

**Lêda Valéria Ramos Santana**

**Análise da variabilidade e similaridade da velocidade do  
vento no Nordeste do Brasil**

**Recife**

**Fevereiro/2018**



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

**Análise da variabilidade e similaridade da velocidade do vento no Nordeste do  
Brasil**

Tese julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 20/02/2018 pela comissão examinadora

**Área de concentração: Biometria e Estatística Aplicada**

**Orientador: Prof. Dr. Tiago Alessandro Espínola Ferreira**  
**Coorientador: Prof. Dra. Tatijana Stošić**

**Recife**

**Fevereiro/2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**  
**Análise da variabilidade e similaridade da velocidade do vento no Nordeste do**  
**Brasil**

Lêda Valéria Ramos Santana

Tese julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 20/02/2018 pela comissão examinadora

Orientador:

---

**Prof. Dr. Tiago Alessandro Espínola**  
**Ferreira**  
Orientador

Banca examinadora:

---

**Prof. Dra. Tatijana Stošić**  
**DEINFO/UFRPE**

---

**Prof. Dr. Moacyr Cunha Filho**  
**DEINFO/UFRPE**

---

**Prof. Dr. Geber Barbosa de**  
**Albuquerque Moura**  
**DEPA/UFRPE**

---

**Prof. Dr. Paulo Salgado Gomes de**  
**Mattos Neto**  
**CIN/UFPE**

*Dedico aos meus pais  
Jennysson e Silvana e, a minha irmã  
Glaúcia.*

# Agradecimentos

À Deus, por estar presente na minha vida e me fortalecer em momentos difíceis.

Aos meus pais, por tudo que fizeram e fazem, sempre pensando no meu melhor. Vocês são tudo para mim!

À tia Suely e Teodoro, os pais que ganhei. Obrigada por todo carinho e atenção.

A minha irmã Gláucia, e as primas-irmãs Dani, Ju, Laine e Kelly, pelas conversas, brigas, farras. Por sempre estarmos presente mesmo distante, uma na vida da outra.

A todos da minha família que torceram por esse momento. Especialmente, as minhas avós Terezinha e Enalva. Meu tio Noel, Jaiminho, Dodó, Jorge, Nene, Solange, Norma, Fabrizia, Sônia, Valéria, Gil e Jackson. A todos os primos e primas. Amo vocês!

Aos que já partiram, minha vó Maria José e avôs Jaime e Tennisson, Tio Silvío.

Aos amigos que estão distantes fisicamente, mas a atenção e o carinho permanecem.

As amizades nacionais e internacionais construídas e fortalecidas em Recife.

Aos meus orientadores, professores Tiago Alessandro Espínola Ferreira e Tatijana Stosic, obrigada por todo ensinamento e paciência.

Ao Programa de Pós-Graduação e Biometria e Estatística Aplicada, pela oportunidade e convivência com professores, alunos e, ao secretário Marco, que sempre nos orienta na parte burocrática.

Aos servidores da UFRPE, pelo convívio diário.

Ao Núcleo de Telessaúde de Pernambuco (NUTES - Hospital das Clínicas - UFPE), pela oportunidade de trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

*“Por onde for floresça...”*  
*(Saulo Fernandes)*

## Resumo

O uso de fontes renováveis tem crescido mundialmente e, no Brasil o incentivo ao uso de energia eólica tem sido ampliado de forma expressiva. Atualmente, o país destaca-se no cenário eólico mundial ocupando a nona posição entre os países que tiveram maiores capacidades instaladas acumuladas de energia eólica, liderando o mercado Latino-Americano. A região Nordeste (NE) detém o maior potencial eólico do país. Todavia, apresentando grande variedade na velocidade do vento devido a diversidade climática. A extensa área está dividida em quatro sub-regiões, Litoral, Agreste, Sertão e Meio Norte. Existem diferentes instituições que disponibilizam dados da velocidade do vento, variável essencial para estudo relacionados à implantação e geração de energia eólica, sobre o NE. Neste trabalho foram analisadas séries históricas de velocidade do vento oriundas de duas bases de dados distintas, Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e ECMWF *Re-Analyses* (ERA-40). Os registros disponibilizados pelo INMET foram obtidos por meio de estações convencionais instaladas a 10 m do solo durante o período de 1961 a 2001, às 00, 12 e 18h. As séries históricas da ERA-40 pertencem a uma grade mundial com resolução espacial de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  em registros realizados a 10 m do solo durante as 00, 06, 12, 18h durante o período de 1957 a 2001. O objetivo é estudar a variabilidade espaço temporal da velocidade do vento e medir o grau de similaridade entre as bases de dados de estações convencionais (INMET) e de reanálise (ERA-40), afim de quantificar o grau de regularidade da série temporal e o grau de similaridade entre duas séries temporais, utilizando os métodos *Sample Entropy* e *cross-Sample Entropy* da teoria da informação. Devido a falta de informações na base do INMET, as análises foram realizadas no período de oito anos de dados simultâneos (1993 a 2000) para a base de dados do INMET e da ERA-40, para as séries as 00h, 12h, Completa/Total (série original), Diária (média por dia), para . Os resultados mostram que os maiores registros de velocidade do vento para diferentes séries encontram-se no Norte das quatro sub-regiões. A *Sample Entropy*, apresentou maior regularidade da velocidade do vento no Meio Norte, área onde a velocidade do vento é menor, apresentando melhor previsibilidade nesta área. A *cross-Sample Entropy* mostrou uma sincronização moderada das séries do INMET e ERA-40, indicando uma superestimação ou subestimação dos dados da ERA-40 em relação aos dados do INMET. O Meio Norte representa também, a região com melhor similaridade entre as séries do INMET e ERA-40. Ao analisar a regularidade da ERA-40 por meio de todas as observações do período de 1957 a 2001 utilizando a *Sample Entropy*, foi possível identificar que as regiões de maior velocidade do vento também apresentam melhor previsibilidade para as séries. Além de, indicar que áreas distintas com comportamento das médias da velocidade do vento semelhantes podem apresentar previsibilidade diferentes.

**Palavras-chaves:** Nordeste, velocidade do vento, *Sample Entropy*, *cross-Sample Entropy*.

# Abstract

The use of renewable energy sources has grown worldwide and in Brazil the incentive to use wind energy has been expanding significantly. Currently, the country stands out in the global wind scenario occupying the ninth position among the countries with largest installed capacity of accumulated wind power, leading the Latin American market. The Northeast (NE) has the highest wind potential in the country. However, there is a great variability in wind speed due to climatic diversity. The NE is divided into four sub-regions, Litoral, Agreste, Sertão e Meio Norte. There are different institutions that provide wind speed data, essential variable to study, related to deployment and wind power generation. This study analyzed wind speed time series coming from two different database, INMET and ERA-40. The records provided by INMET were obtained by conventional stations at 10 m above ground during the period from 1961 to 2001 at 00, 12 and 18h. The historical series of ERA-40 belong to a global grid with spatial resolution of  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  records at 10 m above ground at 00, 06, 12, 18h during the period from 1957 to 2001. The objective is to study spatial and temporal variability of wind speed and to measure the degree of similarity between the conventional stations (INMET) and reanalysis (ERA-40) database in order to quantify the degree of regularity of the time series and the degree of similarity between two time series using the methods *Sample Entropy* and *cross-Sample Entropy* of information theory. Due to lack of information on the basis of INMET, analyzes were performed on eight years of simultaneous data (1993 to 2000) to the database INMET and ERA-40, for the series of 00h, 12h, Full/Total (original series) and Daily (average per day). The results show that the highest wind speed records for different series are in the North of the four sub-regions. The *Sample Entropy* showed highest wind speed regularity in Meio Norte, where the wind speed is lower, with better predictability. The *cross-Sample Entropy* showed that there is moderate synchronization between the series INMET and ERA-40, indicating an overestimation or underestimation of ERA-40 data in relation to INMET data. The Meio Norte is the region with highest similarity between INMET and ERA-40 series. Examining the regularity of ERA-40 through all the observations from 1957 to 2001 using the Sample Entropy, it was found that the regions with higher wind speed have better predictability of wind speed temporal series, and that different regions with similar mean wind speed can have a different predictability.

**Key-words:** Northeast, wind speed, *Sample Entropy*, *cross-Sample Entropy*.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Circulação atmosférica global. . . . .	4
Figura 2 – Ilustração do mapa do Brasil com destaque para região Nordeste e seus estados. . . . .	5
Figura 3 – Ilustração das quatro sub-regiões correspondente aos quatro domínios geoambientais no NE. . . . .	6
Figura 4 – Estações do INMET (vermelho) e grades da ERA-40 (azul) sobre a região NE. A grade da ERA-40 tem resolução de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ , o círculo azul representa o centro de cada célula da grade. As estações do INMET são representadas por triângulos vermelhos dispostos de acordo com a respectivas coordenadas geográficas. . . . .	18
Figura 5 – Estações do INMET com percentual de dados ausentes às 00h (a) e 12h (b) no período de 1961 a 2001. A escala varia entre 0 e 1, indicando o percentual de dados ausentes nos registros da base de dados. Os valores iguais a zero denotam que não há falhas nos registros, caso contrário, os valores indicam o respectivo percentual de dados ausentes nos registros da estação. . . . .	20
Figura 6 – Estações selecionadas do INMET entre os anos de 1993 a 2000, às 00h (a) e 12h (b). . . . .	22
Figura 7 – Estações do INMET (vermelho) e grades da ERA-40 (azul) selecionadas para análise no período de 1993-2000. . . . .	23
Figura 8 – Média da velocidade do vento para série Completa da ERA-40 (a), INMET (b) e a diferença (c) entre ambas. <i>Sample Entropy</i> da ERA-40 (d), INMET (e) e a diferença (f) entre as entropias sobre o NE brasileiro	31
Figura 9 – Média da velocidade do vento às 00h para ERA-40 (a), INMET (b) e a diferença (c) entre ambas. <i>Sample Entropy</i> da ERA-40 (d), INMET (e) e a diferença (f) entre as entropias sobre o NE brasileiro . . . . .	32
Figura 10 – Média da velocidade do vento às 12h para ERA-40 (a), INMET (b) e a diferença (c) entre ambas. <i>Sample Entropy</i> da ERA-40 (d), INMET (e) e a diferença (f) entre as entropias sobre o NE brasileiro . . . . .	33
Figura 11 – Média diária da velocidade do vento, ERA-40 (a), INMET (b) e a diferença (c) entre ambas. <i>Sample Entropy</i> da ERA-40 (d), INMET (e) e a diferença (f) entre as entropias sobre o NE brasileiro . . . . .	34

Figura 12 – Espacialização do coeficiente de variação da ERA-40 ((a), (b), (c), (d)) e do INMET ((e), (f), (g), (h)) para séries completa ((a), (e)), 00h ((b), (f)), 12h ((c), (g)) e diária((d), (h)) sobre o NE brasileiro . . . . .	35
Figura 13 – <i>Cross Sample Entropy</i> para série da velocidade do vento horária no NE brasileiro. Série completa (a), 00h (b) e 12h (c) . . . . .	36
Figura 14 – Séries temporais da velocidade do vento para as séries Completa (a, b), 00h (c, d) e 12h (e, f), que obtiveram o valor mínimo (a, c, e) e máximo (b, d, f) na <i>Cross Sample Entropy</i> . . . . .	37
Figura 15 – <i>Cross Sample Entropy</i> para série diária da velocidade do vento no NE brasileiro . . . . .	38
Figura 16 – Séries temporais diária da velocidade do vento que apresentaram o valor mínimo (a) e máximo (b) na <i>Cross Sample Entropy</i> no NE brasileiro . . . . .	38
Figura 17 – Grade da ERA-40 sobre a região NE do Brasil e os respectivos identificadores. . . . .	39
Figura 18 – Média (a) e <i>Sample Entropy</i> (b) para série da velocidade do vento às 00h da ERA-40 no NE brasileiro. . . . .	43
Figura 19 – Média (a) e <i>Sample Entropy</i> (b) para série da velocidade do vento às 06h da ERA-40 no NE brasileiro. . . . .	44
Figura 20 – Média (a) e <i>Sample Entropy</i> (b) para série da velocidade do vento às 12h da ERA-40 no NE brasileiro. . . . .	45
Figura 21 – Média (a) e <i>Sample Entropy</i> (b) para série da velocidade do vento às 18h da ERA-40 no NE brasileiro. . . . .	46
Figura 22 – Média (a) e <i>Sample Entropy</i> (b) para série Completa da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro. . . . .	47
Figura 23 – Média (a) e <i>Sample Entropy</i> (b) para série Diária da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro. . . . .	48
Figura 24 – Média (a) e <i>Sample Entropy</i> (b) para série Mensal da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro. . . . .	49
Figura 25 – Média para série mensal por hora da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro. (a) Janeiro, (b) Fevereiro, (c) Março, (d) Abril, (e) Maio, (f) Junho, (g) Julho, (h) Agosto, (i) Setembro, (j) Outubro, (k) Novembro, (l) Dezembro . . . . .	50
Figura 26 – <i>Sample Entropy</i> para série mensal por hora da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro. (a) Janeiro, (b) Fevereiro, (c) Março, (d) Abril, (e) Maio, (f) Junho, (g) Julho, (h) Agosto, (i) Setembro, (j) Outubro, (k) Novembro, (l) Dezembro . . . . .	51

- Figura 27 – Média (a) e *Sample Entropy* (b) para série Sazonal da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro. . . . . 52
- Figura 28 – Média e *Sample Entropy* da velocidade do vento da ERA-40 para as estações do ano no NE brasileiro. Média ((a) Primavera, (b) Verão, (c) Outono, (d) Inverno). *Sample Entropy* ((e) Primavera, (f) Verão, (g) Outono, (h) Inverno) . . . . . 53

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Escala de <i>Beaufort</i> (Adaptado de CPTEC (2017)). . . . .	8
Tabela 2 – Código atribuído as grades da ERA-40 e estações do INMET. . . . .	24
Tabela 3 – Estatística descritiva (média, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e <i>Sample Entropy</i> (SEn) para as séries da velocidade do vento no NE do INMET. . . . .	28
Tabela 4 – Estatística descritiva (média, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e <i>Sample Entropy</i> (SEn) para as séries da velocidade do vento no NE da ERA-40. . . . .	30
Tabela 5 – <i>Sample Entropy</i> para séries da velocidade do vento da ERA-40 no NE do Brasil. . . . .	40

## Lista de abreviaturas e siglas

AL	Alagoas
ApEn	<i>Approximate Entropy</i>
BA	Bahia
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CE	Ceará
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
cross-ApEN	<i>Cross-Approximate Entropy</i>
CV	Coefficiente de Variação
DAO	<i>Data Assimilation Office</i>
DP	Desvio-Padrão
ECMWF	<i>European Centre for MediumRange Weather Forecasts</i>
ERA	<i>ECMWF Re-Analyses</i>
GW	GigaWatts
GWEC	<i>Global Wind Power Council</i>
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JMA	<i>Japan Meteorological Agency</i>
LI	linha de instabilidade
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MA	Maranhão
MW	MegaWatts

NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NE	Nordeste
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
PB	Paraíba
PE	Pernambuco
PI	Piauí
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
RN	Rio Grande do Norte
SE	Sergipe
SEn	Sample Entropy
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	Vórtices Ciclônico de Altos Níveis
ZCIT	Zonas de Convergência Intertropical

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>3</b>
2.1	Geral	3
2.2	Específicos	3
<b>3</b>	<b>Revisão de Literatura</b>	<b>4</b>
3.1	Vento no Nordeste do Brasil	5
3.2	O vento como fonte energética	9
3.3	Reanálise	10
3.4	Entropia	11
3.4.1	<i>Sample Entropy</i>	12
3.4.2	<i>Cross Sample Entropy</i>	14
3.5	<i>Inverse Distance Weighting</i>	16
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>18</b>
4.1	Área de estudo	18
4.2	Fonte de dados	19
4.2.1	Reanálise ERA-40	19
4.2.2	Instituto Nacional de Meteorologia	19
4.3	Métodos	26
4.3.1	<i>Sample Entropy</i>	26
4.3.2	<i>Cross Sample Entropy</i>	27
4.3.3	<i>Inverse Distance Weighting</i>	27
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>54</b>
	Referências Bibliográficas	55

# 1 Introdução

A energia renovável obtida do vento encontra-se em constante expansão no mundo e o incentivo a pesquisas cresce por meio de incentivos governamentais e não governamentais. Segundo o relatório GWEC (2017) a capacidade de energia eólica mundial instalada no final do ano de 2016 foi de 486.749 *MegaWatts* (MW). A China é o país com maior capacidade mundial, 168.690MW. O Brasil é responsável por 10.740 MW dessa produção, inserindo-se no clube dos países com 10 *GigaWatts* (GW) instalado. Além de, ocupar a nona posição entre os países com maior capacidade instalada acumulada, liderando o mercado Latino-Americano e, sendo o mais promissor até 2020.

A matriz elétrica brasileira é composta por diversas fontes renováveis (biomassa, hídrica, solar e eólica) e não renováveis (fóssil, nuclear). Embora a maior produção seja das hidroelétricas, o fornecimento da energia eólica tem sido ampliado e representa atualmente 7.2% da matriz energética brasileira, com previsão de capacidade instalada de 17.92 GW ao final de 2020 (GWEC, 2017).

O Brasil possui registros de velocidade do vento três vezes superior à necessidade elétrica do país, colocando-o em posição de destaque no cenário mundial. Atualmente são 496 usinas eólicas instaladas com capacidade superior a 10 GW. O NE abriga o maior potencial eólico do país, estando a maior potencial no estado do Rio Grande do Norte com 920 MW instalada, acompanhado do Ceará com 600 MW e da Bahia com 520 MW (ABEEÓLICA, 2017; GWEC, 2017). A região NE detém a vantagem sobre o aspecto da complementaridade sazonal do regime de ventos com os fluxos hidrológicos nos reservatórios hidrelétricos, uma vez que em período de estiagem quando o níveis do reservatórios baixam, a velocidade do vento é maior.

Diante da capacidade de geração de energia eólica do país pesquisadores têm explorado a região NE do Brasil com a finalidade de obter informações sobre o comportamento do vento local e assim poder contribuir em estudos que viabiliza a configuração e instalações de parques eólicos na região (LIRA et al., 2017; DO NASCIMENTO et al., 2016; CARNEIRO; CARVALHO, 2015; DE ARAUJO et al., 2015; SANTANA et al., 2015; DE OLIVEIRA; STOSIC; STOSIC, 2012; OLIVEIRA; COSTA, 2011; SILVA et al., 2004; SILVA et al., 2002).

As pesquisas são fundamentadas em base de dados de registros da velocidade do vento coletada em vários locais, as informações são disponibilizadas geralmente de forma gratuita. Dentre as distintas fontes de dados, as convencionais, onde a coleta é

realizada por uma pessoa fisicamente, apresentam desvantagens por apresentarem ausência de informação em seus registros. Diante de situações como esta, centros de estudos climáticos desenvolveram modelos de circulação global que fornecem informações contínuas para diversas variáveis climáticas a nível mundial, denominando-o de reanálise. Além da vantagem de registros regulares, as reanálises estão dispostas em uma grade de forma uniforme.

A ERA-40 (ECMWF *Re-Analyses*) é uma reanálise desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (EMCWF), de observações meteorológicas que busca melhorar a precisão dos mapas climáticos históricos possibilitando uma análise mais detalhada dos vários sistemas meteorológicos, abrangendo um período onde se observa uma severa falta de dados. Várias instituições colaboraram com o projeto, sendo as principais o *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e a *Japan Meteorological Agency* (JMA). A coleta das observações são feitas por radiossondas, boias oceânicas, aviões, satélites e escaterômetro. Estas informações são reprocessadas fornecendo uma malha mundial com diversas variáveis climáticas (ECMWF, 2017).

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é um órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) que representa o Brasil junto à Organização Mundial de Meteorologia (OMM), responsável pelo sistema de coleta e distribuição de dados da rede de observações meteorológica da América do Sul e os demais centros meteorológicos que compõem o Sistema de Vigilância Meteorológica Mundial. O sistema de coleta é composto por radiossonda, estações meteorológicas da superfície, operadas manualmente e, pela maior rede de estações automáticas da América do Sul. O INMET disponibiliza o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) com séries históricas de variáveis atmosféricas como velocidade e direção do vento, temperatura, entre outras (INMET, 2017).

Ambas as base de dados têm estações sobre as mesma região, um ponto a ser explorado é se ambas conseguem reproduzir a mesma informação no mesmo local. As estatísticas clássicas utilizadas são o coeficiente de correlação, erro quadrático médio, índice de concordância e coeficiente de desempenho (WITZLER et al., 2016; ALENCAR et al., 2011). Contudo, o uso da medida de entropia *cross-Sample Entropy*, introduzida por Richman e Moorman (2000), utilizada em diversas áreas como processos fisiológicos (VALENZA et al., 2014), processos hidrológicos (CHOU, 2014) e dados financeiros (REDDY; SEBASTIN, 2006), surge como uma nova abordagem, em particular, para o estudo de séries da velocidade do vento que pertencem a base de dados provenientes de diferentes instituições, permitindo verificar a similaridade entre as séries. Assim como, o uso da *Sample Entropy* para verificar a regularidade das séries sobre o NE.

## 2 Objetivos

### 2.1 Geral

Utilização de métodos de entropia para medir o grau de similaridade entre os dados disponibilizados pela ERA-40 e INMET, assim como, identificar quais regiões do Nordeste do Brasil apresentam maior/menor previsibilidade da velocidade do vento.

### 2.2 Específicos

- Mineração de dados das bases do INMET e da ERA-40;
- Comparar o comportamento das informações do INMET e da ERA-40 sobre o Nordeste em séries, horária, diária, mensal, sazonal, com relação a velocidade do vento como fonte de energia eólica;
- Utilizar o *Sample Entropy* para identificar o grau de regularidade dos registros da velocidade do vento da ERA-40 e do INMET sobre região do Nordeste ;
- Utilizar a estatística *cross-Sample Entropy* para medir a similaridade entre as séries das estações convencionais do INMET e a grade da reanálise ERA-40;

### 3 Revisão de Literatura

O vento é um elemento resultante do deslocamento do ar das zonas de alta pressão para as zonas de baixa pressão atmosférica, provocando instabilidade através do aquecimento da superfície. A diferença no gradiente de pressão atmosférica tem influência da energia solar, rotação planetária, diferença de temperatura, assim como da topografia local (AMARANTE et al., 2001; NASCIMENTO; TUBELIS, 1984). Portanto, o comportamento do vento está associado a região que atua e a direção que segue.

Entre os Trópicos e o Equador ocorrem os ventos alísios (NE, SE, L), enquanto entre os Trópicos e áreas Subpolares encontram-se os ventos de Oeste. O encontro dos ventos de Alísios e Oeste geram as frentes polares promovendo altas variações na velocidade do vento (SILVA et al., 2004). Quando submetido ao efeito de Coriolis, o vento sofre interferência na sua trajetória e mantém sua velocidade inalterada. Conseqüentemente, no hemisfério Sul são deslocados para direita originando os ventos alísios de Sudeste, que ao encontrar-se no Equador com os ventos alísios de Nordeste, produzem as Zonas de Convergência Intertropical (ZCIT) (Figura 1) (CPTEC, 2017; INMET, 2017).

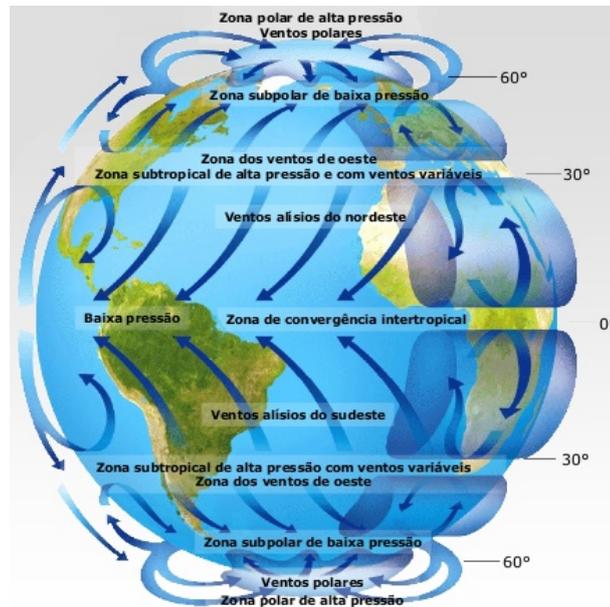


Figura 1 – Circulação atmosférica global.  
Fonte: Ramos (2015).

### 3.1 Vento no Nordeste do Brasil

O Nordeste (NE) brasileiro, conforme ilustrado na Figura 2, possui uma extensa área territorial com aproximadamente  $1.558.196 \text{ km}^2$  e a maior costa litorânea do país. Limita-se a Norte e a Leste com o Oceano Atlântico, ao Sul com os estados de Minas Gerais e Espírito Santo e a Oeste com os estados do Pará, Tocantins e Goiás (VAREJÃO-SILVA, 2006). O relevo do NE é composto por Planaltos como o da Borborema, Araripe e Parnaíba, e pela depressão Sertaneja e do São Francisco (ROSS, 2011).

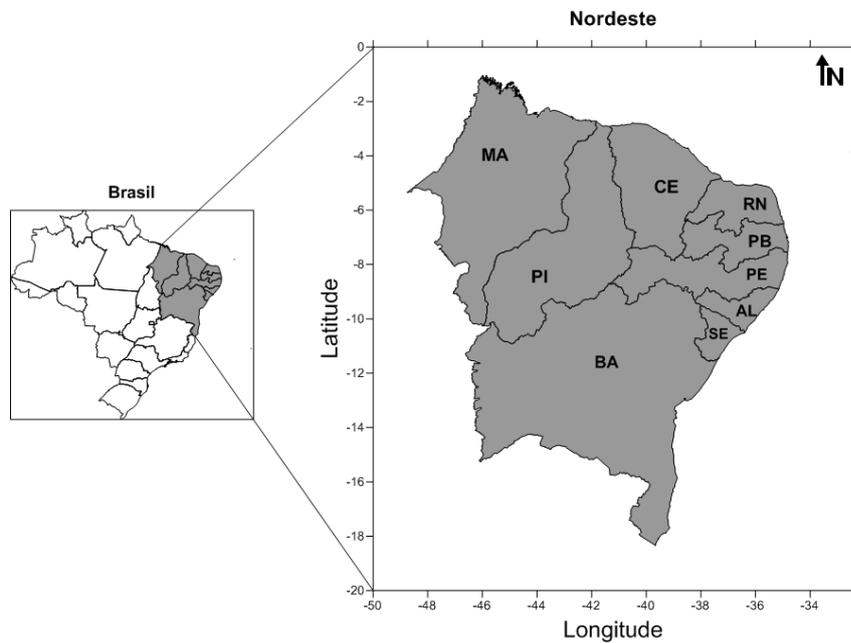


Figura 2 – Ilustração do mapa do Brasil com destaque para região Nordeste e seus estados.

Devido a diversidade climática encontrada na região, a mesma está subdividida em quatro grandes domínios geoambientais (Sertão, Zona da Mata, Agreste e Meio Norte), conforme Figura 3. O Sertão também chamado de semiárido, é conhecido como a área da Seca do NE. A Zona da Mata situada na zona litorânea, localizada do Rio Grande do Norte até o sul da Bahia. O Agreste, região de transição entre o litoral úmido e o sertão semiárido, na forma de uma estreita faixa, paralela à costa e sujeita a seca. E, o Meio Norte a área de transição entre a Amazônica e o Sertão Nordestino (REBOUÇAS, 1997).

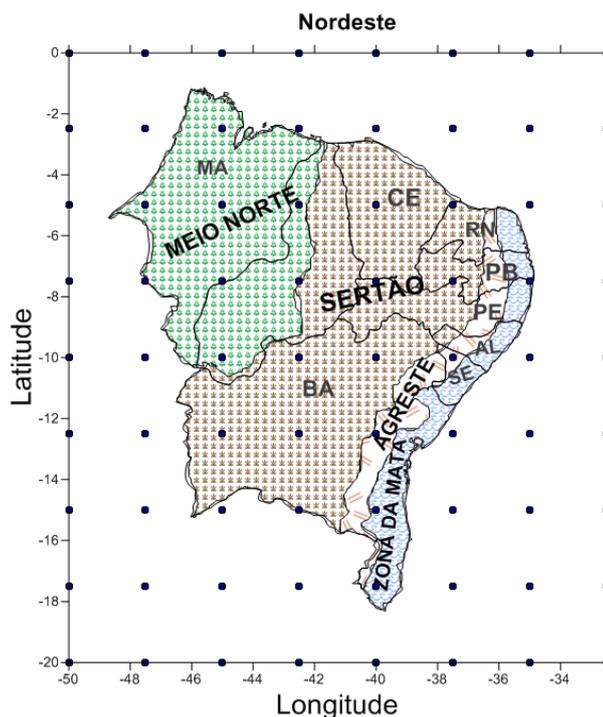


Figura 3 – Ilustração das quatro sub-regiões correspondente aos quatro domínios geoambientais no NE.

O NE sofre a influência de sistemas de escala planetária ou macroescala como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que atribui característica ao clima de grandes áreas. Assim como, os sistemas de mesoescala que fazem referência aos fenômenos locais como as linhas de instabilidade e, os sistemas de microescalas (FERREIRA; MELLO, 2005). As distintas ações nos sistemas exercidas pelo relevo continental, radiação solar, ação periódica irregular das massas de ar polares, extensa faixa litorânea, entre outros, são aspectos que contribuem para a biodiversidade que está intrinsecamente relacionada a variabilidade do vento na região (OLIVEIRA; COSTA, 2011; AMARANTE et al., 2001).

As ZCIT é um sistema meteorológico muito importante, localizada em torno do Equador influenciando diretamente no clima do Nordeste brasileiro. A posição e a intensidade da ZCIT são dominadas por padrões de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre a bacia do oceano Atlântico, atingida por anomalias climáticas como o dipolo de TSM no oceano Atlântico, o El Niño e a La Niña, que alteram a circulação atmosférica afetando os ventos alísios e consequentemente a sua velocidade no clima regional e global (FERREIRA; MELLO, 2005; OLIVEIRA, 1999).

Lima et al. (2014) em investigação dos efeitos das anomalias *El Niño* e *La Niña* na região Nordeste do Brasil, dominada por ventos alísios de Sudeste, identificou que o *El Niño* tem efeito positivo sobre a velocidade do vento para os dados analisados que

compreendem o período de 1982 a 2012. Além de, identificar maior diferença de velocidade de vento no mês de abril. Para o mês de setembro durante os anos de *El Niño* a intensidade dos ventos alísios diminui, ao contrário da *La Niña* que contribui na intensidade dos ventos alísios. Essas características também foram identificadas em um estudo da velocidade do vento em quatro áreas aeroportuárias distintas nos Estados Unidos (HARPER; KATZ; HARRISS, 2007).

A ZCIT também colabora no aumento das Linhas de Instabilidade (LI) formadas na costa Norte do NE, com ênfase nos meses de fevereiro e março. A LI é originada através do alto índice de radiação solar sobre os trópicos formando nuvens alinhadas que se deslocam uniformemente e, provoca um aumento da velocidade do vento. De modo geral, após sua passagem os ventos são mais rápidos (INMET, 2017).

As frentes frias também são sistemas que atuam provocando alterações no clima do NE formando nuvens em zonas de confluência entre massas de ar fria e quente, contribuindo na precipitação local (FERREIRA; MELLO, 2005). Assim, como os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) originados sobre o Oceano Atlântico que formam ciclone na alta troposfera com maior velocidade do vento em altos níveis. Os VCAN têm maior incidência entre os meses de janeiro e fevereiro afetando o interior do NE quando posicionado a Leste na direção do oceano para o continente e, causam perturbações no trópicos (DE CALBETE; GAN; SATYAAMURY, 1996; KOUSKY; GAN, 1981).

As brisas terrestres e marinhas sistemas também presentes na região NE, interferem no comportamento do vento, posto que, quanto menor os índices de vegetação e umidade do solo, menor será a fricção dos ventos e maior será a velocidade, podendo gerar ventos médios anuais entre 6 e 9  $m/s$  no litoral da região. Deste modo, a velocidade do vento diminui à medida que se afasta da costa para o interior, por causa do aumento de atrito e rugosidade de superfície e ao enfraquecimento da contribuição das brisas marinhas (AMARANTE et al., 2001).

Segundo Varejão-Silva (2006) as brisas terrestre e marinhas geralmente contribuem apenas para mudar a direção e a velocidade dos ventos alísios, os quais são persistentes e intensos durante todo o ano no NE brasileiro. As brisas podem fazer com que a velocidade de vento aumente ou diminua mais que os os ventos alísios, dependendo da orientação da costa. No entanto, a variação da velocidade do vento pode ser classificada de acordo com a escala de Beaufort.

A escala de Beaufort (Tabela 1) criada por Sir Francis Beaufort (1777 – 1857), hidrógrafo da Marinha Real Britânica, está fundamentada na Força ou Número de Beaufort e possui um sistema para calcular e informar a velocidade do vento. O sistema é composto da velocidade de vento, um termo descritivo, e os efeitos visíveis sobre as superfícies da

terra ou do mar. A unidade de medida para quantificar a velocidade do vento pode ser em  $m/s$ ,  $km/h$ , ou *Knots* ( $kt$ ), sendo que um *knot* corresponde a uma milha náutica ( $1852m$ ) por hora (INMET, 2017).

Tabela 1 – Escala de *Beaufort* (Adaptado de CPTEC (2017)).

Número de Beaufort	Descrição	Critérios de apreciação na terra	Velocidade do vento (m/s)
0	Calmaria	A fumaça eleva-se verticalmente.	0 – 0,4
1	Ar leve	O vento inclina a fumaça, mas não faz girar o cata-vento.	0,5 – 1,5
2	Brisa leve	As folhas se movem e o vento é sentido no rosto.	1,6 – 3,4
3	Brisa suave	As folhas e os ramos pequenos se movem continuamente	3,5 – 5,5
4	Brisa moderada	O vento levanta o pó e as folhas. Os ramos se agitam.	5,6 – 8,0
5	Brisa fraca	Pequenas árvores começam a balançar.	8,1 – 10,9
6	Vento forte	Os ramos grandes se movem. Os fios elétricos vibram. Dificuldade em se usar o guarda-chuva.	11,4 – 13,9
7	Temporal moderado	As árvores se agitam. Há um incômodo em andar contra o vento.	14,1 – 16,9
8	Temporal	Rompem-se os ramos pequenos das árvores. Difícil andar contra o vento.	17,4 – 20,4
9	Temporal forte	Os ramos médios das árvores se quebram.	20,5 - 23,9
10	Temporal muito forte	As árvores são arrancadas e danos são espalhados.	24,4 – 28,0
11	Tempestade	Destroços extensos. Tetos arrancados, etc.	28,4 – 32,5
12	Furacão	Produz efeitos devastadores.	32,6 – 60,0

A velocidade do vento é também influenciada pela hora do dia como consequência do balanço de radiação solar junto à superfície terrestre. Sob balanço positivo de radiação, a velocidade do vento cresce acompanhando os valores do balanço, ambos alcançando valores máximos simultaneamente. A maior velocidade do vento é no período da tarde quando há maior saldo de radiação (NASCIMENTO; TUBELIS, 1984)

Muitos estudos (DO NASCIMENTO et al., 2016; DE ARAUJO et al., 2015; SANTANA et al., 2015; DE OLIVEIRA; STOSIC; STOSIC, 2012; SILVA et al., 2002) exploram a variável climática velocidade do vento apontando um grande potencial eólico

da região NE. No Brasil a primeira turbina eólica para geração de energia elétrica foi instalada na ilha de Fernando de Noronha em junho de 1992 e, no ano de 2003 a produção de energia eólica no país ganhou pulso após a implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) (ANEEL, 2005).

## 3.2 O vento como fonte energética

A energia eólica é a energia cinética contida no vento, um recurso renovável, limpo e abundante que atingiu escala comercial na década de 70 com a crise internacional do petróleo, recebendo incentivos para viabilizar o seu desenvolvimento. Medir o potencial eólico em uma região exige trabalhos sistemáticos de coleta e análise de dados sobre a velocidade e o regime de ventos, sendo a energia tecnicamente aproveitável se apresentar densidade maior ou igual a  $500 \text{ W/m}^2$ , a uma altura de 50 m, admitindo uma velocidade mínima do vento de 7 a 8  $\text{m/s}$  (ANEEL, 2005; GRUBB, 1993).

Carvalho et al. (2012) em estudo sobre o potencial eólico nas regiões do Litoral, Serra e Sertão do Ceará identifica que a velocidade do vento possui características técnicas satisfatória para geração de energia elétrica. Sendo na Serra, o local com melhor densidade de potência eólica fato que contribui para descentralização dos parques eólicos, pois muitos investimentos são realizados na costa do estado.

Carneiro e Carvalho (2015) apresentam uma avaliação estatística do potencial eólico para os municípios de Maracanaú (CE), Petrolina (PE) e Parnaíba (PI). Foi observado que os padrões de vento com melhor potencial eólico ocorreram na Parnaíba (PI) e em Petrolina(PE). Verificando também que ambas tem maior regularidade no comportamento dos ventos, com destaque para Petrolina (PE).

Do Nascimento et al. (2016) em estudo de predição para médias mensais da velocidade do vento em municípios do Nordeste brasileiro, identificou as cidades de Fortaleza (CE), Parnaíba (PI) e São Luís (MA) com maior semelhança nos registros entre máximos e mínimos da velocidade do vento quando comparados os valores preditos e observados da velocidade do vento local.

Lira et al. (2017) em análise do perfil da velocidade média horária e mensal dos ventos no estado do Piauí identificaram três grupos com características de perfil do vento distintas. Sendo que os municípios de Paulistana e Parnaíba se destacam por apresentarem melhor valores de velocidade média horária e mensal do vento com adequado potencial eólico para o aproveitamento de energia elétrica, através de dados das estações do INMET.

Muitas pesquisas como as citadas anteriormente utilizam dados de estações convencionais para realizar suas análises. No entanto, à ausência de algumas informações

nos bancos de dados dificultam o desenvolvimento do trabalho. Uma alternativa para contornar esse empecilho são as reanálises, modelos atmosféricos globais que resultam em um conjunto de informações com registros contínuos de variáveis climatológicas.

### 3.3 Reanálise

A reanálise é uma análise de dados observacionais obtido através de um sistema de assimilação de dados. Diversas instituições como o *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), *Data Assimilation Office* (DAO) desenvolvem projetos de reanálise cada um com seu sistema de assimilação. O objetivo comum a todas as reanálises é suprir problemas na descontinuidade e ausências de informação de diversas variáveis climáticas, preenchendo as lacunas e dando origem a um conjunto de dados sem falhas (UPPALA et al., 2005). Essas características despertam o interesse de pesquisadores em explorar as informações fornecidas pelas instituições, contribuindo para estudos de diferentes variáveis climáticas.

O ECMWF disponibiliza diferentes conjunto de dados que pertencem ao projeto “ECMWF *Re-Analyses* (ERA)”. O primeiro projeto foi denominado de ERA-15, abrangendo 15 anos de assimilação de dados (1979-1993). Após identificar algumas deficiências e a necessidade por um período maior de informação originou-se a ERA-40. Esta, é a segunda geração da ERA compreendendo 45 anos de informações (1957-2001), com mudanças no sistema de assimilação, maior resolução e recursos computacionais que melhoraram as informações (UPPALA et al., 2005).

A ERA-40 é uma reanálise atmosférica global de observações meteorológica de setembro de 1957 a agosto de 2002, desenvolvida pelo ECMWF com a colaboração de instituições como NCEP e a *Japan Meteorological Agency* (JMA), sendo o principal provedor o NCAR. A variedade na fonte de dados, acarreta em vários tipos de arquivos que são convertidos para o padrão “WMO FM 94 BUFR” (formato universal binário para a representação de dados meteorológicos), bem como submetidos a verificações que garantem a veracidade das informações (UPPALA et al., 2005).

Stüker et al. (2016) fez uma comparação entre dados de ventos das reanálises meteorológicas ERA-Interim e CFSR com as estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul, verificando através do coeficiente de correlação que a CFSR apresenta melhor desempenho para variável magnitude do vento nesta região. Enquanto a variável direção do vento não é bem refletida pelas reanálises.

Schmidt, Cancelli e Junior (2016) avaliou a variabilidade do potencial de usinas eólicas nos quatro estados brasileiros mais importantes na produção de energia eólica, CE, RN, BA e RS, por meio de séries temporais de produção de energia eólica a partir da velocidade do vento obtida por modelos da reanálise NCAR e ECMWF. Os resultados identificaram que os dados do ECMWF reproduz melhor as séries da velocidade do vento que o NCAR.

Witzler et al. (2016) desenvolveu uma metodologia para reconstruir séries históricas de potencial eólico utilizando dados da reanálise NCEP/NCAR, contribuindo em análises de longo alcance da complementariedade entre a energia obtida pelos ventos e por hidroelétricas. A reconstrução das séries possibilitou a avaliação da complementariedade energética em diferentes regiões do Brasil, diminuindo os riscos relacionados a sazonalidade dos ventos.

No Brasil o CPTEC produziu uma reanálise regional em 2006 com 40 km de resolução espacial para o período de 2000 a 2004. Em 2010, foi lançada uma nova versão cobrindo a América do Sul com resolução espacial de 20 km de 2000-2009 (SAPUCCI et al., 2010).

Dentre as diferentes reanálises, a ERA-40 foi selecionada por conter o maior período de informações. No entanto, é de grande importância aferir o grau de desordem das séries climáticas pertencentes a ERA-40, em particular da velocidade do vento, que podem apresentar irregularidade causando dificuldades no funcionamento do sistema e no planejamento operacional. Usualmente são usadas estatísticas clássicas, como o erro quadrático médio, para avaliar as séries. Neste contexto, são inseridas estatísticas que medem o grau de incertezas, como entropia, como uma maneira diferente de explorar as séries.

### 3.4 Entropia

O conceito de entropia foi introduzido na metade do século XIX por Rudolf Clausius, durante o desenvolvimento da Termodinâmica e, interpretada como uma medida da irreversibilidade de um processo. Em 1877, foi reinterpretado pelo físico Ludwig Boltzmann relacionando probabilidade e combinatória em seus cálculos, definindo-a como uma medida de desordem do sistema. Em seguida, Shannon na Teoria da Informação elucidou a entropia como o grau de incerteza, ou média da desinformação associada a um conjunto de eventos (BORGES, 1999).

Há diferentes medidas de entropia, cada uma com suas particularidades. Entre estas pode-se destacar a entropia Shannon (SHANNON, 2001), Rényi (RÉNYI, 1961),

Tsallis (TSALLIS, 1988), *Permutation Entropy* (BANDT; POMPE, 2002), *Approximate Entropy* (PINCUS, 1991), *Sample Entropy* (RICHMAN; MOORMAN, 2000) e *Cross-Sample Entropy* (RICHMAN; MOORMAN, 2000), *Multiscale Entropy* (COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2002). Nesse estudo, serão abordados a *Sample Entropy* e a *cross-Sample Entropy* com o propósito de medir o grau de regularidade e a similaridade, respectivamente.

### 3.4.1 *Sample Entropy*

A *Sample Entropy* também conhecida como entropia amostral é utilizada para medir a taxa de informação ou regularidade em séries temporais não lineares sem considerar a própria ocorrência, ou seja, sem a auto-combinação, foi introduzida por Richman e Moorman (2000) como uma modificação do método *Approximate Entropy* (ApEn) (PINCUS, 1991) para reduzir o viés, tornando-se independente do tamanho dos dados. Além de, mostrar consistência nos casos que o ApEn não conseguiu (RICHMAN; MOORMAN, 2000).

A *Sample Entropy* é definido como o logaritmo natural negativo da probabilidade condicional de que duas sequências similares (dentro de um nível de tolerância  $r$ ), para  $m$  pontos, permanecem similares para  $m+1$  pontos, (Equação 3.7) (RICHMAN; MOORMAN, 2000):

Seja  $x(1), \dots, x(N)$  uma série temporal de tamanho  $N$ , o algoritmo de *SampEn* ( $m, r, N$ ) é descrito como:

1. Construção de  $N + m - 1$  vetores  $x(1), x(2), \dots, x(N + m - 1)$ , definindo  $x(i)$  de acordo com a Equação 3.1.

$$x(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)], \quad i = 1, \dots, N - m + 1. \quad (3.1)$$

em que  $m$  é o comprimento do vetor.

2. Definição da distância  $d$  entre os vetores  $x(i)$  e  $x(j)$ , como a máxima diferença absoluta entre seus elementos escalar correspondente, em que:

$$d[x(i), x(j)] = \max_{k=0, m, m-1} [|x(i+k) - x(j+k)|] \quad (3.2)$$

3. Para cada  $i = 1, \dots, N - m$ , calcula a probabilidade da ocorrência do padrão  $i$ , de tamanho  $m$ , dada uma tolerância  $r$  de combinação, para  $x_m(i) \neq x_m(j)$  garantindo que não haverá autocontagem.

$$B_i^m(r) = \frac{\text{número de } d \leq r}{N - m - 1} \quad (3.3)$$

$$A_i^{m+1}(r) = \frac{\text{número de } d \leq r}{N - m - 1} \quad (3.4)$$

4. Calcula-se a probabilidade que duas sequências são similares para  $m$  pontos ( $B^m(r)$ ) e  $m + 1$  pontos ( $A^{m+1}(r)$ ).

$$B^m(r) = \frac{1}{N - m} \left( \sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r) \right) \quad (3.5)$$

$$A^{m+1}(r) = \frac{1}{N - m} \left( \sum_{i=1}^{N-m} A_i^{m+1}(r) \right) \quad (3.6)$$

5. Por fim, calcula-se o índice *Sample Entropy*:

$$SampEn(m, r, N) = -\ln \left( \frac{A^{m+1}(r)}{B^m(r)} \right) \quad (3.7)$$

em que  $A^{m+1}(r)$  e  $B^m(r)$  representam o número de padrões similares na série com tamanho  $m + 1$  e  $m$ , respectivamente. Baixos valores de *Sample Entropy* indicam alta regularidade das séries temporais.

Segundo Pincus (1991) o nível de tolerância( $r$ ) indicado está entre valores de 10% e 25% vezes o desvio padrão da série e,  $m$  será igual a 1 e 2. Autores como Lake et al. (2002), sugerem modelos auto regressivos para determinar  $m$  e o menor erro relativo para determinar o nível de significância  $r$ .

O método *Sample Entropy* é utilizado em diversas áreas do conhecimento. No mercado financeiro Reddy e Sebastin (2006) aplicam *Sample Entropy* para estudar a manipulação de preços no mercado de ações indiano durante vários dias de negociação.

Valenza et al. (2014) utilizaram *Sample Entropy* em sistemas fisiológicos dinâmicos. Neste estudo a finalidade foi caracterizar a evolução do sistema em cada momento a partir de séries temporais discretas, fornecendo índices capazes de rastrear instantaneamente sua complexidade. Sendo aplicado em dados de pulsão cardíaca de indivíduos saudáveis e com insuficiência cardíaca.

Em climatologia Mimić, Mihailović e Kapor (2015) analisaram séries diárias de temperatura e precipitação de sete estações da Sérvia, com o objetivo de quantificar a complexidade anual das séries. Foi observado tendência crescente para temperatura máxima embora estatisticamente insignificante. Para a temperatura mínima a tendência depende do local. Enquanto a medida de complexidade da precipitação tem tendência decrescente.

Chou (2014) investigou séries temporais de processos hidrológicos para verificar a complexidade em diferentes escalas temporais da precipitação e vazão. Indicando que a complexidade aumenta quando o tamanho da amostra aumenta para uma escala temporal específica. Além de, com as variações da *Sample Entropy* a partir das diferentes escalas temporais forneceu uma referência para determinar qual a escala foi apropriada para realizar previsões pluviométricas e de vazão.

Huang et al. (2011) empregaram *Sample Entropy* para medir a regularidade do fluxo do rio *Yangtze* na China e a regularidade da chuva na região. Considerando que a baixa regularidade do fluxo do rio *Jinsha* podia estar relacionado a regularidade pluviométrica e, a baixa regularidade do fluxo no rio *Yangtze* podia ser influenciada por atividades humanas, como a construção de reservatórios.

Shuangcheng et al. (2006) analisaram séries de temperatura diária usando *Sample Entropy*. Os resultados refletiram o grau de variação das monções de massa de ar na área do estudo, perceberam que ambientes climáticos homogêneos produz baixos valores de *Sample Entropy* e, que a metodologia pode auxiliar para analisar e prever a regularidade de séries temporais de temperatura.

Em estudo da precisão da previsão de séries da velocidade do vento Zhang et al. (2015) extraíram os componentes característicos inerentes dos dados originais usando a *Sample Entropy* e técnica de decomposição. Os componentes característicos demonstraram baixa complexidade e a abordagem para previsão da velocidade do vento indicaram um método mais preciso.

Yue et al. (2017) em estudo da precisão da previsão da velocidade do vento propuseram um método de previsão combinado. Dentre as metodologias utilizadas, a *Sample Entropy* foi usada para verificar sequências com complexidade similar e, baseado nessa informação mesclaram para melhorar a eficiência da previsão.

### 3.4.2 *Cross Sample Entropy*

*Cross-Sample Entropy (cross-Sample Entropy)* é uma técnica baseada no método *Sample Entropy* apresentando maior consistência que a *Cross-Approximate Entropy (cross-ApEN)*, utilizada para medir a similaridade ou grau de sincronia entre duas série temporais. A *cross-Sample Entropy* pode assumir valores altos correspondendo a séries altamente assíncronas e, valores baixos equivalendo à sincronia entre as séries, os valores podem variar entre 0 (baixa entropia) e 2 (alta entropia), valores maiores que 2 não fornecem qualquer informação sobre a série (RICHMAN; MOORMAN, 2000). O algoritmo para o cálculo da (*cross-Sample Entropy*) é apresentado a seguir:

Considere  $u = (u(1), u(2), \dots, u(N))$  e  $v = (v(1), v(2), \dots, v(N))$  serem duas séries de tamanho  $N$ . Fixando o tamanho dos vetores a serem comparados,  $m$ , e o nível de tolerância para aceitar similaridade,  $r$ .

1. Forme sequência de vetores para  $u$  e  $v$ , respectivamente.

$$x_m(i) = u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1), \quad 1 \leq i \leq N-m \quad (3.8)$$

$$y_m(j) = v(j), v(j+1), \dots, v(j+m-1), \quad 1 \leq j \leq N-m \quad (3.9)$$

2. Para cada  $i \leq N-m$  obtenha o número de vetores  $y_m(j)$  e  $y_{m+1}(j)$  dentro do nível de tolerância  $r$  do vetor  $x_m(i)$  e  $x_{m+1}(i)$ , respectivamente.

$$B_i^m(r)(v||u) = \frac{\text{número } 1 \leq j \leq N-m \text{ para } d[x_m(i), y_m(j)] \leq r}{N-m}, \quad (3.10)$$

$$A_i^{m+1}(r)(v||u) = \frac{\text{número } 1 \leq j \leq N-m \text{ para } d[x_{m+1}(i), y_{m+1}(j)] \leq r}{N-m} \quad (3.11)$$

em que  $d[x_m(i), y_m(j)] = \max \{|u(i+k) - v(j+k)| : 0 \leq k \leq m-1\}$ .

3. Calcula-se o número de pares de vetores das duas séries que estão dentro do nível de tolerância  $r$ .

$$B_m(r)(v||u) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r)(v||u)}{N-m}, \quad (3.12)$$

$$A^{m+1}(r)(v||u) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} A_i^{m+1}(r)(v||u)}{N-m} \quad (3.13)$$

4. Finalmente,

$$\text{crossSampEn}(m, r, N)(v||u) = -\ln \left\{ \left[ \frac{A^{m+1}(r)(v||u)}{B^m(r)(v||u)} \right] \right\} \quad (3.14)$$

O número de pares de vetores é independente de qual série será modelo, logo  $\text{crossSampEn}(m, r, N)(v||u) = \text{crossSampEn}(m, r, N)(u||v)$ . Sendo definido desde que  $A_{m+1}(r)(v||u) \neq 0$  e, que pelo menos um par de vetores nas duas séries sejam similares para  $m+1$  pontos. Os valores dos parâmetros  $r$  e  $m$  são obtidos como no método *Sample Entropy*. Nesse estudo o calculo adotado para especificar os parâmetros é o utilizado por Pincus (1991).

A *cross-Sample Entropy* é utilizada em análises de processos fisiológicos (HU; SHI, 2006; MIHAILOVIĆ; BALAŽ, 2012). Zhang, Yang e Coote (2007) utilizaram *cross-Sample Entropy* para avaliar séries de pressão arterial e atividade do nervo simpático renal

durante uma hemorragia em ratos. Notando que o cálculo da *cross-Sample Entropy* pode caracterizar a não linearidade do mecanismo neural subjacente ao controle cardiovascular.

Liu, Qian e Lu (2010) investigaram as taxas de câmbio nos mercados com base em dados empíricos no período de 1995 a 2002, utilizando a *cross-Sample Entropy* para comparar as taxas de retorno do câmbio e avaliar o grau de sincronia. O estudo mostrou que existe assincronia entre as séries após a crise da taxa de câmbio da Ásia, identificada com o aumento no valor da *cross-Sample Entropy*.

Shi e Shang (2013) investiga a *cross-Sample Entropy* no mercado de ações da China e Estados Unidos antes e depois da crise da Ásia. As séries da China mostram um aumento da assincronia após a crise, que pode ser explicada por mudanças políticas ou regimes cambiais. Enquanto, os Estados Unidos apresenta tendências oposta.

Embora a *cross-Sample Entropy* seja aplicada em diferentes áreas, não foram encontrado estudos que explorassem as séries de velocidade do vento. Logo, neste trabalho será abordada esta metodologia para verificar a similaridade entre séries de velocidade do vento do INMET e da ERA-40.

### 3.5 *Inverse Distance Weighting*

O *Inverse Distance Weighting* (IDW) é um método de interpolação proposto por Shepard (1968) que combina a ideia de proximidade, supondo que pontos mais próximos são mais semelhantes do que aqueles que estão mais distantes, ou seja, os valores medidos mais próximos ao local de previsão terão maior influência sobre o valor previsto, admitindo uma influência que diminuirá com a distância (LUO; TAYLOR; PARKER, 2008).

O IDW é considerado uma das técnicas de interpolação espacial padrão na ciência da informação geográfica (LONGLEY et al., 2005; BURROUGH; MCDONNELL; LLOYD, 2001), além de estar disponível na maioria dos softwares de *Geographic Information System* (GIS). A expressão matemática do *Inverse Distance Weighting* (IDW) é dada pela equação,

$$\hat{Z}_{s_0} = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_{(s_i)} \quad (3.15)$$

em que  $\hat{Z}_{s_0}$  é o valor estimado para cada local  $s_0$ ,  $N$  é o número de pontos observados,  $Z_{(s_i)}$  é o valor observado e  $\lambda_i$  é o peso atribuídos a  $i$  – ésima localidade. O peso é determinado pelas equações 3.16 e 3.17:

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}} \quad (3.16)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (3.17)$$

em que  $d_{i0}$  é a distância entre o local de previsão  $s_0$  e os locais medidos  $s_i$ . Os pesos atribuídos aos dados terá soma igual a 1.

O peso é reduzido a um fator  $p$ , podendo assumir valores aleatórios que afetam a precisão do método, usualmente  $p = 2$ . Porém, quanto maior o fator  $p$ , menor o efeito dos pontos mais afastados na interpolação e mais próximo do valor observado será o estimado, afetando significamente o resultado da interpolação. Por outro lado, se  $p$  assume valores pequeno o peso será distribuído uniformemente entre os dados. Portanto o peso é inversamente proporcional a distância. Uma particularidade do IDW está em provocar *bull's eyes* ou efeito mira, que são contornos concêntricos em torno dos pontos (BAKKALI; AMRANI, 2008).

Ao ser comparado com outros métodos de interpolação, em particular o *Kriging*, o IDW é considerado mais simples de programar e não exige pré-modelagem ou suposições na seleção de um modelo de semi-variograma. Assim como, sua medida de incerteza das estimativas que está diretamente relacionada aos valores estimados, enquanto no *Kriging* baseia-se no semi-variograma modelado (HENLEY, 1981).

Mentis et al. (2015) estudaram o potencial eólico na África através de uma análise minuciosa do GIS utilizando o IDW e, forneceram estimativas de potencial teórico, geográfico e técnico com base em tecnologia de energia eólica de última geração, .

Jahangiri et al. (2016) tentaram encontrar locais ideais para construção de estações elétricas conduzidas por sistema híbrido de fonte eólica e solar, usando o método de interpolação IDW em suas análises.

## 4 Metodologia

### 4.1 Área de estudo

O Nordeste brasileiro está localizado entre os meridianos  $48^{\circ}05' W$  a  $35^{\circ}02' W$  e paralelos  $1^{\circ} S$  a  $18^{\circ}05' S$ , a região é composta por nove estados, Bahia (BA), Sergipe (SE), Alagoas (AL), Pernambuco (PE), Paraíba (PB), Rio Grande do Norte (RN), Ceará (CE), Piauí (PI) e Maranhão (MA), todos os estados limita-se com o oceano Atlântico, portanto a velocidade dos ventos nesta fronteira é maior por não haver barreiras. Na Figura 4, observa-se os limites geográficos, bem como a disposição das coordenadas dos dados do INMET composto por 94 estações, e da reanálise ERA-40 que possuem 72 pontos de grade.

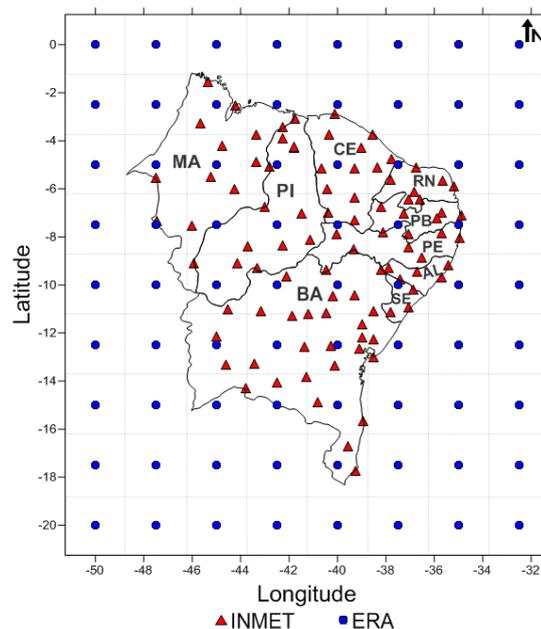


Figura 4 – Estações do INMET (vermelho) e grades da ERA-40 (azul) sobre a região NE. A grade da ERA-40 tem resolução de  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ , o círculo azul representa o centro de cada célula da grade. As estações do INMET são representadas por triângulos vermelhos dispostos de acordo com a respectivas coordenadas geográficas.

## 4.2 Fonte de dados

Para a realização das análises foram explorados duas base de dados. Um banco de dados é proveniente de estações convencionais do INMET. A outra base de informação é gerada por modelos de assimilação de dados da reanálise ERA-40. Primeiro, realizou-se o estudo das séries do INMET e da ERA-40 conjuntamente. Ambos os banco de dados foram analisadas em quatro séries, às 00 e 12h onde são consideradas os registros para o respectivos horários em cada série da velocidade do vento e, a denominada série Completa/Total onde não há discriminação do período. Além da, série diária gerada por meio da média da observações em cada dia. Em seguida, foram exploradas apenas os dados da ERA-40, sendo consideradas todas as 72 coordenadas que formam a grade por todo o NE. Nesta condição, foi verificado o comportamento das coordenadas para as quatro horas sinóticas (00, 06, 12, 18h) e, para as séries original, diária, mensal e sazonal.

### 4.2.1 Reanálise ERA-40

O dados da ERA-40 são registros realizados em  $m/s$  as, 00, 06, 12, 18 *UTC*, a 10  $m$  do solo dispostos em uma grade com resolução  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  (lat/long) que equivale a cerca de  $275 km^2$ , em formato \*.*GRIIB*, no período de 45 anos (1957-2002), disponível no endereço eletrônico <<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/era40-daily/levtype=sfc/>>. Devido a complexidade em manipular este tipo de arquivo, foi necessário desenvolver um código em linguagem C para extrair as informações, entender como as mesmas eram organizadas e exportar em formato \*.*dat* para realizar as análises no R (R Core Team, 2006). Dentre as diversas variáveis disponibilizadas, foram selecionadas as componentes zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ), representando a direção do vento no sentido Oeste-Leste e Norte-Sul, respectivamente. Com base nas componentes  $u$  e  $v$ , pode-se obter velocidade escalar do vento por meio da seguinte expressão:

$$s = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.1)$$

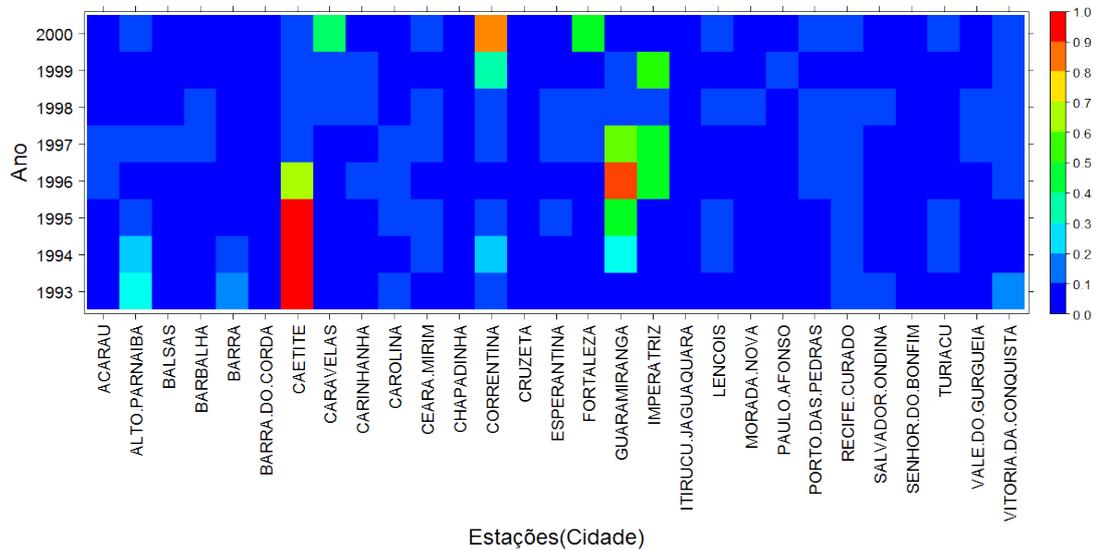
As coordenadas da ERA-40 foram selecionadas considerando se existia alguma coordenada da base de dados do INMET dentro da célula da ERA-40. Deste modo, primeiro foram escolhidas 29 coordenadas entre as 72 coordenadas disponíveis. Em seguida, foram consideradas todas as 72 grades.

### 4.2.2 Instituto Nacional de Meteorologia

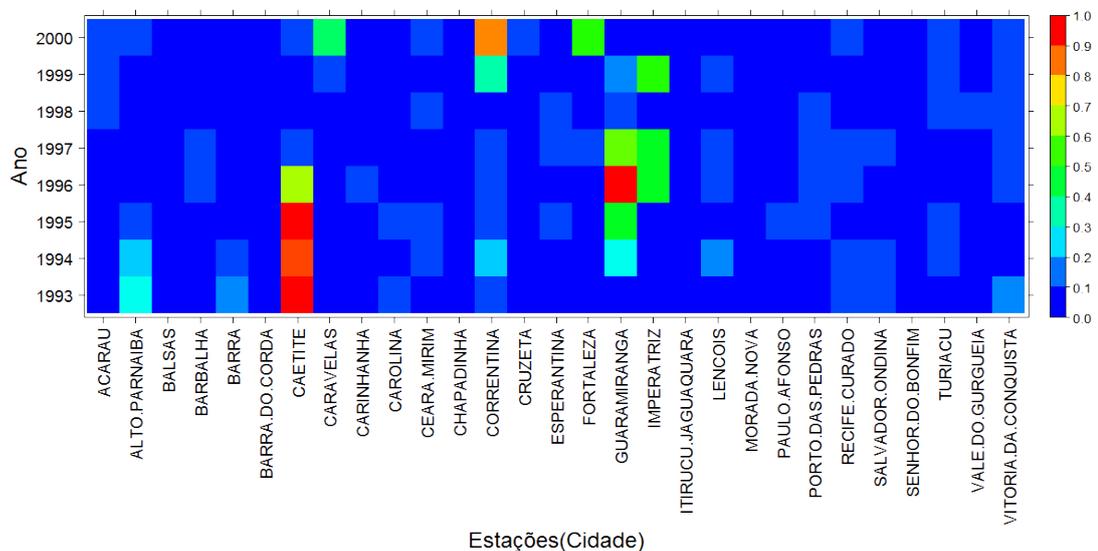
Os dados do INMET são registros de estações convencionais, coletadas manualmente, pertencentes ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) que



Observa-se, ainda na Figura 5, que há estações com períodos sem qualquer registros e outros com quantidade reduzida. Devido a deficiência apresentada nos registros do INMET, foi empregado um critério para selecionar quais estações seriam utilizadas. A seleção foi feita levando em conta aquelas estações que contém no máximo 30% de registros ausentes. Tal critério foi empregado por não ser identificado um método efetivo que trata os registros ausente em uma determinada base de dados (STÜKER et al., 2016; SCHMIDT; CANCELLA; JUNIOR, 2016). Portanto, ocorreu uma reformulação na base de dados, onde os dados do INMET ficaram composto por 69 estações no período de 1/1/1993 a 31/12/2000, correspondendo a 8 anos de observações às 00h (Figura 6 (a)) e às 12h (Figura 6 (b)). Algumas lacunas persistiram, para preencher os registros ausentes nas 69 estações selecionadas foi utilizado o método de interpolação IDW ( $p = 2$ ). As estimativas foram realizadas considerando as informações ausentes para cada hora de cada dia de cada mês e ano, no *software* R (R Core Team, 2006), completando todo a base de dados.



(a)



(b)

Figura 6 – Estações selecionadas do INMET entre os anos de 1993 a 2000, às 00h (a) e 12h (b).

Na primeira análise são utilizadas as base de dados da ERA-40 e do INMET, ficou definido que para ambas o período de análise seria o mesmo. Os dados da ERA-40 foram reduzidos ao mesmo intervalo de tempo dos dados do INMET. Conseqüentemente,

foram verificadas as estações do INMET que estavam dentro da grade que corresponde as coordenadas da ERA-40 (Figura 7). Sendo que cada ponto azul corresponde ao centro de uma grade da ERA-40 e, os triângulos vermelhos são os locais onde as estações convencionais do INMET estão instaladas.

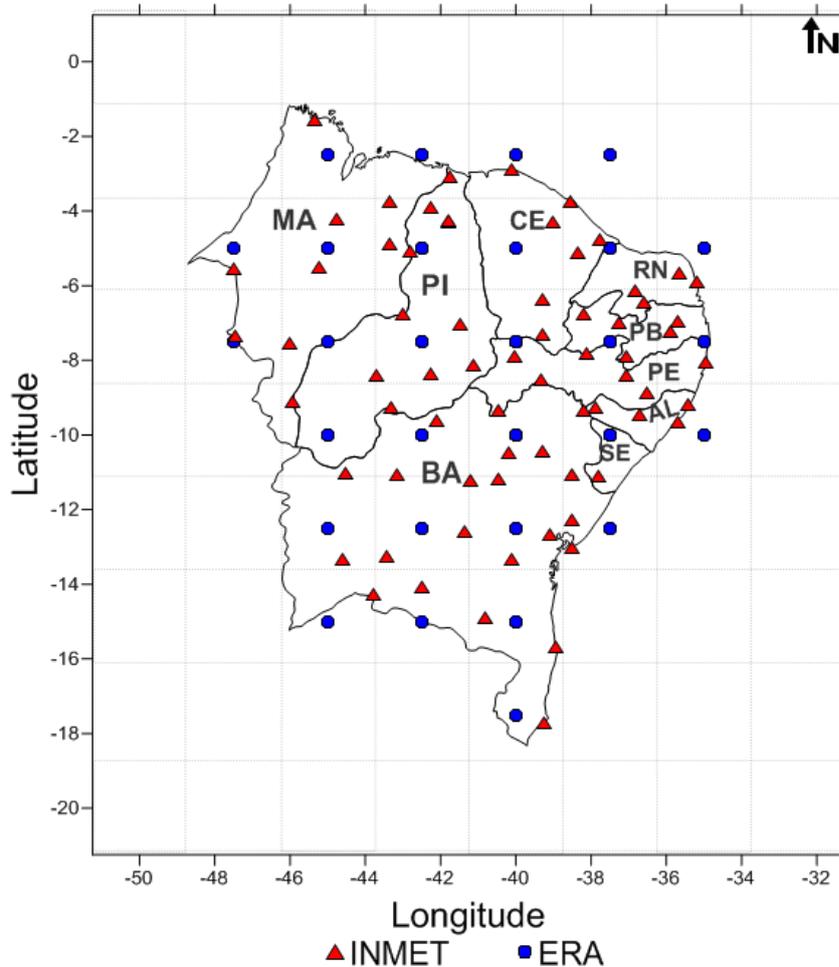


Figura 7 – Estações do INMET (vermelho) e grades da ERA-40 (azul) selecionadas para análise no período de 1993-2000.

Para cada grade da ERA-40 que tem resolução de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  foi atribuído um código que serve de identificador para cada uma das estações do INMET que se encontrem na dimensão da grade, como pode ser observado na Tabela 2. Percebe-se, que existe diferença nos valores da coordenadas. Isto ocorre porque a grade da ERA-40 abrange uma área com resolução  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ , onde o ponto azul representa o centro da grade (Figura 7), e as estações do INMET podem assumir qualquer valor dentro da dimensão da grade. No caso, em que há mais de uma estação dentro de uma grade da ERA-40, as estações do INMET ficaram representada por um único valor, obtido através da média das estações que tem o mesmo código. Portanto, a partir das estações contidas em uma grade, calcula-se

a média entre estas correspondendo ao valor considerado nas análises.

Tabela 2 – Código atribuído as grades da ERA-40 e estações do INMET.

Código	ERA-40		INMET		
	Longitude	Latitude	Latitude	Longitude	Estações do INMET (cidades)
1	-40	-2,5	-40,13	-2,88	Acarau
2	-37,5	-10	-37,9	-9,28	Água branca
2	-37,5	-10	-38,52	-11,08	Cipó
2	-37,5	-10	-36,52	-8,88	Guaranhus
2	-37,5	-10	-37,82	-11,12	Itabaianinha
2	-37,5	-10	-36,7	-9,45	Palmeira dos Índios
2	-37,5	-10	-38,21	-9,36	Paulo Afonso
3	-37,5	-12,5	-38,5	-12,28	Alagoinhas
3	-37,5	-12,5	-38,5	-13	Salvador (Ondina)
4	-45	-10	-45,93	-9,1	Alto Parnaíba
4	-45	-10	-44,51	-11,01	Sta. R. De Cássia (Ibipetuba)
5	-37,5	-7,5	-37,08	-8,42	Arcoverde
5	-37,5	-7,5	-36,58	-6,43	Cruzeta
5	-37,5	-7,5	-37,06	-7,88	Monteiro
5	-37,5	-7,5	-37,26	-7,01	Patos
5	-37,5	-7,5	-38,21	-6,75	São Gonçalo
5	-37,5	-7,5	-38,11	-7,81	Triunfo
6	-35	-7,5	-35,68	-6,97	Areia
6	-35	-7,5	-35,88	-7,22	Campina grande
6	-35	-7,5	-34,95	-8,05	Recife (curado)
7	-45	-5	-44,77	-4,22	Bacabal
7	-45	-5	-45,23	-5,5	Barra do corda
8	-45	-7,5	-46,03	-7,53	Balsas
9	-40	-7,5	-39,3	-7,32	Barbalha
9	-40	-7,5	-39,33	-8,52	Cabrobo
9	-40	-7,5	-39,3	-6,36	Iguatu
9	-40	-7,5	-40,05	-7,9	Ouricuri
9	-40	-7,5	-41,13	-8,13	Paulistana

*Continua na próxima página*

Tabela 2 – *Continuação da página anterior*

Código	ERA-40		INMET		
	Longitude	Latitude	Latitude	Longitude	Estações do INMET (cidades)
9	-40	-7,5	-42,25	-8,35	São João do Piauí
10	-42,5	-10	-43,17	-11,08	Barra
10	-42,5	-10	-43,33	-9,28	Caracol
10	-42,5	-10	-42,1	-9,63	Remanso
11	-42,5	-12,5	-43,42	-13,27	Bom Jesus da Lapa
11	-42,5	-12,5	-41,38	-12,57	Lençóis
12	-42,5	-15	-42,48	-14,07	Caetité
13	-42,5	-5	-41,8	-4,28	Caldeirão
13	-42,5	-5	-43,35	-4,87	Caxias
13	-42,5	-5	-42,25	-3,9	Esperantina
13	-42,5	-5	-41,78	-4,26	Piripiri
13	-42,5	-5	-42,81	-5,08	Teresina
14	-40	-15	-38,95	-15,67	Canavieiras
14	-40	-15	-40,8	-14,88	Vitória da Conquista
15	-40	-17,5	-39,25	-17,73	Caravelas
16	-45	-15	-43,77	-14,28	Carinhanha
17	-47,5	-7,5	-47,47	-7,33	Carolina
18	-35	-5	-35,65	-5,65	Ceará mirim
18	-35	-5	-35,2	-5,91	Natal
19	-42,5	-2,5	-43,35	-3,73	Chapadinha
19	-42,5	-2,5	-41,76	-3,083	Parnaíba
20	-45	-12,5	-44,61	-13,33	Correntina
21	-40	-12,5	-39,08	-12,66	Cruz das Almas
21	-40	-12,5	-40,12	-13,35	Itirucu (jaguaguara)
22	-37,5	-5	-36,82	-6,12	Florania
22	-37,5	-5	-37,77	-4,78	Jaguaruana
22	-37,5	-5	-38,36	-5,11	Morada nova
23	-42,5	-7,5	-43,02	-6,77	Floriano
23	-42,5	-7,5	-41,48	-7,03	Picos
23	-42,5	-7,5	-43,71	-8,41	Vale do Gurgueia (Cristiano Castro)

*Continua na próxima página*

Tabela 2 – Continuação da página anterior

Código	ERA-40		INMET		
	Longitude	Latitude	Latitude	Longitude	Estações do INMET (cidades)
24	-37,5	-2,5	-38,55	-3,75	Fortaleza
25	-40	-5	-39	-4,28	Guaramiranga
26	-47,5	-5	-47,48	-5,53	Imperatriz
27	-40	-10	-40,47	-11,18	Jacobina
27	-40	-10	-39,3	-10,43	Monte Santo
27	-40	-10	-41,21	-11,21	Morro do Chapéu
27	-40	-10	-40,46	-9,36	Petrolina
27	-40	-10	-40,18	-10,46	Senhor do Bonfim
28	-35	-10	-35,7	-9,67	Maceió
28	-35	-10	-35,43	-9,18	Porto de Pedras
29	-45	-2,5	-45,36	-1,56	Turiacu

### 4.3 Métodos

As medidas estatísticas utilizadas para tratar os dados, foram a *Sample Entropy* e a *cross-Sample Entropy*, ambas possuem bastante aplicabilidade em estudos que buscam avaliar a regularidade e a similaridade de séries temporais, respectivamente (VALENZA et al., 2014; CHOU, 2014; LIU; QIAN; LU, 2010; SHUANGCHENG et al., 2006). Como os dados deste trabalho pertencem a diferentes base de dados sobre a mesma região geográfica, o uso destas estatísticas irá verificar a similaridade entre as séries através da *cross-Sample Entropy* e a regularidade das séries com a *Sample Entropy*.

#### 4.3.1 *Sample Entropy*

A regularidade da séries da ERA-40 e do INMET foram analisadas aplicando o método *Sample Entropy* exposto na subseção 3.4.1. Os parâmetros foram definidos como em Pincus (1991), com nível de tolerância ( $r = 20\%$ ) e  $m = 2$  para o tamanho dos vetores. Para cada série foram construídos vetores de tamanho dois e, definidas as distâncias entre os elementos do vetor. Em seguida obteve-se a probabilidade de vetores  $m$  e  $m + 1$  pontos similares, com uma tolerância de  $20\% \times$  desvio padrão. Por fim, verificou-se o índice de

padrões similares para as séries de vetores com  $m$  e  $m + 1$  pontos. As análises da *Sample Entropy* foram executadas no *software* R (R Core Team, 2006).

### 4.3.2 *Cross Sample Entropy*

O grau de similaridade entre as séries do INMET e da ERA-40 foi avaliado através da *Cross Sample Entropy*, que está definida na subseção 3.4.2. Os parâmetros foi determinado como  $m = 2$  e  $r = 20\%$ . O algoritmo da *cross-Sample Entropy* investigou quantos vetores do INMET e da ERA-40 ocorrem dentro de um intervalo estatisticamente significativo simultaneamente e, fornece um índice de similaridade entre ambas. As análises da *cross-Sample Entropy* foram processadas em linguagem C.

### 4.3.3 *Inverse Distance Weighting*

O método de interpolação IDW foi utilizado em duas etapas. Primeiro, foi empregado no preenchimento dos dados que tinham no máximo 30% de observações ausente nas estações do INMET. Depois, o IDW foi usado na criação de mapas, corroborando nas análises através da espacialização dos resultados obtidos. Os mapas foram confeccionados no *software* R (R Core Team, 2006).

## 5 Resultados

Na Tabela 3, são apresentadas a análise descritiva e a *Sample Entropy* da velocidade do vento para as estações do INMET selecionadas nas diferentes séries (Completa, 00h, 12h, Diária). Verifica-se que a maior média da velocidade do vento (4,51 m/s) ocorre às 12h, tal desempenho pode estar relacionado ao saldo de radiação que também é maior durante o dia (NASCIMENTO; TUBELIS, 1984). Observa-se também às 12h o maior (2,07) e menor (0,19) valor de *Sample Entropy* dentre todas as séries analisadas. às 00h têm-se a menor média (0,41 m/s) e o maior coeficiente de variação (165,08%), sendo a série diária a que apresenta menor coeficiente de variação (22,93 %) e desvio padrão (0,51). Portanto, o coeficiente de variação neste estudo é classificado de alto (entre 20 % e 30 %) à muito alto (maior que 30 %) por apresentar dispersão alta e muito alta dos dados, respectivamente (DA SILVA et al., 2012). Observa-se que os Id's 3 e 10 que apresentam coeficiente de variação muito alto, têm as menores médias de velocidade do vento para as diferentes séries. Enquanto, Id's com coeficiente de variação alto têm médias maiores de velocidade do vento.

Tabela 3 – Estatística descritiva (média, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e *Sample Entropy* (SEn) para as séries da velocidade do vento no NE do INMET.

Id	INMET															
	Completa				00h				12h				Diária			
	Média	DP	CV (%)	SEn	Média	DP	CV (%)	SEn	Média	DP	CV (%)	SEn	Média	DP	CV (%)	SEn
1	3,36	1,63	48,57	1,37	2,73	1,32	48,44	1,41	3,99	1,67	41,89	1,47	3,36	1,38	40,97	1,38
2	1,27	0,94	73,72	1,64	0,75	0,55	73,20	1,84	1,79	0,96	53,46	1,94	1,27	0,58	45,82	1,32
3	0,92	0,96	103,93	0,28	<b>0,41</b>	0,58	139,23	0,36	1,43	1,00	69,47	<b>0,19</b>	0,92	0,55	59,21	1,64
4	2,86	1,18	41,39	1,61	2,28	0,93	40,77	1,77	3,44	1,13	32,81	1,70	2,86	0,92	32,18	1,85
5	2,13	1,06	49,97	1,75	1,57	0,79	49,98	1,93	2,69	1,01	37,78	1,96	2,13	0,73	34,35	1,93
6	1,50	0,91	60,88	1,67	1,04	0,65	62,49	1,94	1,96	0,91	46,32	1,65	1,50	0,58	38,95	1,89
7	3,00	2,04	67,82	0,77	2,65	1,99	75,22	0,68	3,36	2,02	60,16	0,85	3,00	1,78	59,38	1,74
8	2,49	1,57	63,06	1,76	2,20	1,51	68,96	1,64	2,78	1,57	56,40	1,88	2,49	1,32	53,00	1,67
9	2,18	1,31	60,12	1,91	1,85	1,09	58,87	1,79	2,50	1,42	56,89	2,05	2,18	1,03	47,25	1,44
10	0,70	1,03	147,68	0,39	0,41	0,68	<b>165,08</b>	0,23	0,98	1,23	124,48	0,72	0,70	0,77	109,47	1,75
11	3,81	1,32	34,61	1,79	3,11	1,02	32,82	1,92	<b>4,51</b>	1,21	26,79	2,06	3,81	0,96	25,19	0,61

*Continua na próxima página*

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Id	INMET															
	Completa				00h				12h				Diária			
	Média	DP	CV (%)	SEn	Média	DP	CV (%)	SEn	Média	DP	CV (%)	SEn	Média	DP	CV (%)	SEn
12	2,72	1,34	49,16	1,58	2,12	1,07	50,36	1,59	3,32	1,31	39,45	1,85	2,72	1,07	39,24	1,60
13	1,79	1,18	65,75	1,71	1,34	0,93	69,36	2,00	2,25	1,23	54,46	1,77	1,79	0,83	46,41	0,65
14	3,41	0,95	27,97	1,85	3,28	1,00	30,54	1,81	3,55	0,89	24,97	1,92	3,41	0,84	24,70	1,77
15	1,68	0,93	55,31	1,54	1,29	0,66	51,19	1,77	2,08	0,99	47,77	1,71	1,68	0,66	39,30	1,96
16	2,61	1,37	52,42	1,74	1,87	1,17	62,25	1,74	3,34	1,14	34,05	1,86	2,61	0,98	37,46	1,33
17	3,17	1,27	39,98	1,60	2,65	1,16	43,63	1,58	3,69	1,15	31,29	1,73	3,17	0,98	30,79	1,98
18	1,12	0,97	86,05	0,87	0,78	0,88	112,71	0,65	1,47	0,93	63,25	1,09	1,12	0,72	64,38	1,91
19	2,51	0,93	37,24	2,01	2,27	0,78	34,48	1,95	2,75	1,01	36,69	1,94	2,51	0,73	28,91	1,88
20	1,22	0,66	54,25	2,04	1,18	0,66	55,67	2,00	1,26	0,67	52,74	2,05	1,22	<b>0,51</b>	41,68	1,98
21	3,23	1,13	34,97	1,78	2,76	1,01	36,62	1,75	3,71	1,04	28,11	1,95	3,23	0,89	27,55	1,94
22	3,25	0,92	28,29	1,93	3,12	1,01	32,42	1,81	3,38	0,80	23,58	2,05	3,25	0,76	23,26	1,81
23	3,66	1,75	47,94	1,96	3,23	1,60	49,60	1,95	4,09	1,80	43,90	2,04	3,66	1,42	38,76	2,03
24	3,31	0,96	29,11	1,99	2,99	0,87	29,28	1,97	3,64	0,94	25,80	<b>2,07</b>	3,31	0,76	<b>22,93</b>	1,89
25	1,54	0,87	56,20	1,67	1,16	0,77	66,36	1,43	1,93	0,79	40,60	1,84	1,54	0,64	41,23	1,83
26	3,01	1,19	39,64	1,90	2,62	1,31	49,88	1,87	3,40	0,91	26,86	1,98	3,01	0,98	32,49	0,72
27	2,93	1,49	51,05	1,39	2,63	1,15	43,52	1,47	3,22	1,73	53,64	1,44	2,93	1,27	43,35	1,84
28	1,74	1,01	58,34	1,19	1,26	0,66	52,39	1,53	2,21	1,08	48,78	1,36	1,74	0,78	44,60	1,95
29	2,10	0,82	38,85	1,96	1,93	0,84	43,57	2,00	2,27	0,75	33,16	1,88	2,10	0,64	30,45	1,82

A Tabela 4, expõe a estatística descritiva e *Sample Entropy* para cada uma das grades selecionadas da ERA-40. Observa-se que o Id 11 apresenta a maior média da velocidade do vento (7,93  $m/s$ ) às 00h, porém para o INMET (Tabela 3) este mesmo Id apresenta maior velocidade às 12h. Ocorre também às 00h a menor *Sample Entropy* (1,39) e coeficiente de variação (17,30). No entanto, às 12h o coeficiente de variação (56,42 %) e o desvio padrão (1,81) são maiores. Os registros da ERA-40 superestima ou subestima as informações do INMET, com registros que atingem média de velocidade do vento de até 7  $m/s$ . Por meio do coeficiente de variação percebe-se que os dados estão muitos dispersos, sendo classificados como alto e muito alto. Nota-se que os Id's, 11 e 16, com coeficiente de variação alto também apresentam velocidade do vento alta para as quatro séries e, os Id's com menor velocidade do vento têm o coeficiente de variação muito alto. Os Id's com menor valor de *Sample Entropy* são os que apresentam maior média da velocidade do vento, uma característica importante uma vez que as séries são mais regulares para Id's com médias de velocidade do vento maiores, proporcionando um cenário para

exploração de energia eólica.

Tabela 4 – Estatística descritiva (média, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e *Sample Entropy* (SEn) para as séries da velocidade do vento no NE da ERA-40.

Id	ERA-40															
	Completa				00h				12h				Diária			
	Média	DP	CV (%)	SEn	Média	DP	CV (%)	SEn	Média	DP	CV (%)	SEn	Média	DP	CV (%)	SEn
1	7,32	1,75	23,90	1,58	7,39	1,75	23,68	1,56	7,25	1,75	24,08	1,59	7,32	1,66	22,61	1,87
2	2,83	1,40	49,42	1,44	2,23	0,78	35,01	1,81	3,42	1,61	47,06	1,53	2,83	1,07	37,93	1,47
3	2,37	1,28	54,22	1,42	1,89	0,65	34,14	1,88	2,85	1,56	54,72	1,57	2,37	0,98	41,18	1,55
4	3,63	1,47	40,38	1,58	3,22	1,53	47,34	1,53	4,05	1,28	31,65	1,65	3,63	1,33	36,58	1,51
5	3,62	1,45	39,96	1,55	3,09	1,34	43,45	1,55	4,15	1,35	32,55	1,53	3,62	1,25	34,44	1,99
6	1,88	0,78	41,56	1,93	1,69	0,57	33,45	2,06	2,06	0,91	44,06	2,09	1,88	0,60	32,04	1,67
7	3,15	1,16	36,63	1,86	3,33	1,22	36,69	1,84	2,98	1,05	35,42	1,87	3,15	1,04	32,93	1,95
8	3,10	1,12	36,03	1,89	3,17	1,04	32,78	1,82	3,03	1,19	39,13	1,96	3,10	0,98	31,75	1,53
9	3,18	1,29	40,57	1,81	2,79	1,19	42,60	1,72	3,56	1,27	35,62	1,86	3,18	1,10	34,72	2,08
10	1,89	0,91	48,04	1,70	1,79	0,60	33,55	1,87	2,00	1,13	<b>56,42</b>	1,79	1,89	0,74	39,30	1,40
11	7,62	1,64	21,54	1,76	<b>7,93</b>	1,58	19,86	1,74	7,31	1,65	22,54	1,81	7,62	1,52	19,95	1,63
12	5,86	1,72	29,32	1,65	5,77	1,70	29,51	1,66	5,94	1,73	29,07	1,65	5,86	1,62	27,64	1,51
13	2,86	1,22	42,68	1,69	2,42	0,92	37,98	1,76	3,30	1,32	40,10	1,79	2,86	1,01	35,28	1,78
14	4,15	1,10	26,51	1,72	4,38	1,11	25,35	1,62	3,92	1,04	26,51	1,83	4,15	0,97	23,41	1,66
15	2,14	0,98	45,69	1,76	1,77	0,60	34,09	2,03	2,52	1,13	44,70	1,94	2,14	0,71	33,12	1,85
16	7,35	1,74	23,62	1,63	7,47	1,65	22,14	1,64	7,24	<b>1,81</b>	25,00	1,62	7,35	1,66	22,53	1,56
17	3,57	1,32	36,98	1,58	3,20	1,31	41,07	1,48	3,94	1,22	30,91	1,63	3,57	1,13	31,71	1,64
18	1,68	0,68	40,82	1,93	1,62	0,53	32,90	1,94	1,73	0,80	46,37	2,14	1,68	0,53	31,61	1,56
19	3,04	0,90	29,68	1,88	3,20	0,83	25,88	1,94	2,88	0,95	32,81	1,82	3,04	0,78	25,80	1,87
20	2,59	0,99	38,26	1,84	2,75	1,04	37,69	1,79	2,42	0,91	37,61	1,88	2,59	0,90	34,79	1,89
21	5,19	1,34	25,79	1,53	5,04	1,47	29,27	<b>1,39</b>	5,34	1,17	21,86	1,70	5,19	1,21	23,35	1,59
22	4,21	0,96	22,86	1,89	4,21	0,97	23,05	1,86	4,21	0,95	22,67	1,90	4,21	0,82	19,55	1,76
23	6,19	1,34	21,72	1,91	6,52	1,13	<b>17,30</b>	1,99	5,86	1,46	24,89	1,95	6,19	1,19	19,29	1,83
24	4,43	1,15	25,99	1,83	4,07	0,96	23,62	1,93	4,79	1,21	25,30	1,89	4,43	0,98	22,13	1,77
25	5,97	1,52	25,38	1,85	6,45	1,25	19,35	1,91	5,49	1,61	29,25	1,89	5,97	1,31	21,99	1,83
26	4,23	1,20	28,35	1,70	4,28	1,29	30,11	1,63	4,18	1,10	26,34	1,77	4,23	1,11	26,23	1,80
27	2,49	1,07	42,98	1,79	2,07	0,78	37,54	1,93	2,91	1,16	39,70	1,88	2,49	0,85	34,12	1,82
28	2,94	1,51	51,48	1,49	2,31	1,06	46,09	1,66	3,56	1,63	45,67	1,44	2,94	1,24	42,14	1,85
29	2,90	0,91	31,27	1,95	3,03	0,83	27,49	2,00	2,77	0,96	34,57	1,91	2,90	0,79	27,18	1,85

Com o propósito de examinar o comportamento espacial das bases de dados, foram confeccionados mapas para cada série das médias e *Sample Entropy* da velocidade do vento, e das diferenças entre as médias e *Sample Entropy* da ERA-40 e INMET. Os parâmetros da *Sample Entropy* utilizados foram  $m = 2$  e  $r = 0,2$ , definidos como em Pincus (1991).

Percebe-se que a média da ERA-40 (Figura 8 (a)) é maior que a do INMET (Figura 8 (b)) em todo o NE, com diferença de até  $3,5 \text{ m/s}$  no Norte das quatro sub-regiões (Figura 8(c)), onde também encontram-se as maiores médias de velocidade do vento. A *Sample Entropy* para ERA-40 (Figura 8 (d)) e INMET (Figura 8 (e)) sobre a Zona da Mata, Agreste e Sertão tem padrão semelhante com valores alto em locais onde a média da velocidade do vento são maior, indicando que a velocidade do vento é pouco previsível nestas regiões. Enquanto no Meio Norte

o comportamento entre ambas é distinto, fato que é refletido na diferença da *Sample Entropy* (Figura 8 (f)). Vale ressaltar, que as áreas como o Norte das quatro sub-regiões, que tem maior registro de velocidade do vento apresentam as menores diferenças de *Sample Entropy* (Figura 8 (f)) com desempenho moderado, tal comportamento é interessante, uma vez que, nos estudos sobre a instalação de turbinas eólicas um dos fatores a ser considerado é a regularidade da velocidade do vento.

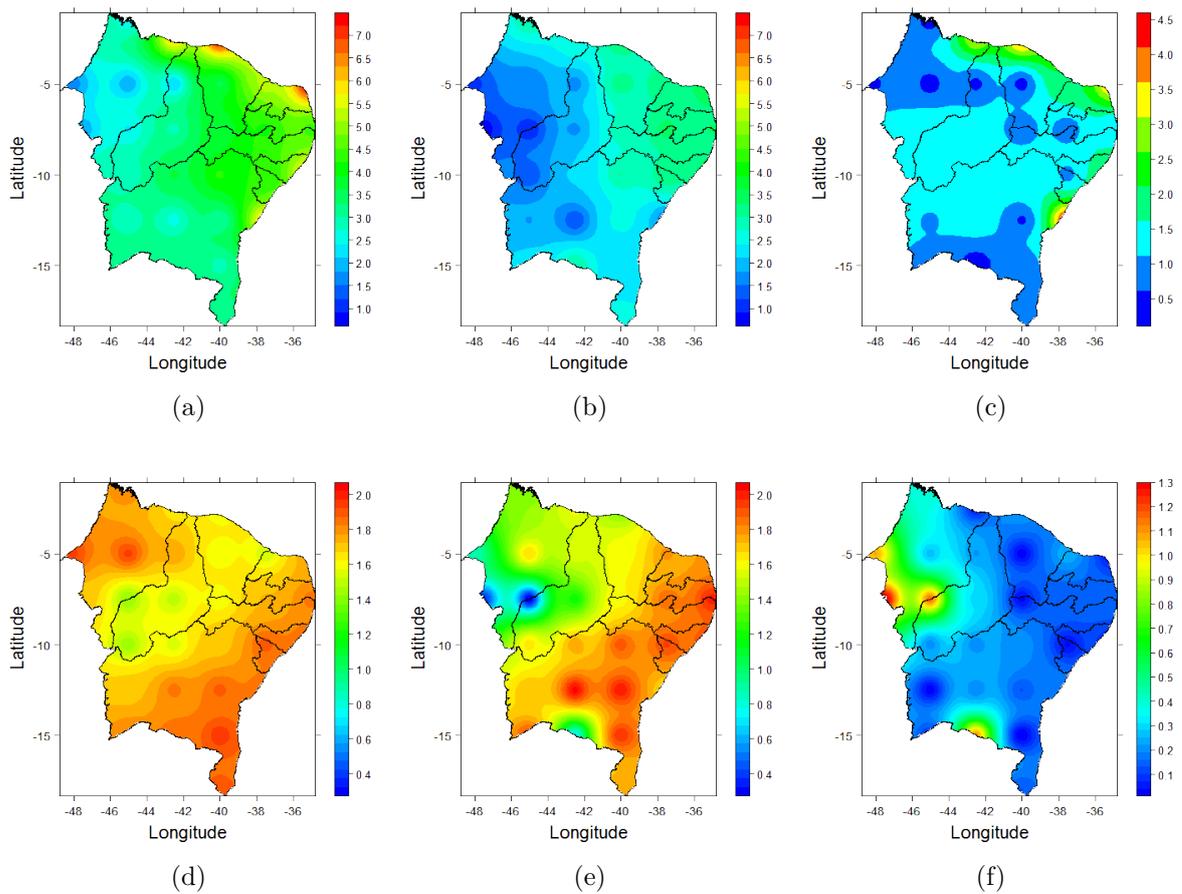


Figura 8 – Média da velocidade do vento para série Completa da ERA-40 (a), INMET (b) e a diferença (c) entre ambas. *Sample Entropy* da ERA-40 (d), INMET (e) e a diferença (f) entre as entropias sobre o NE brasileiro

Na Figura 9, observa-se o comportamento da média e da *Sample Entropy* para a velocidade do vento às 00h. Verifica-se que a média da ERA-40 (Figura 9 (a)) distingui-se dos valores das médias do INMET (Figura 9 (b)), com menor diferença (Figura 9 (c)) nas áreas de menor média de velocidade do vento. Observando a *Sample Entropy* para ERA-40 (Figura 9 (d)) a regularidade é moderada no Sertão entre estado do CE e RN e, as demais localidades apresentam-se mais irregulares. Enquanto para o INMET (Figura 9 (e)) o comportamento no Meio Norte é mais previsível, com ênfase na divisa do Sul do MA e PI, área que também apresenta a maior diferença

(Figura 9 (f)) da regularidade entre as base de dados. Portanto, têm-se que as áreas com menor diferença são também as de maior média da velocidade do vento, logo, são mais previsíveis.

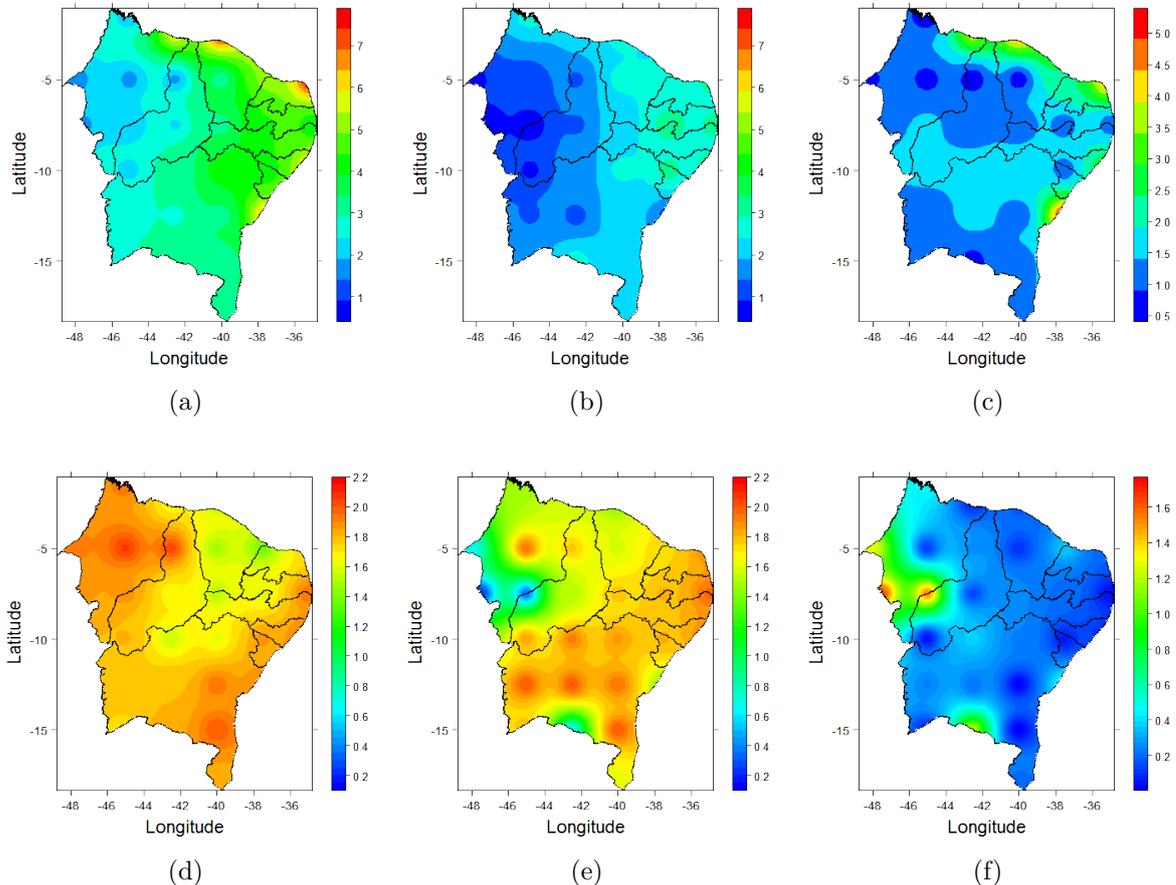


Figura 9 – Média da velocidade do vento às 00h para ERA-40 (a), INMET (b) e a diferença (c) entre ambas. *Sample Entropy* da ERA-40 (d), INMET (e) e a diferença (f) entre as entropias sobre o NE brasileiro

Durante às 12h (Figura 10) a média da velocidade do vento é mais intensa no Norte das quatro sub-regiões tanto para ERA-40 (Figura 10 (a)) quanto para o INMET (Figura 10 (b)). Tal conduta, pode está relacionada as brisas marítimas que contribuem no aumento da intensidade dos ventos sobre NE (VAREJÃO-SILVA, 2006; AMARANTE et al., 2001). A regularidade da série às 12h é similar a das 00h (Figura 9), com menor previsibilidade na maior parte do NE. Contudo, as médias da velocidade do vento são mais regulares para o INMET (Figura 10 (e)). Ressalta-se a maior diferença (Figura 10 (f)) na porção Sul do Meio Norte, onde estão as menores médias da velocidade do vento. De acordo com Lira et al. (2017), essa região dispõe de propriedades propícias para produção de energia eólica. Além de, apresentar melhor regularidade da velocidade do vento como pode ser notado na Figura 10 (e), com maior previsibilidade que as demais regiões.

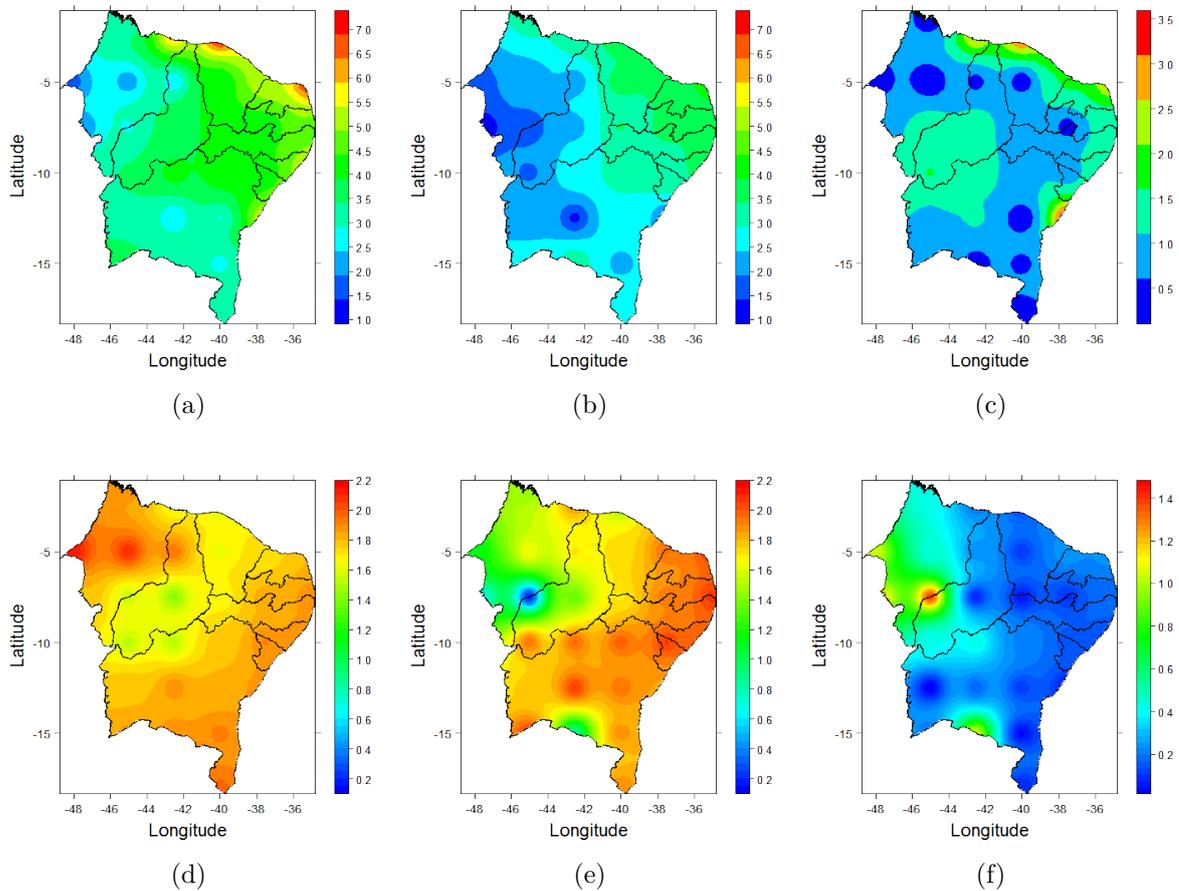


Figura 10 – Média da velocidade do vento às 12h para ERA-40 (a), INMET (b) e a diferença (c) entre ambas. *Sample Entropy* da ERA-40 (d), INMET (e) e a diferença (f) entre as entropias sobre o NE brasileiro

A Figura 11, apresenta as médias e *Sample Entropy* diárias da velocidade do vento no NE. Logo, percebe-se que as bases de dados tem diferença (Figura 11 (c)) nos registros sendo as médias da ERA-40 (Figura 11 (a)) superior as do INMET (Figura 11 (b)). Todavia, o comportamento são similares com menores médias da velocidade do vento no Meio Norte e maiores no Litoral das sub-regiões. Esse desempenho está relacionado as características local, estando a área Leste favorecida pela proximidade do oceano Atlântico e com poucas barreiras, as quais tem maior incidência quando os ventos avançam no sentido Oeste (AMARANTE et al., 2001). Ao verificar a *Sample Entropy* das respectivas médias nota-se que a Zona da Mata, Agreste e Sertão detêm maior valor de *Sample Entropy* tanto para ERA-40 (Figura 11 (d)) quanto para INMET (Figura 11 (e)). Porém, na porção Sul do Meio Norte e uma pequena parte na BA (região com um dos maiores complexo eólico da América Latina, o Alto Sertão I (RENOVAENERGIA, 2017)) há desempenho distintos entre ambas, como pode ser identificado na Figura 11 (f), que representa as diferenças entre as entropias diárias. Comportamento semelhante são observados no Meio Norte entre o Sul do MA e PI como encontrado por Carneiro e Carvalho (2015), Silva et

al. (2002). Observando a *Sample Entropy* da ERA-40 (Figura 11 (d)) na área Central e o Norte do Sertão o desempenho é moderado, estas áreas apresentam também médias da velocidade do vento superior a  $3.5 \text{ m/s}$  a uma altura de  $10 \text{ m}$ , particularidade importante, uma vez que quanto mais alto maior será a velocidade do vento (CARVALHO et al., 2012).

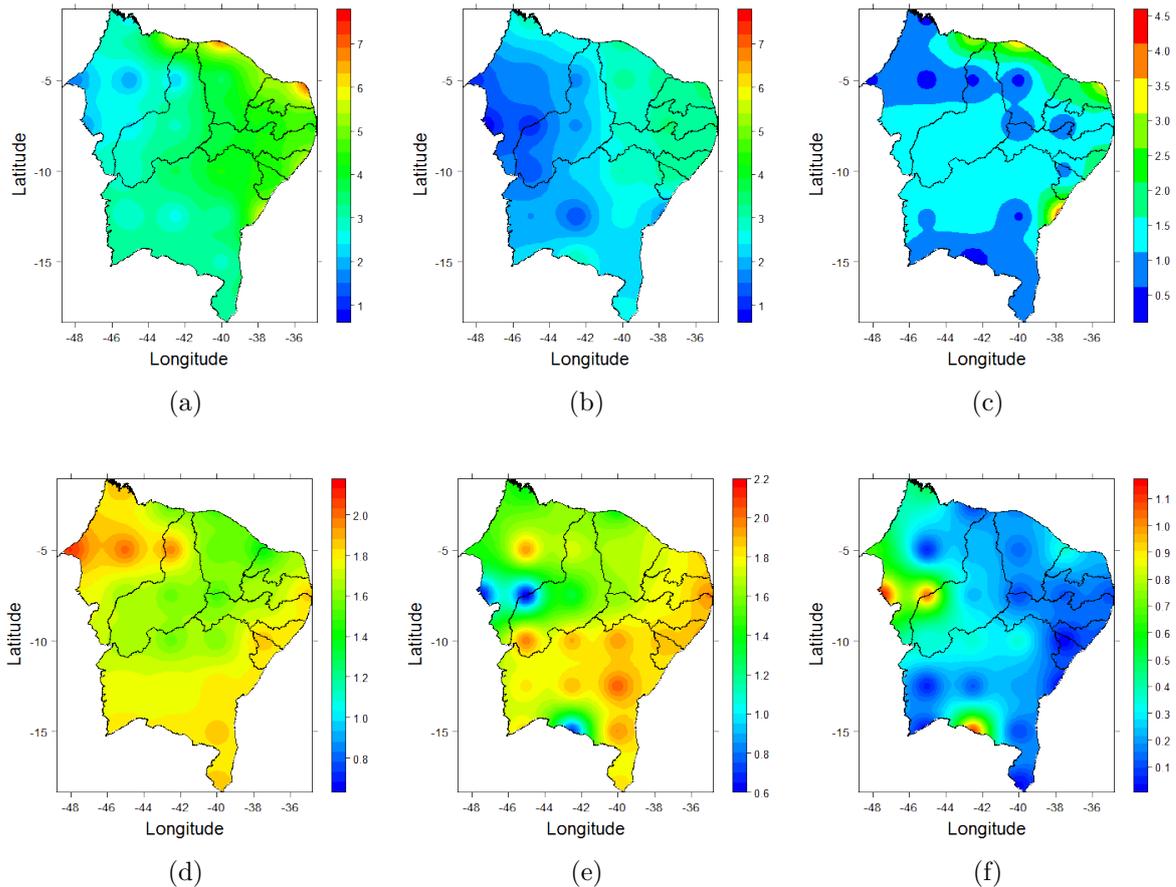


Figura 11 – Média diária da velocidade do vento, ERA-40 (a), INMET (b) e a diferença (c) entre ambas. *Sample Entropy* da ERA-40 (d), INMET (e) e a diferença (f) entre as entropias sobre o NE brasileiro

Analisando o coeficiente de variação (CV) da velocidade do vento da ERA-40 (Figura 12 (a), (b), (c), (d)) e do INMET (Figura 12 (e), (f), (g), (h)) para séries completa (Figura 12, (a), (e)), 00h (Figura 12 (b), (f)), 12h (Figura 12 (c), (g)) e diária (Figura 12 (d), (h)) a variabilidade da velocidade do vento é maior no Oeste do NE abrangendo as sub-regiões do Meio Norte e parte do Sertão para as diferentes base de dados. Observando que a escala altera de acordo com a série que está sendo analisada. Percebe-se também que para diferentes séries do INMET (Figura 12 (e), (f), (g) e (h)) há maior variabilidade principalmente no Meio Norte, área de menor registro de média da velocidade do vento com CV em torno de 140%, portanto, o coeficiente de variação é muito alto (DA SILVA et al., 2012).

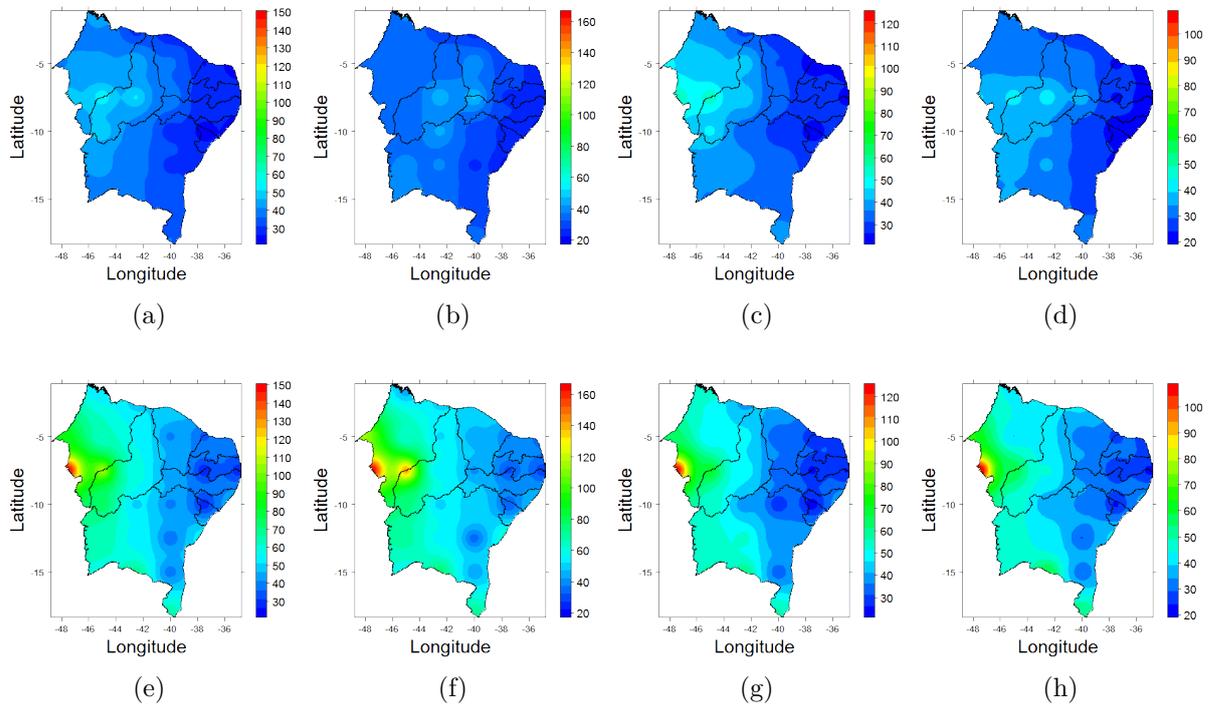


Figura 12 – Espacialização do coeficiente de variação da ERA-40 ((a), (b), (c), (d)) e do INMET ((e), (f), (g), (h)) para séries completa ((a), (e)), 00h ((b), (f)), 12h ((c), (g)) e diária((d), (h)) sobre o NE brasileiro

Por meio da estatística *cross-Sample Entropy* foi verificada a similaridades entre as séries de velocidade do vento do INMET e da reanálise ERA-40. Os valores atribuídos aos parâmetros foram  $m = 2$  e  $r = 0.2$ , definidos como em Pincus (1991). A Figura 13, representa a *cross-Sample Entropy* da ERA-40 com relação as estações convencionais do INMET. Observa-se que para a série completa (Figura 13 (a)), a similaridade é moderada no Meio Norte, com valores da *cross-Sample Entropy* entre 1.4 e 1.85, com ênfase na divisa do Sul do MA com o PI. Essa característica também pode ser observada durante às 00h (Figura 13(b)). Às 12h (Figura 13(c)), as séries já não possuem muitas semelhanças indicando assim que os dados da ERA-40 podem estar superestimando ou subestimando as observações do INMET. Desempenho semelhante foi encontrado com dados de reanálise na Rio Grande do Sul (STÜKER et al., 2016). Embora, Schmidt, Cancelli e Junior (2016), ao analisar dados de estações automáticas do INMET, da reanálise ECMWF e NCAR, identificou que os dados da ECMWF reproduzem melhor os dados quando comparado ao NCAR, ressalta-se portanto, que foi necessário inserir um fator calibração nas médias da velocidade do vento do ECMWF para que tal resultado fosse obtido.

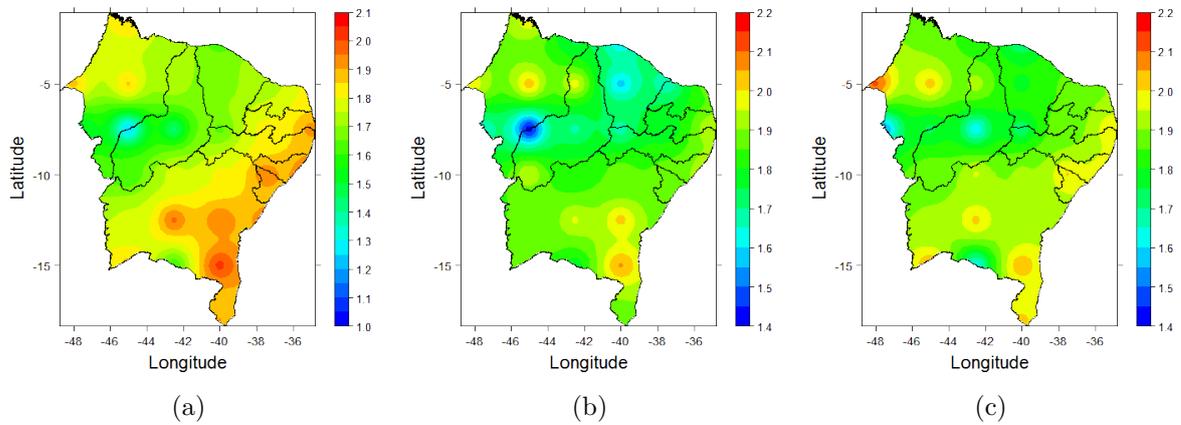


Figura 13 – *Cross Sample Entropy* para série da velocidade do vento horária no NE brasileiro. Série completa (a), 00h (b) e 12h (c)

A Figura 14 indica que a ERA-40 superestima ou subestima os registros do INMET por meio das séries temporais da velocidade do vento que apresentam o menor e maior valor de *cross-Sample Entropy* para série Completa (Figura 14 (a), (b)), às 00h (Figura 14 (c)), (d) e às 12h (Figura 14 (e), (f)). A Figura 14 corrobora para os resultados obtidos na Figura 13, por meio da visualização do comportamento das séries é possível notar que para o menor valor de *cross-Sample Entropy*, as observações do INMET e da ERA-40 têm desempenho similares (Figura 14 (a), (c), (e)). Enquanto para o maior valor da *cross-Sample Entropy* as séries tem performance diferente (Figura 14 (b), (d), (f)). Durante às 12h (Figura 14), as diferenças são mais evidentes tanto para o valor mínimo (Figura 14 (e)), quanto para o valor máximo (Figura 14 (f)), sendo que nesse horário os registros apresentam maior velocidade do vento.

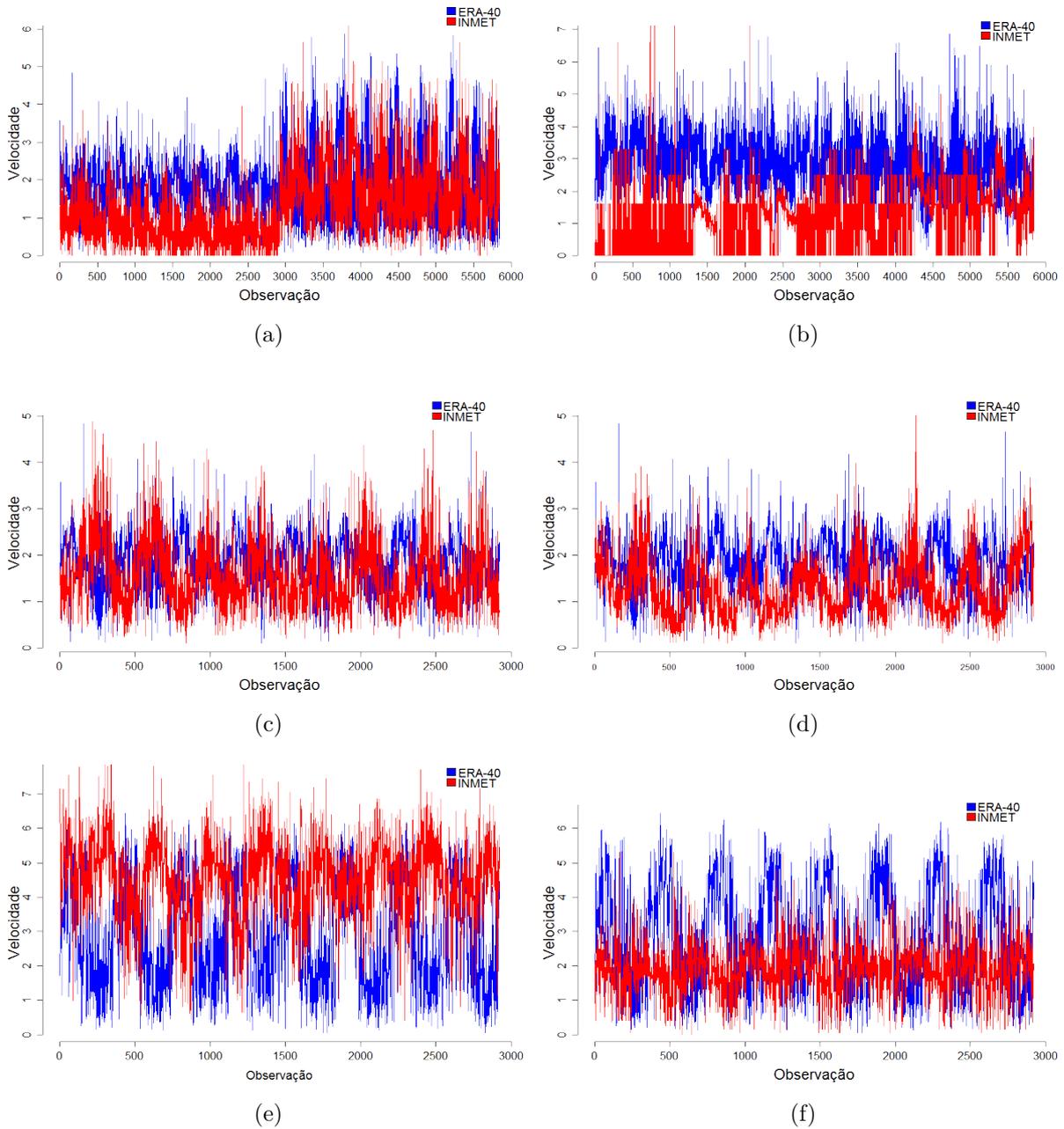


Figura 14 – Séries temporais da velocidade do vento para as séries Completa (a, b), 00h (c, d) e 12h (e, f), que obtiveram o valor mínimo (a, c, e) e máximo (b, d, f) na *Cross Sample Entropy*

A estatística *cross-Sample Entropy* da série diária (Figura 15) apresenta maior similaridade para estações localizadas no Norte do Sertão, estado do CE, centro do PI e em uma pequena porção da BA. Enquanto no centro Meio Norte, na Zona da Mata, no Sul do Agreste e Sertão a similaridade apresentam-se menor entre as os registros da ERA-40 e do INMET, sinalizando que nessas regiões há maior índices de super ou subestimação da velocidade do vento entre ambas.

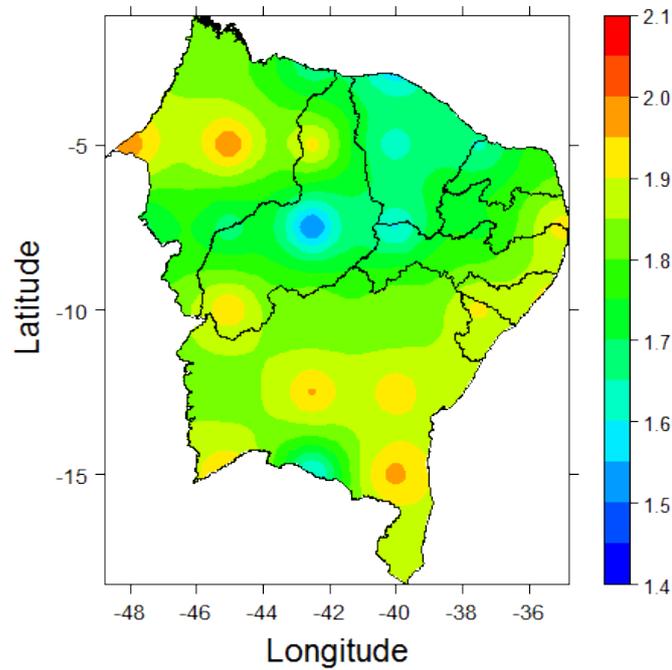


Figura 15 – *Cross Sample Entropy* para série diária da velocidade do vento no NE brasileiro

Na Figura 16, nota-se o comportamento das séries temporais da velocidade do vento que atingiram o valor mínimo (Figura 16(a)) e o máximo (Figura 16(b)) na estatística da *cross-Sample Entropy* diária, ratificando o desempenho obtido na Figura 15, onde a ERA-40 superestima ou subestima os registro do INMET. Denotando que as séries das bases de dados do INMET e da ERA-40 apresentam maior similaridade quando atinge menor valor de *cross-Sample Entropy*.

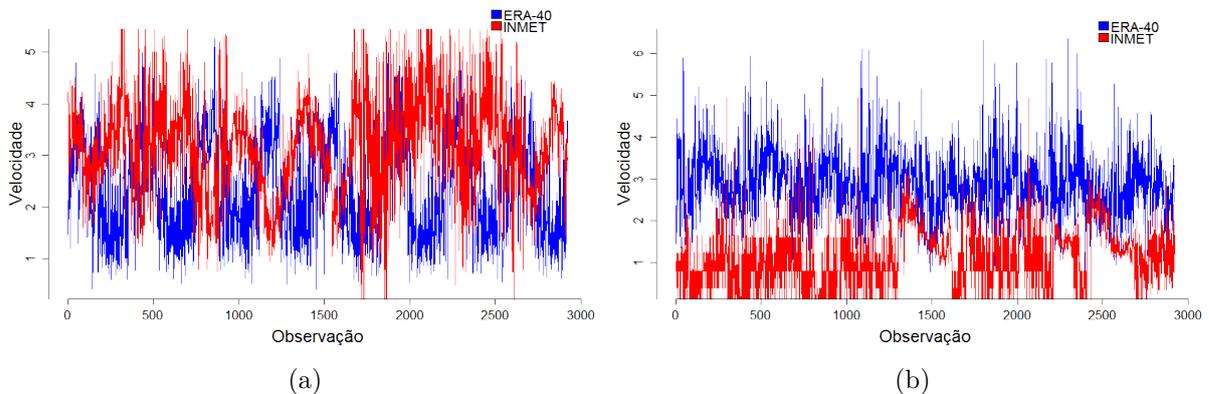


Figura 16 – Séries temporais diária da velocidade do vento que apresentaram o valor mínimo (a) e máximo (b) na *Cross Sample Entropy* no NE brasileiro

A análise da *Sample Entropy* e *cross-Sample Entropy* para dados mensais e anuais não são viáveis, pois o tamanho das amostras nestas escalas são menores que 200 podendo divergir nas

previsões (YENTES et al., 2013; CHEN; SOLOMON; CHON, 2006; RICHMAN; MOORMAN, 2000).

A seguir são apresentados os resultados da análise com o intuito de investigar o comportamento das 72 células da grade da base de dados da ERA-40 no NE, po meio da análise espacial das médias e *Sample Entropy*. Na Figura 17, observa-se a grade da ERA-40 sobre a região NE do Brasil e os identificadores atribuídos a cada célula, representados por números ordinais que varia do 1 ao 72, auxiliando no estudo.

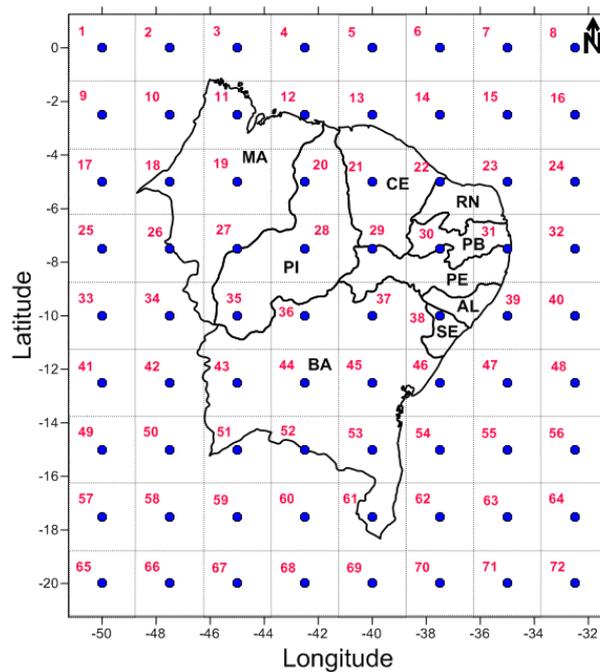


Figura 17 – Grade da ERA-40 sobre a região NE do Brasil e os respectivos identificadores.

Para obter a *Sample Entropy* foram construídas séries a partir da série da velocidade do vento a cada seis horas a qual é dominada de série original. A série diária foi obtida através da média das quatro observações em cada dia. A série mensal é representada pela média em cada mês. Enquanto a série sazonal é a média para cada estação do ano em cada ano.

Na Tabela 5, observa-se os valores da *Sample Entropy* para as séries original, horária, diária e mensal com parâmetros  $m = 2$  e  $r = 0,2$ , e sazonal com  $r = 0,4$ , pois para valores de  $r$  inferiores há coordenadas que não conseguem identificar padrões similares. Observa-se, que o menor e maior valor da *Sample Entropy* encontra-se na série sazonal, 0,759 e 2,686, respectivamente. Na maioria dos Id, a *Sample Entropy* aumenta no dia e diminui a noite, do mesmo modo, a velocidade do vento aumenta durante o dia e diminui durante a noite. A *Sample Entropy* das séries podem também ser afetada pela topografia da região, podendo gerar mais irregularidade.

Tabela 5 – *Sample Entropy* para séries da velocidade do vento da ERA-40 no NE do Brasil.

Id	Long	Lat	<i>Sample Entropy</i>							
			$m = 2, r = 0.2$							$m = 2, r = 0.4$
			Original	00h	06h	12h	18h	Diária	Mensal	Sazonal
1	-50	0	1,588	1,614	1,700	1,938	1,745	1,665	1,690	1,514
2	-47,5	0	1,796	1,740	1,812	1,824	1,826	1,666	1,854	1,316
3	-45	0	1,779	1,750	1,804	1,781	1,800	1,642	1,825	1,642
4	-42,5	0	1,718	1,728	1,729	1,699	1,738	1,565	1,694	1,409
5	-40	0	1,692	1,702	1,709	1,672	1,702	1,529	1,634	1,409
6	-37,5	0	1,693	1,700	1,706	1,675	1,707	1,534	1,600	1,133
7	-35	0	1,715	1,724	1,725	1,698	1,725	1,566	1,636	1,649
8	-32,5	0	1,731	1,729	1,746	1,726	1,742	1,582	1,601	1,214
9	-50	-2,5	1,755	1,619	1,690	2,010	1,994	1,825	1,576	1,123
10	-47,5	-2,5	1,712	1,633	1,757	1,934	1,947	1,776	1,545	1,400
11	-45	-2,5	1,666	1,591	1,761	1,822	1,803	1,644	1,561	1,367
12	-42,5	-2,5	1,530	1,524	1,571	1,533	1,514	1,357	1,491	1,053
13	-40	-2,5	1,488	1,459	1,437	1,462	1,590	1,282	1,347	1,174
14	-37,5	-2,5	1,535	1,521	1,518	1,543	1,577	1,344	1,390	1,157
15	-35	-2,5	1,591	1,579	1,591	1,583	1,619	1,411	1,377	1,210
16	-32,5	-2,5	1,629	1,605	1,625	1,640	1,654	1,446	1,475	1,306
17	-50	-5	1,855	1,828	1,925	2,065	1,968	1,909	1,582	0,971
18	-47,5	-5	1,831	1,893	1,896	2,025	1,945	1,889	1,456	1,072
19	-45	-5	1,872	2,008	1,892	1,971	1,919	1,813	1,455	0,902
20	-42,5	-5	1,729	1,914	1,778	1,880	1,909	1,769	1,483	1,099
21	-40	-5	1,569	1,466	1,495	1,612	1,721	1,451	1,332	1,917
22	-37,5	-5	1,474	1,347	1,587	1,624	1,605	1,358	1,335	1,548
23	-35	-5	1,680	1,658	1,640	1,726	1,724	1,512	1,642	1,504
24	-32,5	-5	1,719	1,709	1,705	1,739	1,743	1,547	1,589	1,066
25	-50	-7,5	1,777	1,797	1,907	1,996	1,894	1,817	1,655	1,386
26	-47,5	-7,5	1,684	1,809	1,801	1,747	1,906	1,666	1,361	1,331
27	-45	-7,5	1,534	1,780	1,521	1,529	1,835	1,480	1,348	1,273
28	-42,5	-7,5	1,505	1,594	1,318	1,481	1,729	1,341	1,325	1,887
29	-40	-7,5	1,585	1,567	1,486	1,631	1,687	1,447	1,633	<b>2,686</b>
30	-37,5	-7,5	1,681	1,564	1,635	1,802	1,768	1,567	1,718	1,440

*Continua na próxima página*

Tabela 5 – Continuação da página anterior

Id	Long	Lat	<i>Sample Entropy</i>							
			$m = 2, r = 0.2$							$m = 2, r = 0.4$
			Original	00h	06h	12h	18h	Diária	Mensal	Sazonal
31	-35	-7,5	1,651	1,848	1,852	1,875	1,814	1,731	1,777	1,485
32	-32,5	-7,5	1,840	1,855	1,845	1,843	1,853	1,688	1,779	2,128
33	-50	-10	1,746	1,716	1,823	1,915	1,922	1,784	1,681	1,099
34	-47,5	-10	1,678	1,855	1,738	1,639	1,953	1,629	1,485	2,079
35	-45	-10	1,584	1,643	1,492	1,574	1,900	1,574	1,625	1,658
36	-42,5	-10	1,593	1,523	1,504	1,520	1,762	1,481	1,634	1,735
37	-40	-10	1,656	1,563	1,711	1,738	1,671	1,508	1,662	1,665
38	-37,5	-10	1,643	1,680	1,887	1,894	1,780	1,764	1,837	1,386
39	-35	-10	1,884	1,924	1,924	1,911	1,920	1,786	1,841	1,492
40	-32,5	-10	1,847	1,862	1,860	1,855	1,858	1,706	1,869	1,584
41	-50	-12,5	1,712	1,722	1,711	1,828	1,954	1,720	1,873	1,005
42	-47,5	-12,5	1,659	1,755	1,640	1,745	1,947	1,644	1,821	1,299
43	-45	-12,5	1,764	1,661	1,684	1,833	1,958	1,711	1,797	1,153
44	-42,5	-12,5	1,818	1,736	1,794	1,895	1,847	1,680	1,958	1,124
45	-40	-12,5	1,768	1,808	1,799	1,891	1,833	1,759	1,926	1,749
46	-37,5	-12,5	1,850	1,899	1,887	1,902	1,873	1,764	1,912	1,792
47	-35	-12,5	1,876	1,894	1,895	1,878	1,890	1,747	1,863	1,665
48	-32,5	-12,5	1,816	1,819	1,842	1,817	1,826	1,668	1,964	0,951
49	-50	-15	1,858	1,894	1,814	1,921	2,000	1,790	1,973	1,232
50	-47,5	-15	1,865	1,884	1,787	1,944	1,997	1,782	2,017	1,367
51	-45	-15	1,843	1,707	1,754	1,885	1,983	1,746	1,951	1,322
52	-42,5	-15	1,826	1,802	1,758	1,841	1,905	1,744	1,917	1,540
53	-40	-15	1,778	1,864	1,743	1,937	1,905	1,776	1,878	1,115
54	-37,5	-15	1,876	1,871	1,899	1,906	1,874	1,767	2,051	1,452
55	-35	-15	1,858	1,850	1,879	1,873	1,863	1,728	1,915	1,473
56	-32,5	-15	1,794	1,784	1,811	1,807	1,807	1,649	2,053	1,153
57	-50	-17,5	1,828	1,835	1,759	2,014	2,059	1,860	1,983	1,718
58	-47,5	-17,5	1,752	1,738	1,688	1,984	2,015	1,782	1,920	1,262
59	-45	-17,5	1,867	1,769	1,759	1,992	2,036	1,791	1,837	<b>0,759</b>
60	-42,5	-17,5	1,892	1,888	1,839	1,966	1,993	1,802	1,882	1,281
61	-40	-17,5	1,790	1,789	1,635	1,989	1,905	1,747	1,897	1,114

Continua na próxima página

Tabela 5 – Continuação da página anterior

Id	Long	Lat	<i>Sample Entropy</i>							
			$m = 2, r = 0.2$							$m = 2, r = 0.4$
			Original	00h	06h	12h	18h	Diária	Mensal	Sazonal
62	-37,5	-17,5	1,888	1,863	1,905	1,917	1,893	1,780	1,909	1,447
63	-35	-17,5	1,873	1,850	1,889	1,886	1,887	1,752	2,084	1,099
64	-32,5	-17,5	1,819	1,803	1,817	1,832	1,842	1,684	2,238	1,076
65	-50	-20	1,735	1,719	1,683	2,000	2,050	1,843	1,968	1,812
66	-47,5	-20	1,820	1,812	1,718	2,019	2,054	1,834	1,935	1,285
67	-45	-20	1,869	1,837	1,778	2,058	2,051	1,868	2,060	1,638
68	-42,5	-20	1,964	1,905	1,943	2,095	2,074	1,938	1,992	0,947
69	-40	-20	1,925	1,891	1,942	2,014	1,896	1,873	1,906	1,564
70	-37,5	-20	1,906	1,874	1,903	1,929	1,939	1,812	2,027	1,404
71	-35	-20	1,889	1,859	1,896	1,889	1,919	1,781	2,078	1,285
72	-32,5	-20	1,860	1,841	1,857	1,855	1,892	2,043	2,043	1,363

A região NE tem sua localização geográfica favorecida pela ação de sistemas e fenômenos que influenciam na velocidade do vento. Na Figura 18, nota-se que a média da velocidade do vento (Figura 18 (a)) varia entre 2 e 7m/s e *Sample Entropy* (Figura 18 (b)) entre 1 e 2, durante às 00h. Percebe-se que as áreas com maior média de velocidade do vento estão sobre as sub-regiões do Sertão e Zona da Mata. Enquanto a *Sample Entropy* apresenta menor valor ao longo do Norte das quatro sub-regiões e, no Centro do Sertão. Essas regiões revelam características que favorecem a produção de energia eólica tanto do ponto de vista da média, quanto de regularidade da velocidade do vento, pois embora ocorra um padrão nas médias da velocidade do vento, a *Sample Entropy* indica os locais que tem melhor regularidade. Destacando, a divisa entre o estado do CE e RN na sub-região do Sertão, área atualmente com turbinas eólicas em funcionamento. Estas condições são importantes em estudos relacionado ao comportamento do vento, uma vez que os registros da velocidade do vento podem tornar-se previsíveis nestes locais às 00h.

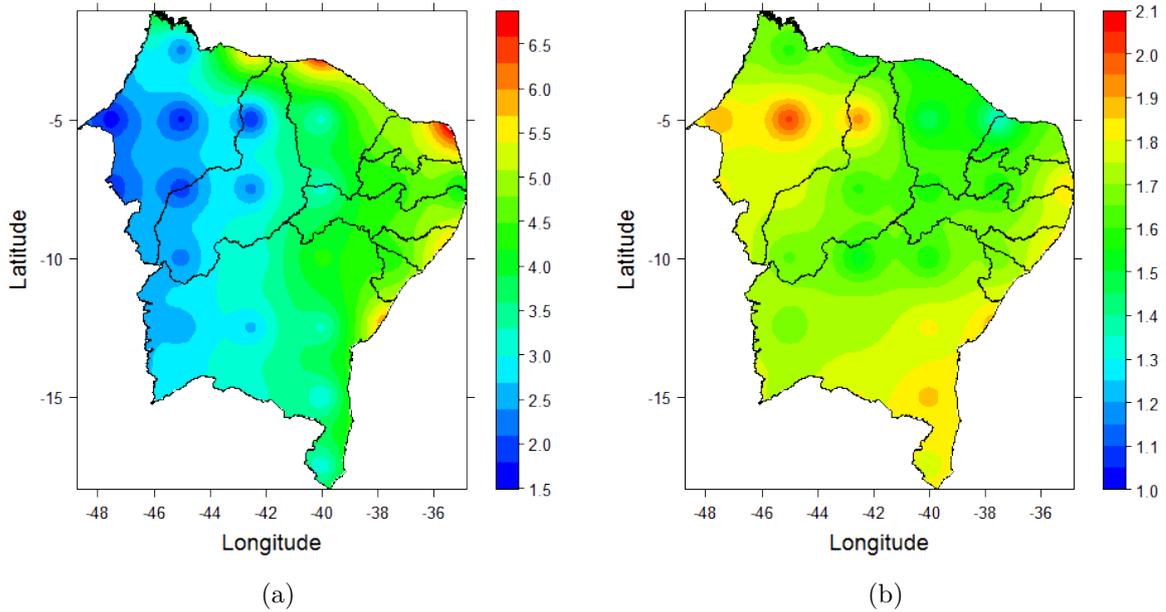


Figura 18 – Média (a) e *Sample Entropy* (b) para série da velocidade do vento às 00h da ERA-40 no NE brasileiro.

Na Figura 19, observa-se a média (Figura 19 (a)) e a *Sample Entropy* (Figura 19 (b)) para série da velocidade do vento durante às 06h. A média (Figura 19 (a)) neste horário tem domínio de valores variando até 3 m/s na parte Oeste e Sul do NE, enquanto os valores de *Sample Entropy* (Figura 19 (b)) prevalecem em torno de 1,7 no Sertão e em parte do Meio Norte. Enfatizando o valor da *Sample Entropy* no centro do PI, uma área que embora tenha média menor, apresenta velocidade do vento mais previsível às 06h. No Oeste do NE, sobre as sub-regiões da Sertão, Agreste e Zona da Mata a velocidade do vento aumenta, mas a *Sample Entropy* aponta regularidade moderada no Norte das quatro sub-regiões e, maior irregularidade na Zona da Mata, Agreste e Sul do Sertão. Portanto, os extremos do RN e CE onde a velocidade do vento atinge 6,5 m/s são locais mais previsíveis.

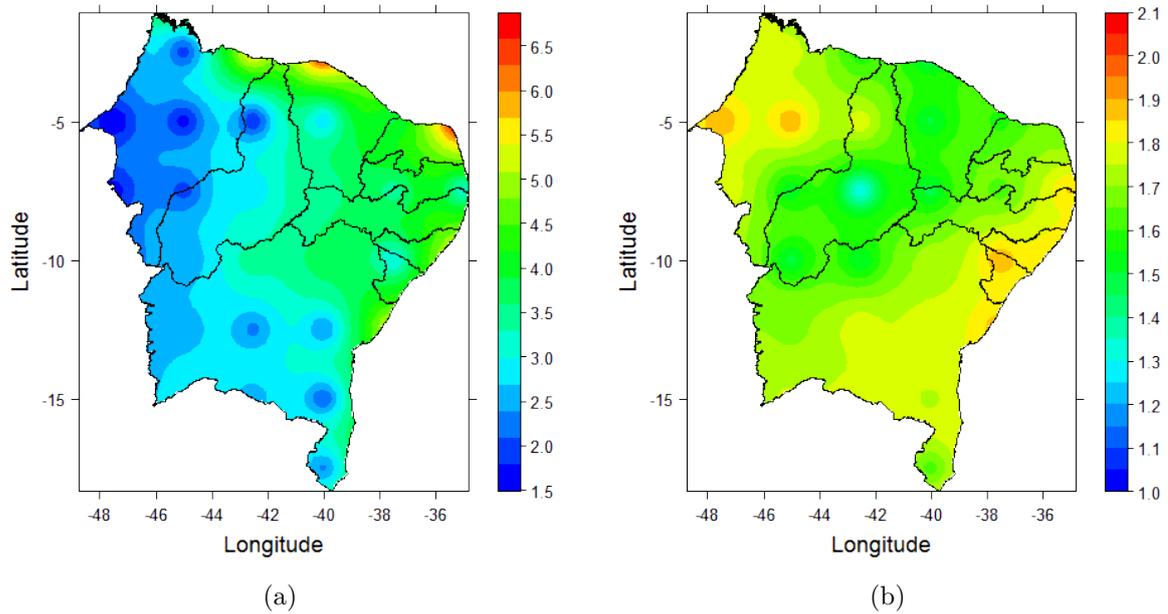


Figura 19 – Média (a) e *Sample Entropy* (b) para série da velocidade do vento às 06h da ERA-40 no NE brasileiro.

A Figura 20 (a) indica que a média da velocidade do vento às 12h predomina entre 4 e 5  $m/s$  na maior parte do NE. A Figura 20 (b) apresenta registros maior de *Sample Entropy*, configurando menor previsibilidade da velocidade do vento nas sub-regiões da Zona da Mata e Agreste, e em parte do Sertão e do Meio Norte. Mas no Sertão, as regiões do CE e RN tem registros da média de velocidade do vento entre 6 e 6,5  $m/s$  e apresentam valor de *Sample Entropy* moderado, logo, a velocidade do vento no nestes locais são mais regulares no período das 12h. A área com *Sample Entropy* moderado abrange os estado do PI e CE, que apresentam média da velocidade do vento diferente nos extremo onde fazem fronteira com o oceano Atlântico e, média similar no centro. Mesmo com as diferenças nas médias velocidade do vento a previsibilidade neste locais são regulares.

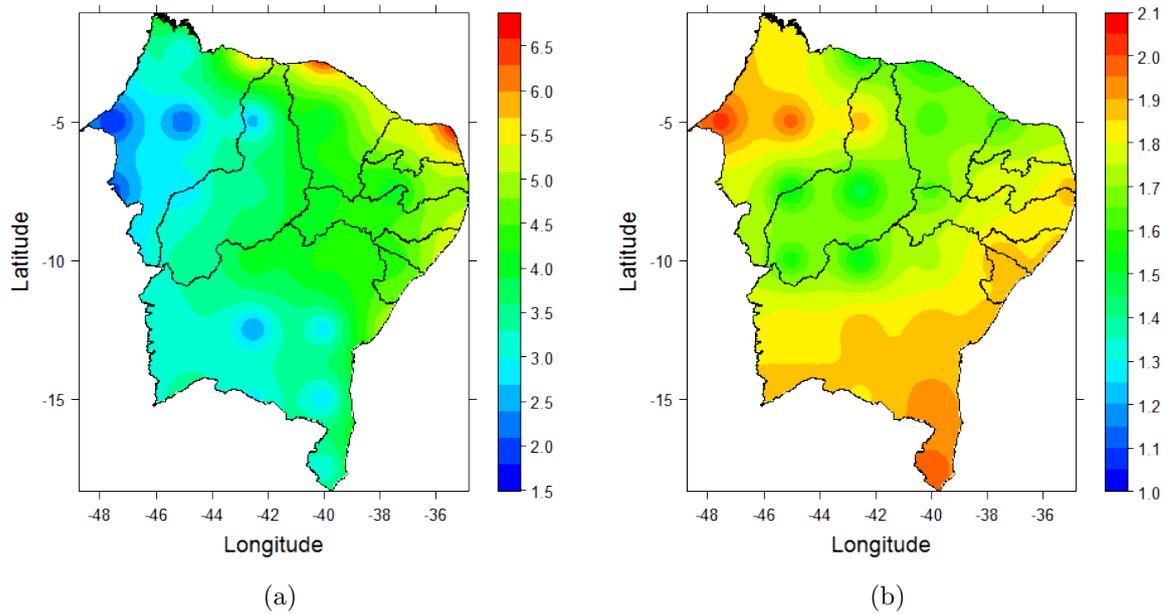


Figura 20 – Média (a) e *Sample Entropy* (b) para série da velocidade do vento às 12h da ERA-40 no NE brasileiro.

A Figura 21 representa a média (Figura 21 (a)) e a (*Sample Entropy* Figura 21 (b)) da velocidade do vento às 18h. Percebe-se que o desempenho da média da velocidade do vento é maior principalmente na Zona da Mata (Figura 21 (a)). Porém, a *Sample Entropy* (Figura 21 (b)) apresenta valor alto por todas as sub-regiões, sendo que a velocidade do vento é pouco previsível nestas áreas durante às 18h. No Norte do Sertão a *Sample Entropy* é moderada, portanto, a velocidade do vento com registros entre 5 m/s tem comportamento regular e são mais previsíveis nestas áreas.

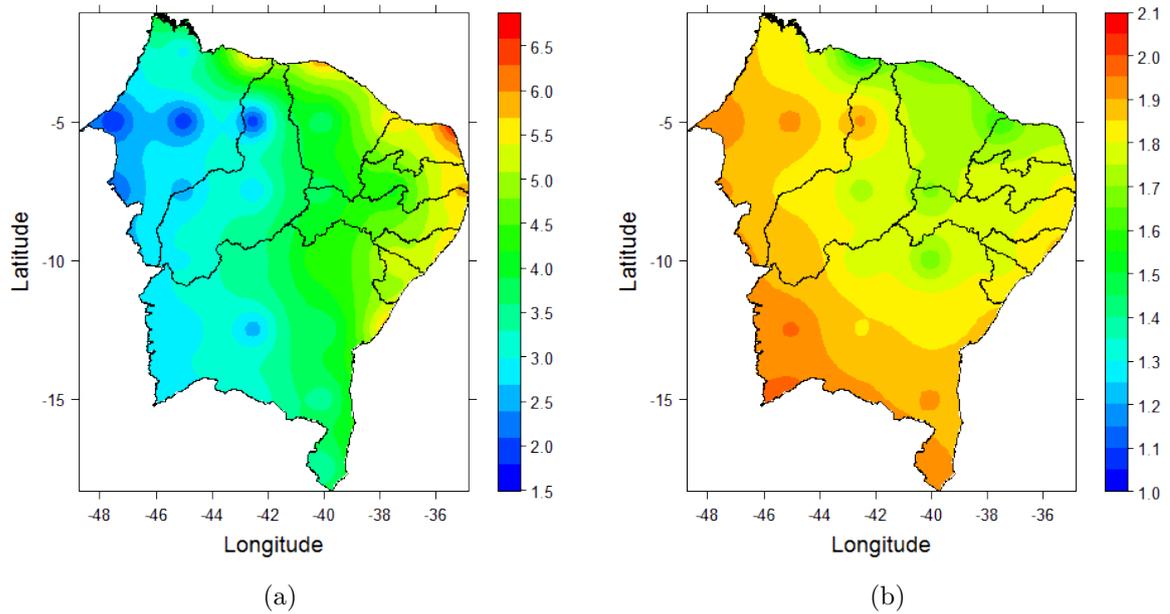


Figura 21 – Média (a) e *Sample Entropy* (b) para série da velocidade do vento às 18h da ERA-40 no NE brasileiro.

Na Figura 22 têm-se a espacialização da média (Figura 22 (a)) e *Sample Entropy* (Figura 22 (b)) para série Completa. Percebe-se um limiar no centro do NE, indicando menor média de velocidade do vento (2 e 3  $m/s$ ) nas regiões concentrada ao Oeste e média maior (4 e 6  $m/s$ ) no Leste do NE. Enquanto a *Sample Entropy* tem maior valor no Sul e menor no Norte. Mas os valores menores da *Sample Entropy* varia entre 1,65 e 1,90, não sendo a velocidade do vento muito previsível. No Sertão, sobre os estado do CE e PI a *Sample Entropy* é moderada, nota-se que essa região tem comportamento similar ao das 12h (Figura 20), com a velocidade do vento maior e mais previsível.

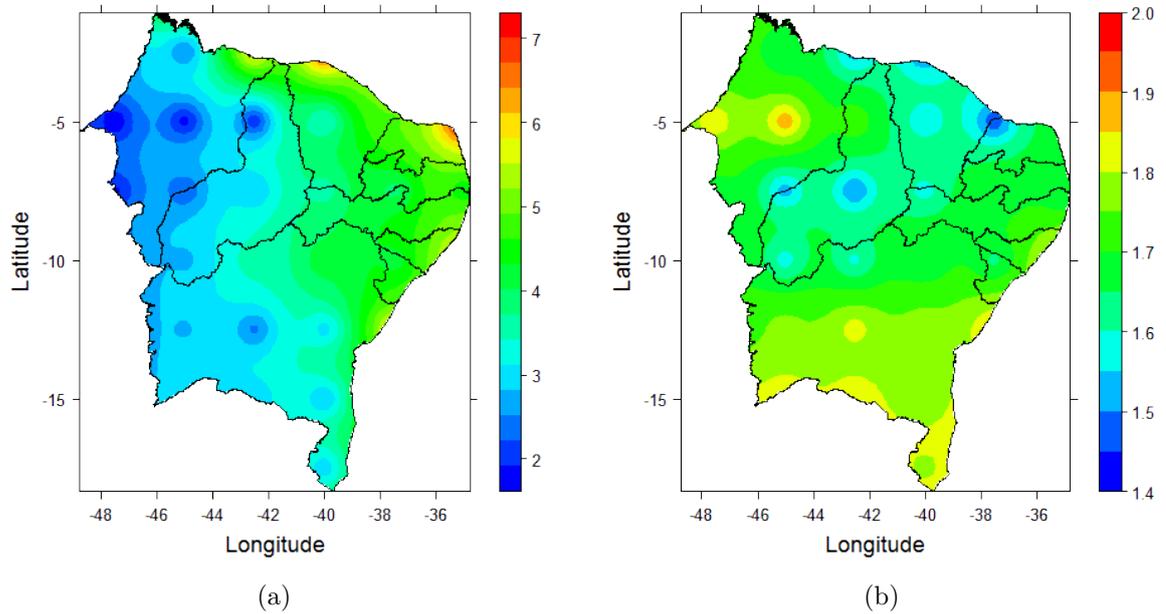


Figura 22 – Média (a) e *Sample Entropy* (b) para série Completa da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro.

A média diária (Figura 23 (a)) sobre o NE brasileiro encontra-se entre (2 e 6  $m/s$ ), sendo o Norte das sub-regiões da Zona da Mata, Agreste e Sertão as áreas de maior intensidade. Estas regiões também apresentam menor valor de *Sample Entropy*, com performance que são pertinentes a previsão da velocidade no vento. No Centro do Meio Norte concentra-se os maiores valores de *Sample Entropy*, mas a velocidade do vento nesta região é menor. Comportamento semelhante é observado no Sul da Zona da Mata e do Agreste. No Centro do PI, área limite entre as sub-regiões do Sertão e Meio Norte, nota-se a *Sample Entropy* moderada, indicando regularidade para essas regiões que apresentam menor média da velocidade do vento.

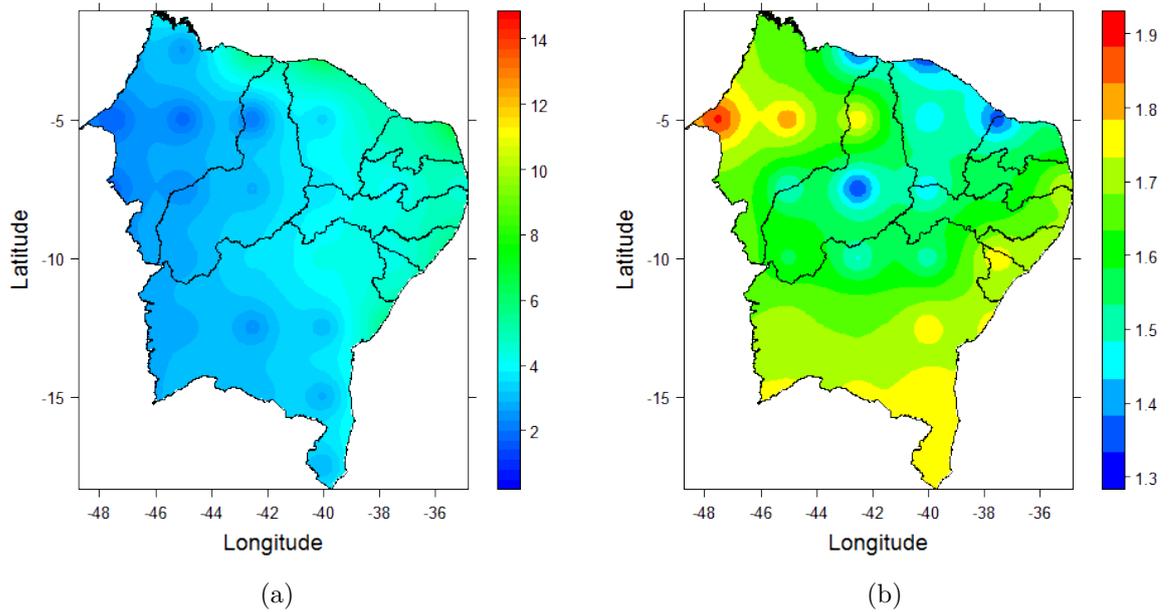


Figura 23 – Média (a) e *Sample Entropy* (b) para série Diária da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro.

A avaliação mensal da média (Figura 24 (a)) da velocidade do vento demonstra o domínio de velocidade entre 2 e 4  $m/s$ , como brisas leves e suaves de acordo com a escala de *Beaufort*. Sendo o Norte da sub-regiões e Leste da Zona da Mata locais de maior velocidade do vento (6  $m/s$ ), número 4 de *Beaufort* (brisas fracas). A Figura 24 (b), apresenta-se com desempenho moderado da *Sample Entropy* no Norte do Sertão e por todo Meio Norte, tornando a velocidade do vento mais previsível nestes locais. Além de, indicar que diferentes regiões com média de velocidade do vento diferente tem regularidade semelhante.

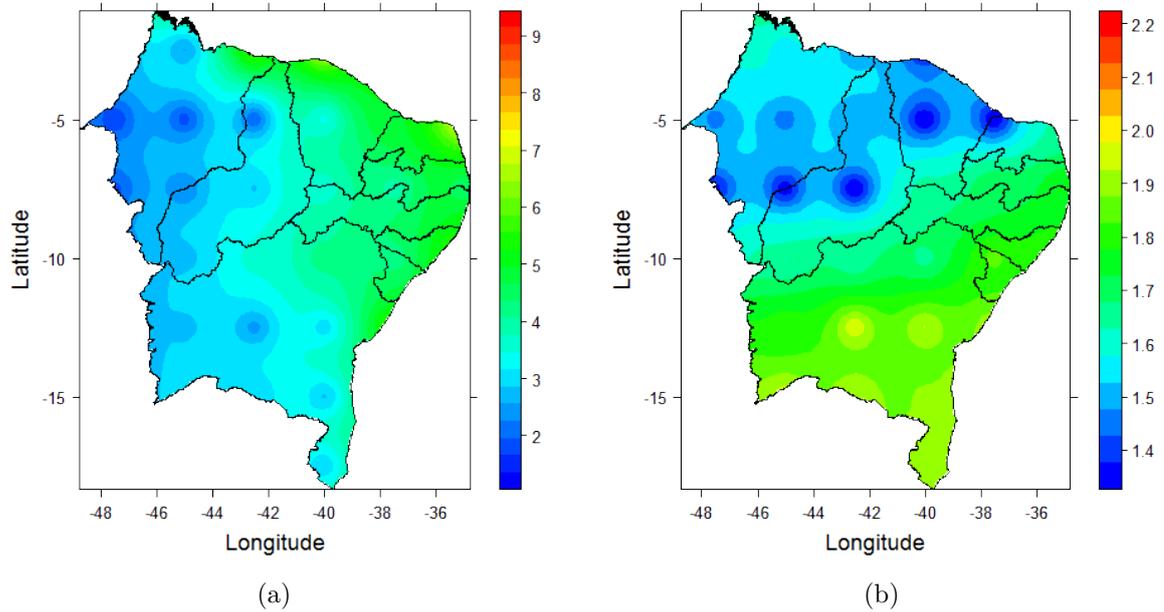


Figura 24 – Média (a) e *Sample Entropy* (b) para série Mensal da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro.

Na Figura 25, são analisadas as médias de velocidade do vento por mês, obtidas por meio da média por hora para cada mês. Observa-se que o padrão de velocidade do vento mantém-se menor a Oeste, enquanto os maiores registros estão concentrados a Leste. Percebe-se também que à medida que os meses passam de janeiro à maio (Figura 25 (a) - (e)) a velocidade do vento aumenta e, entre os meses de junho à dezembro (Figura 25 (f) - (l)) o comportamento é oposto, com menor velocidade do vento. Nos meses de março (Figura 25 (c)), abril (Figura 25 (d)), maio (Figura 25 (e)) e junho (Figura 25 (f)), ocorrem os maiores registros de velocidade do vento. De acordo com Witzler et al. (2016), Amarante et al. (2001) o comportamento da velocidade do vento é oposto a vazão do Rio São Francisco, que apresenta menor disponibilidade hídrica durante o período de maior velocidade do vento.

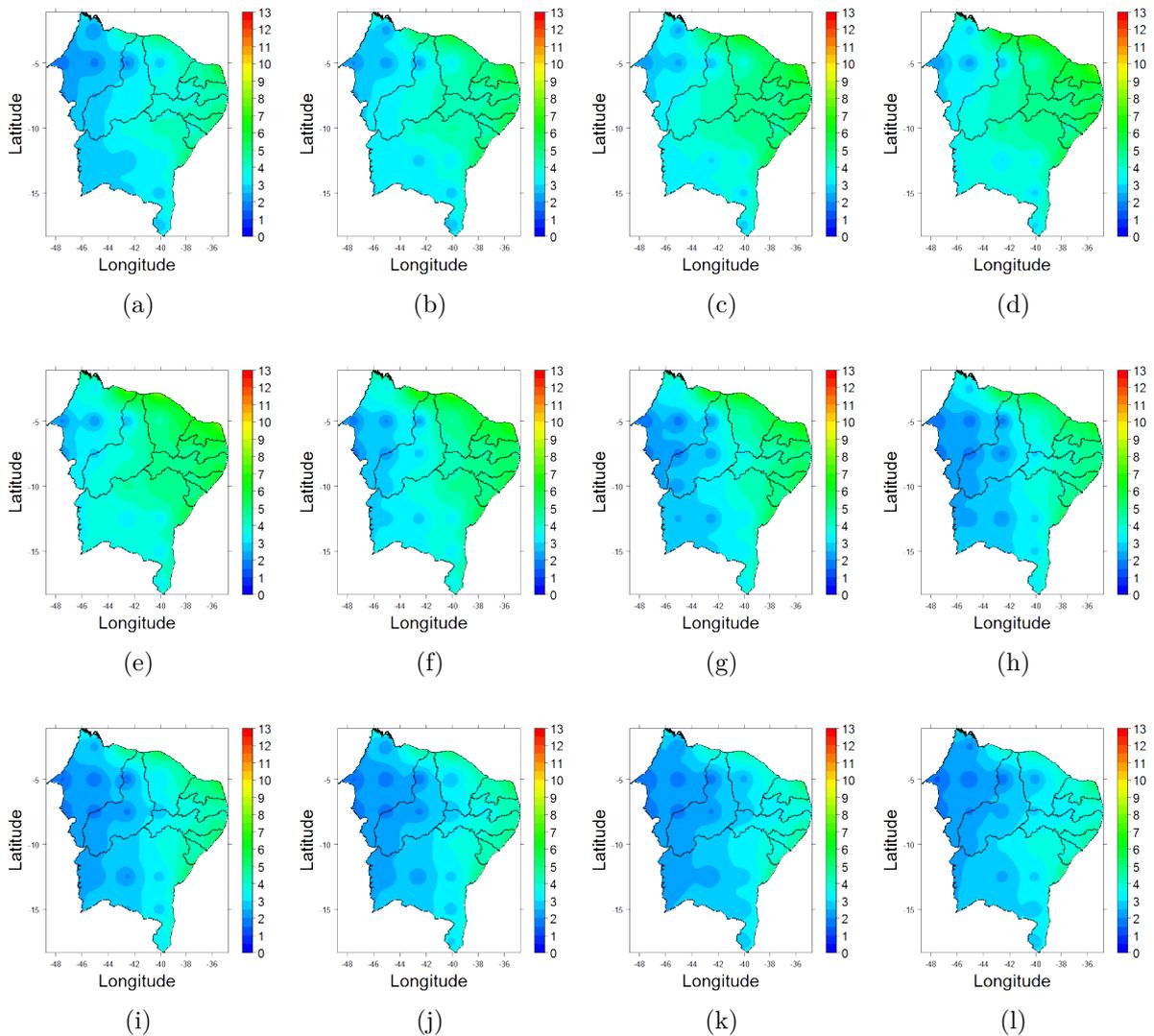


Figura 25 – Média para série mensal por hora da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro. (a) Janeiro, (b) Fevereiro, (c) Março, (d) Abril, (e) Maio, (f) Junho, (g) Julho, (h) Agosto, (i) Setembro, (j) Outubro, (k) Novembro, (l) Dezembro

A *Sample Entropy* por mês é apresentada na Figura 26. Os meses tem valores alto de *Sample Entropy* por quase todo o NE. Sendo que no Sertão nos meses de junho (Figura 26 (f)), agosto (Figura 26 (h)), outubro (Figura 26 (j)) e dezembro (Figura 26 (l)) a *Sample Entropy* é ainda maior, portanto, durante esses meses a irregularidade é maior, com previsibilidade moderada para séries da velocidade do vento. Nos meses de março (Figura 26 (c)) e abril (Figura 26 (d)) a *Sample Entropy*, embora alta, é menos intensa, durante esses meses as média da velocidade são alta no Sertão, Agreste e Zona da Mata, enquanto no Meio Norte os registros são menores. Mas, mesmo com velocidade do vento diferente a irregularidade da séries tem comportamento similar, desta forma, a previsibilidade não é bem representada em ambas localidades.

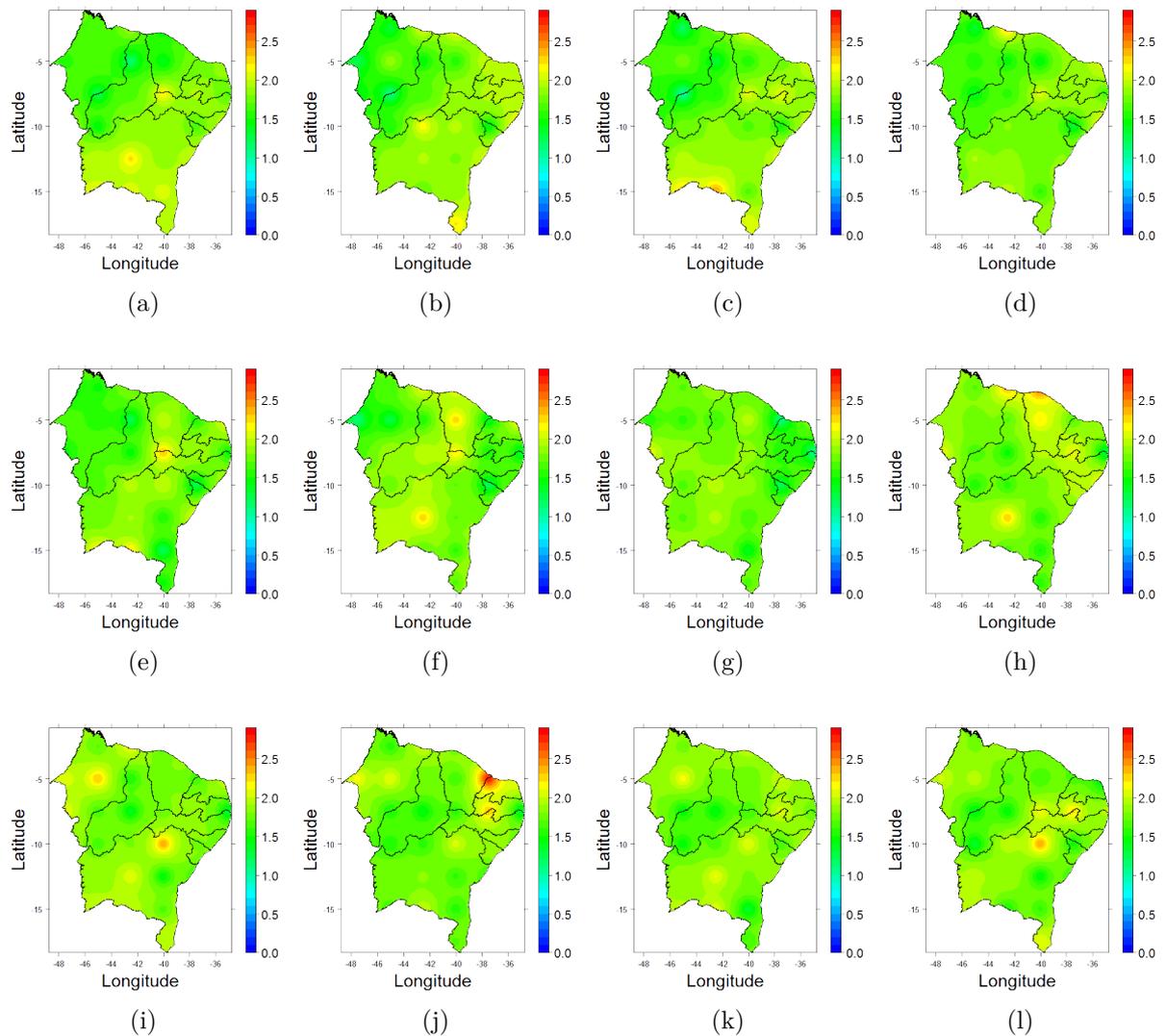


Figura 26 – *Sample Entropy* para série mensal por hora da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro. (a) Janeiro, (b) Fevereiro, (c) Março, (d) Abril, (e) Maio, (f) Junho, (g) Julho, (h) Agosto, (i) Setembro, (j) Outubro, (k) Novembro, (l) Dezembro

O comportamento da média sazonal (Figura 27 (a)) é semelhante ao Mensal (Figura 24 (a)) com velocidade do vento maior sobre o Norte das quatro sub-regiões e centro do Agreste e Zona da Mata, sendo as demais áreas dominadas por baixa velocidade do vento. Porém, a *Sample Entropy* (Figura 27 (b)) tem menor valor em locais específicos sobre o Sertão. Na divisa do CE e RN a *Sample Entropy* tem desempenho moderado, esta região também apresenta o melhor índice de velocidade do vento, portanto, essas características são ideais para implantação de turbinas eólicas, uma vez que a previsibilidade da velocidade do vento é maior em locais onde as médias são maiores. Enquanto, no centro do Meio Norte a média é menor e a *Sample Entropy* é maior, apresentando maior irregularidade para séries da velocidade do vento.

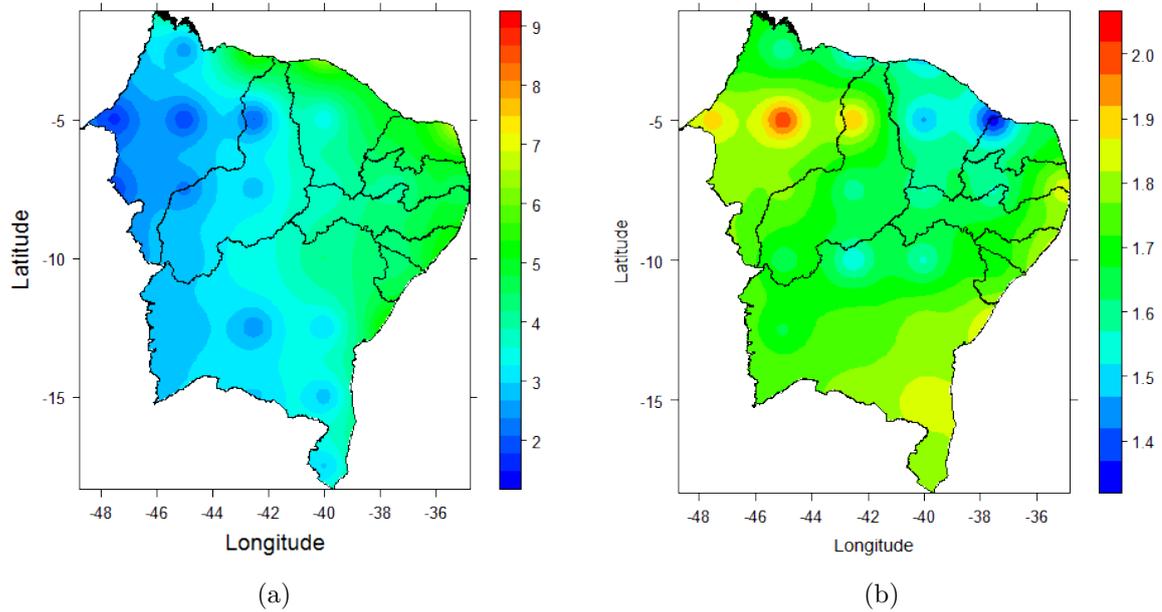


Figura 27 – Média (a) e *Sample Entropy* (b) para série Sazonal da velocidade do vento da ERA-40 no NE brasileiro.

Na Figura 28, observa-se a média ((a), (b), (c), (d)) e *Sample Entropy* ((e), (f), (g), (h)) da velocidade do vento por estação do ano. O outono (Figura 28 (g)), é a estação que concentra maior registro de velocidade do vento sobre o Norte do Meio Norte e no Centro e Norte das sub-regiões da Zona da Mata, Agreste e Sertão. Mas, os valores da *Sample Entropy* são elevados indicando baixa previsibilidade da velocidade do vento. Embora, as médias sejam semelhantes nestas áreas a regularidade varia, indicando por exemplo, que no CE a velocidade do vento é menos previsível que na PB e PE. No inverno (Figura 28 (h)), a média da velocidade do vento varia em torno de 8 m/s e a *Sample Entropy* nestes locais é moderada. No verão (Figura 28 (f)), a *Sample Entropy* é mais irregular e as médias da velocidade do vento são menos previsíveis. Nota-se, na divisa dos estados de PE e PB na Zona da Mata, durante as quatro estações que a *Sample Entropy* é moderada, sendo também essa região dominada por média velocidade do vento maior que 4 m/s, contribuindo em projetos que visam a o uso do vento como uma fonte alternativa, limpa e renovável de energia elétrica.

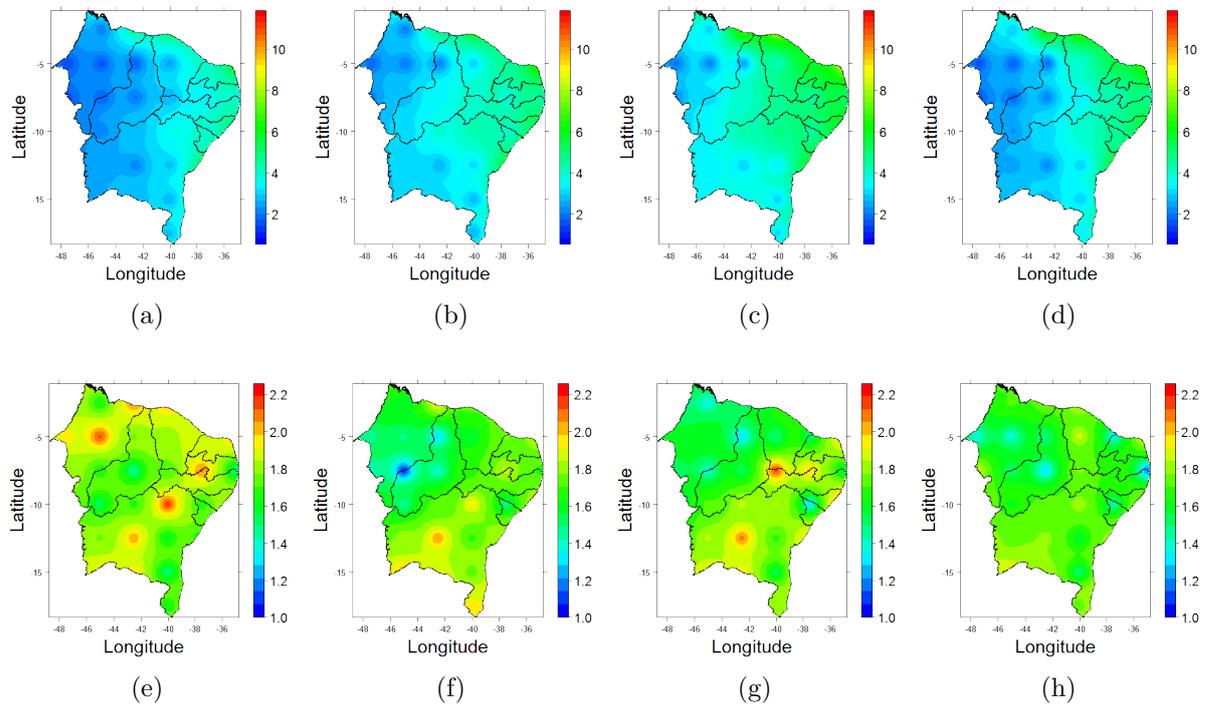


Figura 28 – Média e *Sample Entropy* da velocidade do vento da ERA-40 para as estações do ano no NE brasileiro. Média ((a) Primavera, (b) Verão, (c) Outono, (d) Inverno). *Sample Entropy* ((e) Primavera, (f) Verão, (g) Outono, (h) Inverno)

## 6 Considerações Finais

Foi analisada a regularidade espaço temporal da variabilidade da velocidade do vento na região do Nordeste brasileiro utilizando a base de dados da ERA-40 e do INMET. Aplicou-se o método *Sample Entropy* e *cross-Sample Entropy* para as séries Completa/Total, 00h, 12h e Diária. Os resultados mostraram que para todas as séries os valores da *Sample Entropy* e da média foram maior para ERA-40 do que para o INMET, sendo que no Sul do Meio Norte em todas as escalas a *Sample Entropy* apresenta regularidade moderada, com ênfase para o INMET, embora, as médias da velocidade do vento nesta sub-região sejam menor. Por meio da *Sample Entropy* também foi possível observar que, locais com menor média da velocidade do vento tem maior previsibilidade. Quanto as diferenças, o Norte das quatro sub-regiões do NE detém a maior diferença nas médias para as quatro séries, enquanto a *Sample Entropy* tem menor diferença nesta localidade. Desta forma, a velocidade do vento apresenta regularidade moderada nas áreas com maior diferença na média da velocidade do vento e, portanto, são mais previsíveis quando comparada as demais áreas.

A comparação entre os dados da ERA-40 e do INMET através da *cross-Sample Entropy* apontam que as bases de dados são pouco similares em grande parte do NE principalmente para as séries Total/Completa e Diária. Desta forma, observa-se uma superestimação ou subestimação nos dados da ERA-40 com relação as observações das estações convencionais do INMET. Contudo, como os dados analisados estão a 10m do solo, o desempenho das estações da ERA-40 e do INMET com relação a velocidade do vento mínima necessária para explorar o potencial eólica da região, alcança no Norte do NE velocidade entre 7 e 8m/s, que de acordo com o Atlas de Energia Eólica é o mínimo desejado para sistemas eólicos de grande porte à uma altura 50 metros.

Foram também analisados os dados da ERA-40 baseado na *Sample Entropy* e na média, considerando todas as 72 células da grade disposta sobre o NE para as quatro horas sinóticas e, para a séries original, diária, mensal e sazonal. Pode-se observar que a velocidade do vento aumenta quando a hora aumenta, sendo a escala Diária a que apresenta maior intervalo para os valores da média da velocidade do vento. A *Sample Entropy* identificou que as áreas de maior média de velocidade do vento apresentam maior previsibilidade e, que locais com mesmo padrão na média da velocidade do vento apresentam regularidades distintas, essas característica são condições importantes em estudos que visam a implantação de torres eólicas, uma vez que a regularidade da velocidade vento pode interferir no desempenho das turbinas.

Como trabalho futuro, pode ser utilizado as diferenças obtidas entre as médias do INMET e ERA-40 como um possível fator de calibração e, verificar o comportamento das mesmas. Realizar a análise de agrupamento das 72 células da grade da ERA-40 com o propósito de identificar o regime do vento. Além de, utilizar diferentes medidas de entropia.

## Referências Bibliográficas

- ABEEÓLICA. **Associação Brasileira de Energia Eólica**. 2017. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>>.
- ALENCAR, L. P. de; SEDIYAMA, G. C.; WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no Norte de Minas Gerais. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 19, p. 437–449, 2011.
- AMARANTE, O. A.; BROWER, M.; ZACK, J.; EOLICA, C. S. E.; SOLUTIONS, T. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. [s.n.], 2001. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=&cid=1>>.
- ANEEL, A. N. d. E. E. **Atlas de energial elétrica do Brasil**. [s.n.], 2005. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia\\_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)>.
- BAKKALI, S.; AMRANI, M. About the use of spatial interpolation methods to denoising Moroccan resistivity data phosphate “disturbances” map. **Acta Montanistica Slovaca**, v. 13, n. 2, p. 216–222, 2008.
- BANDT, C.; POMPE, B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series. **Physical review letters**, APS, v. 88, n. 17, p. 174102, 2002.
- BORGES, E. P. Irreversibilidade, desordem e incerteza: três visões da generalização do conceito de entropia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 21, n. 4, p. 453–463, 1999.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D. **Principles of geographical information systems**. [S.l.]: Oxford University Press, 2001.
- CARNEIRO, T. C.; CARVALHO, P. C. M. de. Caracterização de potencial eólico: estudo de caso para Maracanaú (CE), Petrolina (PE) e Parnaíba (PI). **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 6, n. 1, 2015.
- CARVALHO, I. V. de; MESQUITA, A. L.; SANTOS, P. G. de L.; SANTOS, J. S. dos. Densidade de potencial eólico nas diferentes regiões do estado do ceará–litoral, serra, sertão. **REVISTA GEONORTE**, v. 3, n. 9, p. 1317–1327, 2012.
- CHEN, X.; SOLOMON, I. C.; CHON, K. H. Comparison of the use of approximate entropy and sample entropy: applications to neural respiratory signal. p. 4212–4215, 2006.
- CHOU, C.-M. Complexity analysis of rainfall and runoff time series based on sample entropy in different temporal scales. **Stochastic environmental research and risk assessment**, Springer, v. 28, n. 6, p. 1401–1408, 2014.
- COSTA, M.; GOLDBERGER, A. L.; PENG, C.-K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series. **Physical review letters**, APS, v. 89, n. 6, p. 068102, 2002.
- CPTEC. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. 2017. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/noticias/imprimir/22551>>.

DA SILVA, V. d. P. R.; PEREIRA, E. R. R.; DE SOUSA, F. D. A. S.; ALMEIDA, R. S. R. Estudo da variabilidade anual e intra anual da precipitação da região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 27, n. 2, 2012.

DE ARAUJO, A. J.; STOSIC, T.; STOSIC, B.; DEZOTTI, C. H. Correlações de longo alcance em séries temporais de velocidade do vento no Nordeste. **Sigmae**, v. 2, n. 3, p. 81–84, 2015.

DE CALBETE, N. O.; GAN, M.; SATYAAMURY, P. Vórtices ciclônicos da alta troposfera que atuam sobre a região Nordeste do Brasil. **Climanálise: Edição especial 10 anos**, INPE/CPTEC: São José dos Campos, Brasil, 1996.

DE OLIVEIRA, S. M.; STOSIC, T.; STOSIC, B. D. Long-term correlations in hourly wind speed records in Pernambuco, Brazil. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 391, n. 4, p. 1546–1552, 2012.

DO NASCIMENTO, C. H.; LUCIO, P. S.; GOMES, O. M.; JUNIOR, J. B. V. L. Predição de velocidade do vento em regiões do Nordeste brasileiro através de regressão linear e não linear para fins de geração eólica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 3, p. 927–939, 2016.

ECMWF. **European Centre for Medium-Range Weather Forecasts**. 2017. Disponível em: <<https://www.ecmwf.int/>>.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. da S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

GRUBB, M. Systems, and regional strategies. **Renewable energy: sources for fuels and electricity**, Island Press, 1993.

GWEC, G. W. P. C. **Global Wind Energy Outlook**. [S.l.]: Brussels, 2017.

HARPER, B. R.; KATZ, R. W.; HARRISS, R. C. Statistical methods for quantifying the effect of the El Niño southern oscillation on wind power in the Northern great plains of the United States. **Wind Engineering**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 31, n. 3, p. 123–137, 2007.

HENLEY, S. **Nonparametric geostatistics**. [S.l.]: Elsevier Applied Science, 1981.

HU, Z.; SHI, P. Interregional functional connectivity via pattern synchrony. In: **Control, Automation, Robotics and Vision. ICARCV'06. 9th International Conference on**. [S.l.]: IEEE, 2006. p. 1–6.

HUANG, F.; XIA, Z.; ZHANG, N.; ZHANG, Y.; LI, J. Flow-complexity analysis of the upper reaches of the Yangtze river, China. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 16, n. 11, p. 914–919, 2011.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal>>.

JAHANGIRI, M.; GHADERI, R.; HAGHANI, A.; NEMATOLLAHI, O. Finding the best locations for establishment of solar-wind power stations in middle-east using gis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 66, p. 38–52, 2016.

- KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, Taylor & Francis, v. 33, n. 6, p. 538–551, 1981.
- LAKE, D. E.; RICHMAN, J. S.; GRIFFIN, M. P.; MOORMAN, J. R. Sample entropy analysis of neonatal heart rate variability. **American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology**, Am Physiological Soc, v. 283, n. 3, p. R789–R797, 2002.
- LIMA, C. N. N.; FERNANDES, C. A. C.; FRANÇA, G. B.; MATOS, G. G. de. Estimativa do impacto do el niño/la niña na intensidade dos ventos do Nordeste brasileiro. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 232–240, 2014.
- LIRA, M. A. T.; NETO, J. M. M.; LOIOLA, J. V. L. d.; SILVA, E. M. d.; ALVES, J. M. B. Caracterização do Regime de Ventos no Piauí Para o Aproveitamento de Energia Eólica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, scielo, v. 32, p. 77 – 88, 03 2017. ISSN 0102-7786. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862017000100077&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862017000100077&nrm=iso)>.
- LIU, L.-Z.; QIAN, X.-Y.; LU, H.-Y. Cross-sample entropy of foreign exchange time series. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 389, n. 21, p. 4785–4792, 2010.
- LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic information systems and science**. 2. ed. [S.l.]: Chichester, England: John Wiley & Sons, 2005.
- LUO, W.; TAYLOR, M.; PARKER, S. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. **International journal of climatology**, Wiley Online Library, v. 28, n. 7, p. 947–959, 2008.
- MENTIS, D.; HERMANN, S.; HOWELLS, M.; WELSCH, M.; SIYAL, S. H. Assessing the technical wind energy potential in Africa a gis-based approach. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 83, p. 110–125, 2015.
- MIHAILOVIĆ, D. T.; BALAŽ, I. Synchronization in biochemical substance exchange between two cells. **Modern Physics Letters B**, World Scientific, v. 26, n. 05, p. 1150031, 2012.
- MIMIĆ, G.; MIHAILOVIĆ, D.; KAPOR, D. Complexity analysis of the air temperature and the precipitation time series in serbia. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, p. 1–8, 2015.
- NASCIMENTO, F. J. L.; TUBELIS, A. Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras. **São Paulo: Nobel**, 1984.
- OLIVEIRA, G. S. d. **Niño e você: o fenômeno climático**. [S.l.]: Transtec, 1999.
- OLIVEIRA, J.; COSTA, A. Estudo de variabilidade do vento em escala sazonal sobre o Nordeste brasileiro utilizando o rams: Os casos de 1973-1974 e 1982-1983. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 1, p. 53–66, 2011.
- PINCUS, S. M. Approximate entropy as a measure of system complexity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 88, n. 6, p. 2297–2301, 1991.
- R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2006. Disponível em: <<https://www.R-project.org>>.

- RAMOS, B. **Geografia – biomas e climas**. 2015. Disponível em: <<http://image.slidesharecdn.com/geo03-150719184837-lva1-app6891/95/biomas-climas-massas-de-ar-8-638.jpg?cb=1437332024>>. Acesso em: 15/10/2017.
- REBOUÇAS, A. d. C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, SciELO Brasil, v. 11, n. 29, p. 127–154, 1997.
- REDDY, Y.; SEBASTIN, A. Parameters for estimation of entropy to study price manipulation in stock market. **10th Capital Markets Conference**, Indian Institute of Capital Markets Paper, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.962329>>.
- RENOVAENERGIA. **Companhia Brasileira de Geração de Energia Renovável**. 2017. Disponível em: <<http://www.renovaenergia.com.br/pt-br/nossos-negocios/eolica/Paginas/default.aspx>>.
- RÉNYI, A. On measures of entropy and information. In: **Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability**. [S.l.]: The Regents of the University of California, 1961. v. 1: Contributions to the Theory of Statistics.
- RICHMAN, J. S.; MOORMAN, J. R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. **American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology**, v. 278, n. 6, p. H2039–H2049, 2000.
- ROSS, J. L. S. Relevo brasileiro: uma nova proposta de classificação. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 4, p. 25–39, 2011.
- SANTANA, L. V. R.; STOSIC, T.; DEZOTTI, C. H.; MOURA, G. B. de A.; ARAÚJO, L. H. G. D. de; SILVA, A. S. A. da. Spatial analyses of wind speed in the North-Brazil with data from ERA-40. **REVISTA BRASILEIRA DE BIOMETRIA**, v. 33, n. 3, p. 414–432, 2015.
- SAPUCCI, L. F.; HERDIES, D. L.; MATTOS, J. G. Z.; GONCALVES, L. G. G. D.; R., F. J. P.; LIMA, S. S. T.; ARAVEQUIA, J. A. **Reanálise regional do CPTEC de 2000-2009 com resolução de 20 km sobre a América do Sul**. 2010.
- SCHMIDT, J.; CANCELLA, R.; JUNIOR, A. O. P. The effect of windpower on long-term variability of combined hydro-wind resources: The case of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 55, p. 131–141, 2016.
- SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review**, ACM, v. 5, n. 1, p. 3–55, 2001.
- SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: **ACM. Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference**. [S.l.], 1968. p. 517–524.
- SHI, W.; SHANG, P. Cross-sample entropy statistic as a measure of synchronism and cross-correlation of stock markets. **Nonlinear Dynamics**, Springer, v. 71, n. 3, p. 539–554, 2013.
- SHUANGCHENG, L.; QIAOFU, Z.; SHAOHONG, W.; ERFU, D. Measurement of climate complexity using sample entropy. **International journal of climatology**, Wiley Online Library, v. 26, n. 15, p. 2131–2139, 2006.
- SILVA, B. B.; ALVES, J. J.; CAVALCANTI, E. P.; DANTAS, R. T. Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Departamento de Engenharia Agrícola-UFCG, 2002.

SILVA, B. B. d.; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTI, E.; VENTURA, E. Variabilidade espacial e temporal do potencial eólico da direção predominante do vento no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 189–202, 2004.

STÜKER, E.; SCHUSTER, C. H.; SCHUSTER, J. J.; SANTOS, D. C.; MEDEIROS, L. E.; COSTA, F. D.; DEMARCO, G.; PUHALES, F. S. Comparison of wind data of ERA-Interim reanalysis and cfsr with the data from automatic inmet stations in Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, Universidade Federal de Santa Maria-Centro de Ciências Naturais e Exatas, v. 38, n. IX WORKSHOP, p. 284, 2016.

TSALLIS, C. Possible generalization of boltzmann-gibbs statistics. **Journal of statistical physics**, Springer, v. 52, n. 1, p. 479–487, 1988.

UPPALA, S. M.; KÅLLBERG, P. W.; SIMMONS, A. J.; ANDRAE, U.; BECHTOLD, V. D. C.; FIORINO, M.; GIBSON, J. K.; HASELER, J.; HERNANDEZ, A.; KELLY, G. A.; LI, X.; ONOGI, K.; SAARINEN, S.; SOKKA, N.; ALLAN, R. P.; ANDERSSON, E.; ARPE, K.; BALMASEDA, M. A.; BELJAARS, A. C. M.; BERG, L. V. D.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; CAIRES, S.; CHEVALLIER, F.; DETHOF, A.; DRAGOSAVAC, M.; FISHER, M.; FUENTES, M.; HAGEMANN, S.; H6LM, E.; HOSKINS, B. J.; ISAKSEN, L.; JANSSEN, P. A. E. M.; JENNE, R.; MCNALLY, A. P.; MAHFOUF, J.-F.; MORCRETTE, J.-J.; RAYNER, N. A.; SAUNDERS, R. W.; SIMON, P.; STERL, A.; TRENBERTH, K. E.; UNTCH, A.; VASILJEVIC, D.; VITERBO, P.; WOOLLEN, J. The era-40 re-analysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 131, n. 612, p. 2961–3012, 2005. ISSN 1477-870X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1256/qj.04.176>>.

VALENZA, G.; CITI, L.; SCILINGO, E. P.; BARBIERI, R. Inhomogeneous point-process entropy: An instantaneous measure of complexity in discrete systems. **Physical Review E**, APS, v. 89, n. 5, p. 052803, 2014.

VAREJÃO-SILVA, M. **Meteorologia e Climatologia**. [S.l.: s.n.], 2006. v. 2.

WITZLER, L.; RAMOS, D.; CAMARGO, L.; GUARNIER, E. Reconstruction of wind generation historical series aiming at the analysis of energy complementarity: Methodology and applications. **European Energy Market (EEM), 13th International Conference on the**, IEEE, p. 1–6, 2016.

YENTES, J. M.; HUNT, N.; SCHMID, K. K.; KAIPUST, J. P.; MCGRATH, D.; STERGIU, N. The appropriate use of approximate entropy and sample entropy with short data sets. **Annals of biomedical engineering**, Springer, v. 41, n. 2, p. 349–365, 2013.

YUE, Y.; ZHAO, Y.; ZHAO, H.; WANG, H. Short-term wind speed combined prediction for wind farms. **IEEE**, p. 18–22, 2017.

ZHANG, G.; WU, Y.; WONG, K. P.; XU, Z.; DONG, Z. Y.; IU, H. H.-C. An advanced approach for construction of optimal wind power prediction intervals. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 30, n. 5, p. 2706–2715, 2015.

ZHANG, T.; YANG, Z.; COOTE, J. H. Cross-sample entropy statistic as a measure of complexity and regularity of renal sympathetic nerve activity in the rat. **Experimental physiology**, Wiley Online Library, v. 92, n. 4, p. 659–669, 2007.