{i=1}^j x_{\nu s+i} - \frac{j}{s} \sum_{i=1}^j x_{\nu s+i} \quad (3.4)$$

Após isto, são obtidas as diferenças entre os valores máximos e mínimos em cada segmento, bem como o desvio padrão de cada um desses segmentos:

$$R_\nu(s) = \max_{j=1}^s Y_\nu(j) - \min_{j=1}^s Y_\nu(j), \quad S_\nu(s) = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{j=1}^s Y_\nu^2(j)}. \quad (3.5)$$

A função de flutuação é dada pela expressão  $F_{RS}(s) = \frac{1}{N_s} \sum_{\nu=0}^{N_s-1} \frac{R_\nu(s)}{S_\nu(s)} \approx s^H$ , para  $s \gg 1$ , em que  $H$  é o expoente de Hurst, o qual é relacionado com o expoente de correlação  $\gamma$  e com o coeficiente  $\beta$  da análise espectral pela equação  $2H = 1 + \beta = 2 - \gamma$  (RANGARAJAN e DING, 2000). O expoente  $H$  está limitado no intervalo  $(0, 2)$  com significativa imprecisão nos extremos desse intervalo. A principal diferença entre estes três expoentes está no fato de que  $\gamma$  e  $\beta$  se referem a auto-similaridade da série original enquanto que  $H$  indica a auto-similaridade das séries integradas em cada intervalo.

A interpretação do expoente  $H$  é a seguinte (FEDER, 1988): i) Para ruído branco (séries não correlacionadas)  $H = 0,5$  e a função de autocorrelação diminui exponencialmente.

ii) O valor  $0,5 < H < 1$  indica que a série original possui correlações de longo-alcance persistentes: os valores grandes (pequenos) tem maior probabilidade de serem seguidos por valores grandes (pequenos), a função de autocorrelação diminui seguindo uma lei de potência  $C(n) \approx n^{-\gamma}$ , com  $\gamma = 2 - 2H$ . iii) Para  $0 < H < 0,5$  a série é anti-persistente significando que os valores grandes (pequenos) tem maior probabilidade de serem seguidos por valores pequenos (grandes). iv) O valor  $H = 1$  representa um ruído tipo  $1/f$  (o espectro de potências segue uma lei de potências  $S(f) \approx f^{-\beta}$ , com  $\beta = 2H - 1 = 1$ ). v) Para  $H > 1$  as correlações existem, contudo não diminuem seguindo uma lei de potências. O caso especial  $H = 1,5$  indica um ruído Browniano, que é a integração do ruído branco.

O expoente de Hurst  $H$  pode ser interpretado como o parâmetro que indica a suavidade da série original. Quanto maior o valor de  $H$ , mais suave é a série. Neste aspecto, o ruído  $1/f$  pode ser interpretado como uma transição entre o processo não correlacionado (ruído branco) e um processo muito mais suave (ruído Browniano) (PRESS, 1978).

### 3.2.4 Análise de Flutuação

Seja  $X_i, i = 1, \dots, N$ , uma série temporal com média zero. A série original é integrada, formando uma nova série  $Y(j) = \sum_{i=1}^j x_i, j = 1, 2, \dots, N$ . Esta nova série,  $Y$ , é dividida em segmentos não sobrepostos de tamanho  $s$  produzindo  $N_s = \text{int}(N/s)$  segmentos começando do início da série e produzindo  $N_s = \text{int}(N/s)$  segmentos não sobrepostos de tamanho  $s$  começando do final da série. Fazendo esta divisão a partir do início e a partir do fim garante-se que nenhum valor da variável será perdido, nem do início nem do fim da série  $Y$ .

A função de flutuação é obtida pela equação  $F_{FA}^2(\nu, s) = [Y(\nu s) - Y((\nu + 1)s)]^2$  para  $\nu = 0, \dots, N_s - 1$ , e pela equação  $F_{FA}^2(\nu, s) = [Y(N - (\nu - N_s)s) - Y(N - (\nu + 1 - N_s)s)]^2$  para  $\nu = N_s, \dots, 2N_s - 1$ . A média de  $F_{FA}^2(\nu, s)$  para todos os segmentos é dada pela expressão

$$F^2(s) = \left[ \frac{1}{2N_s} \sum_{\nu=0}^{2N_s-1} F_{FA}^2(\nu, s) \right]^2. \quad (3.6)$$

Em correlações de longo alcance,  $F^2(s)$  aumenta segundo uma lei de potência  $F^2(s) \approx s^\alpha$ , em que  $\alpha \approx H$ . O expoente  $\alpha$  é idêntico ao expoente de Hurst,  $H$ , para dados monofractais e está relacionado com  $\gamma$  e  $\beta$  pela equação  $2\alpha = 1 + \beta = 2 - \gamma$ . O expoente da análise de flutuação tem valor limitado,  $0 < \alpha < 1$  e, assim como o expoente de Hurst,

possui significativa imprecisão nos extremos desse intervalo. Uma característica desta análise é que deve ser limitada a  $s < N/10$  (KANTELDHARDT, 2009).

### 3.2.5 Detrended Fluctuation Analysis - DFA

O método Detrended Fluctuation Analysis (DFA) é utilizado em séries temporais não estacionárias para quantificar as correlações de longo alcance. O DFA foi introduzido para análises de seqüências gênicas de DNA (PENG et al., 1994) e vem sendo amplamente aplicado em diversas áreas tais como: fisiologia (IVANOV et al., 2009); climatologia (KAVASSERI E NAGARAJAN, 2004); e séries temporais econômicas (COSTA e VASCONCELOS, 2003). A vantagem deste método em relação aos métodos convencionais é que ele também evita falsas detecções de correlações de longo alcance que são artefatos de tendência incorporada no sinal (HU et al., 2001).

Inicialmente a série deve ser integrada, processo que transforma a série original,  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , em

$$y(k) = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}), \quad (3.7)$$

em que  $\bar{x}$  é a média dos valores de  $x_i$  com  $i = 1, 2, \dots, N$ , e  $k$  é um número inteiro entre 1 e  $N$ .

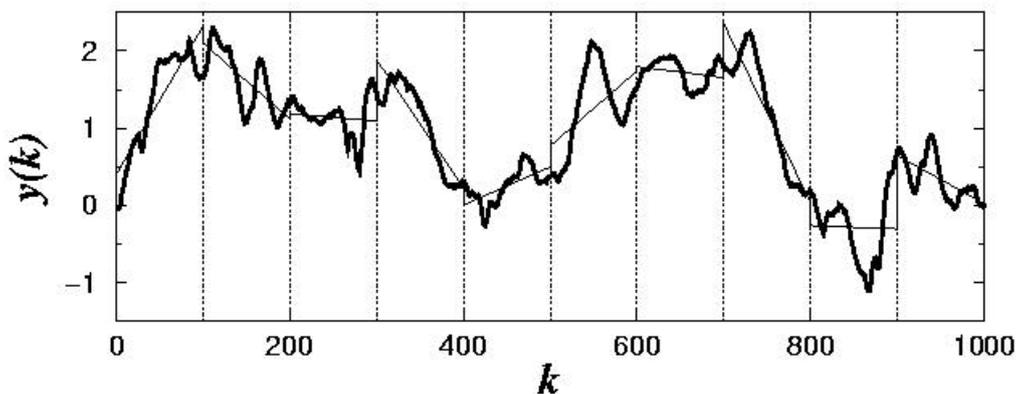


Figura 5: Exemplo da divisão de uma série temporal de tamanho 1000 em  $k$  intervalos de mesmo tamanho  $n$ .

Em seguida a série temporal integrada é dividida em intervalos de mesmo tamanho  $n$ , e em cada um destes intervalos, uma reta é ajustada aos dados por mínimos quadrados (representando a tendência em cada intervalo). Ver exemplo da Figura 5. A coordenada  $y$  da reta (representando a tendência no intervalo de tamanho  $n$ ) é denotada por  $y_n(k)$ . Além

da função linear (DFA-1), a tendência pode ser ajustada usando-se as funções polinomiais: quadrática (DFA-2), cúbica (DFA-3) e de ordem  $m$  (DFA- $m$ ). Depois é retirada a tendência da série temporal integrada,  $y(k)$ , subtraindo da mesma a tendência local  $y_n(k)$  em cada intervalo. A medida da flutuação da série para o tamanho  $n$  dos intervalos usados é dada por:

$$F_{DFA}(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2}. \quad (3.8)$$

Este cálculo é repetido para todas as escalas (tamanhos de intervalos) para fornecer a relação entre  $F(n)$  e o tamanho do intervalo  $n$ . Para um processo auto-similar  $F(n)$  tende a crescer com o tamanho do intervalo,  $n$ , pela lei de potência

$$F_{DFA}(n) \propto n^\alpha. \quad (3.9)$$

O coeficiente angular da reta entre  $\log F(n)$  e  $\log(n)$  determina o expoente (parâmetro de auto-similaridade),  $\alpha$ , o qual se relaciona com a função de autocorrelação da série original da seguinte forma:

- Para ruído branco (séries não correlacionadas) a série representa uma caminhada aleatória e o método DFA apresentará  $\alpha = 0,5$ ;
- Um parâmetro de auto-similaridade no intervalo  $0,5 < \alpha < 1$ , indica que a série original apresenta autocorrelações de longo alcance persistentes;
- Para um valor de parâmetro  $\alpha = 1$  a série representa um ruído do tipo  $1/f$ ;
- Para parâmetro de auto-similaridade no intervalo  $0 < \alpha < 0,5$ , as autocorrelações são anti-persistentes;
- O caso especial  $\alpha = 1,5$  indica um ruído Browniano que é a integração do ruído branco.

Neste trabalho foi utilizado o método DFA para analisar as correlações de longo alcance em séries temporais da velocidade e da direção do vento, as quais foram registradas em quatro estações meteorológicas em Pernambuco. Utilizou-se um software disponível no site da PhysioNet (<http://www.physionet.org/>), um fórum on-line que reúne uma grande coleção de registros de sinais biomédicos e softwares para análise dos mesmos.

## 4 RESULTADOS

O método DFA foi aplicado nas séries originais da velocidade do vento e nas séries dos valores absolutos (volatilidade) da direção do vento. A direção do vento em plano horizontal tem valores entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$  que podem gerar incrementos artificiais de grande magnitude (por exemplo, quando a direção muda de  $5^\circ$  para a  $355^\circ$ ). Para possibilitar a análise das correlações, os incrementos da direção  $\delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i$  devem ser corrigidos pela expressão  $\delta\theta \rightarrow \delta\theta - (\delta\theta/|\delta\theta|)360$  para  $|\delta\theta| > 180$  (VAN DOOM et al., 2000).

As Figuras 6- 13 mostram as séries temporais da velocidade e da direção do vento registradas nas estações meteorológicas instaladas nos municípios de Arcoverde, Cabrobró, Garanhuns e Petrolina. A *Tabela 4.1* mostra algumas medidas descritivas de cada série, e observam-se medidas semelhantes em todas as estações, tanto para a velocidade quanto para a direção do vento. As Figuras 14- 37 apresentam os gráficos obtidos pela aplicação do método Detrended Fluctuation Analysis (DFA) nas séries temporais estudadas. Ao aplicar o método DFA, no momento em que se divide a série em intervalos, foram usados os intervalos sobrepostos (sliding box) para obter a melhor estatística. Para retirar as tendências em séries integradas, foram utilizados os polinômios de primeiro (DFA1), segundo (DFA2) e terceiro (DFA3) grau. Todos os gráficos apresentam linearidade em escalas até quatro meses.

Para explicar a origem das correlações, aplicamos o método DFA em séries randomizadas. O procedimento de randomização é o seguinte (MATIA et al., 2003):

- Gerar um par  $(m, n)$  de números aleatórios inteiros, onde  $m, n \leq N$ ,  $N$  é o tamanho da série  $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n, \dots, x_N$ .
- Trocar os dados  $x_m$  e  $x_n$ , gerando uma nova série  $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_m, \dots, x_N$ .
- Repetir os dois passos anteriores pelo menos  $20N$  vezes (foram feitas 222.000 repetições).

Esse procedimento destrói as correlações temporais da série, preservando a distribui-

ção dos valores.

Os expoentes obtidos utilizando DFA-1, DFA-2, DFA-3, para as séries originais e séries randomizadas da velocidade de vento são apresentados na *Tabela 4.2* e para as séries temporais da direção de vento, na *Tabela 4.3*. Para séries originais todos os expoentes têm valores superiores a 0,5 indicando que as correlações de longo alcance são persistentes. Ou seja, os valores grandes (pequenos) têm maior probabilidade de serem seguidos por valores grandes (pequenos).

Todas as séries randomizadas apresentaram a perda das correlações (expoente de escala próximo a 0,5) significando que as correlações de longo alcance presentes nas séries temporais de velocidade e da direção de vento têm origem na organização temporal dos dados e não na distribuição dos valores.

Tabela 2: Medidas descritivas da velocidade e da direção do vento das quatro estações meteorológicas.

		<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Arcoverde</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	3,164	1,427	0,0	9,5
	<b>Direção (graus)</b>	131,7	49,838	1,0	360,0
<b>Cabrobó</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	3,472	1,861	0,0	12,1
	<b>Direção (graus)</b>	153,1	56,795	1,0	360,0
<b>Garanhuns</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	3,178	1,354	0,0	9,3
	<b>Direção (graus)</b>	108,2	42,527	2,0	360,0
<b>Petrolina</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	3,279	1,362	0,0	9,4
	<b>Direção (graus)</b>	101,1	81,244	1,0	360,0

A velocidade do vento na superfície é um exemplo natural do fenômeno de turbulência, que representa um processo estocástico caracterizado pela invariância de escala temporal e espacial (GOVINDAN e KANTZ, 2004). A natureza intermitente da velocidade e da direção do vento pode influir na potência gerada pelas turbinas eólicas e todos os outros fenômenos para os quais o vento representa um fator significativo (dispersão de poluentes, transporte de pólen e de sementes, danos a vegetação, etc.). Apesar de ser importante, a memória longa em séries temporais da velocidade do vento foi pouco estudada. Os primeiros resultados foram apresentados pelo HASLETT e RAFTERY, 1989. Eles estudaram

Tabela 3: Expoentes DFA para a velocidade do vento da série original ( $\alpha$ ) e randomizada ( $\alpha_r$ ).

Estação	DFA	Original( $\alpha$ )	Randomizada( $\alpha_r$ )
Arcoverde	DFA1	0,821 $\pm$ 0,006	0,477 $\pm$ 0,002
	DFA2	0,812 $\pm$ 0,008	0,514 $\pm$ 0,003
	DFA3	0,825 $\pm$ 0,010	0,526 $\pm$ 0,001
Cabrobó	DFA1	0,842 $\pm$ 0,008	0,526 $\pm$ 0,001
	DFA2	0,790 $\pm$ 0,007	0,489 $\pm$ 0,001
	DFA3	0,809 $\pm$ 0,010	0,518 $\pm$ 0,001
Garanhuns	DFA1	0,913 $\pm$ 0,005	0,481 $\pm$ 0,002
	DFA2	0,911 $\pm$ 0,009	0,485 $\pm$ 0,005
	DFA3	0,926 $\pm$ 0,010	0,513 $\pm$ 0,002
Petrolina	DFA1	0,872 $\pm$ 0,005	0,517 $\pm$ 0,002
	DFA2	0,876 $\pm$ 0,008	0,538 $\pm$ 0,003
	DFA3	0,892 $\pm$ 0,010	0,507 $\pm$ 0,004

Tabela 4: Expoentes DFA para a direção do vento da série original ( $\alpha$ ) e randomizada ( $\alpha_r$ ).

Estação	DFA	Original( $\alpha$ )	Randomizada( $\alpha_r$ )
Arcoverde	DFA1	0,704 $\pm$ 0,005	0,527 $\pm$ 0,002
	DFA2	0,679 $\pm$ 0,003	0,525 $\pm$ 0,003
	DFA3	0,686 $\pm$ 0,004	0,515 $\pm$ 0,002
Cabrobó	DFA1	0,697 $\pm$ 0,004	0,466 $\pm$ 0,003
	DFA2	0,721 $\pm$ 0,004	0,516 $\pm$ 0,003
	DFA3	0,735 $\pm$ 0,005	0,506 $\pm$ 0,002
Garanhuns	DFA1	0,876 $\pm$ 0,006	0,515 $\pm$ 0,003
	DFA2	0,882 $\pm$ 0,009	0,496 $\pm$ 0,003
	DFA3	0,902 $\pm$ 0,010	0,511 $\pm$ 0,005
Petrolina	DFA1	0,838 $\pm$ 0,003	0,468 $\pm$ 0,002
	DFA2	0,821 $\pm$ 0,005	0,500 $\pm$ 0,002
	DFA3	0,827 $\pm$ 0,006	0,505 $\pm$ 0,002

as correlações temporais e espaciais das séries temporais da velocidade do vento registradas na Irlanda com objetivo de avaliar os recursos disponíveis para geração de energia eólica. Recentemente, os métodos da física estatística começaram a ser aplicados nos estudos de correlações de longo alcance em séries temporais climáticas (AUSLOOS, 2004). A maioria dos resultados refere-se à temperatura e precipitação, as outras variáveis climáticas, incluindo a velocidade do vento, foram pouco exploradas. O vento possui duas propriedades: velocidade e direção, e é caracterizado por uma dinâmica mais complexa do que para outras variáveis climáticas que tem a natureza escalar. Recentemente o método DFA foi aplicado em séries temporais da velocidade do vento registradas nos Estados Unidos (KAVASSERI e NAGARAJAN, 2004), e Turquia (KOÇAK, 2009). Os resultados deste trabalho são semelhantes aos resultados apresentados nos artigos citados: as séries temporais da velocidade do vento possuem as correlações de longo alcance persistentes, com

expoente da escala acima de 0,5, indicando que a dinâmica do vento pode mostrar as propriedades universais, independente da posição geográfica. Outra semelhança com os resultados citados é que não foi detectada a correlação entre os valores dos expoentes de escala e os parâmetros geográficos: longitude, latitude e altitude da estação. Para obter os resultados mais conclusivos é necessário analisar os dados registrados em outras localizações e utilizar séries temporais mais longas. As séries da volatilidade da direção do vento são persistentes, o que indica a possibilidade de multifractalidade (GOVINDAN e KANTZ, 2004). Os resultados destas análises podem servir para a validação dos modelos climáticos. Os resultados das simulações computacionais do clima são disponibilizados em forma das séries temporais espaçadamente distribuídas com alta resolução temporal e espacial e também com um período de mais de 100 anos, possibilitando a análise das correlações de longo alcance. Os resultados obtidos com dados observados neste trabalho devem ser comparados com os resultados obtidos com dados produzidos com modelos climáticos para posições espaciais (longitude e latitude) correspondentes às posições das estações meteorológicas utilizadas. Uma análise comparativa deste tipo foi feita com séries temporais de precipitação na Espanha (GARCIA-MARIN, 2007).

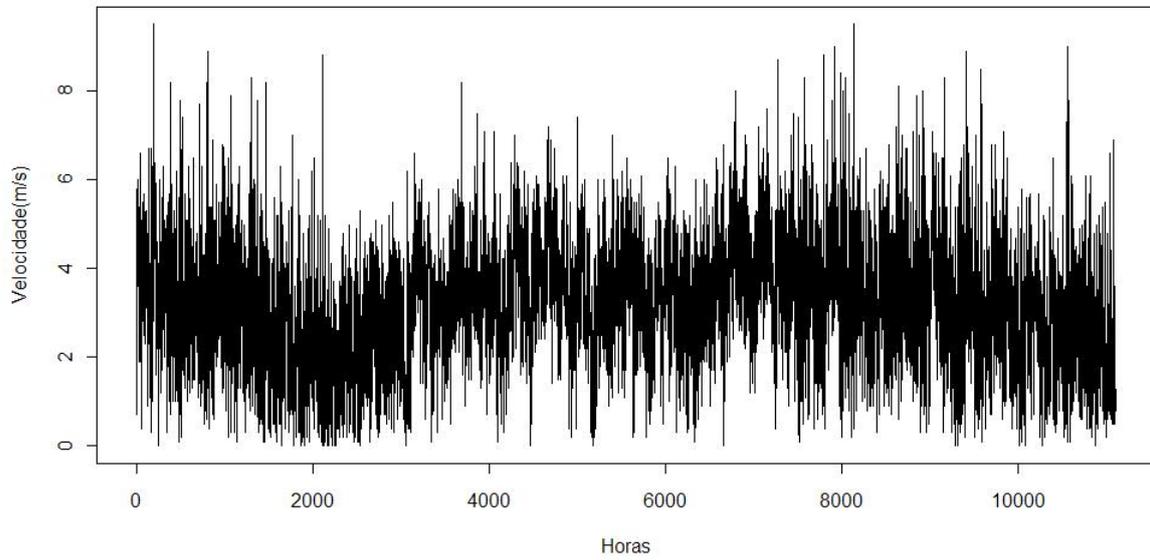


Figura 6: Série temporal da velocidade do vento em Arcoverde.

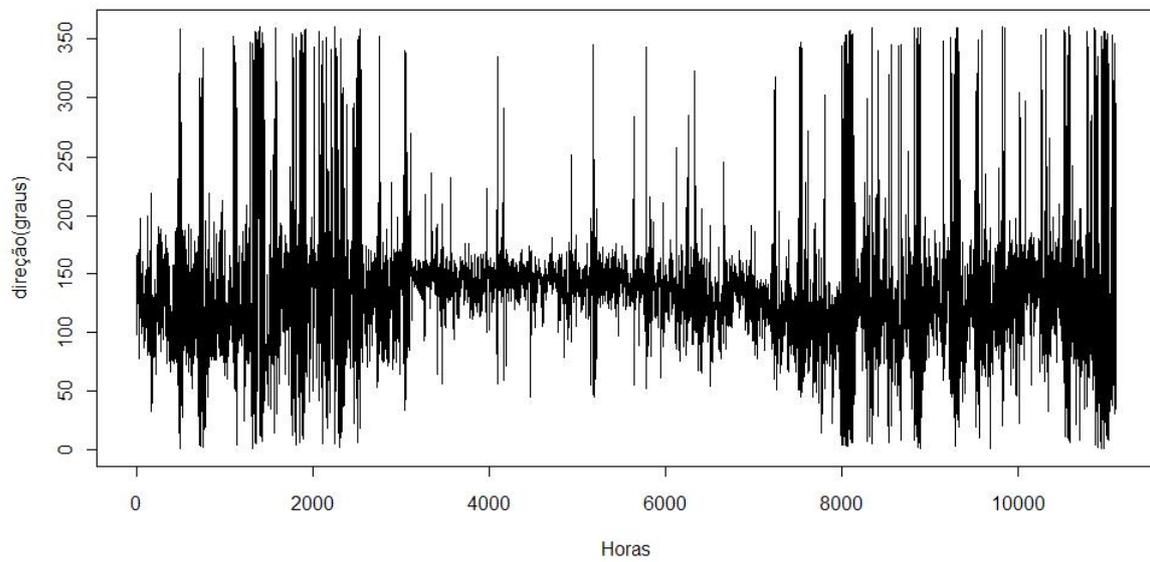


Figura 7: Série temporal da direção do vento em Arcoverde.

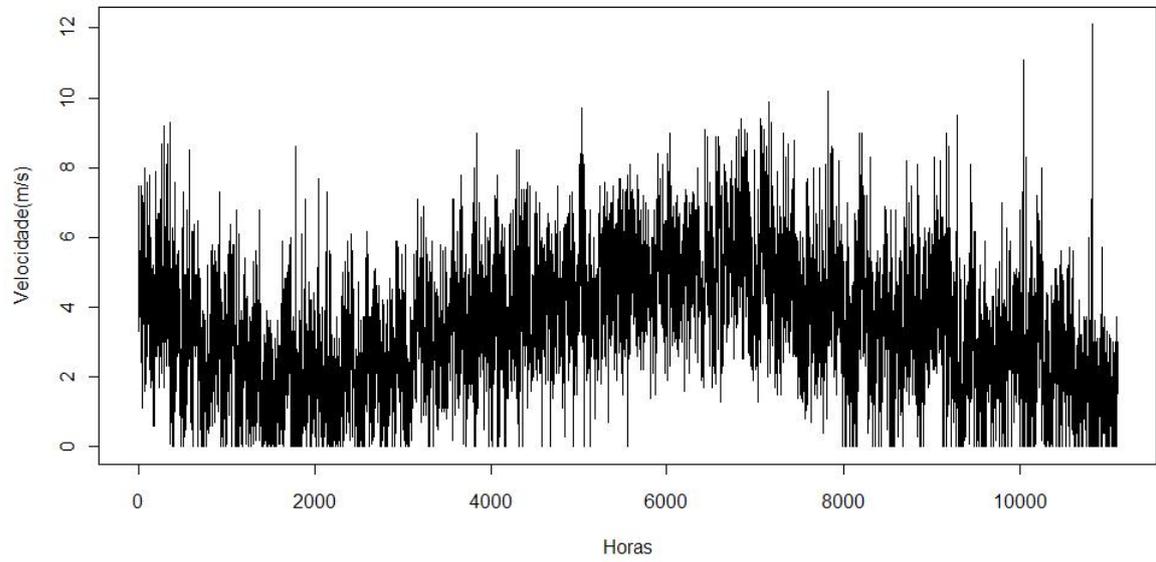


Figura 8: Série temporal da velocidade do vento em Cabrobó.

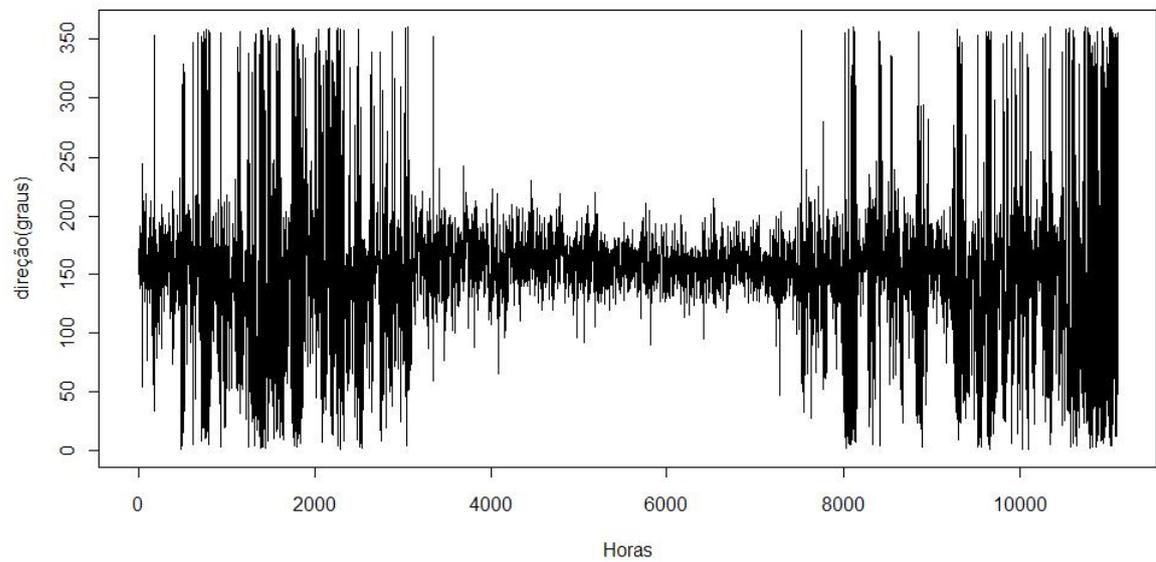


Figura 9: Série temporal da direção do vento em Cabrobó.

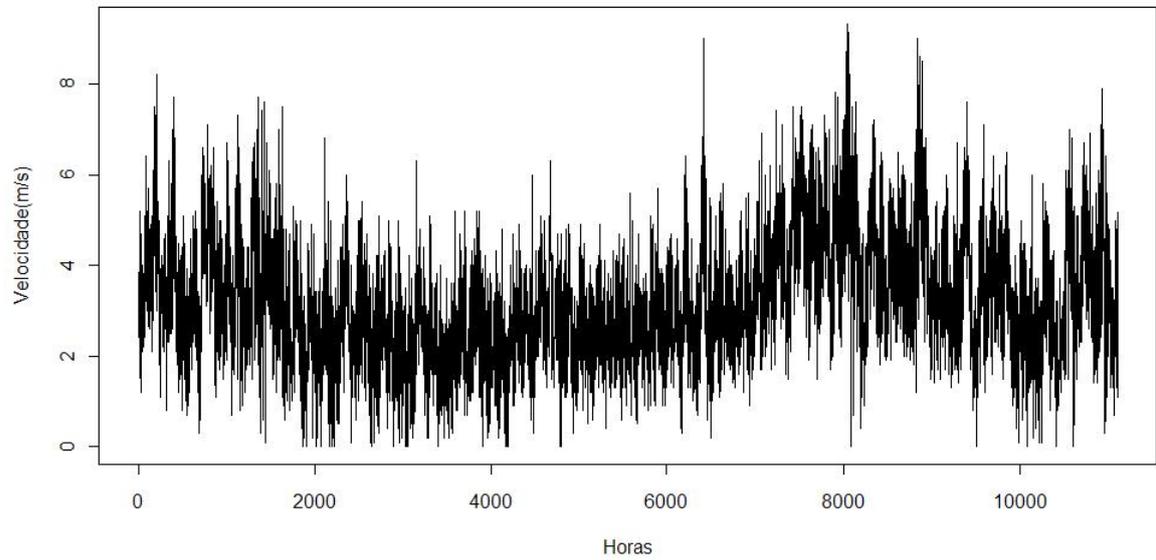


Figura 10: Série temporal da velocidade do vento em Garanhuns.

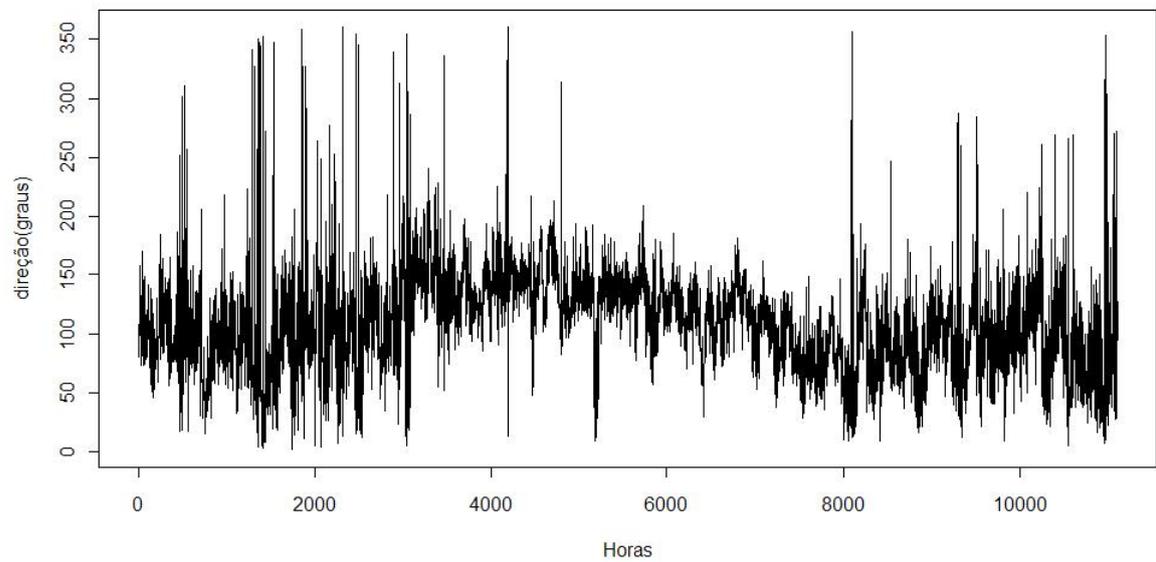


Figura 11: Série temporal da direção do vento em Garanhuns.

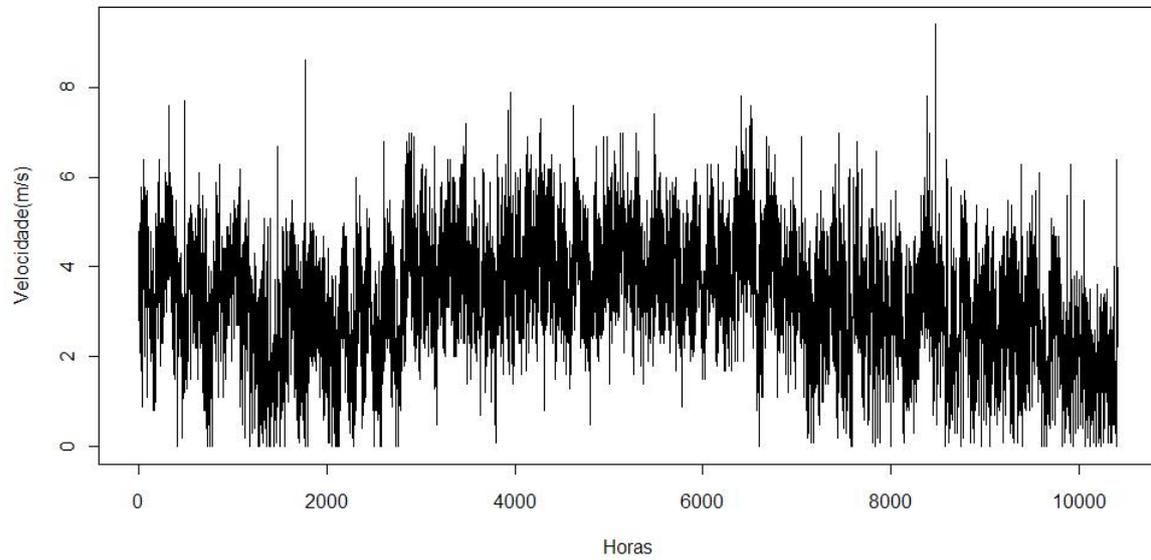


Figura 12: Série temporal da velocidade do vento em Petrolina.

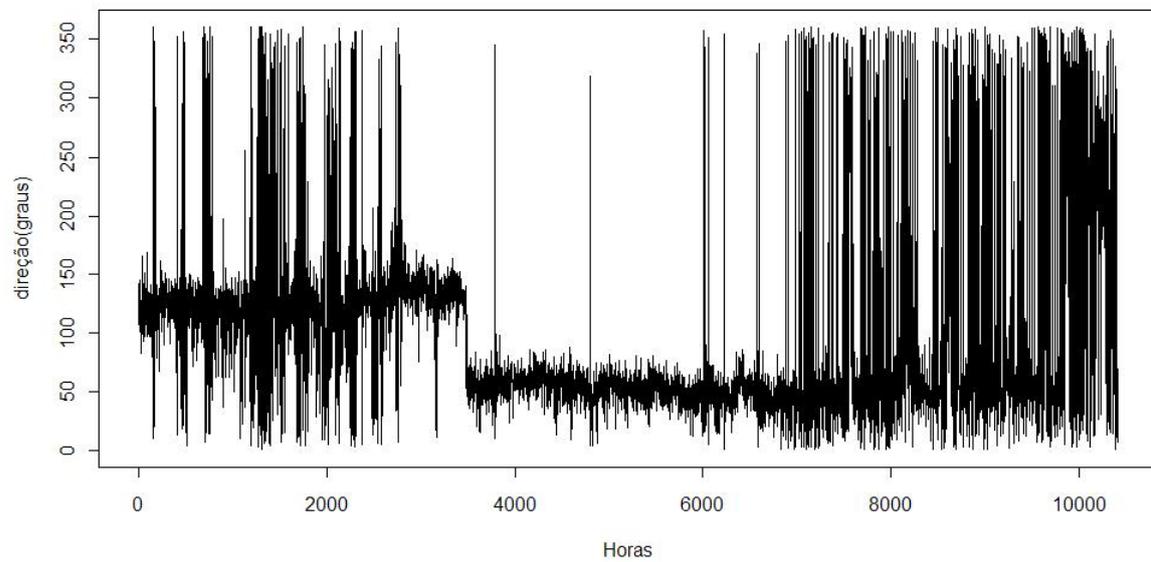


Figura 13: Série temporal da direção do vento em Petrolina.

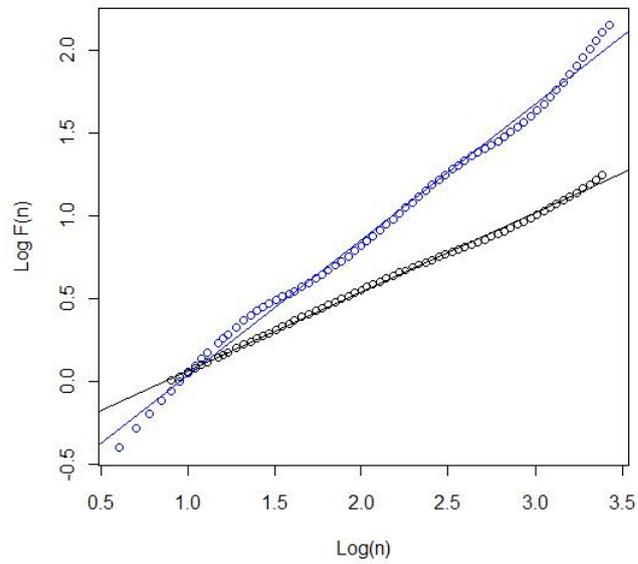


Figura 14: DFA1 da série original (azul),  $\alpha = 0,82$  e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,47$ , da velocidade do vento em Arcoverde.

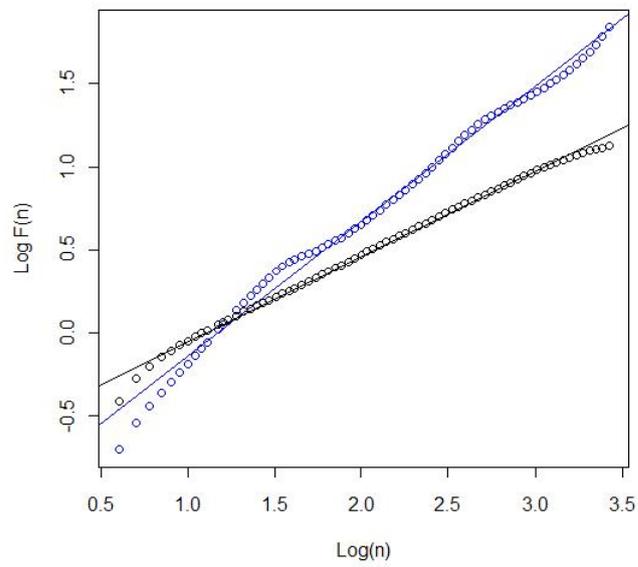


Figura 15: DFA2 da série original (azul),  $\alpha = 0,81$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,51$ , da velocidade do vento em Arcoverde.

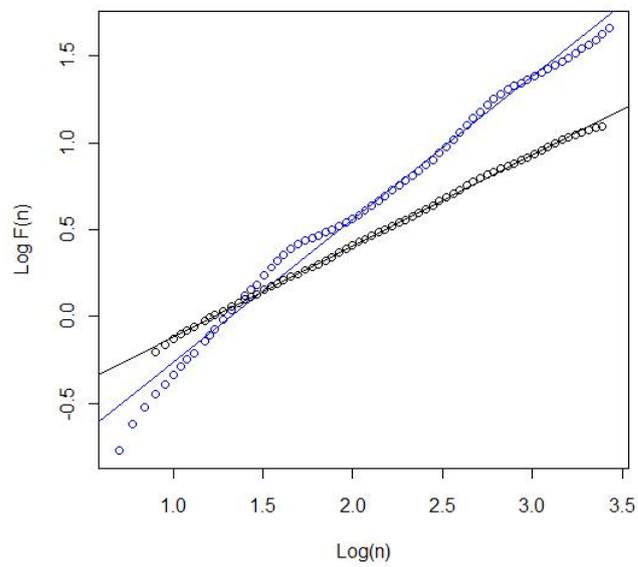


Figura 16: DFA3 da série original (azul),  $\alpha = 0,82$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,52$ , da velocidade do vento em Arcoverde.

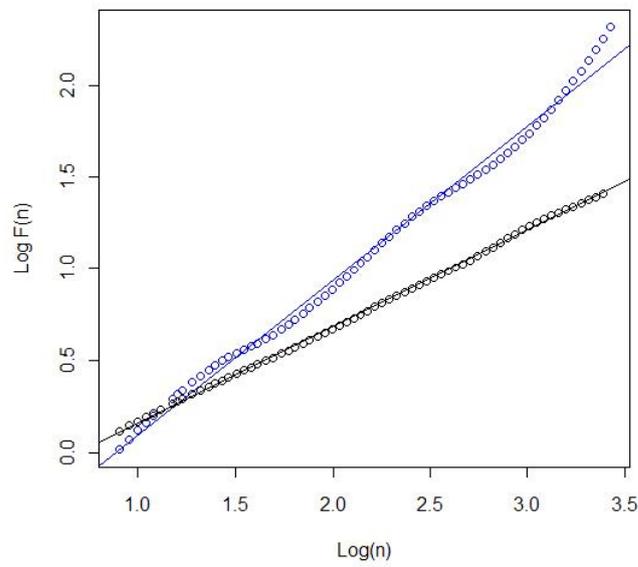


Figura 17: DFA1 da série original (azul),  $\alpha = 0,84$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,52$ , da velocidade do vento em Cabrobó.

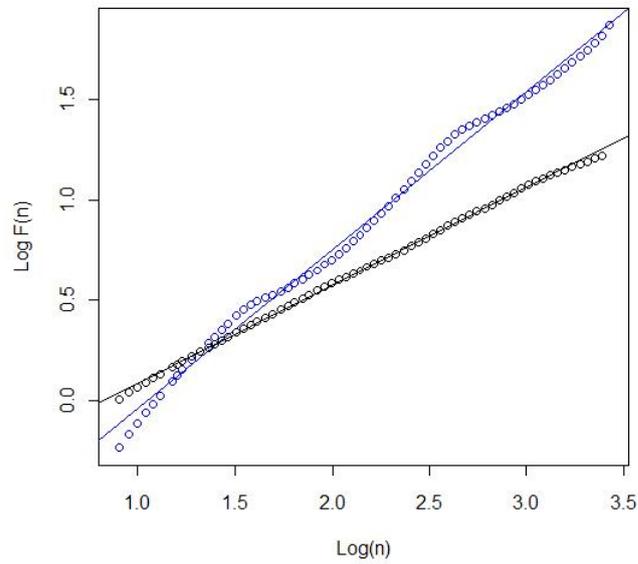


Figura 18: DFA2 da série original (azul),  $\alpha = 0,79$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,49$ , da velocidade do vento em Cabrobó.

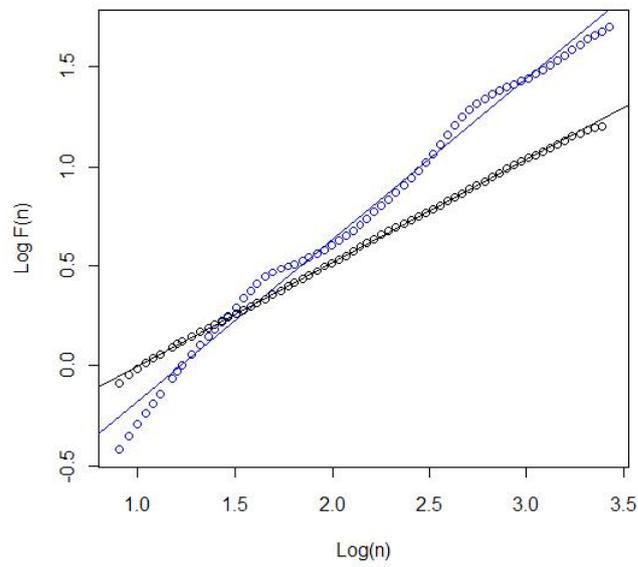


Figura 19: DFA3 da série original (azul),  $\alpha = 0,81$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,52$ , da velocidade do vento em Cabrobó.

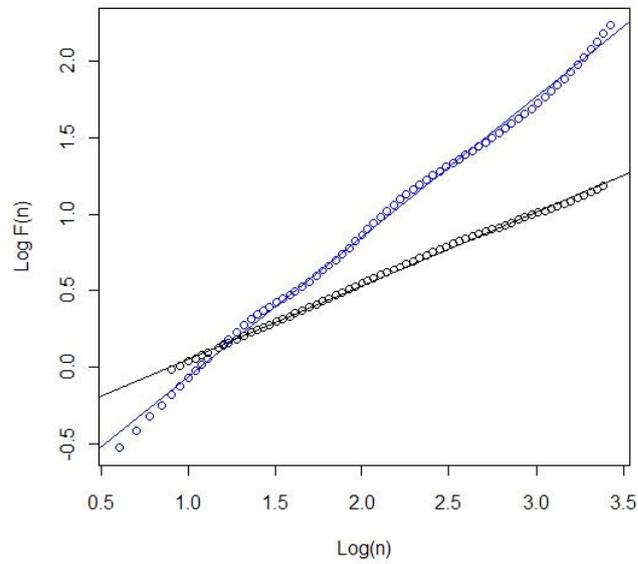


Figura 20: DFA1 da série original (azul),  $\alpha = 0,91$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,48$ , da velocidade do vento em Garanhuns.

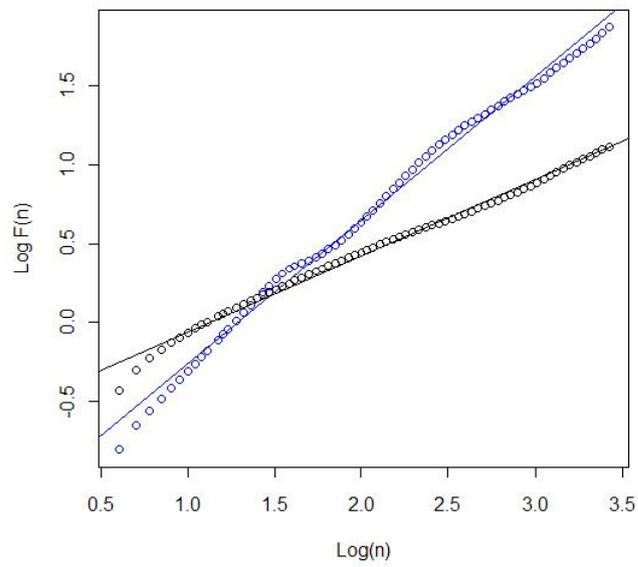


Figura 21: DFA2 da série original (azul),  $\alpha = 0,91$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,48$ , da velocidade do vento em Garanhuns.

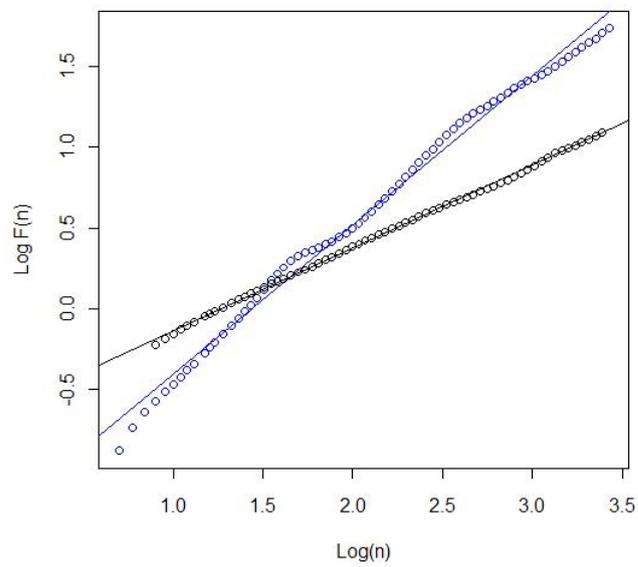


Figura 22: DFA3 da série original (azul),  $\alpha = 0,92$ , e da série andomizada (preto),  $\alpha_r = 0,51$ , da velocidade do vento em Garanhuns.

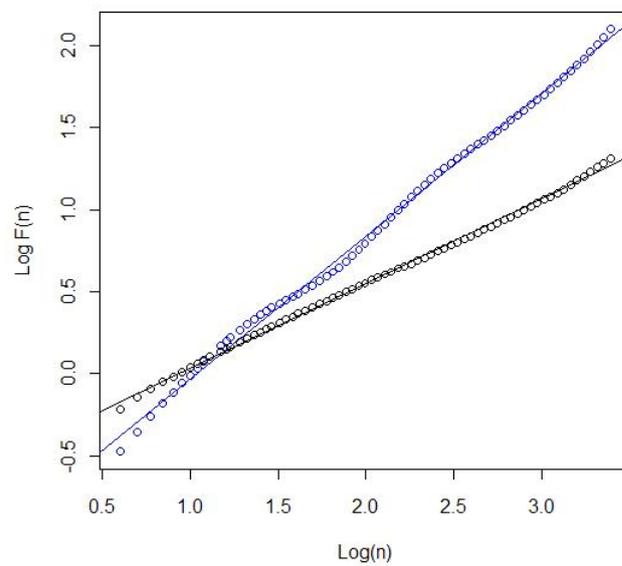


Figura 23: DFA1 da série original (azul),  $\alpha = 0,87$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,51$ , da velocidade do vento em Petrolina.

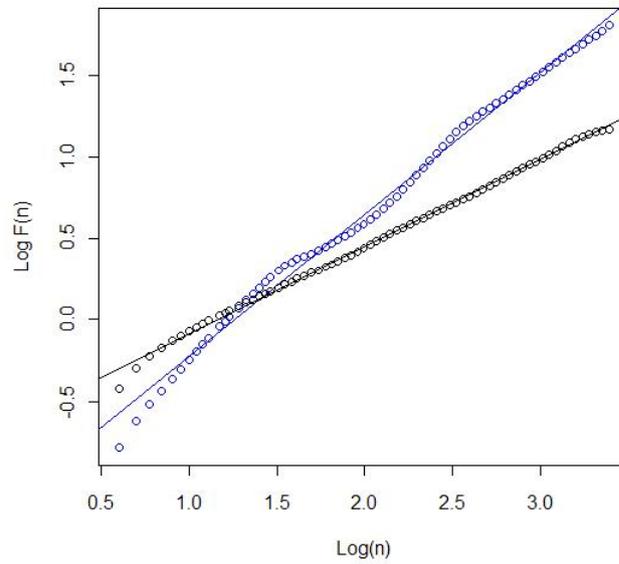


Figura 24: DFA2 da série original (azul),  $\alpha = 0,88$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,54$ , da velocidade do vento em Petrolina.

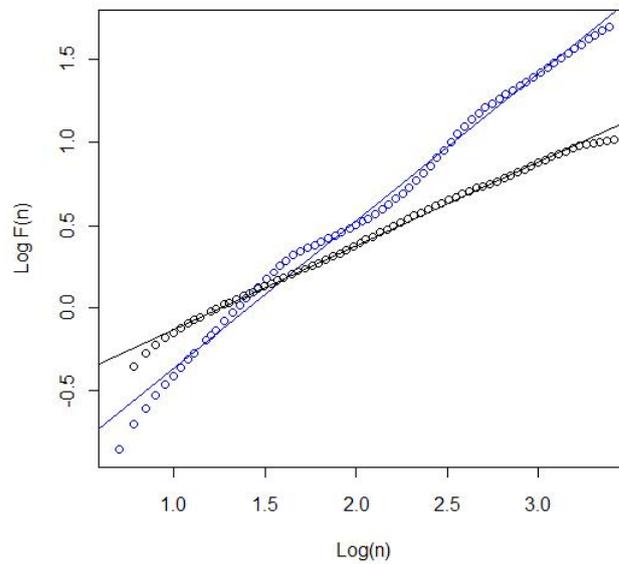


Figura 25: DFA3 da série original (azul),  $\alpha = 0,89$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,51$ , da velocidade do vento em Petrolina.

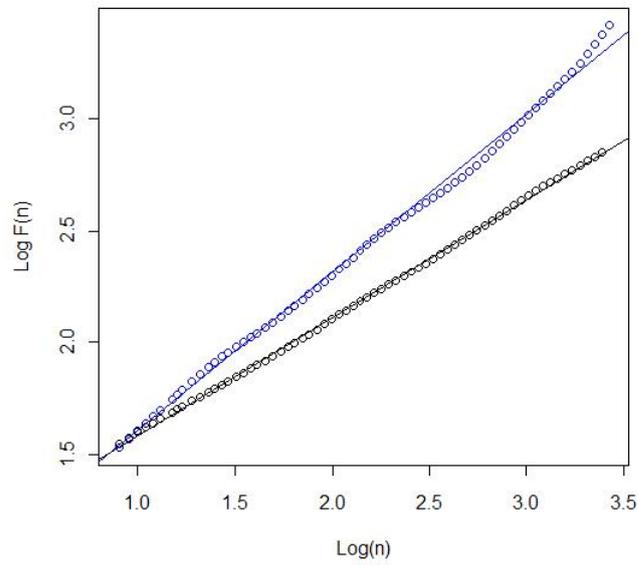


Figura 26: DFA1 da série original (azul),  $\alpha = 0,70$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,53$ , da direção do vento em Arcoverde.

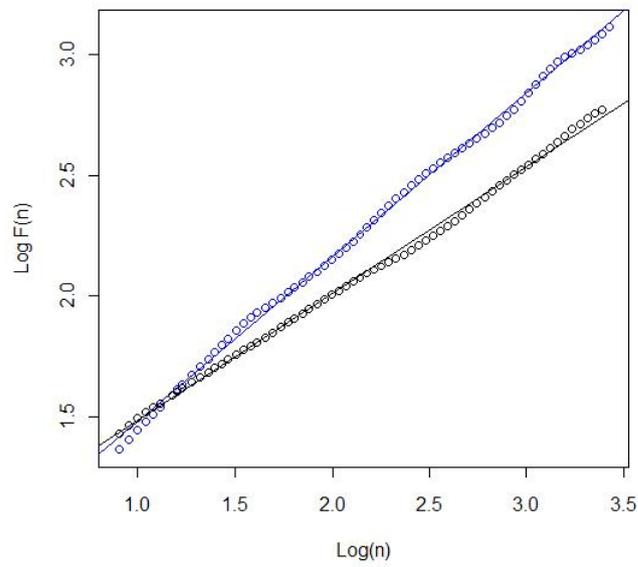


Figura 27: DFA2 da série original (azul),  $\alpha = 0,68$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,52$ , da direção do vento em Arcoverde.

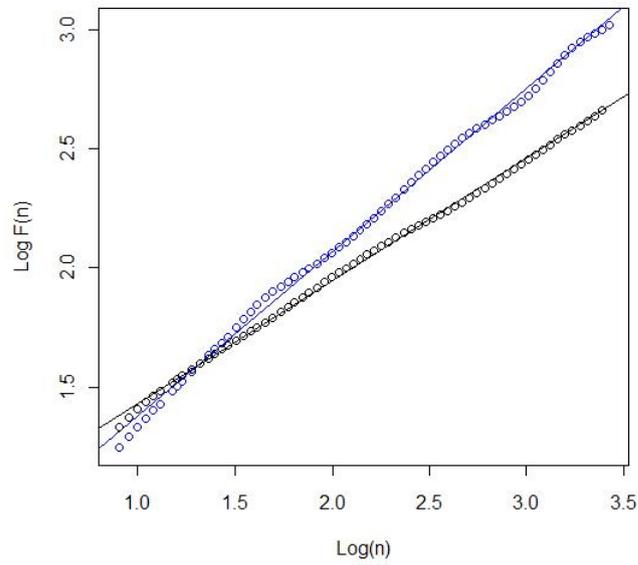


Figura 28: DFA3 da série original (azul),  $\alpha = 0,69$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,51$ , da direção do vento em Arcoverde.

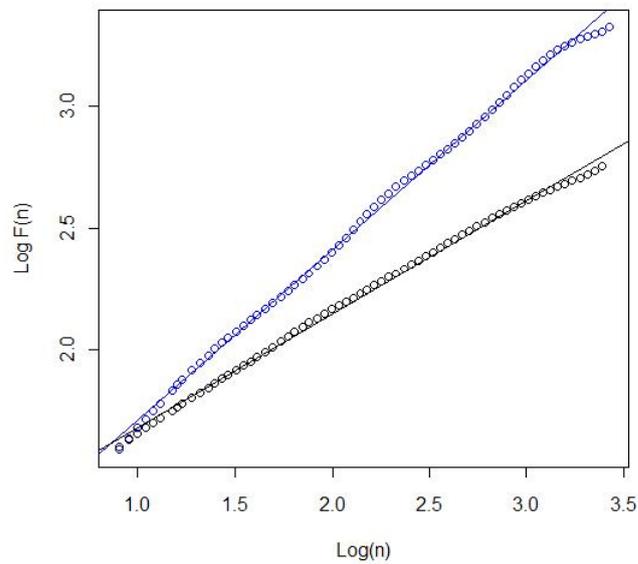


Figura 29: DFA1 da série original (azul),  $\alpha = 0,70$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,47$ , da direção do vento em Cabrobó.

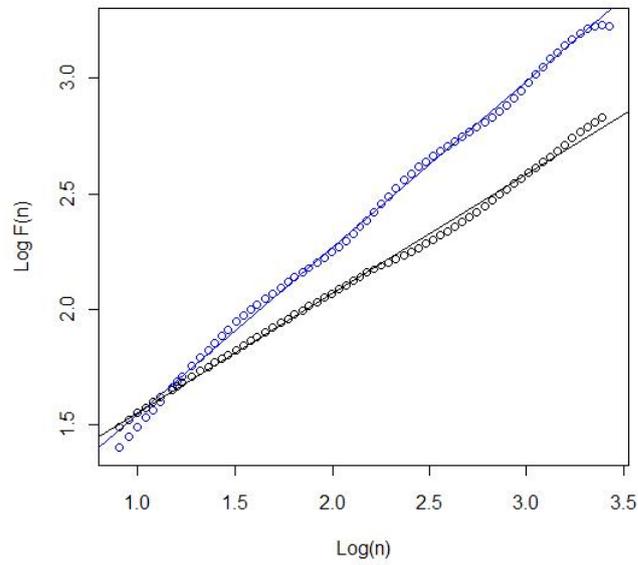


Figura 30: DFA2 da série original (azul),  $\alpha = 0,72$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,52$ , da direção do vento em Cabrobó.

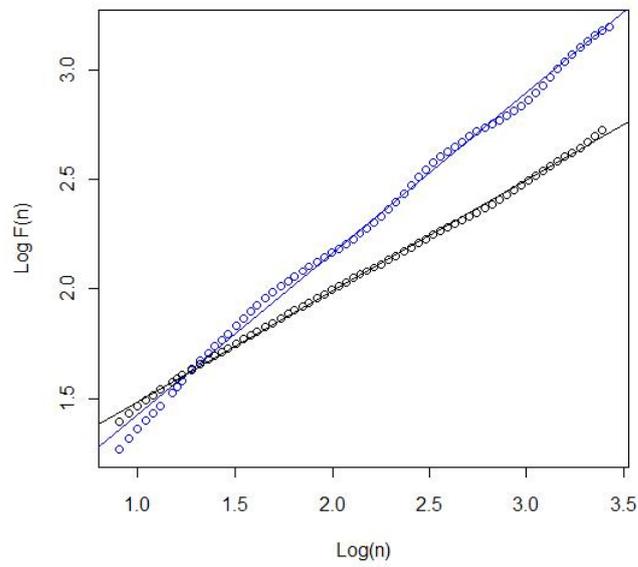


Figura 31: DFA3 da série original (azul),  $\alpha = 0,73$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,51$ , da direção do vento em Cabrobó.

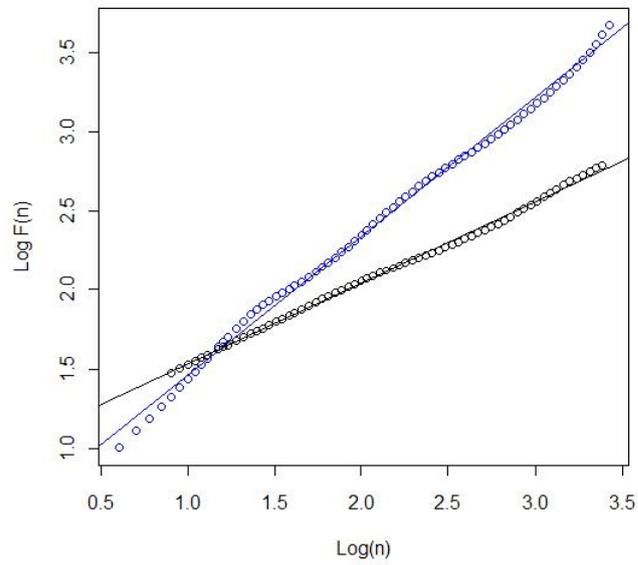


Figura 32: DFA1 da série original (azul),  $\alpha = 0,88$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,51$ , da direção do vento em Garanhuns.

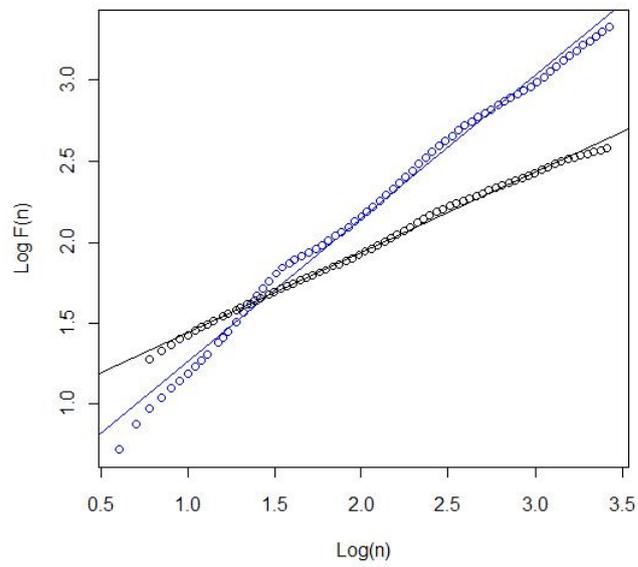


Figura 33: DFA2 da série original (azul),  $\alpha = 0,88$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,50$ , da direção do vento em Garanhuns.

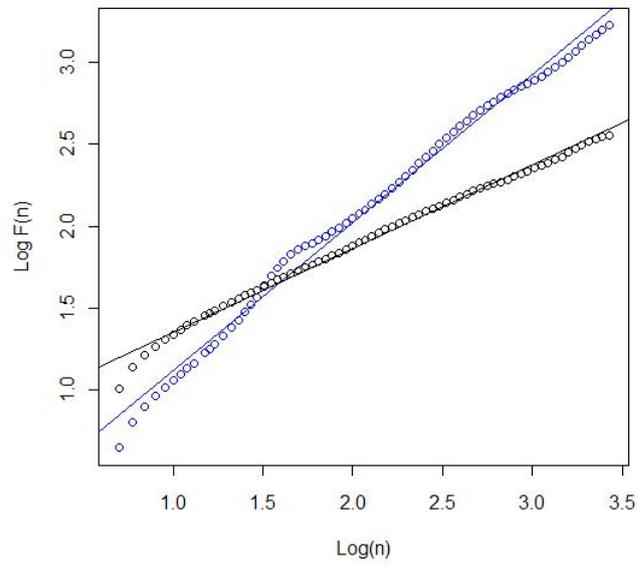


Figura 34: DFA3 da série original (azul),  $\alpha = 0,90$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,51$ , da direção do vento em Garanhuns.

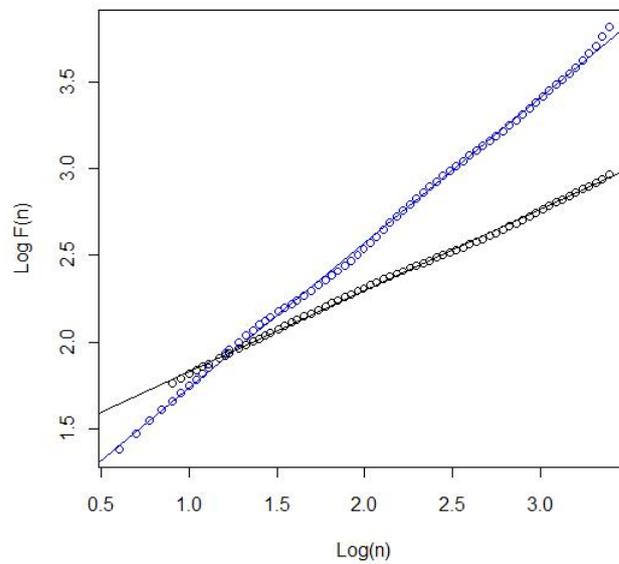


Figura 35: DFA1 da série original (azul),  $\alpha = 0,84$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,47$ , da direção do vento em Petrolina.

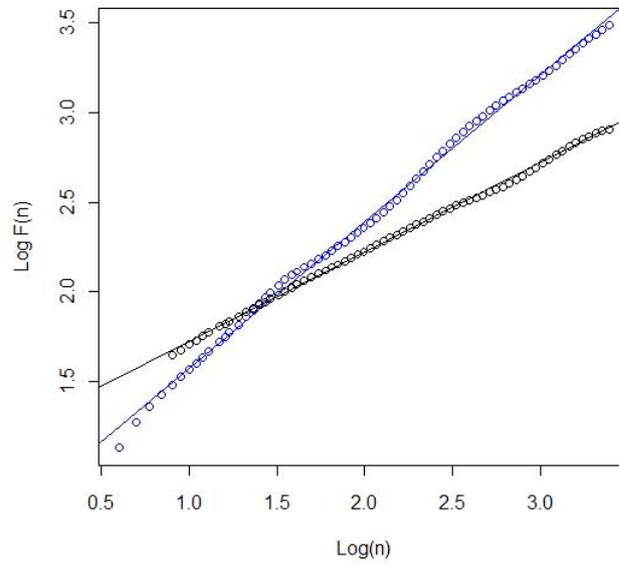


Figura 36: DFA2 da série original (azul),  $\alpha = 0,82$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,50$ , da direção do vento em Petrolina.

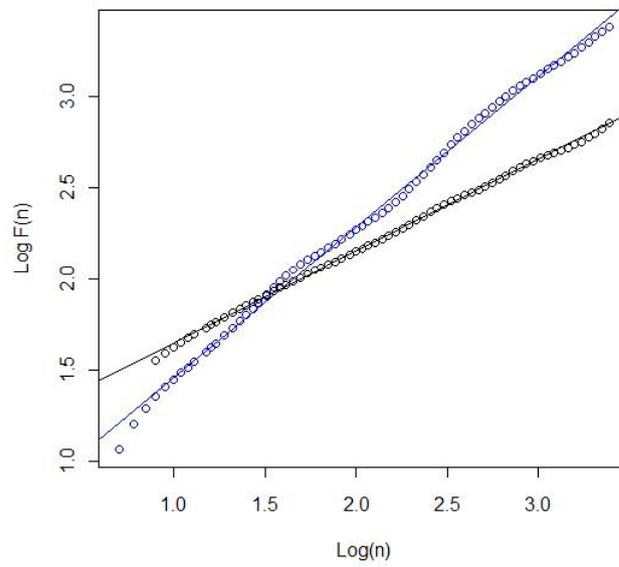


Figura 37: DFA3 da série original (azul),  $\alpha = 0,83$ , e da série randomizada (preto),  $\alpha_r = 0,50$ , da direção do vento em Petrolina.

## 5 CONCLUSÕES

O estudo do clima e dos seus elementos tem grande importância econômica e ambiental, visto que uma grande e inesperada variação em ao menos um dos elementos do clima pode devastar plantações, cidades, e assim mudar a economia de uma região e a vida das pessoas que ali habitam. Então, entender o comportamento dos elementos climáticos, em várias escalas temporais e espaciais, ajuda na tomada de decisões em projetos cujo bom resultado depende do clima. O clima pode ser influenciado por diversos fatores, tais como latitude, altitude, massas do ar, continentalidade, maritimidade, correntes marítimas, relevo, vegetação, etc. Dentre os elementos climáticos podemos citar: temperatura, umidade, pressão atmosférica, radiação solar, precipitação, vento, entre outras. O vento é gerado pelo movimento de massas do ar na atmosfera e pode influenciar vários fenômenos como erosão do solo, dispersão de poluentes, transporte de pólen e sementes, propagação de doenças e geração da energia eólica. A velocidade do vento na superfície é um exemplo natural do fenômeno de turbulência, que representa um processo estocástico caracterizado pela invariância de escala temporal e espacial. Recentemente, os métodos da física estatística começaram a ser aplicados nos estudos de correlações de longo alcance em séries temporais climáticas, porém, a maioria dos resultados refere-se à temperatura e precipitação. As outras variáveis climáticas, incluindo a velocidade e direção do vento, foram pouco exploradas.

Neste trabalho foram estudadas as correlações de longo alcance em séries temporais da velocidade e da direção do vento registradas em quatro estações meteorológicas, nas cidades Arcoverde, Cabrobó, Garanhuns e Petrolina em Pernambuco. Foi utilizado o método Detrended fluctuation analysis (DFA), desenvolvido para quantificar as correlações de longo alcance em séries temporais não estacionárias. Foram analisadas as séries originais da velocidade do vento e as séries dos valores absolutos (volatilidade) dos incrementos da direção do vento. Todas as séries analisadas possuem correlações de longo alcance persistentes, com expoentes de escala acima de 0,5. Em todos os casos os valores dos expoentes são menores para a direção do que para a velocidade do vento, indicando que

a persistência é mais fraca. Todas as séries randomizadas apresentaram a perda das correlações (isto é, apresentaram expoentes de escala próximos a 0,5), significando que as correlações de longo alcance têm origem na organização temporal dos dados e não na distribuição dos valores. Não foi detectada a correlação entre os valores dos expoentes de escala e os parâmetros geográficos: longitude, latitude e altitude da estação. Para obter resultados mais conclusivos sobre essas correlações é necessário analisar dados registrados em outras localidades, aumentando o número e a distância entre as localidades, e obter séries temporais mais longas. Os resultados desta análise podem servir para a validação dos modelos climáticos. Resultados das simulações computacionais do clima disponibilizados em forma das séries temporais com alta resolução temporal e espacial podem possibilitar a avaliação da distribuição espacial dos expoentes de escala. Os resultados obtidos neste trabalho podem ser comparados com os resultados obtidos usando dados produzidos por modelos climáticos para posições espaciais (longitude e latitude) correspondentes às posições das estações meteorológicas.

Outros estudos também detectaram correlações de longo alcance persistentes em séries temporais de variáveis climáticas como temperatura, pressão atmosférica, precipitação e velocidade do vento (ECHNER et al., 2003, BERETTA et al., 2005, MATSUCAS et al., 2000, KOÇAK, 2009). As análises espaciais dos expoentes de escala utilizando dados observados de temperatura (KIRALY et al., 2006) e umidade do ar (CHEN et al., 2007) e dados produzidos pelos modelos climáticos para umidade do solo (WANG et al., 2010), indicam a possibilidade de uso destes expoentes em classificação de vários regimes climáticos.

A maioria dos resultados é baseada em análises de dados do hemisfério norte e precisam ser completados com os resultados correspondentes para hemisfério sul. O Brasil, o maior país do América do Sul, possui a quinta maior área territorial do planeta e vários tipos de clima, e assim se torna ideal para a avaliação das hipóteses baseadas em análises de dados do hemisfério norte.

Este trabalho representa um dos primeiros estudos das correlações de longo alcance de séries temporais climáticas registradas no Brasil. Os resultados são semelhantes aos resultados já publicados na literatura (GOVINDAN E KANTZ, 2004, KAVASSERI, 2004, KOÇAK, 2009). Estudos futuros devem incluir as análises dos dados das estações meteorológicas distribuídas pelo território brasileiro, não somente da velocidade e da direção do vento, mas também das outras variáveis climáticas. Os resultados destas análises vão ajudar a entender melhor a natureza dos processos estocásticos geradores dos fenômenos climáticos. Este entendimento é necessário para o desenvolvimento de modelos teóricos

e computacionais mais precisos, cujos resultados servirão como base para modelagem de vários fenômenos influenciados pelas condições climáticas.

## Referências

- AHN, V. V., YU, Z., WANLISS, J. A. *Analysis of global geomagnetic variability*. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 14, pp.701-718, 2007.
- ALVAREZ-RAMIREZ, J., ESPINOSA-PAREDES, G., VASQUEZ, *Detrended Fluctuation analysis of the neutronic power from a nuclear reactor*. *Physica A*, v. 351, pp.227-240, 2005.
- AMATO, U.; CUOMO, V.; FONTANA, F.; SERIO, C. *Statistical predictability and parametric models of daily ambient temperature and solar irradiance: Na analysis in the Italian climate*. *Journal of Applied meteorology*, v. 28, pp. 711-721, 1989.
- ASHKENAZY, Y.; BAKER, D.R.; GILDOR, H.; HAVLIN, S. *Nonlinearity and multifractality of climate change in the past 420,000 years*. *Geophysical Research Letters*, v. 30, p. CLM2.1-CLM2.4, 2003.
- AUSLOS, M. *Statistical Physics in meteorology*. *Physica A*, v. 336, pp. 93-101, 2004.
- BASSINTHWAITGHT J. B., LIEBOVITCH L. S., BRUCE J. W. *Fractal physiology*. New York: Oxford American Physiological Society, 1994.
- BERAN, J. *Statistics for Long-memory Processes*. Chapman Hall, NewYork, 1994.
- BERETTA, A.; ROMAN, H.E.; RAICICH, F.; CRISCIANI, F. *Long-time correlations of sea-level and local atmospheric pressure fluctuations at Trieste*. *Physica A*, v. 347, p. 695-703, 2005.
- BLENDER, R.; FRAEDRICH, K. *Long-time memory in global warming simulations*. *Geophysical Research Letters*, v. 30, L1769, 2003.
- CAJUEIRO, D. O., TABAK, B. *Possible causes of long-range dependence in the Brazilian stock market*. *Physica A*, v. 345, pp.635-645, 2005.
- CHEN, X.; LIN, G.; FU, Z. *Long-range correlations in daily relative humidity fluctuations: A new index to characterize the climate regions over China*. *Geophysical Research Letters*, v. 34, L07804, 2007.
- COSTA, R. L.; VASCONCELOS, G. L. *Long-range correlations and nonstationarity in Brazilian stock market*, *Physica A*, Netherlands, v.329, pp. 231-248, 2003.
- CURRENTI, G., DELNEGRO, C., LAPENNA, V., TELESCA, L. *Fluctuation analysis of hourly-time variability of volcano-magnetic signals recorded at Mt. Etna Volcano, Sicily(Italy)*. *Chaos, SolitonsFractals*, v.23, pp.1921-1929, 2005.
- DEMIRICI, E., CUHADAROGLY, B. *Statistical analysis of wind correlation and air pollution in urban Trabzon*. *Energy and Buildings*, v. 31, pp. 49-53, 2000.

- Dias, F.L.F. *Relacao entre produtividade, clima, solos e variedades de cana-de-acucar, na regio noroeste do estado de Sao Paulo*. Tese (Mestre em Agronomia), Piracicaba, SP (Brazil). 1997.
- ECHNER, J.F.; KOSCIELNY-BUNDE, E.; BUNDE, A.; HAVLIN, S.; SCHELLINHUBER, H.J. *Power-law persistence and trends in the atmosphere: A detailed study of long temperature records*. Physical Review E, v. 68, 046133, 2003.
- ENNARTZ, S., LIVINA, N., BUNDE, A., HAVLIN, S. *Long-term memory in Earthquakes and the distribution of interoccurrence times*. Europhysics Letters, v. 81, pp.59001, 2008.
- FEDER, J. *Fractals*. New York : Plenum Press, 1988.
- FENG, T.; FU, Z.; DENG, X.; MAO, J. *A brief description of different multifractal behaviors of daily wind speed records over China*. Physics Letters A, v. 375, p. 4134-4141, 2009.
- FIEDLER, Nilton Cesar et al. *Efeito de incêndios florestais na estrutura e composição florística de uma área de cerrado sensu stricto na fazenda Água Limpa-DF*. Revista Árvore, vol.28, n.1, pp. 129-138, 2004.
- FRAEDRICH, K.; BLENDER, R. *Scaling of atmosphere and ocean temperature correlations in observations and climatic models*. Physical Review Letters, v. 90, p. 108501, 2003.
- FRIEDMAN, J., BARRET, S.C.H. *Wind of change: new insights on the ecology and evolution of pollination and mating in wind pollinated plants*. Annals of Botany, v. 103, pp. 1515-1527, 2009.
- GARCIA-MARIN, A.P., JIMENEZ-HOMERO, F.J., AYUSO-MUNOZ, J.L. *Multifractal analysis as a tool for validating a rainfall model*. Hydrological Processes, v. 22, pp. 2672-2688, 2007.
- GOLDBERGER, A. L., AMARAL, L. A. N., HAUSDORFF, J. M., IVANOV P. Ch., PENG, C-K., STANLEY, H. E. *Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging*. PNAS, v. 99, pp.2466-2472, 2002.
- GOVINDAN, R.B.; KANTZ, H. *Long-term Correlations and Multifractality in Surface Wind Speed*, Europhysics Letters, 68(2), pp. 184-190, 2004.
- GOVINDAN, R. B.; VYUSHIN, D.; BUNDE, A.; BRENNER, S.; HAVLIN, S. *Global climate models violate scaling of the observed atmospheric variability*. Physical Review Letters, v. 89, 028501, 2002.
- GRAN-CHARLES, P. *Empirical evidence of long-range correlations in stock-returns*. Physica A, v. 287, pp.396-404, 2000.
- HASLETT, J., RAFTERY, A.E. *Space-time modeling with long-memory dependence: Assessing Irelands wind power resource (with discussions)*. Applied Statistics, v. 38, pp. 1-50, 1989.
- HAUSDORFF, H. M., PENG, C-K., LADIN, Z., WEI, J. Y., GOLDBERGER, A. L. *Is walking is random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait*. Journal of Applied Physiology, v.78, pp.349-358, 1995.

- HU, K., IVANOV, P. CH., CHEN, Z., CARPENA, P., STANLEY, H.E. *Effects of trends on detrended fluctuation analysis*. Physical Review E, v.64, 011114, 2001.
- IVANOV, P. Ch., MA, Q. D. Y., BORTSCH, R. P., HAUSDORFF, J. M., AMARAL, L. A. N., SCHULTE-FROHLINDE, V., STANLEY, H. E., YONEYOMA, M. *Levels of complexity in scale-in variant neuronal signals*. Physical Review E, v.79, 041920, 2009.
- JONGEJANS, E., TELENIUS, A. *Field experiments on seed dispersal by wind in ten umbelliferous species (Apiaceae)*. Plant Ecology, v. 152, pp. 67-78, 2004.
- KANTELHARDT, J. W. *Fractal and multifractal time series*. In: Encyclopedia of Complexity and Systems Science (Springer, 2009); preprint arXiv:0804.0747.
- KANTELHARDT, J.W.; KOSCIELNY-BUNDE, E.; RYBSKI, D.; BRAUN, P.; BUNDE, A.; HAVLIN, S. *Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records*. Journal of Geophysical Research, v. 111, D01106, 2006.
- KAVASSERI, R.G.; NAGARAJAN, R. *A multifractal description of wind speed records*. Chaos, Solitons Fractals, v. 24, p. 165-173, 2005.
- KAVASSERI, R.G. *Evidence of crossover phenomena in wind speed data*. IEEE Transactions on Circuits and Systems I, v. 5, p. 165-173, 2005.
- KIRALY, A.; BARTOS, I.; JANOSI, I.M. *Correlation properties of daily temperature anomalies over land*. Tellus, v.58A, p.593-600, 2006.
- KIRALY, A.; JANOSI, I.M. *Detrended fluctuation analysis of daily temperature records: Geographic dependence over Australia*. Meteorology and Atmospheric Physics, v. 88. p. 119-128, 2005.
- KIRALY, A.; JANOSI, I.M.; *Stochastic modeling of daily temperature fluctuations*. Physical Review E, v. 65, 051102, 2002.
- KOBAYASHI M.; MUSHA T., *1/f fluctuation of heartbeat period*. IEEE transactions on bio-medical engineering, v. 29, pp. 456-457, 1982.
- KOÇAK, K. *Examination of persistence properties of wind speed records using detrended fluctuation analysis*. Energy, v. 34, p. 1980-1985, 2009.
- KOSCIELNY-BUNDE, E.; BUNDE, A.; HAVLIN, S.; ROMAN, H.E.; GOLDREICH, Y. *Indication of universal persistence law governing atmospheric variability*. Physical Review Letters, v. 81, p. 729-732, 1998.
- KULISH, V., SOURIN, A., SOURINA, O. *Human electroencephalograms seen as fractal time series: Mathematical analysis and visualization*. Computers in Biology and Medicine. Volume 36, pp. 291-302, 2006.
- LACERDA, F. F. et al. *Climatologia do Sertão de Pernambuco*. IV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Anais, p. 1306-1308 (2), Campos do Jordão, 1996.
- LIN, G.; FU, Z. *A universal model to characterize different multifractal behaviors of daily temperature records over China*. Physica A, v. 387, p. 573-579, 2008.

- LIU, Y., GOPIKRISHNAN, P., CIZEU, P., MEYER, C., STANLEY, H. E. *Statistical properties of the volatility of price fluctuations*. Physical Review E, v.60, pp.1390-1400, 1999.
- LIU, L.U.; SKIDMORE, E.; WAGNER, R.; TATARKO, J. *Dune sand transport as influenced by wind directions, speed and frequencies i the Ordos Plateau, China*. Geomorphology, v. 67, p. 283-297, 2005.
- LIVINA, V.N.;ASCHEHAZY, Y.; BRAUN, P.; MONETTI, R.; BUNDE, A.; HAVLIN, S. *Nonlinear volatility of river flux fluctuations*. Physical Review E, v. 67, 042101, 2003.
- MANDELBROT, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. FREEMAN, 1982.
- MATIA, K., ASKENAZY, Y., STANLEY, H.E. *Multifractal properties of price fluctuations of stocks and commodities*. Europhysics Letters, v. 61, pp. 422-428, 2003.
- MATSOUKAS, C.; ISLAM, S.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. *Detrended fluctuation analysis of rainfall and steamflow time series*. Journal of Geophysical Research, v. 105, p. 29165-29172, 2000.
- MENDONÇA, F.; OLIVEIRA, D.; MORESCO, I. *Climatologia: Noções básicas e Clima no Brasil*, Oficina de Textos, 2007.
- MONETI, R.A.; HAVLIN, S.; BUNDE, A. *Long-term persistence in the sea surface temperature fluctuations*. Physica A, v. 320, p. 581-589, 2003.
- MULLIGAN, R. F. *Fractal analysis of highly volatile markets: an application to technology equities*. The Quarterly Review of Economics and Finance, Volume 44, pp. 155-179, 2004.
- NIKULIN, V. V., BRISMAR, T., *Long-range temporal correlations in electroencephalographic oscillations: Relation to topography, frequency band, age and gender*. Neuroscience, v. 130, pp.549-558, 2005.
- OÑATE,J.J. *Fractal analysis of climatic data: Annual precipitation records in Spain*. Theoretical and applied climatology, Volume 56, pp. 83-87. 1997.
- PATTANATYUS-ABRAHAM, M.; KIRALY, A.; JANOSI, I.M. *Nonuniversal atmospheric persistence: Different scaling of daily minimum and maximum temperature*. Physical Review E, v. 69, 021110, 2004.
- PAZ, S.; BROZA, M. *Wind direction and its linkage with vibrio cholerae dissemination*. Environmental Health Perspectives, v. 115, p. 195-200, 2007.
- PENG, C. K. et al. *Long-range anticorrelations and non-gaussian behavior pf the heartbeat*. Physical Review Letter, United States, v.70, pp.1343-1346, 1993.
- PENG, C-K. et al. *Mosaic organization of DNA nucleotides*, Physical Review E, v. 49, n. 2, pp. 1685-1989, 1994.
- PRESS, W. H. *Flicker noise in astronomy and elsewhere*. Comments Astrophysics, v.7, pp. 103-119, 1978
- PIMENTA, F., KEMPTON, W., GARVINE, R. *Combining meteorological stations and satelite data to evaluate the ofshore wind power resource of Southeastern Brazil*. Renewable Energy, v. 33, pp. 2375-2387, 2008.

- RANGARAJAN, G., DING, M. *Integrated approach to the assessment of long-range correlations in time series data*. Physical Review E, v.61, pp. 4991-5001, 2000.
- RODRIGUES, Maria Laura Guimarães; FRANCO, Davide; SUGAHARA, Shigetoshi. *Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina*. Revista Brasileira de Geofísica, vol.22, n.2, pp. 135-151, 2004.
- ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. *Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo*. Bragantia, vol.66, n.4, pp. 711-720, 2007.
- ROVEDDER, A. P. M.; ELTZ, F. L. F. *Revegetação com plantas de cobertura em solos arenizados sob erosão eólica no Rio Grande do Sul*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol.32, n.1, pp. 315-321, 2008.
- SHANG, P., LU, Y., KOMAE, S. *Detecting long-range correlations of traffic time series with multifractal detrended fluctuation analysis*. Chaos, Solitons Fractals, v.36, pp.82-90, 2008.
- SZETO, H. et al. *Fractal properties of fetal breathing dynamics*. The American Journal of Physiology, United States, v. 263, pp. 141-147, 1992.
- TONG, S., JIANG, D., WANG, Z., ZHU, Y., GEOCADIN, R. G., THAKOR, N. V. *Long-range correlations in the heart-rate variability following the injury of cardiac arrest*. Physica A, v. 380, pp.250-258, 2007.
- TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. O. *Introdução à Climatologia*, Geographica, 2008
- TSONIS, A. A., ROEBBER, P. J., ELSNER, J. B. *Long-range correlations in the extratropical atmospheric circulation: origins and implications*. Journal of Climate, v.12, pp.1534-1541, 1999.
- VAN DOOM, E., DHRUVA, B., SREENIVASAN, K.R. *Statistics of wind direction and its increments*. Physics of Fluids, v. 12, pp. 1529-1534, 2000.
- VAROSTOS, C.; EFSTATHIOU, M.; TZONIS, C. *Scaling behaviour of the global tropopause*. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, v. 8, p. 17891-17915, 2008.
- VICSEK, T. *Fractal growth phenomena*. 2<sup>a</sup> ed. Singapore: World scientific, 1993.
- VAROSTOS, C., KIRK-DAVIDOFF, D. *Long-memory processes in ozone and temperature variations at the region 60° S-60° N*. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 6, pp. 4093-4100, 2006.
- VYUSHIN, D.; ZHIDKOV, I.; HAVLIN, S.; BUNDE, A.; BRENNER, S. *Volcanic forcing improves atmosphere-ocean coupled general circulation model scaling performance*. Geophysical Research Letters, v. 31, L10206, 2004.
- WANG, F., SHIEH, S. -J., HAVLIN, S., STANLEY, H. E. *Statistical analysis of the overnight and day time returns*. Physical Review E, v.79, 056109, 2009.
- WANG, G.; DOLMAN, A.J.; BLENDER, R.; FREADRICH, K. *Fluctuation regimes of soil moisture in ERA-40 reanalysis data*. Theoretical and Applied Climatology, v. 99, p. 1-8, 2010.

WEBER, R.; TALKNER, P. *Spectra and correlations of climate data from days to decades*. Journal of Geophysical Research , v. 106, p. 20131-20144, 2001.

ZHANG, H.; XU, C-Y.; YU, Z.; LIU, C-L.; CHEN, Y.D. *Multifractal analysis of streamflow records of the East River basin (Perl River), China*. Physica A, v. 388, p. 927-934, 2009.