

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



Tese de Doutorado

EVERSON BATISTA MARIANO

**SIMULAÇÃO DO MODELO BRAMS PARA INSTALAÇÃO DE PARQUE
EÓLICO NO NORDESTE SETENTRIONAL ORIENTAL DO BRASIL**

Campina Grande, Maio de 2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CENTRO DE TECNOLOGIA EM RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

TESE DE DOUTORADO

**SIMULAÇÃO DO MODELO BRAMS PARA INSTALAÇÃO DE
PARQUE EÓLICO NO NORDESTE SETENTRIONAL ORIENTAL
DO BRASIL**

EVERSON BATISTA MARIANO

ORIENTADOR: PROF. DR. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI

CAMPINA GRANDE – PB

MAIO, 2017

TESE DE DOUTORADO

**SIMULAÇÃO DO MODELO BRAMS PARA INSTALAÇÃO DE
PARQUE EÓLICO NO NORDESTE SETENTRIONAL
ORIENTAL DO BRASIL**

EVERSON BATISTA MARIANO

ORIENTADOR: PROF. DR. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI

CAMPINA GRANDE – PB

MAIO, 2017

EVERSON BATISTA MARIANO

**SIMULAÇÃO DO MODELO BRAMS PARA INSTALAÇÃO DE
PARQUE EÓLICO NO NORDESTE SETENTRIONAL
ORIENTAL DO BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, seguindo às exigências para obtenção do Título de Doutor em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Climatologia

CAMPINA GRANDE – PB

MAIO, 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M333s Mariano, Everson Batista.
 Simulação do modelo BRAMS para instalação de parque eólico no
 Nordeste Setentrional Oriental do Brasil / Everson Batista Mariano. –
 Campina Grande, 2017.
 85 f. : il. color.

 Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina
 Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.
 "Orientação: Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti".
 Referências.

 1. *Modelo Brazilian Developments on The Regional Atmospheric
Modeling System (BRAMS)*. 2. Velocidade do Vento. 3. Potencial Eólico. 4.
TSM. I. Cavalcanti, Enilson Palmeira. II. Título.

CDU 551,55(043)

EVERSON BATISTA MARIANO

SIMULAÇÃO DO MODELO BRAMS PARA INSTALAÇÃO DE PARQUE EÓLICO
NO NORDESTE SETENTRIONAL ORIENTAL DO BRASIL

TESE APROVADA EM 26/05/2017

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. JOSÉ CARLOS FIGUEIREDO
Centro de Meteorologia de Bauru
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho


Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Centro de Ciências Biológicas e Sociais Aplicadas
Universidade Estadual da Paraíba

"E assim, para frente no caminho da sabedoria, a bom passo, com boa confiança! Em qualquer condição que estiveres, serve-te dessa fonte de experiência! Joga o descontentamento para além de teu ser, perdoa teu próprio eu, pois, em todo caso, tens em ti mesmo uma escada com cem degraus, pelos quais podes subir para o conhecimento".

Friedrich Nietzsche

*Aos meus Pais, José Mariano (in memoriam) & Sálvia
Mariano e ao meu Orientador, Enilson Palmeira Cavalcanti,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Um agradecimento em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti, por ser o primeiro a acreditar em minha capacidade, pelos seus conselhos de pai para minha vida e por sua dedicação para comigo;

A minha Família;

Aos meus Amigos que sempre me apoiaram, em especial: Richelle Kerlle, Pollyanna Kelly, Elder Beserra e Hérika Rodrigues;

À minha companheira Vamberta Mariano seu amor, paciência e dedicação.

Aos membros da banca examinadora: Prof. Dr. José Ivaldo, Prof. Dr. Enio Pereira, Prof. Dr. José Carlos Figueiredo e ao Prof. Dr. Madson Tavares por terem aceitado este processo de avaliação e aprimoramento deste trabalho;

Aos funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas, em especial: Divanete e Arilene, agradeço-lhes pela disposição em ajudar-me;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS e ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. Breve histórico da energia eólica no mundo e no NEB	23
2.2. Modelagem numérica em estudos de potencial eólico	24
2.3. Relações climatológicas e condições que influenciam na variabilidade do vento no NEB	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1. Características da área de estudo	32
3.2. Configuração do modelo BRAMS	33
3.3. Potência eólica disponível no vento	34
3.4. Parte I - Calibração e validação dos dados	34
3.4.1. Dados anemométricos, ERA-Interim e localização	34
3.4.2. Ajuste dos dados	35
3.4.3. Índices estatísticos	36
3.4.4. A distribuição de Weibull	38
3.5. Parte II - Análise climática de velocidade do vento	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1. Parte I: Índices Estatísticos	42
4.2. Comportamentos temporais das simulações e reanálises	45
4.3. Distribuição de Weibull	49
4.4. Densidade de Potência Eólica (DPE)	53
4.5. Parte II: Variação interanual da velocidade do vento	55
4.6. Séries temporais das anomalias da velocidade do vento e TSM	60
4.7. Variação espacial da climatologia dos ventos	63
4.8. Anomalia do vento para março de 1998 (El Niño) e 1996 (La Niña)	68

4.9. Anomalia do vento para março de 2004 (Gradiente Positivo) e 1986 (Gradiente Negativo)	70
4.10. Anomalia do vento para anos de El Niño (La Niña) e Gradiente Meridional Positivo (Negativo)	71
5. CONCLUSÕES	74
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXO	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo representada pelo mapa da orografia	33
Figura 2. Mesorregiões do Estado da Paraíba e pontos de medições: A-Damião, B-Juazeirinho e C-Teixeira (Adaptado, AESA – 2016)	35
Figura 3. Parques eólicos ativos na área do Nordeste Setentrional Oriental do Brasil. (Fonte: SIGEL, 2016)	39
Figura 4. Dispersão dos dados observados em função dos simulados pelo modelo BRAMS para o Agreste a) 10m e b) 70m c) 100m; Borborema d) 10m e e) 70m f) 100m e Sertão g) 10m e h) 70m i) 100m	44
Figura 5. Dispersão dos dados observados em função dos obtidos pelo ERA-Interim para o Agreste a) 10m e b) 70m c) 100m; Borborema d) 10m e e) 70m f) 100m e Sertão g) 10m e h) 70m i) 100m	45
Figura 6. Variação diária do vento para o mês de outubro de 2010 no Agreste para às respectivas alturas de: (a) 10m, (b) 70m e (c) 100m	47
Figura 7. Variação diária do vento para o mês de outubro de 2010 no Borborema para às respectivas alturas de: (a) 10m, (b) 70m e (c) 100m	47
Figura 8. Variação diária do vento para o mês de outubro de 2010 no Sertão para às respectivas alturas de: (a) 10m, (b) 70m e (c) 100m	48
Figura 9. Imagens do satélite GOES a) dia 09/10/2010 e (b) 16/10/2010; Ambas às 12:00 UTC (Fonte: CPTEC/INPE)	48
Figura 10. Distribuição de Weibull para o Agreste a 10 metros de altura	50
Figura 11. Distribuição de Weibull para o Agreste a 70 metros de altura	50
Figura 12. Distribuição de Weibull para o Agreste a 100 metros de altura	50
Figura 13. Distribuição de Weibull para Borborema a 10 metros de altura	51
Figura 14. Distribuição de Weibull para Borborema a 70 metros de altura	51
Figura 15. Distribuição de Weibull para Borborema a 100 metros de altura	51
Figura 16. Distribuição de Weibull para o Sertão a 10 metros de altura	52
Figura 17. Distribuição de Weibull para o Sertão a 70 metros de altura	52
Figura 18. Distribuição de Weibull para o Sertão a 100 metros de altura	52
Figura 19. Variação da média diária da velocidade do vento (m/s) para a cidade de Trairi - CE no período de 1983 a 2013 para os meses de: A) março, B) junho, C) setembro e D) dezembro	57
Figura 20. Variação da média diária da velocidade do vento (m/s) para a cidade de João Câmara - RN no período de 1983 a 2013 para os meses de: A) março, B) junho, C) setembro e D) dezembro	58
Figura 21. Variação da média diária da velocidade do vento (m/s) para a cidade de	

	Santa Luzia - PB no período de 1983 a 2013 para os meses de: A) março, B) junho, C) setembro e D) dezembro	59
Figura 22.	Varição da média diária da velocidade do vento (m/s) para a cidade de Caetés - PE no período de 1983 a 2013 para os meses de: A) março, B) junho, C) setembro e D) dezembro	60
Figura 23.	Série temporal da anomalia da velocidade do vento (março) e anomalias de TSM média do trimestre (março-maio) para Trairi – CE	62
Figura 24.	Série temporal da anomalia da velocidade do vento (março) e anomalias de TSM média do trimestre (março-maio) para João Câmara – RN	62
Figura 25.	Série temporal da anomalia da velocidade do vento (março) e anomalias de TSM média do trimestre (março-maio) para Santa Luzia – PB	63
Figura 26.	Série temporal da anomalia da velocidade do vento (março) e anomalias de TSM média do trimestre (março-maio) para Caetés – PE	63
Figura 27.	Distribuição espacial da climatologia dos ventos (m/s) para os meses de: a) março; c) junho. Desvio padrão, para os meses de: b) março; d) junho	64
Figura 28.	Distribuição Espacial da Climatologia dos Ventos (m/s) para os meses de: a) setembro; c) dezembro. Desvio padrão, para os meses de: b) setembro; d) dezembro	66
Figura 29.	Distribuição espacial da Densidade de Potência Eólica (W/m ²): a) março; b) junho; c) setembro; d) dezembro	68
Figura 30.	Distribuição espacial da anomalia do vento (m/s) para o mês de março de: (a) 1998 (ano de El Niño) e (b) (ano de La Niña)	69
Figura 31.	Distribuição espacial da anomalia do vento (m/s) para o mês de março de: (a) 2004 (Gradiente Meridional Positivo) e (b) 1986 (Gradiente Meridional Negativo)	71
Figura 32.	Distribuição espacial da anomalia do vento (m/s) para atuações do Gradiente Meridional Positivo e El Niño para o mês de março nos anos de: (a)1983 e (b)1992	73
Figura 33.	Distribuição espacial da anomalia do vento (m/s) para atuações do Gradiente Meridional Positivo e El Niño para o mês de março nos anos de: (a)1985 e (b)1989	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parametrizações utilizadas no modelo BRAMS	33
Tabela 2 – Classificação do Coeficiente de Correlação de Pearson	37
Tabela 3 – Cidades selecionadas e respectivas coordenadas geográficas da onde estão localizados os parques eólicos	40
Tabela 4 - Anomalias de TSM do Oceano Pacífico na área Niño3 (5° N - 5° S , 150° W -90° W)	84
Tabela 5 - Gradientes Meridionais na área do Oceano Atlântico Tropical	85
Tabela 6. Coeficientes de Correlação estimados para o período de 01 a 31 de outubro de 2010 da velocidade do vento observada com os obtidos pelo BRAMS e ERA-Interim	42
Tabela 7. Índices estatísticos para a velocidade do vento médio diário para as três mesorregiões do Estado da Paraíba	43
Tabela 8. Informações dos parâmetros k e c para as distribuições de Weibull	53
Tabela 9. Densidade de potência média mensal (W/m^2) para outubro de 2010	53

LISTA DE SIGLAS e ABREVIATURAS

BRAMS - Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System

CCM - Complexos Convectivos de Mesoescala

CE - Ceará

DOL - Distúrbios Ondulatórios de Leste

DPE – Densidade de Potência Eólica

EAM - Erro Absoluto Médio

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ENOS - El Niño-Oscilação Sul

FF - Frentes-Frias

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

LAMEPE - Laboratório de Meteorologia de Pernambuco

LI - Linhas de Instabilidade

MERRA - Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications

NCAR - National Center for Atmospheric Research

NCEP - National Centers for Environmental Prediction

NEB - Nordeste do Brasil

NREL - Renewable Energy Laboratory

PB - Paraíba

PE - Pernambuco

PNM – Pressão ao Nível Médio do Mar

RAMS - Regional Atmospheric Modeling System

REQM - Raiz do Erro Quadrático Médio

RN - Rio Grande do Norte

ROC - Radiação de Onda Curta

ROL - Radiação de Onda Longa

SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

TSM - Temperatura de Superfície do Mar

VCAN - Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

WRF - Weather Research and Forecasting System

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

GrADS - Grid Analysis and Display System

LISTA DE SÍMBOLOS

$P_{\text{disponível}}$ – Potência disponível

k – Parâmetro de forma

c – Parâmetro de escala

ρ – Densidade do ar

D_p – Densidade de potência eólica

N – Número de dados

V_m – Média da velocidade do vento

t – Teste de Student

t_c – t crítico

r_c – Coeficiente de correlação crítico

r – Correlação de Pearson

ϕ_{ci} – Correção estatística do modelo

ϕ_i – Valor simulado pelo modelo

ϕ_{im} – Média dos dados simulados

ϕ_{om} – Média dos dados observados

σ_i – Desvio Padrão dos dados simulados

σ_o – Desvio Padrão dos dados observados

RESUMO

Na realização deste trabalho, foram analisadas variações espaciais e temporais do vento e da potência eólica para a região do nordeste setentrional oriental do Brasil. Para tanto, utilizou-se o modelo *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) usando como entrada dados de reanálises do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Foram utilizados dados observados da velocidade do vento de três mesorregiões da Paraíba do período de 1 a 31 de outubro de 2010 para validação do modelo BRAMS. Reanálises do ERA-Interim, com resolução espacial de $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ foram utilizadas como uma segunda fonte de dados para o mesmo propósito. Nesta comparação, foram feitas correlações e aplicados testes de significância estatística, assim como, avaliação dos parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull. Após validação, foram geradas simulações do vento dos meses de março, junho, setembro e dezembro para o período de 1983 a 2013. Foram avaliadas as variações sazonais e interanuais da velocidade do vento em quatro cidades com parques eólicos instalados. Os resultados apontam coeficientes de correlações acima de 0,70 com significância estatística de 99% ($\alpha = 0,01$). Na distribuição de Weibull, os parâmetros de forma e de escala mostraram-se próximos aos obtidos para os dados observados. Na variação sazonal, o mês de setembro apresentou velocidades do vento mais intensas e menos intensas em março, com valores intermediários verificados em junho e dezembro. Na distribuição espacial da média climatológica da velocidade do vento e da potência eólica, destacam-se influências da topografia, com velocidades mais intensa e maior potencial eólico sobre áreas mais elevadas. Variações interanuais, devido alterações na TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais, mostraram que em anos de El Niño e Gradiente Meridional Positivo o vento sobre o nordeste setentrional oriental do Brasil é intensificado e que a atuação simultânea de ambos, potencializa esse aumento. Com os resultados obtidos o uso da simulação de Densidade de Potência Eólico (DPE), utilizando o modelo BRAMS pode ser aplicado em qualquer região da América do Sul.

Palavras-chave: BRAMS; velocidade do vento; potencial eólico; TSM.

ABSTRACT

In this work, wind and wind power spatial and temporal variability were analyzed for the northern region. For this, the Brazilian development on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) atmospheric model was used, alongside National Center for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data. Observed wind speed data from three meso regions of Paraíba from October 1 to October 31, 2010 were used to validate the BRAMS model. Reanalyses of the ERA-Interim with spatial resolution of $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ were used as a second data source for the same purpose. In this comparison, we performed correlation analysis and verified its statistical significance, as well as the evaluation of the shape and fit parameters of the Weibull distribution. After further validation, wind simulations were generated in the months of March, June, September and December for the period from 1983 to 2013. Seasonal and interannual wind speed variation was evaluated in four cities with wind farms. The results show correlation coefficients above 0.70 with a statistical significance of 99% ($\alpha = 0.01$). In the Weibull distribution, the shape and fit parameters were close to those obtained for the observed data. In the wind speed seasonal variation, September presented more intense, while March showed lower wind speeds with intermediate values verified in June and December. Spatial distribution of the average climatological wind speed and wind power topography influences are highlighted, with higher velocities and greater wind potential on higher altitude areas. Interannual variations, due to changes in the SST of the Pacific and Atlantic Tropical Oceans, have shown that in the years influenced by El Niño and positive Southern Gradient, the wind over the north east to Brazil is intensified and that the simultaneous action of both SST gradients amplifies this increase. With the results obtained the use of the Wind Power Density (WPD) simulation using the BRAMS model can be applied in any region of South America.

Keywords: BRAMS; wind speed; wind power; TSM.

1. INTRODUÇÃO

Os recursos energéticos necessitam de pesquisas que produzam conhecimentos que busquem suprir a alta demanda industrial e de consumo populacional, visando à conservação ambiental daquilo que se explora. Esta prática conduz a um melhor aproveitamento e uso mais sustentável dos recursos naturais. O desenvolvimento sustentável, mira utilizar os meios necessários para suprir as necessidades da humanidade, sem privar as gerações que virão se beneficiar dos recursos da natureza (LOPEZ, 2012). Neste contexto, uma das fontes de energias renováveis mais promissoras e que geram menor impacto sobre o ambiente é a que usa os ventos para produzir eletricidade, por meio dos aerogeradores. O Brasil apresenta um vasto território de bacias hidrográficas e um relevo favorável à sua principal matriz energética que é proveniente de fontes hídricas, o que não atende às necessidades do país. No entanto, intempéries oceânicas significativas, provocam variações climáticas que afetam diretamente as principais bacias hidrográficas e conseqüentemente, as usinas hidrelétricas em atividade, responsáveis pela maior parte da produção de energia elétrica do país (AMARANTE *et al.*, 2001).

A energia eólica, por sua vez, é umas das soluções que possibilitariam complementar este déficit gerado pelas atividades de consumo humano e fatores climáticos. O Brasil vem crescendo nas últimas décadas no ranking de investimentos na energia Eólica, ocupando a 5ª posição mundial e é o país que mais cresce no campo eólico. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil possui cerca de 420 parques eólicos em funcionamento, com capacidade instalada de 2.014,0 MegaWatts em 2016. Atualmente, a região Nordeste do Brasil (NEB) possui aproximadamente 327 parques eólicos em operação, o que abrange aproximadamente em 78% do potencial eólico total, produzido no Brasil (PORTAL BRASIL, 2017).

No Brasil, uma das maiores dificuldades relacionadas aos estudos da variabilidade espacial e temporal do vento é a falta de dados observados continuamente com boa confiabilidade. A aquisição de dados diários, através de estações anemométricas nos padrões exigidos pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM), entre outros fatores, demanda de um alto custo para a instalação e manutenção dessas torres, além de tempo necessário para captação dessa série de dados, aproximadamente 30 anos consecutivos. No entanto, existe uma maneira alternativa para minimizar essa limitação de dados, que é o uso de modelos numéricos regionais

(mesoescala/microescala). Esses modelos, quando bem calibrados, tornam-se uma ferramenta muito versátil e precisa nas estimativas de séries climatológicas de vento, importantes para caracterização local, regional e global das variáveis atmosféricas e prospecção futura no planejamento de projetos eólicos.

Proveniente do *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) (PIELKE *et al.*, 1992), o modelo *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System* (BRAMS) descrito por Freitas *et al.* (2017) foi adaptado e melhorado no Brasil, sendo esse bastante utilizado em todos os campos da Meteorologia. Entretanto, um problema intrínseco na modelagem numérica são as incertezas geradas pelo padrão das condições iniciais, fazendo-se necessário um ajuste nas suas configurações iniciais, afim que se possam garantir resultados mais precisos. Segundo Costa e Lyra (2012), os resultados dos modelos numéricos são acompanhados de desvios, que no geral, se torna bastante relevante na estimativa de alguma variável ou parâmetro atmosférico. Os processos físicos que ocorrem na camada limite dependem muito das condições de contorno superficial de cada região. Isso pode ser fundamental no processo de verificação e ajuste das parametrizações dos modelos e assim seja agregado como ferramenta útil num projeto eólico, sendo capaz de gerar séries temporais do vento. Esta verificação dos dados climáticos para uma determinada região é fundamental para que sejam identificadas possíveis áreas com potencial aproveitável da energia cinética dos ventos.

Outro recurso utilizado como solução para a escassez de dados de vento é o uso das reanálises. Estas podem ser compreendidas como uma composição de dados, gerados por modelos de grande escala, dados de satélites, estações convencionais e automáticas, além de boias oceânicas. Também demanda grande importância pela possibilidade de longas séries de dados de vento, com boa consistência física, para atender às necessidades da pesquisa em projetos eólicos. Atualmente, as reanálises mais requeridas são as do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP); ERA-Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e a *Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications* (MERRA) da NASA (SAHA *et al.*, 2010; DEE *et al.*, 2011 e RIENEKER *et al.*, 2011).

Num projeto eólico é imprescindível conhecer características sobre a variabilidade espacial e temporal (diário, sazonal e interanual) relacionados com relevo, aquecimento radiativo, densidade do ar, entre outros aspectos superficiais. A não observância dessas questões, relacionadas ao vento, pode comprometer um projeto de

energia eólica. Então, a qualidade dos dados de velocidade do vento, torna-se de grande relevância, assim como seu tratamento e análise (VIANELLO e ALVES, 2004; LOPEZ, 2012).

Os principais sistemas meteorológicos que acarretam a variabilidade do vento na região do nordeste setentrional oriental são: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), efeitos de Brisas marítimas e terrestres, Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), Linhas de Instabilidade (LI) e Frentes-Frias (FF). Esses sistemas são modulados por efeitos climáticos de Grande Escala, tais como: El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e o Gradiente Meridional da Temperatura de Superfície do Mar do Atlântico, também denominado Dipolo do Atlântico (KOUSKY e GAN, 1981; SERVAIN, 1991; FERREIRA e MELLO, 2005; GRIMM, 2009).

Experimentos de campo nacional e internacional (WILBANKS *et al.*, 2008; BORBA *et al.*, 2012) têm sido executados no intuito de se obter medições do vento para avaliar características meteorológicas, assim como estatísticas que ajudem a descrever o comportamento local do vento (GARRAT e PIELKE, 1989). Entretanto, essas iniciativas são limitadas a períodos curtos e localidades específicas. Para a Região Nordeste do Brasil (NEB), destacam-se os trabalhos de Lima e Bezerra Filho, (2010), Lima *et al.* (2012), Araújo Júnior *et al.* (2014) e Pinto *et al.* (2014) que buscaram avaliar a consistência dos dados de ventos, obtidos por modelos numéricos da atmosfera, comparando-os com dados observados mediante o uso de análises estatísticas, além da obtenção da Densidade de Potência Eólica (DPE) de cada localidade e/ou região. Em todos esses estudos, são evidenciadas boas relações entre os dois tipos de dados analisados.

Em face da carência de estudos climatológicos da velocidade do vento para fins de avaliação da potência eólica na região do nordeste setentrional oriental, esta pesquisa apresenta os seguintes objetivos:

Objetivo Geral:

Estudar aspectos climáticos do vento e da DPE para os estados do Ceará (CE), Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco do Brasil, mediante simulações do modelo BRAMS.

Objetivos Específicos:

- Calibrar e validar o modelo BRAMS comparando velocidade do vento simulada com dados observados;
- Utilizar a reanálise do ERA-Interim, como segunda fonte de dados de velocidade do vento, para efeitos comparativos com dados observados e simulados pelo BRAMS;
- Testar a distribuição de frequência para dados simulados pelo BRAMS e reanálises, modelando-os através da função de Weibull;
- Determinar a variabilidade do vento em alguns parques eólicos ativos dentro dos limites da região estudada, relacionando-os com anomalias oceânicas;
- Obtenção dos campos médios climatológicos e respectivos desvios padrão da velocidade do vento e DPE;
- Analisar espacialmente a variabilidade interanual da anomalia da velocidade do vento associadas a anomalias da TSM.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Breve histórico da energia eólica no mundo e no NEB

Os cata-ventos originaram-se na China aproximadamente a 4000 anos, enquanto que na antiga Pérsia, relatos históricos datados de cerca 200 a.C. já mencionam acerca de moinhos de eixo vertical; os mesmos eram empregados na agricultura por meio da irrigação (HASSAN e HILL, 1986; LOPEZ, 2012). No século I d.C. o engenheiro grego Herão de Alexandria inventou a roda de vento, que transformou a energia cinética dos ventos em energia mecânica, capaz de mover máquinas agrícolas (DRACHMANN, 1961). Em meados do século VII na Pérsia, a estrutura dos moinhos de vento era composta de pás acopladas na horizontal a grandes pedras e que, mesmo com baixa eficácia na sua captação do vento, giravam para triturar cereais e bombear água em regiões secas (HASSAN e HILL, 1986).

Por volta do século XII a França, Inglaterra e Holanda foram pioneiros na utilização dos moinhos de vento. Esse conseguiu ser bem aproveitado pelo sistema feudal da época, sendo difundido para a agricultura nos processos de moagem de grãos e bombeamento de água. Portanto, os cata-ventos alavancaram-se em desenvolvimento na Europa, mas estagnaram-se com o início da Revolução Industrial. No século XIX, devido ao fato da busca incessante pela energia motora, proveniente dos combustíveis fósseis e fontes hídricas, usadas para alimentar máquinas movidas a vapor e na produção de eletricidade. Entretanto, na segunda metade do século XIX, dá-se início nos Estados Unidos da América aos moinhos de vento de pás múltiplas, sendo esse apontado como um dos mais significativos avanços no progresso da captação e aproveitamento do vento. O mesmo era utilizado no bombeamento de água em vários países do mundo e trazia em si características empregadas nos protótipos dos geradores eólicos dos dias atuais (LOPEZ, 2012).

No final do século XIX, o norte-americano Charles Francis Brush ergueu o primeiro aerogerador usado exclusivamente para produção de energia elétrica, na cidade de Cleveland, em Ohio (SHEPHERD, 1994). A estrutura dos cata-ventos, já chamados de aerogeradores, foi aprimorada pela Dinamarca. Nesses protótipos a aerodinâmica das pás e sistemas de frenagem hidráulica foi levada em consideração. A Rússia teve sua contribuição ao conectar aerogeradores de médio e grande porte na rede elétrica. Depois da Segunda Guerra Mundial a Dinamarca, França, Estados Unidos e Alemanha

investiram em pesquisas, nas quais os primeiros modelos de aerogeradores de grande porte foram desenvolvidos, dando origem aos aerogeradores comumente usados nos parques eólicos do globo (NIXON, 2008).

Na década de 90, os estados pioneiros na quantificação e observação dos ventos, para fins energéticos, foram o Ceará e Pernambuco (Fernando de Noronha), onde se deu a instalações dos primeiros anemômetros capazes de obter a velocidade do vento, para que posteriores estimativas do potencial eólico e instalações dos primeiros aerogeradores do Brasil (ANEEL, 2005). A energia eólica teve uma guinada na produção e instalação de parques eólicos em meados de 2000, devido à necessidade de uma demanda crescente entre do consumo da energia. Sendo a maior alternativa para fins de produção de energia, os rios, que davam suporte às barragens hidrelétricas, em época de seca, sofriam uma diminuição em seu fluxo, sendo a causa de diversos apagões nas Regiões Sudeste e do Nordeste.

2.2. Modelagem numérica em estudos de potencial eólico

Em estudo da DPE média horária para uma direção predominante do vento a partir de dados coletados de 77 estações climatológicas do INMET, num período de 4 anos, Silva *et al.* (2004) utilizaram o modelo de distribuição de frequência de Weibull no qual foram determinados os parâmetros de forma e de escala. Assim, avaliaram a DPE para cada estação. Verificaram que a direção predominante do vento para região do NEB é a de Leste, com variações para Sudeste e Nordeste. A partir das estimativas de DPE concluíram grande variabilidade espacial no NEB, com períodos de máximos encontrados de julho a dezembro e mínimos de janeiro a maio. Esse comportamento está relacionado com a atuação dos diferentes sistemas atmosféricos atuantes na região em períodos distintos, influenciando diretamente na velocidade e direção do vento.

Em estudo para o NEB, Maria *et al.* (2008) apresentaram um método de comparação através de índices estatísticos entre simulações da velocidade do vento de curta duração gerados pelo modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS, PIELKE *et al.*, 1992; WALKO *et al.*, 1995; COTTON *et al.*, 2003) na versão 6.0, com dados observados. As configurações das grades do modelo RAMS foram expressas em diversas resoluções espaciais horizontais e variadas grades aninhadas, cujo domínio da grade maior contempla grande parte do NEB. As análises evidenciaram que a simulação com 1 km de resolução horizontal e parametrização de turbulência na opção

anisotrópica e relaxamento newtoniano de 12 horas apresentaram melhores resultados. Concluíram ainda que os índices estatísticos se mostraram coerentes, contribuindo para validação das séries temporais dos dados simulados.

Com o objetivo de estimar a Densidade de Potencia Eólica (DPE) para a região NEB e investigar as influências causadas pela mudança climática, nos primeiros metros da camada limite planetária, Faria (2010) propôs usar um modelo de mesoescala *Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model* (MM5) aliado a modelos de microescala, para simulação de cenários de tempo passado (entre 1980-2000) e futuro (2080-2100). Nas simulações do modelo MM5, os valores mais significativos da velocidade do vento, utilizados no cálculo da DPE, foram observados nas alturas de 80 e 100 metros. Nos cenários futuros, houve predisposição para o aumento do vento, vistas nas anomalias computadas. Com isso o autor concluiu que a área de estudo indica bom provimento do vento para fins de energia eólica, indicando perspectivas futuras para possíveis instalações de aerogeradores.

Verificando mudanças no clima e os impactos da circulação geral que atuam no regime dos ventos sobre o NEB, Oliveira e Costa (2011) agregaram modelos numéricos da atmosfera para verificar características dos ventos da região. Investigaram também as modificações nas condições de TSM na bacia do Pacífico e Atlântico Equatorial, buscando compreender as influências sobre a circulação atmosférica em menor escala. Utilizaram o modelo RAMS para simular os padrões de vento sobre o NEB. Correlações significativas entre os índices climáticos (índices de El Niño e Dipolo) e a atividade do vento sobre o NEB, principalmente nos meses correspondentes à estação chuvosa (fevereiro a maio) foram obtidas. Concluíram que o modelo simulou satisfatoriamente às características dos ventos diante da representatividade quanto ao regime de vento sobre o NEB e em particular o Estado do Ceará, quando correlacionados com a TSM observadas na parte equatorial dos oceanos Atlântico e Pacífico. Ainda em suas conclusões, observaram que o fenômeno El Niño, acoplado ao padrão de dipolo positivo no Atlântico, traz benefícios à produção de energia eólica.

Lira *et al.* (2011) obtiveram a variabilidade do vento e potencial eólico para as regiões de Paracuru e Camocim, localizadas no litoral do Estado do Ceará. O período dos dados observados para a região de Paracuru foi de 18/08/2004 a 09/05/2006; e Camocim de 22/08/2004 a 12/02/06, em que foram estimadas médias diárias para 5, 10 e 15 dias. Dados de velocidade do vento em 10 metros foram interpolados para as alturas de 20, 40 e 60 metros, mediante o perfil logarítmico do vento e modelo de

regressão linear para aplicação de estatísticas básicas e comparações. Resultados constataram que os maiores valores de velocidade foram encontrados no período de estiagem (julho-dezembro) e que o modelo de regressão linear, colaborou para a validação dos dados, apresentando índices estatísticos significativos e menores erros. Concluíram que as localidades estudadas representam áreas de grande potencial eólico no Estado do Ceará.

Lima *et al.* (2012) avaliaram a DPE, utilizando o modelo BRAMS na estimativa da velocidade e direção do vento em cinco municípios do Estado da Paraíba. Os autores usaram dados da velocidade e direção do vento, retirados de estações convencionais com anemômetros a 10 metros de altura, fornecido pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para fins de comparação com os dados simulados. As análises foram feitas para dois meses da estação chuvosa: março e abril. Em seus resultados, verificaram que a velocidade do vento simulado apresentou uma boa relação com o conjunto de dados observados. Os índices estatísticos apresentaram alta correlação para o período de chuva. O modelo BRAMS, apresentou limitação para captar os fatores locais, como por exemplo, fenômenos associados à microescala.

Visando verificar as funções estatísticas Rayleigh, Weibull e Log Normal que melhor se ajusta a distribuição dos ventos, como também avaliar a sazonalidade do regime de ventos e DPE, Favera *et al.* (2012) usaram dados da plataforma do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (Projeto SONDA) para o período de 2005 a 2011, pelos quais geraram-se perfis do potencial eólico para a região central do Estado do Rio Grande do Sul. Os resultados evidenciaram que as funções de distribuição Weibull e Rayleigh ofereceram os melhores ajustes, já que apresentaram os menores desvios para o perfil eólico da região. Constataram que as maiores DPE foram notadas nas estações Primavera e Inverno. Então, concluíram que todas as funções estatísticas proporcionaram significativos ajustes ao perfil dos ventos observados, sendo as funções de Weibull e Rayleigh com a maior correlação e os menores desvios computados.

A partir da função de Weibull, Gunturu e Schlosser (2012) analisaram o impacto da elevação das turbinas eólicas, a frequência e a climatologia do vento em algumas localidades dos Estados Unidos. Utilizaram dados de reanálises do *Modern Era Retrospective - Analysis for Research and Applications* (MERRA) (RIENECKER *et al.*, 2011) e calcularam a velocidade do vento nas alturas de 50, 80, 100 e 120 metros. Nos resultados constataram que as maiores velocidades de vento foram nas regiões montanhosas da costa Leste e Oeste dos Estados Unidos devido uma menor densidade

do ar. Concluíram que apenas a velocidade média do vento não pode ser uma medida confiável no âmbito dos recursos eólicos. As regiões centrais dos Estados Unidos e as regiões costeiras, especialmente para os aerogeradores *off-shore* na costa da Nova Inglaterra e Califórnia central, mostraram-se com maior DPE.

Dispondo de dados da velocidade do vento, coletados em estações espalhadas na Turquia, Altunkaynak *et al.* (2012) desenvolveram uma formulação com aplicações gerais para melhoramentos na captação da energia eólica. Usando parâmetros da função de distribuição de Weibull estimaram a velocidade do vento e a DPE em várias alturas, para os anos 2000 a 2002. Concluíram que a distribuição da velocidade do vento, segue à função de Weibull satisfatoriamente, agregando valores qualitativos e quantitativos aos projetos de produção de energia eólica.

Hernández-Escobedo *et al.* (2012) avaliaram a possibilidade do vento para fins de aproveitamento energético no Estado de Vera Cruz, México. Para a obtenção dos dados, utilizaram 16 torres anemométricas na altura de 50 metros para os anos de 2008 e 2009. Os autores utilizaram várias turbinas eólicas de modelos e características diferentes para avaliar suas capacidades de geração de energia eólica. Os resultados evidenciaram que para uma velocidade média do vento na faixa de 5,45 m/s, existe a possibilidade de uma produção de 10,694 MWh/ano. Nas conclusões, fizeram uma equivalência da energia eólica produzida com a emissão CO₂ (gás do efeito estufa) e a queima de toneladas de petróleo que poderiam ser evitados, caso o sistema elétrico de distribuição aproveitasse toda energia gerada pelos aerogeradores instalados em cada localidade.

Oliveira (2013) investigou a eficácia dos modelos de mesoescala BRAMS e o *Weather Research and Forecasting System* (WRF), na determinação do potencial eólico do Estado da Paraíba. Os dados de reanálises do NCEP/NCAR (2,5° por 2,5° de resolução) foram utilizados para inicialização dos modelos, para os meses de março e setembro de 2010. Os dados observados foram coletados nas alturas de 10 m, 70 m e 100 m de três torres anemométricas, distribuídas nas mesorregiões do Agreste, Borborema e Sertão, obedecendo às normas para estimativas eólicas. Nos resultados, as simulações realizadas indicaram que o vento tende a ter maior intensidade na mesorregião do Sertão, conseqüentemente, uma maior DPE foi observada. O mês de setembro indicou ventos de maior intensidade para as três localidades. Observou-se uma maior variação em magnitude do vento para o BRAMS, no entanto o modelo WRF conseguiu maior homogeneidade nas simulações. Uma de suas conclusões evidenciou

que os coeficientes analisados de Determinação e Correlação para o BRAMS, apresentaram-se mais elevados na região do Sertão. Já para o WRF, constatou-se que os coeficientes mais elevados estão na mesorregião da Borborema.

Ramos *et al.* (2013a) buscaram calibrar e validar os modelos de mesoescala WRF e microescala WindSim. O local escolhido para o estudo foi à cidade de Bagé, localizada no Rio Grande do Sul. Utilizaram dados disponibilizados pelas estações automáticas do INMET, visando comparar as estimativas dos modelos. Nos resultados, as simulações apresentaram valores próximos dos observados, com a média da velocidade do vento de aproximadamente 4,2 m/s. Finalmente, concluíram que os resultados foram satisfatórios para os modelos WRF e WindSim, indicando que os mesmos podem ser usados como ferramentas expressivas para o levantamento do potencial eólico na execução de projetos.

Em outra pesquisa, utilizando simulações de vento (velocidade e direção) com o modelo WRF Ramos *et al.* (2013b) e dispendo, para comparações, de 3 estações anemométricas localizadas em mesorregiões do Estado de Alagoas. Calcularam índices estatísticos básicos para validar as simulações do WRF no período de agosto de 2007 a julho de 2008. Observaram que o WRF apresentou imprecisão em prever os maiores valores da velocidade do vento no período seco e os menores durante o chuvoso. Relataram que provavelmente isso ocorreu devido a resolução utilizada de 5 x 5 km que não foi suficiente para identificar efeitos orográficos ou fenômenos meteorológicos locais. Entretanto, concluíram que o WRF simulou a velocidade e direção do vento de maneira satisfatória, além dos índices valores bastante significativos no processo de validação.

Pinto *et al.* (2014) usaram dados de torres anemométricas na altura de 50 metros, situadas em Roteiro e Girau do Ponciano no Estado de Alagoas, com o objetivo de serem comparados com os dados simulados pelo modelo BRAMS, na versão 4.2. Foram feitas análises estatísticas utilizando o Erro médio e a Raiz do Erro Médio Quadrático. Os resultados apontaram boas estimativas da velocidade do vento para 2 km de resolução horizontal do modelo. Os resultados para a localidade de Girau do Ponciano (AL) foram bem melhores, devido sua localização sofrer pouca ação dos fenômenos de brisas marítima. Também concluíram que uma das limitações nos resultados da DPE, com dados de vento simulados pelo BRAMS, foi devido às configurações iniciais impostas que não possibilitou a real influência de fenômenos meteorológicos de menor

escala e sugerem em estudos futuros ajustes nestas configurações, inclusive nas parametrizações do modelo.

Araújo Junior *et al.* (2014) avaliaram o potencial eólico para o Estado do Ceará em períodos distintos de El Niño e La Niña de ano seco 1997/1998 e chuvoso 1998/1999. Usando o modelo RAMS na versão 6.0, estimaram a densidade do ar e a velocidade do vento em diferentes alturas. O método de validação dos dados foi utilizado através de análises estatísticas, como o Viés, Razão entre Desvios, Índice de Concordância e Correlação de Pearson, além de aplicar o teste *t* de *Student*. Nas conclusões, verificaram que ocorre um aumento na velocidade dos ventos em períodos de El Niño e diminuição em anos de La Niña. Finalmente, afirmam que o modelo utilizado mostrou-se aceitável para o computo da velocidade média mensal dos ventos no Estado do Ceará.

2.3. Relações climatológicas e condições que influenciam na variabilidade dos ventos do NEB

Os eventos que atuam na área do Atlântico Tropical, influenciam de forma mais efetiva às variações interanuais sobre o NEB, do que os eventos da bacia do Pacífico, em áreas de formação do El Niño ou La Niña (HASTENRATH, 1977; HASTENRATH e HELLER, 1977; CHU, 1984).

De posse das anomalias de TSM do Atlântico Norte e Sul (30° N a 20° S; 60° W a 15° E), Servain (1991) estabeleceu um índice chamado de Dipolo que descreve as influências climatológicas sobre o NEB e o Sahel na África. O índice Dipolo apresenta variação significativa em escala decadal, e teria influência com mudanças climáticas observadas em outras regiões do globo. Também conhecido por Gradiente Meridional interhemisférico de TSM (GMT) do Atlântico (CARTON *et al.* 1996) o Dipolo do Atlântico é um dos principais índices que denota maiores características, atuando diretamente nos ventos alísios, devido ao fornecimento de calor latente, proveniente do aquecimento ou resfriamento das águas do Atlântico.

Vários trabalhos Hastenrath e Heller (1977), Moura e Shukla (1981), Servain (1991) e Hastenrath e Greischar (1993) definem o Dipolo do Atlântico como um índice fundamental para observação da variação do clima sobre o NEB, pois atua alterando a circulação de Hadley com implicações na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Esse sistema atua diretamente na variabilidade dos ventos nos trópicos (NOBRE, 1996)

e é considerado por muitos pesquisadores (SERRA e RATISBONA, 1942; UVO, 1989) como o principal sistema gerador das precipitações sobre norte do NEB. A ZCIT é fortemente influenciada pelas atuações do El Niño e La Niña (ARAGÃO, 1986; UVO, 1989; COELHO, 2002).

A ZCIT é localizada na zona de convergência dos alísios, que age na condução de radiação e vapor d'água dos baixos níveis para os altos níveis da atmosfera na região equatorial, com migração para as latitudes médias e altas. As regiões tropicais são caracterizadas pela presença do cavado equatorial, que chega a atingir a costa do NEB na chamada estação chuvosa. É verificado também como indicativo de relevância para estação chuvosa no NEB a permanência da ZCIT de 5° S a 6° S da sua posição climatológica. No entanto, nos anos considerados característicos da estação seca, a ZCIT se situa mais ao norte do H. N. (UVO e NOBRE, 1989; HASTENRATH e HELLER, 1997; COELHO e GAN, 2004; MELLO *et al.*, 2009).

Aragão (1998) reuniu uma série de bibliografias que relatam diversos casos de ocorrências do El Niño, Oscilação Sul e Dipolo do Atlântico com atuações no Brasil e mais especificamente sobre o NEB. Nessa revisão, o autor tratou de definir cada um desses fenômenos, detalhando todas as suas causas e características. Uma conclusão verificada foi que às anomalias de precipitação são causadas por influências diretas nas variações da TSM dos oceanos Atlântico e Pacífico Equatorial. A resposta está na faixa tropical que exibiu mudanças nas circulações atmosféricas das células meridional (Hadley) e zonal (Walker) em anos de seca na região do norte do NEB, com grande anomalia de subsidência. Em anos de anomalias de precipitação positiva, se observa intenso movimento vertical ascendente nessa área.

Sabendo que os fluxos de radiação solar atuam significativamente na variabilidade dos ventos, Souza e Nobre (1998) analisaram sua influência na atuação no desenvolvimento do Padrão de Dipolo no oceano Atlântico Tropical. Avaliaram peculiaridades da atmosfera e do oceano, correlacionando algumas variáveis tais como: TSM, Pressão ao Nível médio do Mar (PNM), Radiação de Onda Longa (ROL), Radiação de Onda Curta (ROC), entre outras. Foram investigados 22 episódios significativos de Dipolo (Negativo e Positivo) significativos, ocorridos no Atlântico Tropical. Os resultados mais evidentes constataram que os fluxos de ROC e ROL, relacionado com a evaporação do oceano Atlântico Tropical, agem diretamente para a formação e manutenção do padrão inverso de anomalias de TSM (anomalia negativas no H.N. e positivas no H.S.), dando origem ao gradiente térmico meridional de TSM do

Atlântico tropical no sentido Norte-Sul, que aliado com ventos anômalos e pressão à superfície, atuam favorecendo a migração da ZCIT para o Sul. Os resultados desta pesquisa foram comparados com vários trabalhos existentes na literatura, mostrando assim coerência com os trabalhos de Hastenrath e Heller (1977); Moura e Shukla (1981); Hastenrath e Greischar (1993); Wagner (1996); Nobre e Shukla (1996).

Segundo Silva (2003), os ventos nas latitudes que englobam o NEB são intensamente mantidos pelo regime dos ventos alísios da circulação de grande escala, porém influenciados pelo aspecto do relevo continental e características climáticas. Ainda na região do Nordeste, os ventos alísios colaboram significativamente para o um aumento e mudança na direção dos ventos locais, quando acoplado aos sistemas de brisas marítimo-terrestres (VALENÇA, 2010). Entretanto, a velocidade do vento local poderá intensificar ou não, a depender de sua direção em relação ao litoral (VAREJÃO-SILVA, 2006; COSTA e LYRA, 2012). Assim, na costa do NEB valores médios de velocidade do vento estão na faixa de 6,0 a 9,0 m/s, para a costa do Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte e Paraíba (SILVA, 2009; FARIA, 2010).

Nóbrega e Santiago (2014) avaliaram variações na TSM dos oceanos Pacífico (Leste e Central) e Atlântico (Norte e Sul) fazendo analogias com a variabilidade de chuvas no Estado de Pernambuco. Usaram dados pluviométricos de algumas localidades, registrados pelo Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (LAMEPE), para o período entre 1950 e 2009. Utilizaram anomalias de TSM para algumas áreas do oceano, definidas em Bezerra e Cavalcanti (2008). Os resultados obtidos indicam concordâncias com os resultados apresentados em Giannini *et al.* (2004) e Andreoli e Kayano (2007) que descrevem a relevância do Atlântico Sul agindo sobre sistemas atuantes no NEB. Portanto, quando o El Niño (La Niña) é associado ao Dipolo Positivo (Negativo) às anomalias de precipitação foram negativamente (positivamente) mais intensas com chuvas bem abaixo da média (acima da média) em todas às localidades estudadas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características da área de estudo

A área escolhida para esta pesquisa envolve a parte setentrional oriental do Nordeste do Brasil e envolve os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Os compreendendo uma área total de 356.498,657 km² (IBGE, 2016).

O clima dessa região é bastante heterogêneo e variável, pois como já mencionado na introdução, existe uma série de sistemas atmosféricos atuantes e fatores associados à orografia da região que influenciam diretamente na variabilidade do clima nessa região. A precipitação em média anual pode chegar acima dos 2.700 mm/ano na parte mais litorânea e abaixo dos 500 mm/ano no Sertão da Paraíba (SILVA *et al.*, 2003). A temperatura média predominante nesta região fica em torno de 24,5 °C com variações de 5 °C a 2 °C, dependendo de cada estação do ano e é considerada intensa por está localizada na faixa equatorial do globo (BRASIL, 2006).

O período chuvoso é marcado pelas influências dos seguintes sistemas meteorológicos: ZCIT que é o principal causador de precipitação, atuando entre os meses de março a maio; Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) que ocorre de maio a julho; Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) entre os meses de novembro a março; Oscilação Intrazonal de Madden-Julian; pulsos de Frentes-Frias, que se deslocam para o norte da região nos meses de janeiro a agosto; e sistemas de Brisas que atuam durante o ano todo (FERREIRA e MELO, 2005; KAYANO e ANDREOLI, 2009). As tempestades convectivas locais também estão presentes na região, onde geralmente são acompanhadas por vendavais. Isso ocorre devido às diferenças no gradiente de pressão, somado a dinâmica da atmosfera local mais a rugosidade do terreno (CASTRO, 2003).

A Figura 1 mostra a orografia da região do nordeste setentrional oriental do Brasil (Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco). Essa faixa que compreendeu as longitudes de 42° W a 34° W e latitudes de 10° S a 2,8° S no qual o modelo BRAMS estimou a velocidade do vento, de hora em hora. A partir daí, foram aplicadas metodologias que ao longo do texto são descritas.

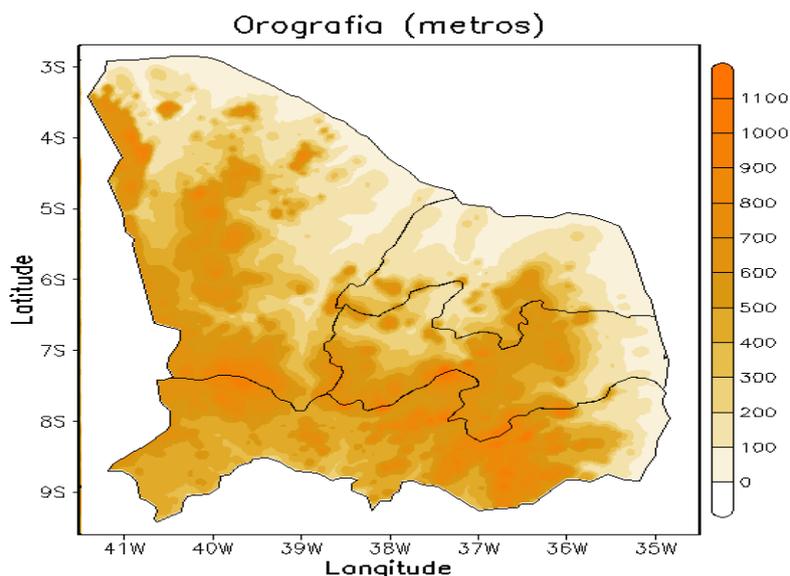


Figura 1. Área de estudo representada pelo mapa da orografia.

3.2. Configuração do modelo BRAMS

Para simulação dos dados de ventos foi utilizado o modelo BRAMS na versão 4.2 (FREITAS *et al.*, 2009). Dados de reanálises (KALNAY *et al.*, 1996; KISTLER *et al.*, 2001), referentes a temperatura; geopotencial; umidade relativa do ar e vento, do *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), com resolução espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (aproximadamente 278 km), foram usados para entrada no BRAMS.

O modelo foi configurado com uma grade de 300 pontos para X e Y com resolução horizontal de três quilômetros. A grade é centrada na latitude de $6,0^\circ$ S e $37,5^\circ$ W. Na vertical, foram utilizados 80 níveis, com maior concentração para a Camada Limite Planetária para gerar dados da velocidade do vento.

Na Tabela 1 apresentam-se as parametrizações expressas no modelo BRAMS e suas respectivas referências.

Tabela 1 - Parametrizações utilizadas no modelo BRAMS

Parametrizações
Radiação de onda curta e longa (CHEN e COTTON, 1983)
Parametrização de Cúmulos Rasos (SOUZA, 1999)
Convecção Profunda (GRELL e DÉVÉNIY, 2002)
Turbulência na Camada Limite Planetária (MELLOR e YAMADA, 1982)
Microfísica (WALKO <i>et al.</i> , 1995)

3.3. Potência eólica disponível no vento

A energia eólica se dá através da energia potencial existente no vento, que é transformada em energia de movimento circular que passa através das pás ligadas ao rotor e sendo convertida em energia elétrica (MARTINS *et al.*, 2008), consistindo-se assim no princípio de funcionamento básico dos aerogeradores. A equação da Potência disponível do vento é expressa pela Equação (1):

$$P_{disponível} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

em que $P_{disponível}$ do vento é perpendicular a velocidade (m/s) ao cubo, numa área (A) dada em metros, formada pelo diâmetro rotacional das pás dos aerogeradores no qual passa o vento e ρ (Kg/m³) é a densidade do ar (CUSTÓDIO, 2009).

Entretanto, o Físico Albert Betz estimou um índice que explica o aproveitamento total da energia disponível no vento, que é de aproximados 59%. Esse fator foi denominado de Potência de Betz (BETZ, 1926). Esta potência representa às perdas causadas entre a dissipação de energia mecânica nos aerogeradores, entre outros fatores. Assim, através de rearranjos matemáticos sob a Equação (1), verificando-se que a equação da Densidade de Potência Eólica (DPE) pela área da secção transversal, resulta-se na equação, por:

$$D_p = \frac{P_{disp.}}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (2)$$

em que: ρ (Kg/m³) é a densidade do ar e V é a velocidade (m/s).

3.4. Parte I - Calibração e validação dos dados

3.4.1. Dados anemométricos, reanálises do ERA-Interim e localização

Foram utilizados dados observados da velocidade do vento nas alturas de 10, 70 e 100m, obtidos por torres anemométricas da ELETROBRAS, instaladas e operadas em parceria com a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Essas torres estão localizadas em três municípios paraibanos: A- Damião (06° 37' 55"S e 35° 54' 36"W);

B- Juazeirinho (07° 04' 04"S e 36° 34' 40"W) e C- Teixeira (07° 13' 22"S, 37° 15' 14"W), compreendendo as mesorregiões do Agreste, Borborema e Sertão, respectivamente (Figura 2). O período de estudo foi de 01 a 31 de outubro de 2010.

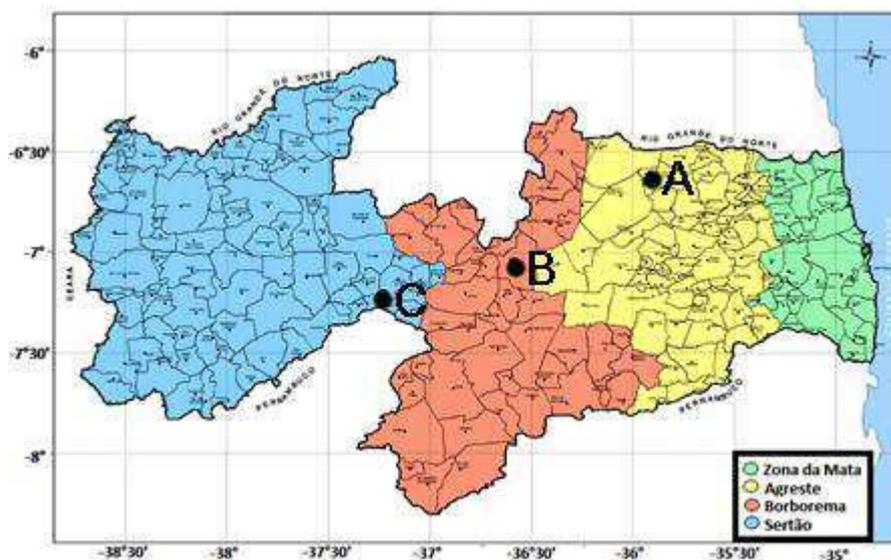


Figura 2. Mesorregiões do Estado da Paraíba e pontos de medições: A-Damião, B-Juazeirinho e C-Teixeira (Adaptado, AESA – 2016)

Em relatório da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA-PB), é apresentada uma caracterização fisiográfica e hidroclimática do Estado da Paraíba, com uma descrição detalhada sobre as quatro mesorregiões paraibanas: Zona da Mata, Agreste, Borborema e Sertão (AESA, 2016).

Além dos dados observados, foram utilizados para comparação, dados diários de reanálises de 6 em 6 horas, do ERA-Interim correspondente ao período de estudo. Esses dados apresentam resolução espacial de $0,75^\circ \times 0,75^\circ$, fornecidos pelo *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), descritos em Uppala *et al.* (2005); Dee *et al.* (2011).

Os principais sistemas meteorológicos, que atuam na Paraíba são: ZCIT, DOLs, VCANs, Linhas de Instabilidade e Brisas Marítima (Terrestre) (FERREIRA e MELLO, 2005).

O modelo BRAMS foi configurado (*descrito no item 3.2*) para simular o mesmo período da verificação.

3.4.2. Ajuste dos dados

Feddersen *et al.* (1999) e Lima *et al.* (2012) sugeriram um ajuste nos dados extraídos do modelo numérico, que visa a diminuição de erros sistemáticos em modelos de previsão sazonais, tomando como base a média e o desvio padrão dos dados simulados e observados. A equação que representa em cada ponto de grade do modelo esse ajuste é:

$$\phi_{ci} = (\phi_i - \phi_{im}) \frac{\sigma_o}{\sigma_i} + \phi_{om} \quad (3)$$

em que: ϕ_i é o valor estimado; ϕ_{im} média dos dados estimados; σ_o desvio-padrão da série observada; σ_i desvio-padrão da série estimada e por último, ϕ_{om} média da série observada.

3.4.3. Índices Estatísticos

Os dados de vento apresentam variações durante o dia, assim como, variações de dia para dia ao longo do mês. Portanto, é necessário que esses dados (Observado, modelo BRAMS e ERA-Interim) sejam comparados através de índices estatísticos (LIMA *et al.*, 2012). Então, seguiu-se com as equações utilizadas para o cálculo dos índices estatísticos que são: Viés, o Erro Absoluto Médio (EA), a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e a Correlação de Pearson (r), em que ϕ_i representa o valor simulado e ϕ_{oi} ao valor observado.

Viés - Parâmetro que relaciona a série simulada com a observada. Os mesmo apresentam valores positivos, que indicam superestimação dos dados observados, assim como, negativos, para casos de subestimação dada na Equação (4).

$$\text{Viés} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_{oi}) \quad (4)$$

Erro Absoluto Médio (EAM) - Usado para resolver a limitação do Viés, que implica numa anulação dos desvios pontuais (positivos e negativos) quando somados. (DEVORE, 2006). Quanto mais próximo de zero, maior será a relação entre os valores simulados e observados, vista na Equação (5).

$$\text{EAM} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\phi_i - \phi_{oi}| \quad (5)$$

A Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) - É geralmente utilizada para avaliar a exatidão das simulações apresentando valores do desvio erro nas mesmas grandezas dos dados reais (HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011), dispostos na Equação (6):

$$\text{REQM} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_{oi})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Correlação de Pearson (r) - O coeficiente de correlação (r) entre duas variáveis X e Y é obtido pela equação (7) proposta por Morettin (1991), como expressa na Equação 7:

$$r = \frac{\sum(\Phi_i - \bar{\Phi}_i)(\Phi_{oi} - \bar{\Phi}_{oi})}{\sqrt{\sum(\Phi_i - \bar{\Phi}_i)^2} \sqrt{\sum(\Phi_{oi} - \bar{\Phi}_{oi})^2}} \quad (7)$$

Devore (2006) considera que as correlações estimadas podem assumir classificações que variam de "Muito Fraca" a "Muito Forte" entre os limites estabelecidos nas correlações verificadas na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação do Coeficiente de Correlação de Pearson

Classificação	Intervalos de r
Muito Fraca	0,00 a 0,19
Fraca	0,20 a 0,39
Moderada	0,40 a 0,69
Forte	0,70 a 0,89
Muito Forte	0,90 a 1,00

Fonte: Devore (2006).

Teste *t* de Student - Nas equações (8) e (9) são usadas para verificação da significância estatística foi aplicado o teste *t* de Student com N - 2 graus de liberdade (n = 31) dias. Assumindo significância de 99% ($\alpha = 0,01$) obteve-se $t_c = 2,756$ e $r_c = 0,45$. Para 95% de significância ($\alpha=0,05$), $t_c = 2,045$ e $r_c = 0,35$. Por fim, para 90 % de significância ($\alpha = 0,10$), $t = 1,699$ e $r_c = 0,23$.

$$t_c = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (8)$$

$$r_c = \sqrt{\frac{t^2}{(n-2)+t^2}} \quad (9)$$

3.4.4. A distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é amplamente utilizada entre todas às funções de distribuição de frequência no estudo da estimativa do vento, apresentando melhor representatividade para valores maiores que 5,0 m/s de velocidade do vento (MAATALLAH *et al.*, 2013). As figuras da distribuição de Weibull foram confeccionadas no software *Windographer 2.3* (versão 15 dias). A Função de Distribuição de Probabilidade de Weibull, com dois parâmetros, pode ser expressa como:

$$f(x) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (10)$$

em que: k e c são os parâmetros de forma e escala, respectivamente, e a velocidade do vento V . Os parâmetros k e c podem ser estimados a partir das equações (11) e (12) seguintes:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1,086} \quad (11)$$

$$c = V_m \left(0,568 + \frac{0,433}{k}\right)^{-\frac{1}{k}} \quad (10)$$

Quanto maior o parâmetro de forma (k), mais estreita é a distribuição, mostrando com isso uma menor variabilidade na velocidade do vento. O parâmetro de escala (c) controla o eixo das abscissas na distribuição de dados de velocidades de vento, representando à média. A escolha desses parâmetros pelo meio científicos é dada devido à sua capacidade de explicar com mais precisão a variabilidade da velocidade do vento, medidas em diferentes locais. Assim, os parâmetros c e k são índices usados distinguir os ventos a uma determinada altura, e, estão relacionados à distribuição de frequência da velocidade do vento (ALTUNKAYNAK *et al.*, 2012).

3.5. Parte II - Análise climática de velocidade do vento

Na Figura 3 tem-se uma amostragem da distribuição das centrais geradoras de energia eólica (parques eólicos) em atividades na área de estudo (Figura 1). Quatro localidades foram selecionadas e estão destacadas por um círculo vermelho, para posterior análise da variabilidade temporal da velocidade do vento a 100 metros de altura. Neste sentido, foram obtidas séries temporais das análises geradas pelo modelo BRAMS, para os municípios (Tabela 3) de Trairi, João Câmara, Santa Luzia e Caetés, representativos de cada um dos Estados Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, respectivamente.

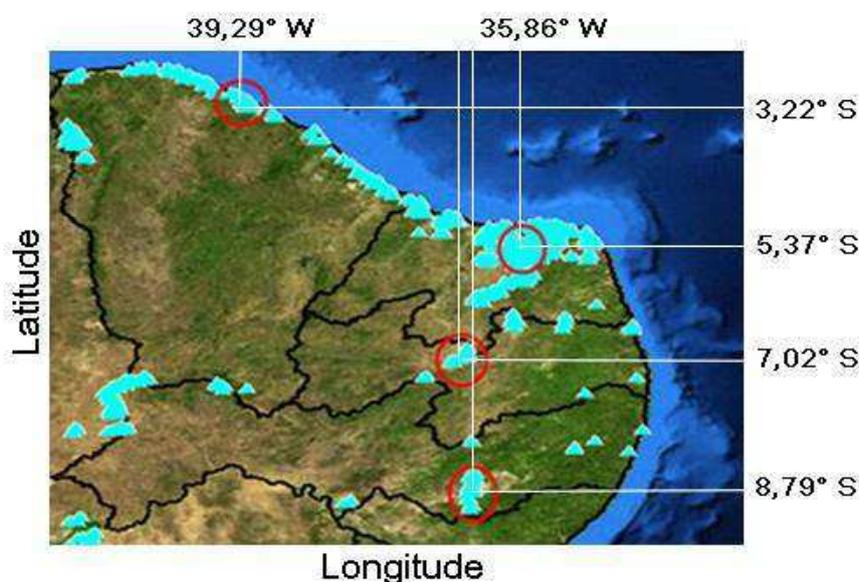


Figura 3. Parques eólicos ativos na área do nordeste setentrional oriental do Brasil. (Fonte: SIGEL, 2016)

De posse dos dados do modelo BRAMS (séries temporais), foram produzidos diagramas Hovmoller, representando a variação anual da média mensal da velocidade do vento para os meses de março, junho, setembro e dezembro, para o período de 1983 a 2013 (30 anos) para as localidades dispostas na Tabela 3.

Trairi se localiza no centro-norte cearense, esse município possui clima Tropical, com chuvas de janeiro a junho, com acumulados de 1.589,0 mm/ano. João Câmara é localizado no Rio Grande do Norte a 203,0 metros de altitude e apresenta clima tropical com estação seca com período chuvoso entre os meses de janeiro a abril e possui média anual de precipitação em torno de 620 mm. Santa Luzia, localizada no Planalto da Borborema na Paraíba a 647,0 metros de altitude possuindo clima semiárido e precipitação em média de 550 mm/ano. Caetés, também localizada no Planalto da

Borborema a uma altitude de 809,0 metros no Estado de Pernambuco, possui clima Tropical com aproximadamente 800,0 mm/ano de precipitação (KÖPPEN, 1948; IBGE, 2016).

Tabela 3 – Cidades selecionadas e respectivas coordenadas geográficas nos quais estão localizados os parques eólicos

Municípios	Latitude	Longitude	Altura
Trairi (CE)	3,221° S	39,290° W	6,0 m
João Câmara (RN)	5,374° S	35,868° W	203,0 m
Santa Luzia (PB)	7,020° S	36,927° W	647,0 m
Caetés (PE)	8,796° S	36,733° W	809,0 m

As informações da Tabela 4 e 5 (ver ANEXO) foram obtidas do NCEP (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>) e referem-se às anomalias de TSM do Pacífico (Tabela 4) e Gradiente Meridional de Anomalia de TSM do Atlântico Tropical (Tabela 5), e foram utilizadas para comparar com as anomalias da velocidade do vento, através de gráficos de barras, para cada localidade e mês março (Tabela 3); a escolha deste mês se deu pelo fato de representar bem a estação chuvosa na maior parte da região em estudo, na qual se caracteriza um período de baixa produção de energia eólica. Neste estudo, às anomalias de velocidade do vento foram considerados fortes quando apresentam valores (em módulo) maiores ou iguais a 1,0 m/s; para anomalias moderadas, entre 0,5 a 0,9 m/s e anomalias menores que 0,5 m/s, foram ditas fracas.

De posse dos dados de 30 anos gerados pelo modelo BRAMS dos meses de março, junho, setembro e dezembro foram elaborados mapas da distribuição espacial da média climatológica da velocidade do vento, desvio padrão e densidade de potencia eólica para a área de estudo (Figura 1). Isso foi feito com o propósito de analisar/testar a eficácia do modelo BRAMS para um longo período, e também de identificar a variabilidade sazonal do vento para cada mês que marca a transição de cada estação do ano, com suas devidas peculiaridades, além da criação de um banco de dados que possibilite estudos futuros.

Para verificar se o modelo BRAMS seria capaz de identificar possíveis relações com as fases dos agentes oceânicos e influências da circulação Grande Escalas, nesta pesquisa, selecionaram-se anos de atuação de El Niño (1998), La Niña (1996), Gradiente Positivo (2004), Gradiente Negativo (1986), El Niño atuando simultaneamente com Gradiente Meridional Positivo (1983 e 1992) e La Niña atuando com Gradiente Meridional Negativo (1985 e 1989). Nesta escolha, observaram-se os

valores trimestrais das anomalias, estimados na área do Niño3, área esta que apresenta forte influência sobre a sobre o NEB (MOURA *et al.*, 2009) maiores ou iguais a 0,5 °C e menores ou iguais a -0,5 °C para que se configurasse El Niño ou La Niña, respectivamente. Similarmente, para o Gradiente Meridional, anomalias maiores ou iguais 0,4 °C e menores ou iguais -0,4 °C para que fosse considerado um padrão de Gradiente Meridional Positivo ou Negativo, respectivamente, na área do Atlântico Tropical. Neste contexto, foram criados mapas com as anomalias da velocidade do vento para o mês de março, referente a cada condição de influência oceânica, conforme os anos selecionados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Parte I: Índices estatísticos

Na Tabela 6 é mostrado o coeficiente de Correlação de Pearson (r), abordando as afinidades entre os dados observados com os simulados pelo BRAMS e reanálises do ERA-Interim. Esses valores ao quadrado representam o coeficiente de Determinação (r^2), que indica, em termos percentuais, o quanto os dados extraídos do modelo BRAMS (59% a 80%) e das reanálises do ERA-Interim (68% a 89%) explicam a variabilidade dos dados reais.

Tabela 6. Coeficientes de Correlação estimados para o período de 01 a 31 de outubro de 2010 da velocidade do vento observada com os obtidos pelo BRAMS e ERA-Interim

Mesorregião da Paraíba	Altura (m)	Correlação	
		BRAMS	Era-Interim
Agreste	10	0,77	0,89
	70	0,86	0,93
	100	0,85	0,92
Borborema	10	0,77	0,82
	70	0,89	0,88
	100	0,87	0,88
Sertão	10	0,85	0,94
	70	0,89	0,94
	100	0,88	0,94

Todas as correlações são significativas a 99% ($\alpha = 0,01$)

Verifica-se que o melhor r^2 obtido para o modelo BRAMS foi para a mesorregião da Borborema na altura de 70 metros com 80% e no Sertão, com 79% e 77%, nas alturas de 70 e 100 metros, respectivamente. As reanálises apresentaram melhor desempenho na mesorregião do Sertão, com 88%, 88% e 89,0% de explicação com relação aos dados observados, para as três respectivas alturas citadas. Os menores valores r^2 verificados foram para as mesorregiões do Agreste e Borborema com 59,0% e 60,0%, respectivamente.

Em todos os casos o modelo BRAMS apresentou coeficientes de Correlação Forte e significativos a 99%. Entretanto, constataram-se nos dados de reanálises do ERA-Interim na mesorregião do Sertão (10, 70 e 100m) e no Agreste (70m e 100m)

correlações classificadas como Muito Forte; nos casos restantes, as correlações foram consideradas Fortes. Todos os casos apresentados (BRAMS e ERA-Interim) com significância de 99% ($\alpha = 0,01$) pelo critério t de Student.

As estatísticas apresentadas na Tabela 7 indicaram que o modelo BRAMS de maneira geral, apresentaram menores erros para a mesorregião da Borborema e Sertão nas alturas em estudo, sendo mais bem representado pela mesorregião do Sertão. Para as do ERA-Interim, a mesorregião da Borborema obteve os menores valores de EAM e REQM. Vale salientar que as estatísticas referentes às reanálises do ERA-Interim (Tabela 7), apresentaram maiores valores em seus erros (Viés, EAM e REQM). Isso se deve ao fato de que as médias diárias foram obtidas com base em informações de 6 em 6 horas, sendo essa uma limitação encontrado nos dados de reanálises. Sendo assim, verificou-se que os dados do modelo BRAMS estão mais concordantes com o valor diário do vento, nas três mesorregiões escolhidas do Estado da Paraíba.

Tabela 7. Índices estatísticos para a velocidade do vento médio diário para as três mesorregiões do Estado da Paraíba

Mesorregião (metros)	BRAMS			Reanálise		
	EAM(m/s)	REQM(m/s)	Viés(m/s)	EA(m/s)	REQM(m/s)	Viés(m/s)
Agreste	0,65	0,77	-0,21	0,74	0,88	-0,73
Borborema (10)	0,74	0,93	-0,16	0,58	0,80	0,11
Sertão	0,66	0,87	-0,10	0,57	0,72	-0,50
Agreste	0,78	0,94	0,03	1,19	1,36	-1,17
Borborema (70)	0,80	1,12	-0,28	1,08	1,38	-0,85
Sertão	0,79	1,00	-0,33	1,04	1,22	-1,03
Agreste	0,86	1,06	-0,30	1,26	1,45	-1,23
Borborema (100)	0,68	0,90	-0,28	0,87	1,19	-0,66
Sertão	0,82	1,05	-0,23	1,45	1,61	-1,45

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as dispersões da média diária do vento dos valores observados em função dos gerados pelo BRAMS e por reanálise ERA-Interim. A linha tracejada representa um ajuste perfeito com coeficiente de correlação um.

Sobre a Figura 4 é observado que para todos os casos, com exceção da mesorregião do Agreste na altura de 70 metros (Viés positivo), houve uma subestimação dos dados no modelo BRAMS (Viés negativo).

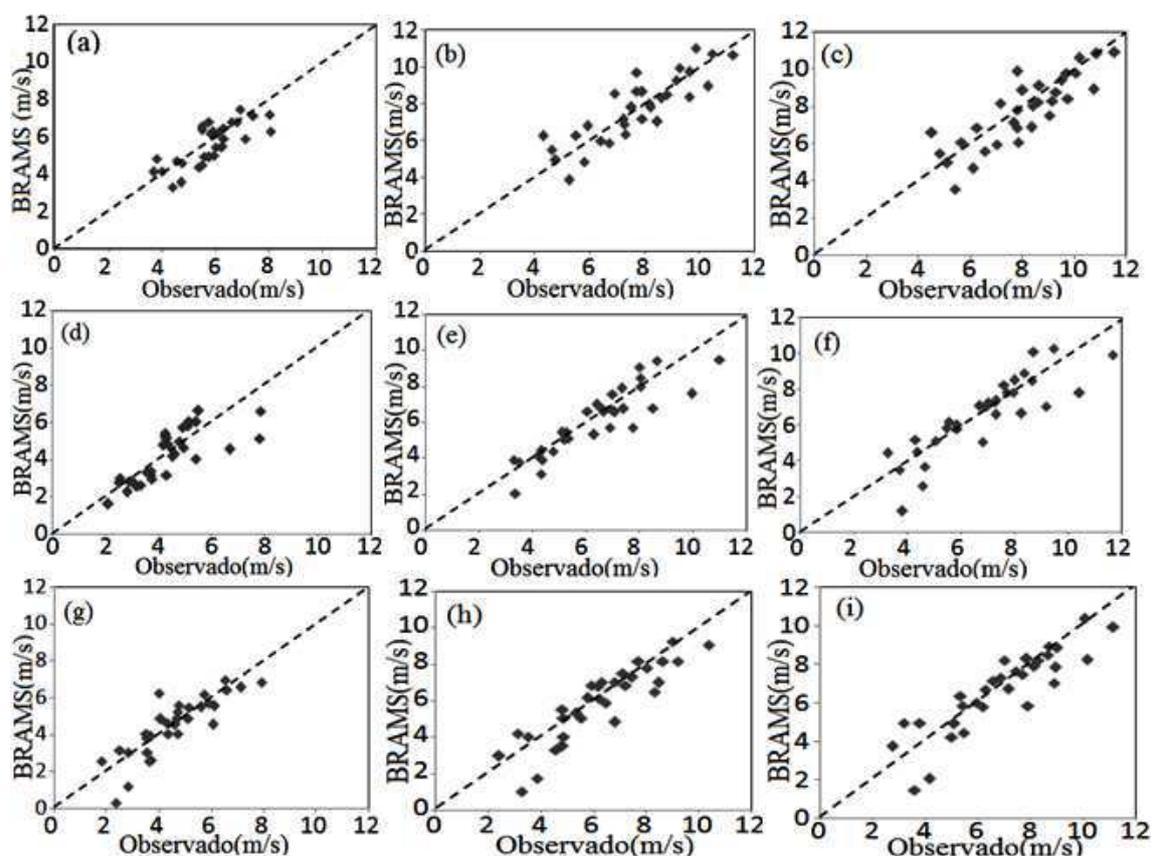


Figura 4. Dispersão dos dados observados em função dos simulados pelo modelo BRAMS para o Agreste a) 10m e b) 70m c) 100m; Borborema d) 10m e e) 70m f) 100m e Sertão g) 10m e h) 70m i) 100m

Para os dados do era-Interim (Figura 5) é verificado que apenas na mesorregião da Borborema (70 metros), houve uma superestimação nos dados (Viés positivo). Nos demais casos são constatados que os dados de reanálise subestimaram os dados observados (Viés negativo).

Isso pode ser visto na Tabela 7 em que foram estimados os valores dos Vieses que indicam orientação média do desvio com relação aos dados reais. Assim, um Viés com sinal positivo considera-se que existiu uma superestimação; do contrário a isso, tem-se uma subestimação dos dados simulados em relação aos observados.

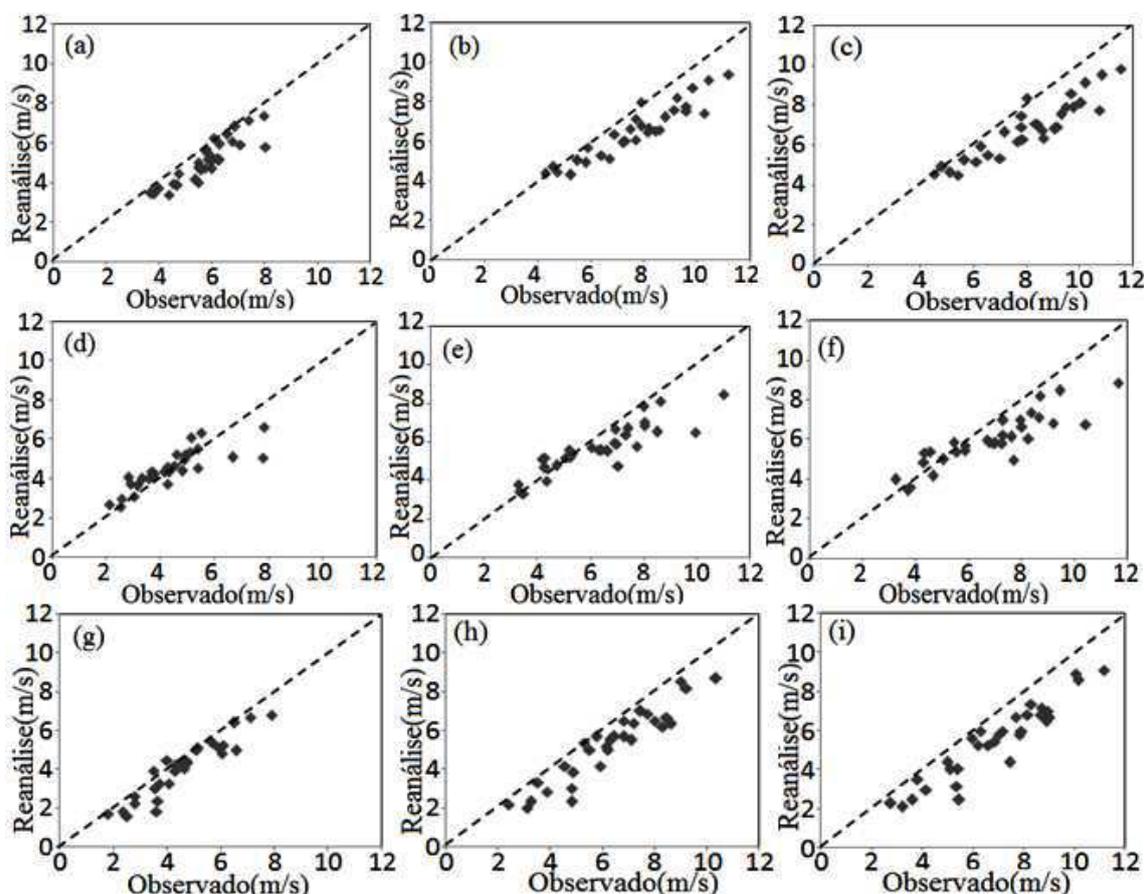


Figura 5. Dispersão dos dados observados em função dos obtidos pelo ERA-Interim para o Agreste a) 10m e b) 70m c) 100m; Borborema d) 10m e e) 70m f) 100m e Sertão g) 10m e h) 70m i) 100m

4.2 Comportamentos temporais das simulações e reanálises

De acordo com as Figuras 6, 7 e 8 é possível verificar o comportamento da média diária da velocidade do vento, no período de 1 a 31 de outubro de 2010, para as mesorregiões do Agreste, Borborema e Sertão, respectivamente. Nelas, também, observa-se uma comparação entre o vento observado com o vento simulado pelo modelo BRAMS e os gerados pelo ERA-Interim para as alturas de 10, 70 e 100 metros. Verifica-se um padrão comum às três figuras, em que inicialmente a velocidade oscila em torno de um valor constante até aproximadamente o dia nove de outubro de 2010, em seguida apresenta uma tendência crescente até por volta do dia 16 e em seguida essa tendência torna-se decrescente até atingir valores mínimos em torno do dia 21 e posteriormente tende a retornar aos valores iniciais.

Esse padrão apresentado é consequência da atuação de uma Linha de Instabilidade que influenciou a intensificação dos ventos sobre o Estado da Paraíba. Nas

imagens do Satélite GOES 12R, apresentadas nas Figuras 9 (a, b), mostram às condições atmosféricas (nebulosidade), vistas no início e fim do intervalo em que ocorre o aumento e decréscimo da velocidade do vento.

Ressalta-se que tanto os dados gerados pelo BRAMS quanto os do ERA-Interim reproduzem coerentemente, dentro dos erros apresentados, a série temporal do período estudado para os três níveis de altura e para as três mesorregiões. Destacam-se a capacidade que tiveram os modelos BRAMS e ERA-Interim em reproduzir as tendências crescente e decrescente observadas na série diária do vento para o mês em estudo.

Os valores da velocidade do vento a 10 metros estiveram entre um máximo de 8,1 e um mínimo de 3,7 m/s para Agreste, 7,9 e 2,1 m/s para a Borborema e 7,9 e 1,8 m/s para o Sertão, entre os dias 15 a 24 de outubro. Para os níveis de 70 e 100 metros os valores são mais intensos e está de acordo com a dinâmica da Camada Limite Planetária formulado pelo perfil logaritmo do vento.

A subestimativa do vento observado pelo BRAMS e ERA-Interim, apontado pelas análises estatísticas, é verificado no comportamento das séries diárias para o mês de outubro de 2010. Observa-se que na maioria dos dias o valor diário do vento observado é superior aos obtidos através do BRAMS e ERA-Interim. Essa subestimativa é mais evidente para o ERA-Interim e certamente está relacionada à resolução temporal do modelo, já que, o valor indicado para um ponto da grade representa a média espacial correspondente ao elemento de grade.

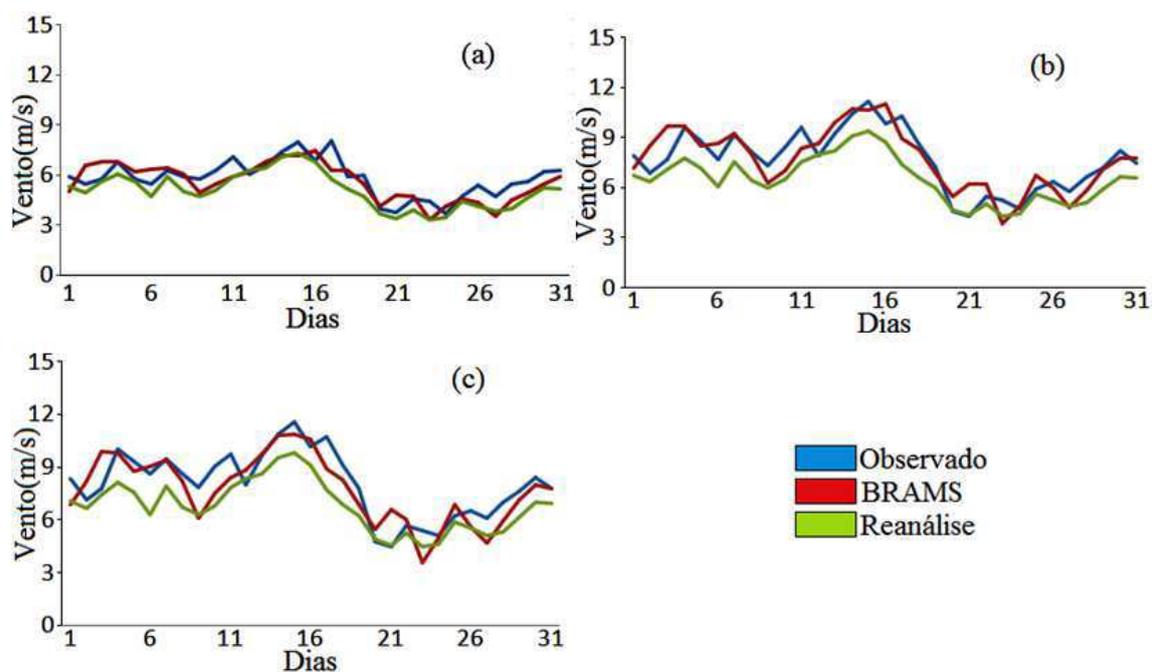


Figura 6. Variação diária do vento para o mês de outubro de 2010 no Agreste para às respectivas alturas de: (a) 10m, (b) 70m e (c) 100m

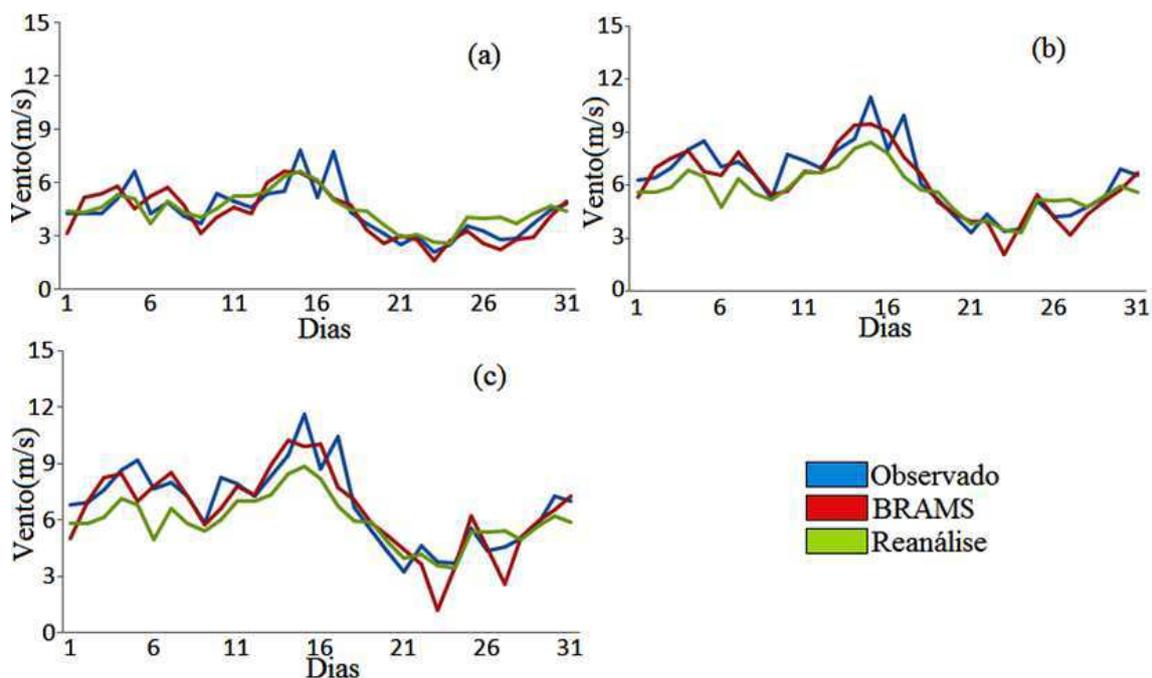


Figura 7. Variação diária do vento para o mês de outubro de 2010 no Borborema para às respectivas alturas de: (a) 10m, (b) 70m e (c) 100m

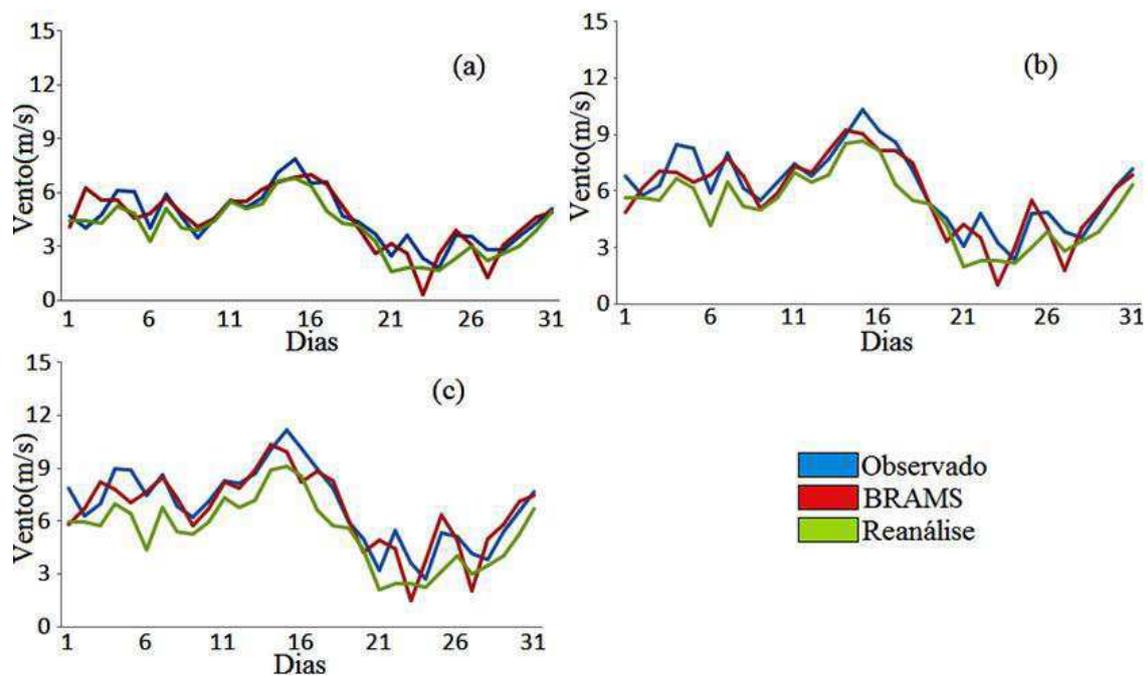


Figura 8. Variação diária do vento para o mês de outubro de 2010 no Sertão para às respectivas alturas de: (a) 10m, (b) 70m e (c) 100m

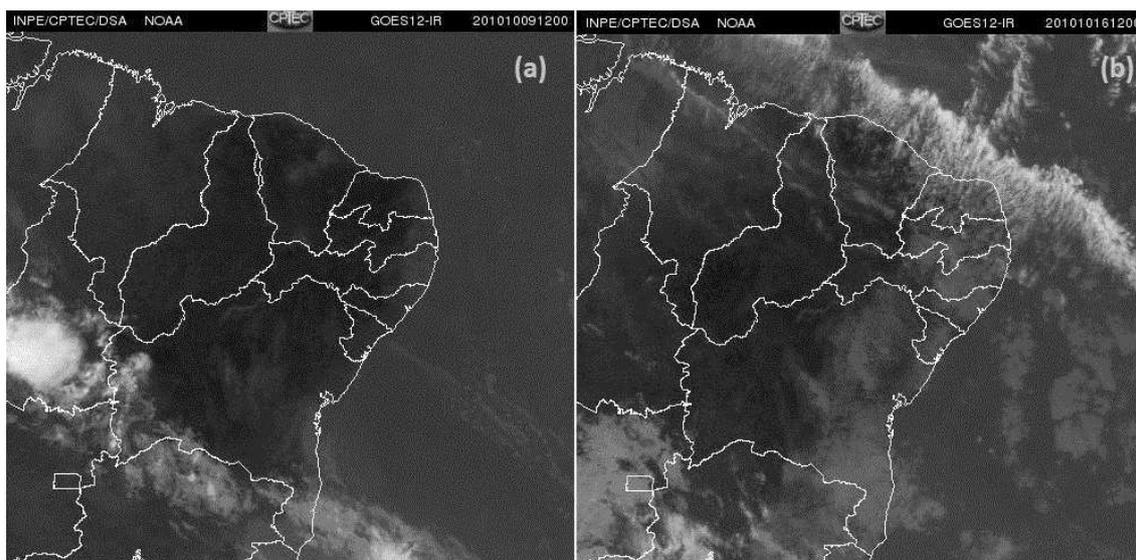


Figura 9. Imagens do satélite GOES a) dia 09/10/2010 e (b) 16/10/2010; Ambas às 12:00 UTC (Fonte: CPTEC/INPE)

4.3. Distribuição de Weibull

As Figuras 10 a 18 representam a distribuição de frequência de Weibull para a velocidade média do vento para os dados observados, modelo BRAMS e reanálises do ERA-Interim para o mês de outubro e nas localidades descritas no item 3.4.1.

As Figuras 10, 13 e 16 referem-se à altura de 10 m para as três mesorregiões escolhidas. Tem-se que no Agreste e na Borborema as curvas se apresentaram mais alongadas. Para o Sertão, apresentou uma maior variação dos ventos (curva mais achatada). As velocidades mais frequentes estão no intervalo de 5,0 e 6,0 m/s, aproximadamente. A localidade situada na mesorregião do Agreste, nessa altura, apresentou maior frequência nos valores velocidades do vento, entre 6,0 e 8,0 m/s, para os dados observados e o modelo BRAMS.

Nas alturas de 70 m (Figuras 11,14 e 17) e 100 m (Figuras 12,15 e 18) são verificadas entre si uma similaridade nas suas curvas, visto que a velocidade do vento em 70 m e 100 metros podem apresentar mesmas características. Nessas alturas são observados ventos com velocidades mais frequentes entre 7,0 e 8,0 m/s, aproximadamente.

Percebe-se que o modelo BRAMS se ajustou bem a distribuição de Weibull quando comparada a distribuição para os dados observados. Isso mostra uma coerência com as análises obtidas anteriormente, através das correlações estatísticas.

Um resumo do que foi discutido é apresentado na Tabela 8 que exhibe valores dos parâmetros de forma (k) e de escala (c). Os dados observados apresentaram valores de k que variaram entre 3,3 e 6,0 e o parâmetro c , entre 5,0 e 8,8 m/s, aproximadamente. Valores próximos são observados no modelo BRAMS, no qual o parâmetro de escala varia entre 3,0 e 6,1 e o parâmetro de forma entre 4,6 e 8,5 m/s, aproximadamente. Por fim, as reanálises do ERA-Interim apresentaram valores de 3,1 a 5,2 para k , e, de 4,5 a 7,4 m/s para c , aproximadamente. Esses parâmetros no modelo BRAMS, em todos os casos, se aproximaram dos parâmetros estimados para os dados observados, diferentemente dos dados do ERA-Interim.

O BRAMS apresentou melhores resultados, quando comparando a proximidade dos parâmetros de forma e escala, obtidos para os dados observados.

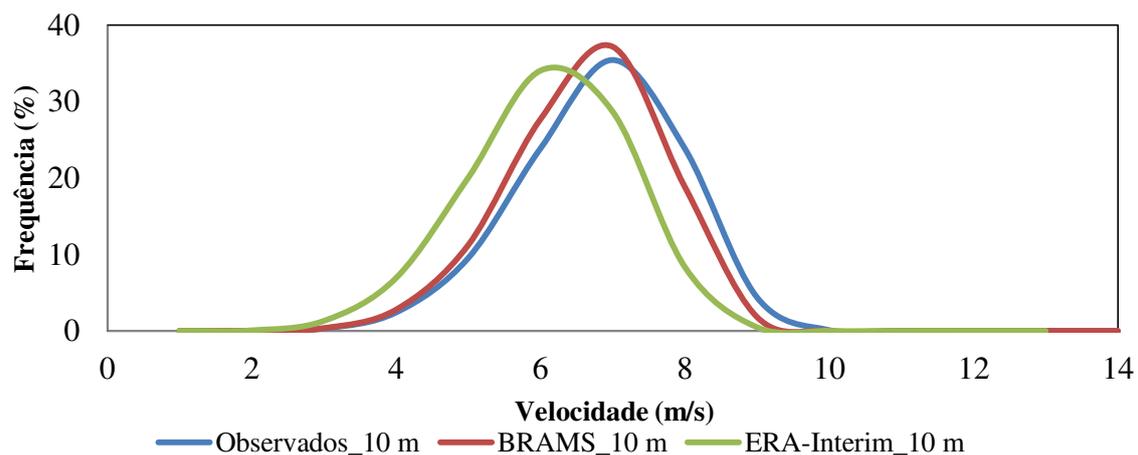


Figura 10 - Distribuição de Weibull para o Agreste a 10 metros de altura

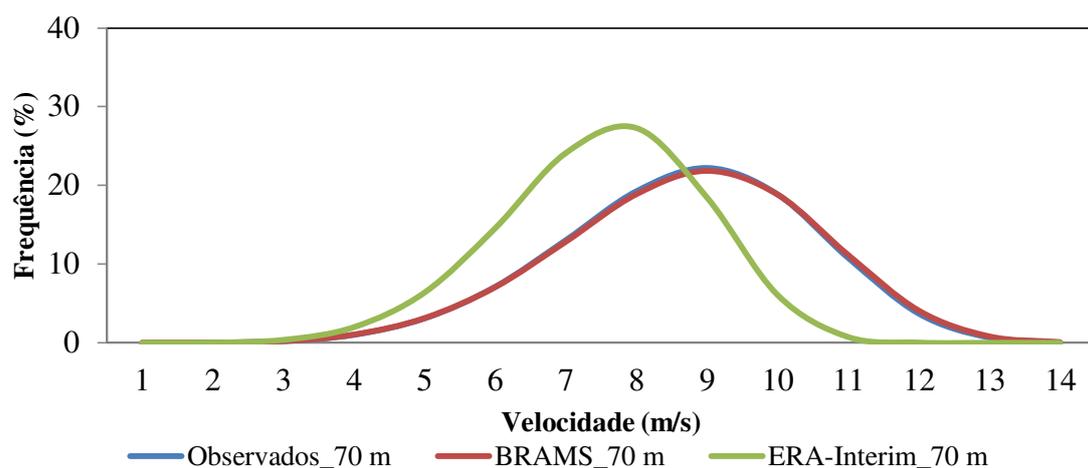


Figura 11 - Distribuição de Weibull para o Agreste a 70 metros de altura

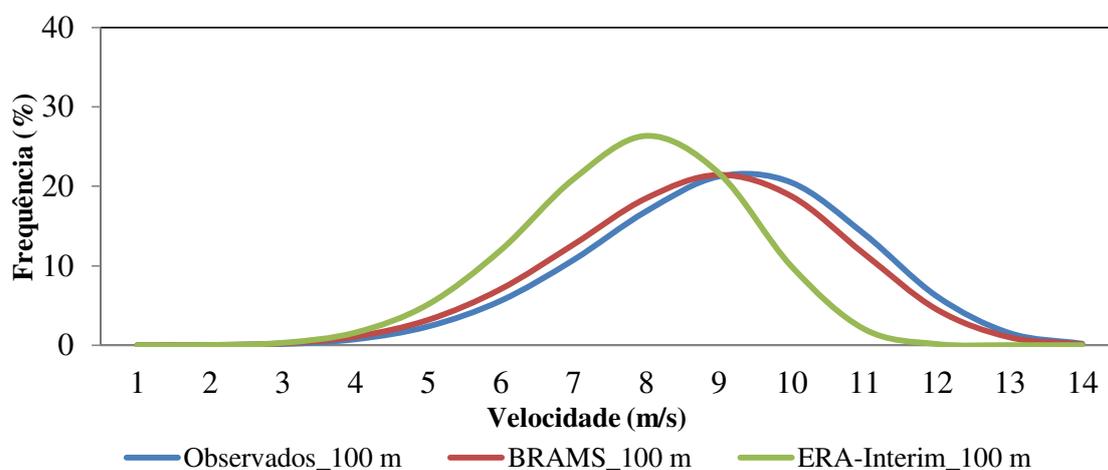


Figura 12 - Distribuição de Weibull para o Agreste a 100 metros de altura

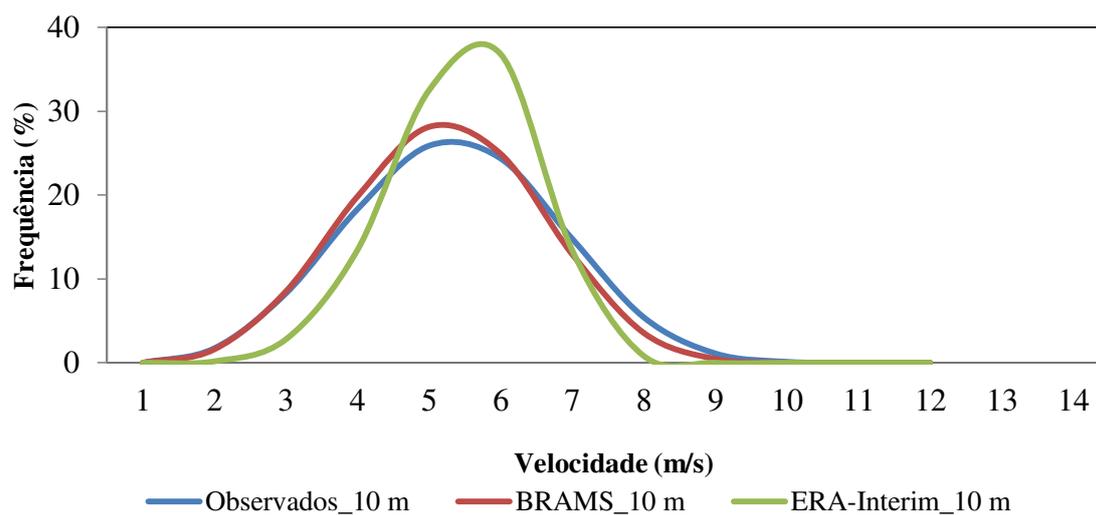


Figura 13 - Distribuição de Weibull para Borborema a 10 metros de altura

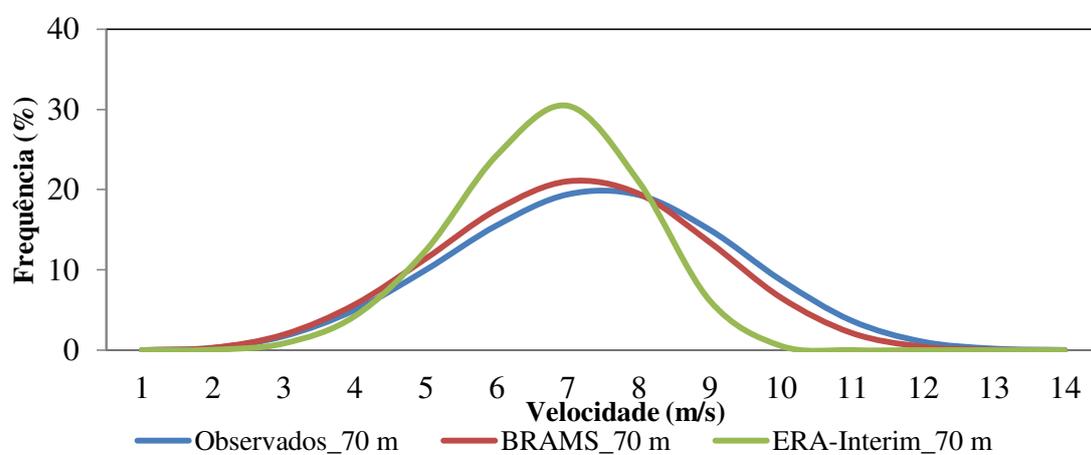


Figura 14 - Distribuição de Weibull para Borborema a 70 metros de altura

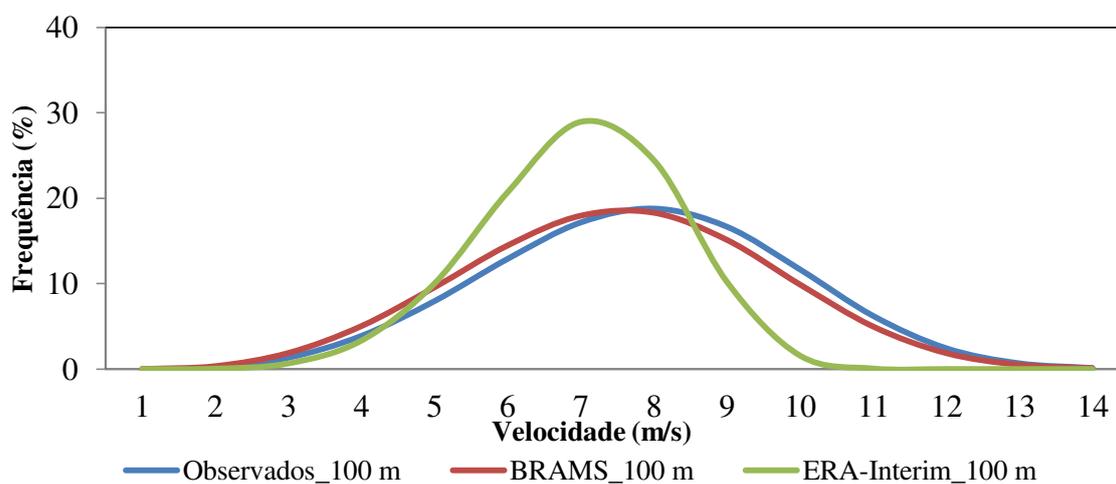


Figura 15 - Distribuição de Weibull para Borborema a 100 metros de altura

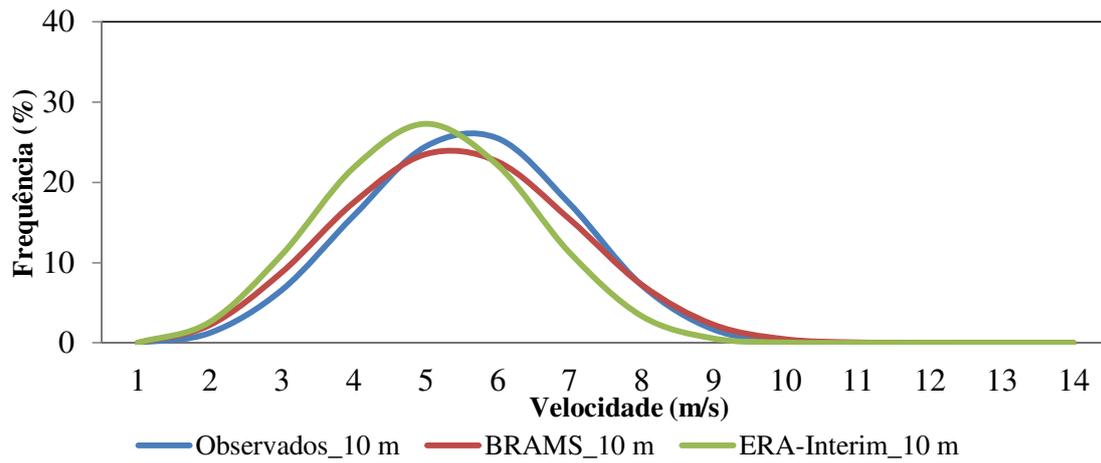


Figura 16. Distribuição de Weibull para o Sertão a 10 metros de altura

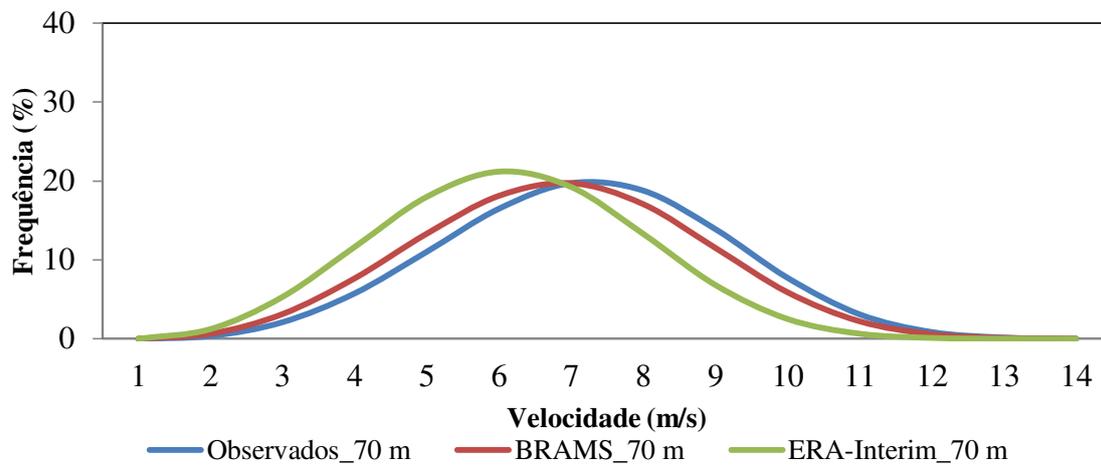


Figura 17. Distribuição de Weibull para o Sertão a 70 metros de altura

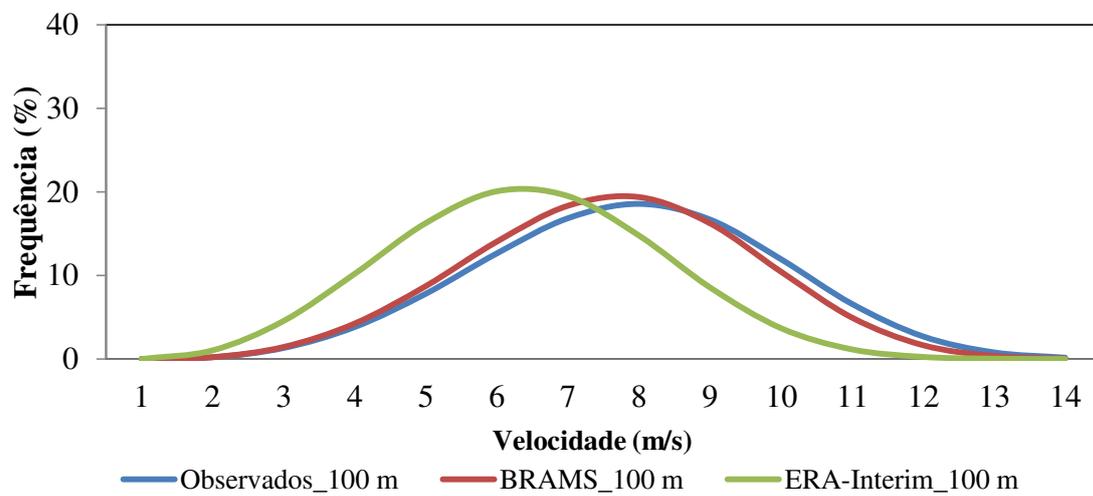


Figura 18. Distribuição de Weibull para o Sertão a 100 metros de altura

Tabela 8. Informações dos parâmetros k e c para as distribuições de Weibull

	Observados		BRAMS		ERA-I.	
	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)
Agreste						
10 m	5,97	6,27	6,08	6,06	5,20	5,53
70 m	4,95	8,38	4,89	8,42	5,20	7,07
100 m	5,06	8,76	4,82	8,46	5,20	7,39
Borborema						
10 m	3,33	4,85	3,48	4,69	5,06	4,86
70 m	3,68	7,07	3,74	6,76	5,03	6,20
100 m	3,71	7,56	3,51	7,26	5,06	6,49
Sertão						
10 m	3,47	5,08	3,07	4,98	3,18	4,53
70 m	3,58	6,90	3,34	6,54	3,16	5,79
100 m	3,69	7,62	3,74	7,34	3,18	6,06

4.4. Densidade de Potência Eólica (DPE)

Na Tabela 9 estão contidos os valores estimados da Densidade de Potência Eólica (DPE) dos dados extraídos das localidades situadas nas mesorregiões do Agreste, Borborema e Sertão, para o mês de outubro de 2010.

Tabela 9. Densidade de potência média mensal (W/m^2) para outubro de 2010.

Agreste		Borborema		Sertão	
Observado (10 m)	122	Observado (10 m)	61	Observado (10 m)	67
BRAMS (10 m)	110	BRAMS (10 m)	54	BRAMS (10 m)	66
ERA-I. (10 m)	84	ERA-I. (10 m)	47	ERA-I. (10 m)	49
Observado (70 m)	294	Observado (70 m)	182	Observado (70 m)	166
BRAMS (70 m)	299	BRAMS (70 m)	159	BRAMS (70 m)	145
ERA-I. (70 m)	175	ERA-I. (70 m)	118	ERA-I. (70 m)	103
Observado (100 m)	336	Observado (100 m)	224	Observado (100 m)	222
BRAMS (100 m)	304	BRAMS (100 m)	202	BRAMS (100 m)	212
ERA-I. (100 m)	200	ERA-I. (100 m)	135	ERA-I. (100 m)	118

Dessa forma, observa-se que os maiores valores verificados foram no Agreste na altura de 100 metros, no quais os dados observados apresentou uma DPE média de 336 W/m^2 , o modelo BRAMS de 304 W/m^2 e o ERA-Interim de 200 W/m^2 . A Borborema e o Sertão apresentaram valores intermediários da DPE em torno da média, para as três alturas apresentadas.

As maiores diferenças da densidade de potência foram apresentadas pelos dados de reanálises do ERA-Interim. O modelo BRAMS apresentaram valores próximos de DPE quando comparados aos dados observados nas três localidades e alturas do estudo. Ressalta-se que os valores estimados a densidade do ar (ρ) para às localidades e período foram: 1,12 Kg/m^3 para o Agreste; 1,11 Kg/m^3 para a Borborema e por fim, 1,07 Kg/m^3 para o Sertão, aproximadamente.

O BRAMS mostrou valores bem próximos a DPE em relação aos dados observados para todas as alturas e mesorregiões, portanto, verifica-se que os valores da DPE para o modelo BRAMS foram maiores aos apresentados pelos dados de reanálises do ERA-Interim.

4.5. Parte II: Variação interanual da velocidade do vento

Nas Figuras 19, 20, 21 e 22 são apresentados gráficos do tipo Hovmöller para os meses de março, junho, setembro e dezembro, respectivamente, das localidades selecionadas (Tabela 3). Esses gráficos representaram a variabilidade interanual da velocidade do vento médio diário a 100 metros de altura, simulados pelo modelo BRAMS, para o período de 1983 a 2013. No eixo das ordenadas apresentam-se os anos e no eixo das abscissas os dias do mês.

Para março, mês de transição da estação do verão para o outono do Hemisfério Sul, tem-se como principal sistema gerador de precipitação a ZCIT cuja posição pode chegar a 5° Sul de latitude, em anos chuvosos (UVO e NOBRE, 1989). Neste contexto, percebe-se que na Figura 19a (Trairi-CE) e Figura 20a (João Câmara-RN) apresentam os menores valores que ficam em torno de 2,0 m/s a 4,0 m/s quando comparadas com as outras localidades. Entretanto, pode-se destacar um aumento na velocidade do vento nos anos de 1983, 1992, 1997, 2007 e 2013. Nas Figuras 21a e 22a para os municípios de Santa Luzia (PB) e Caetés (PE), evidenciam-se as maiores velocidades para o mês de março, com ventos médios entre 8,0 e 12,0 m/s, respectivamente. Porém, nos anos 1986, 1988, 1994, 1996, 2006 e 2011 são frequentes valores baixos da velocidade do vento, entre 2,0 m/s a 4,0 m/s. Certamente as causas para esse aumento (decréscimo) na intensidade do vento estão relacionadas com o aquecimento (resfriamento) superficial dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical (ENOS e Dipolo), tendo influência direta na circulação de grande escala e no regime de ventos locais, como por exemplo, causando o afastamento (aproximação) da ZCIT no período seco (chuvoso) regulando a qualidade da estação chuvosa do outono para a região do NEB (HASTENRATH e GREISCHAR, (1993); SERVAIN, 1991; UVO, 1989).

Verificou-se nas Figuras 19b, 20b, 21b e 22b para o mês de junho que as velocidades médias são um pouco mais intensas que no mês de março, variando no intervalo de 5 a 12 m/s mantendo o mesmo padrão anual. Destacam-se os municípios de João Câmara (RN), Santa Luzia (PB) e Caetés (PE) cujas maiores velocidade estão entre 8 a 12 m/s, provavelmente relacionados com a altitude destas localidades. Esse mês representa a transição da estação do outono para o inverno do Hemisfério Sul. Nesse período, não ocorre atuação da ZCIT devido ao seu afastamento mais para Norte da linha do Equador, porém, ainda atuam nessa região sistemas como os DOLs, Cavados em altos níveis e Brisas que afetam a circulação local (FERREIRA e MELLO, 2005).

Vale destacar setembro como o mês de velocidades do vento mais intensas, quando comparados aos demais meses em estudo. Portanto, seguindo a mesma ordem de localidades, nas Figuras 19c, 20c, 21c e 22c, podem-se observar com mais frequência valores da velocidade do vento máximos entre 9,0 e 12,0 m/s. Observa-se ainda que nos anos de 1989 e 1996 as intensidades do vento foram menores em comparação aos demais anos, provavelmente, pela manutenção das condições de atuação de La Niña e Dipolo Negativo ao longo do ano (Tabelas 4 e 5 em Anexo). Ressalta-se ainda, que o mês de setembro marca o início da estação da primavera no Hemisfério Sul, considerada na literatura como a estação mais seca do NEB (FERREIRA e MELLO, 2005).

Por fim, para o mês de dezembro é verificadas variações da velocidade média dos ventos de 7 a 10 m/s, como observado através das Figuras 19d, 20d, 21d e 22d. Esses valores da velocidade do vento apresentam um decréscimo em relação ao mês de setembro para todas as localidades. Nesse mês, ocorre grande aquecimento da atmosfera devido ao início da estação do verão com predominância de sistemas de alta pressão, embora, seja um mês característico de atuação dos Vórtices Ciclônicos Altos Níveis (FERREIRA e MELLO, 2005).

Dentre as cidades escolhidas, destaca-se o município de Trairi (CE), em que se observou as maiores variações da velocidade do vento, como também, constataram-se ventos menos intensos. Isso se deve pelo fato de Trairi ser localizada ao nível médio do mar não sofreu influência da orografia, quando comparada as outras localidades apresentadas. Problemas de fronteira oceano-continente pode ter influência na estimativa final do vento gerado pelo modelo BRAMS.

Em geral, as influências Oceânicas do Pacífico e Atlântico Tropical caracterizado pelo El Niño/La Niña e Dipolo do Atlântico em fase positiva/negativa são os principais responsáveis por essa variabilidade interanual na velocidade dos ventos para esses municípios e para a região nordeste setentrional oriental como um todo. Quando se verifica um período de La Niña agindo simultaneamente com Dipolo Negativo do Atlântico (gradiente meridional negativo) tem-se um período chuvoso intenso associado com velocidade do vento mais baixas, caso contrário, ocorrerá período chuvoso menos intenso (seco) relacionados com velocidades do vento mais altas.

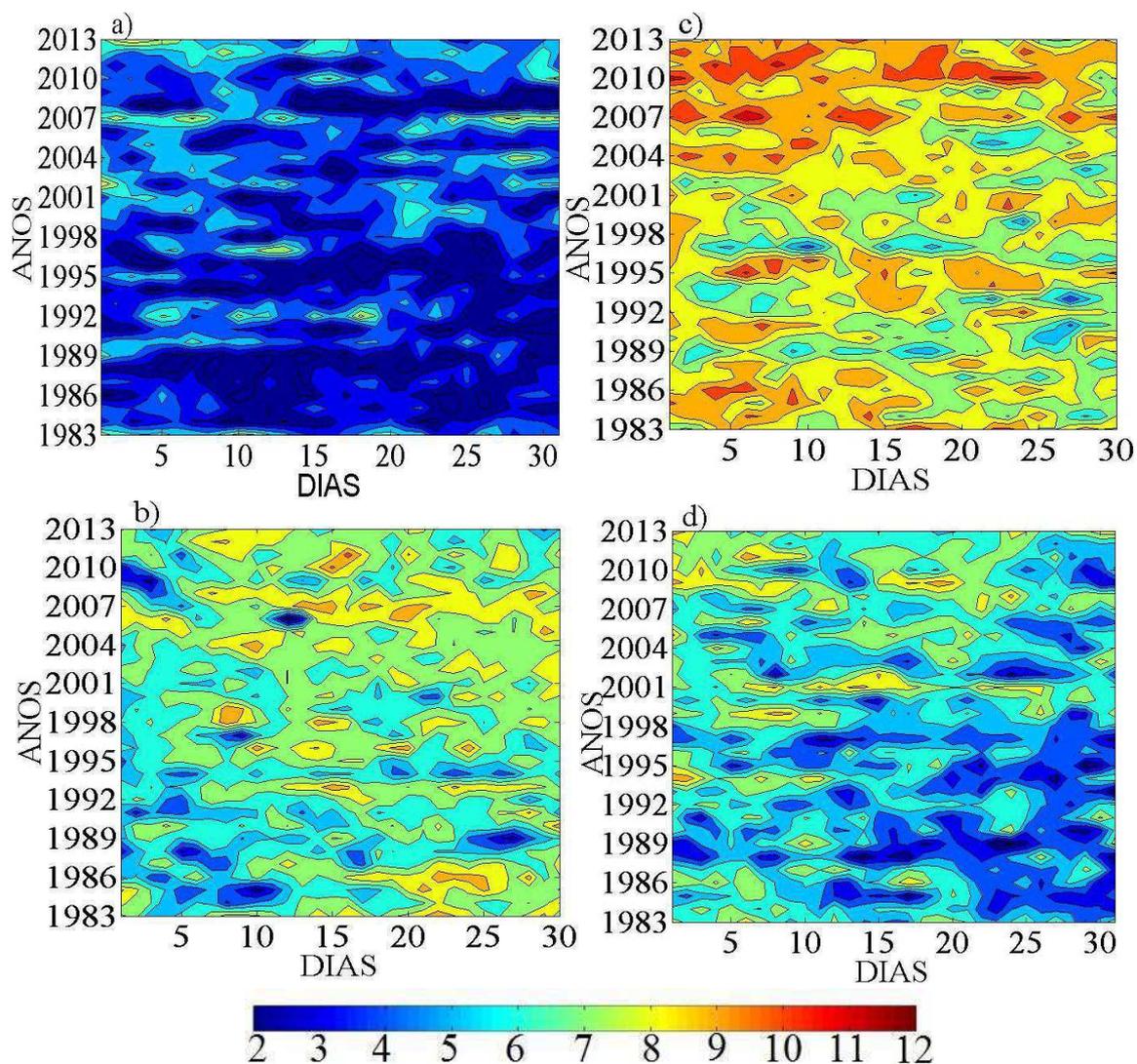


Figura 19. Variação da média diária da velocidade do vento (m/s) para a cidade de Trairi - CE no período de 1983 a 2013 para os meses de: a) março, b) junho, c) setembro e d) dezembro

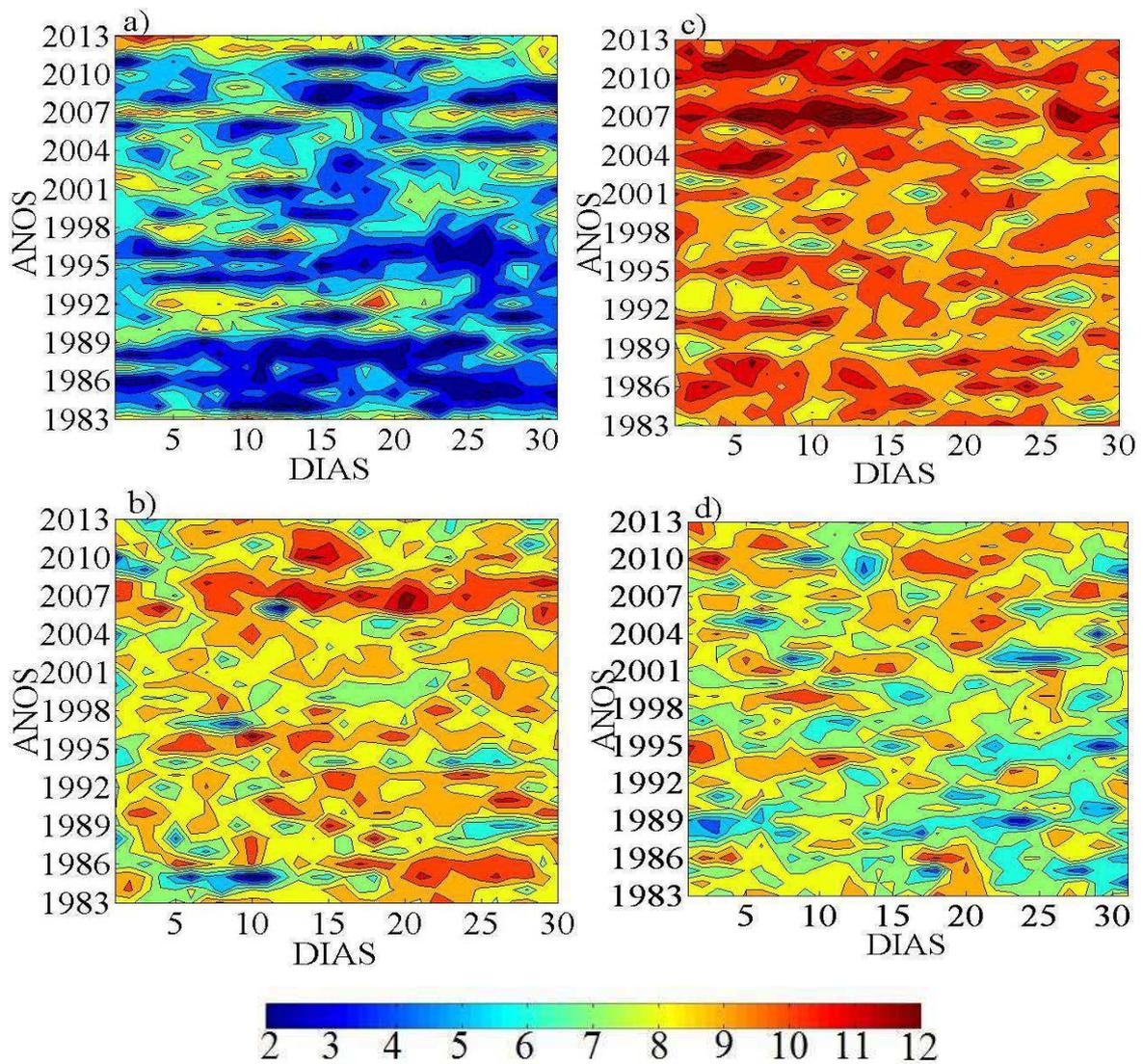


Figura 20. Variação da média diária da velocidade do vento (m/s) para a cidade de João Câmara - RN no período de 1983 a 2013 para os meses de: a) março, b) junho, c) setembro e d) dezembro

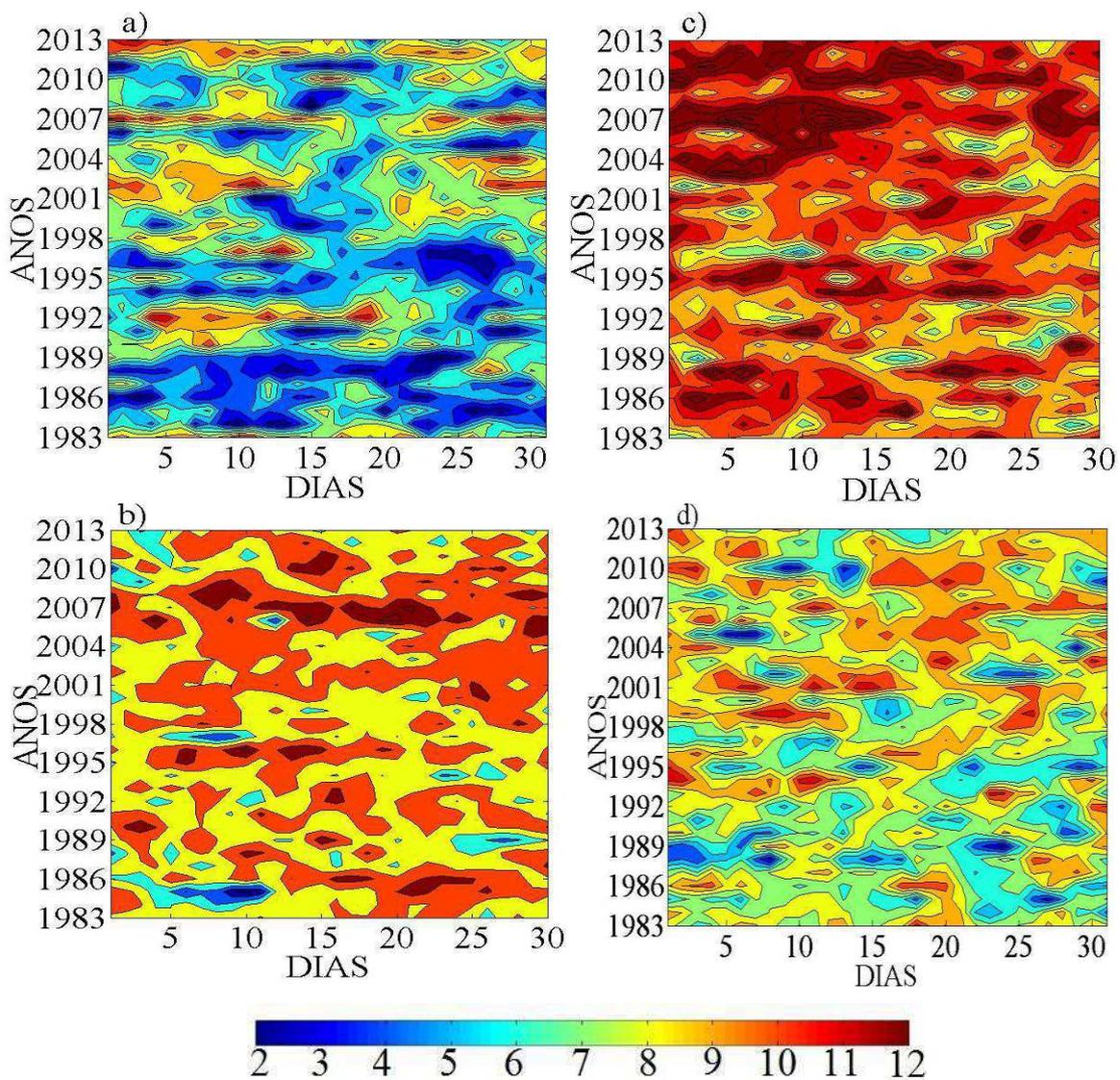


Figura 21. Variação da média diária da velocidade do vento (m/s) para a cidade de Santa Luzia - PB no período de 1983 a 2013 para os meses de: A) março, B) junho, C) setembro e D) dezembro

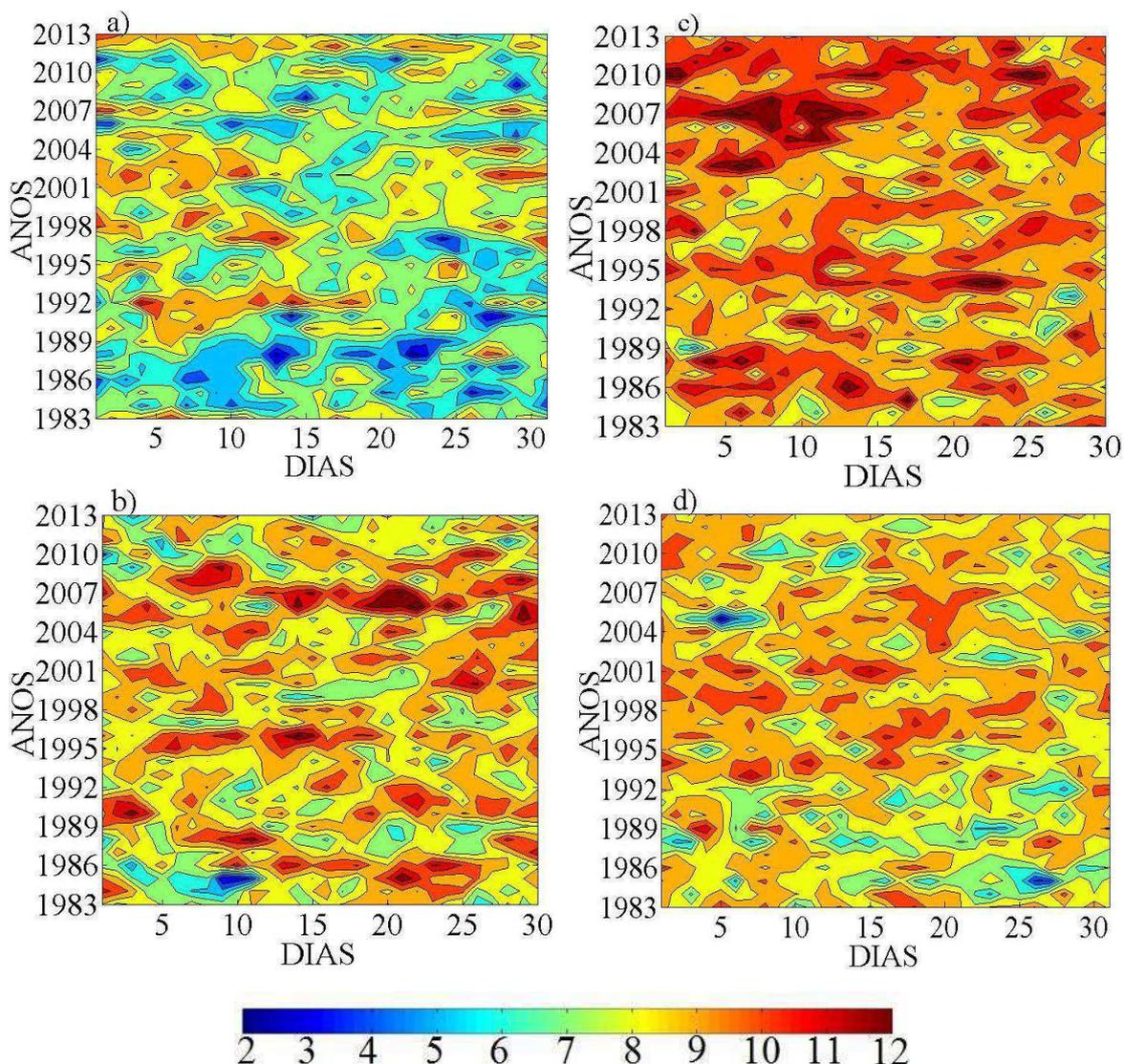


Figura 22. Variação da média diária da velocidade do vento (m/s) para a cidade de Caetés - PE no período de 1983 a 2013 para os meses de: A) março, B) junho, C) setembro e D) dezembro

4.6. Séries temporais das anomalias da velocidade do vento e TSM

As Figuras 23, 24, 25 e 26 apresentam as anomalias da velocidade média do vento para o mês de março, estimadas mediante o modelo regional BRAMS e comparados com anomalias trimestrais (MAM) das TSMs (Tabelas 4 e 5 em Anexo) para cada localidade escolhida (Tabela 3).

Com relação às anomalias oceânicas positivas, destacam-se os anos de 1983, 1992 com ocorrência simultânea de El Niño e Gradiente Meridional Positivo; 1993 e 1998 com atuação de El Niño e, finalmente, 1997, 2004, 2010 e 2013 com a ocorrência

de Gradiente Meridional Positivo. Por outro lado, para as anomalias oceânicas negativas evidenciam-se os anos 1985 e 1989 com atuação simultânea de La Niña e Gradiente Meridional Negativo; 1988 196 e 1999 com atuação de La Niña e por fim, 1984, 1986, 1991, 1994, 2008 e 2009 com atuação de Gradiente Meridional Negativo.

São observados valores fortes de anomalias positivas da velocidade do vento para as localidades: Trairi (CE), variando de 1,2 a 2,2 m/s (Figura 23); João Câmara (RN) de 1,2 a 3,0 m/s (Figura 24); Santa Luzia (PB) de 1,0 a 3,1 m/s (Figura 25) e Caetés (PE) de 1,1 a 1,5 m/s (Figura 26). Essas anomalias fortes no vento se verificam em anos de anomalia positivas da TSM, ressalta-se que em anos de atuação simultânea de El Niño e Gradiente Meridional Positivo a intensidade do vento se mostrou bem mais intensa que a média para a maioria das localidades.

De maneira similar, verificam-se valores fortes de anomalias negativas da velocidade do vento para as localidades: Trairi, de -1,1 e -1,5 m/s (Figura 23); João Câmara de -1,3 a -2,3 m/s (Figura 24); Santa Luzia de -1,0 a -2,0 m/s (Figura 25) e Caetés de -1,0 e -1,4 m/s (Figura 26). Essas anomalias negativas indicam que a velocidade do vento esteve abaixo da média e bem mais nos casos de atuação simultânea da La Niña e Gradiente Meridional Negativo.

Eventualmente observam-se anomalias fortes da velocidade do vento em anos de anomalias de TSM de moderada a fraca, possivelmente induzida pela atuação de sistemas de menor escalas (CCMs, LIs e VCANs).

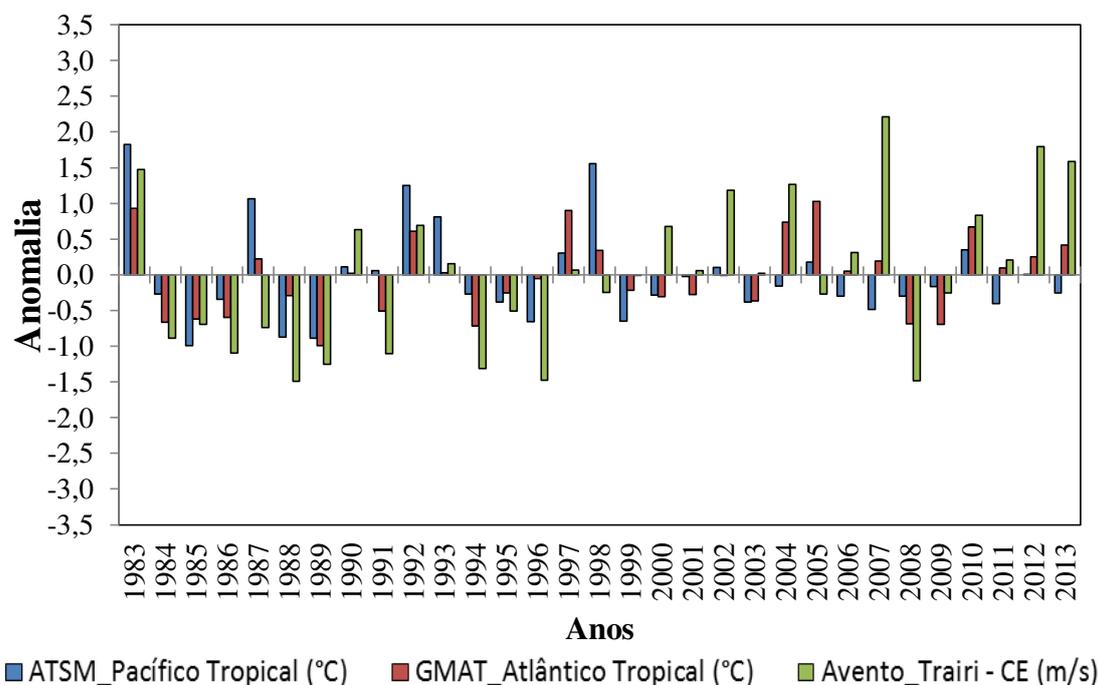


Figura 23. Série temporal da anomalia da velocidade do vento (março) e anomalias de TSM média do trimestre (março-maio) para Trairi – CE

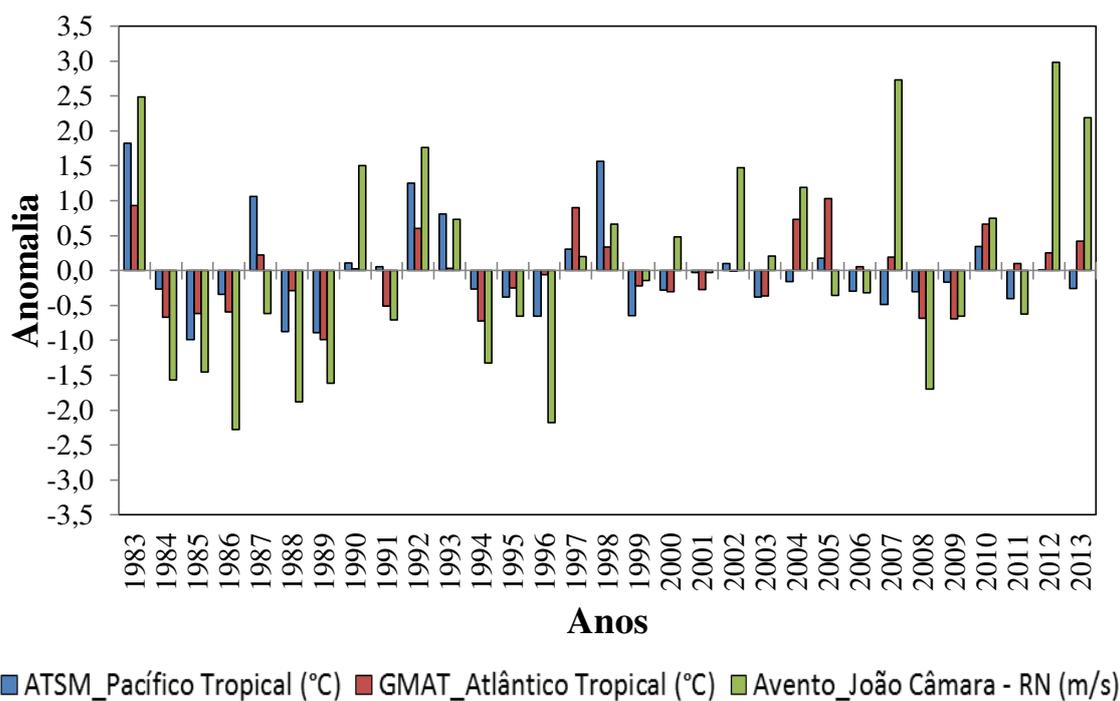


Figura 24. Série temporal da anomalia da velocidade do vento (março) e anomalias de TSM média do trimestre (março-maio) para João Câmara - RN

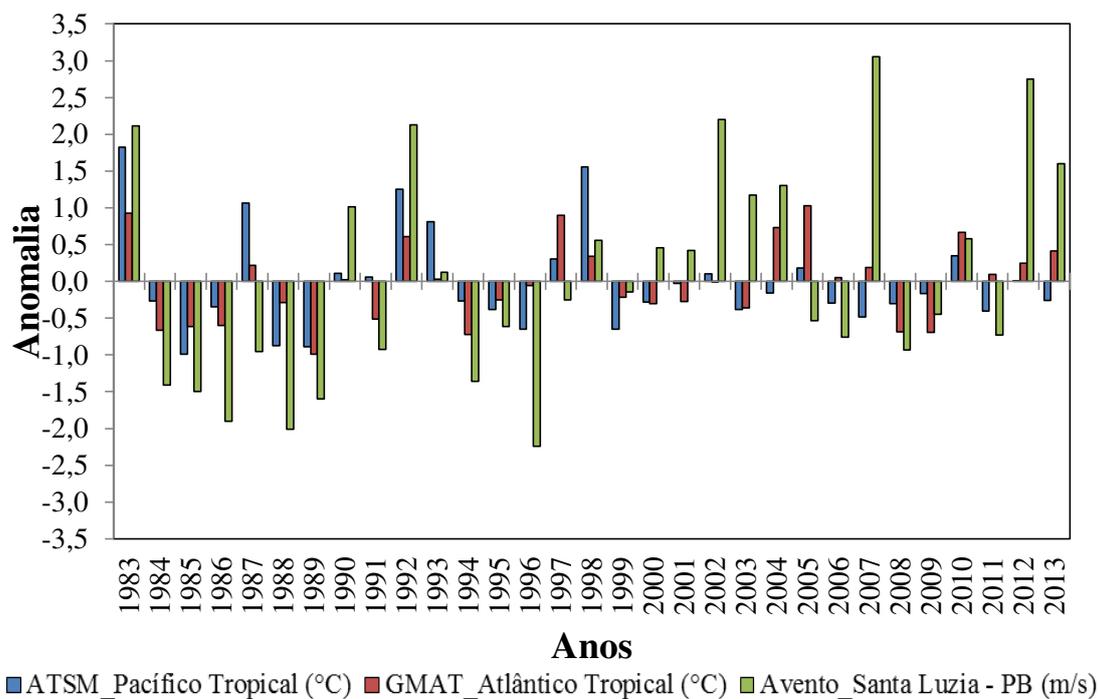


Figura 25. Série temporal da anomalia da velocidade do vento (março) e anomalias de TSM média do trimestre (março-maio) para Santa Luzia - PB

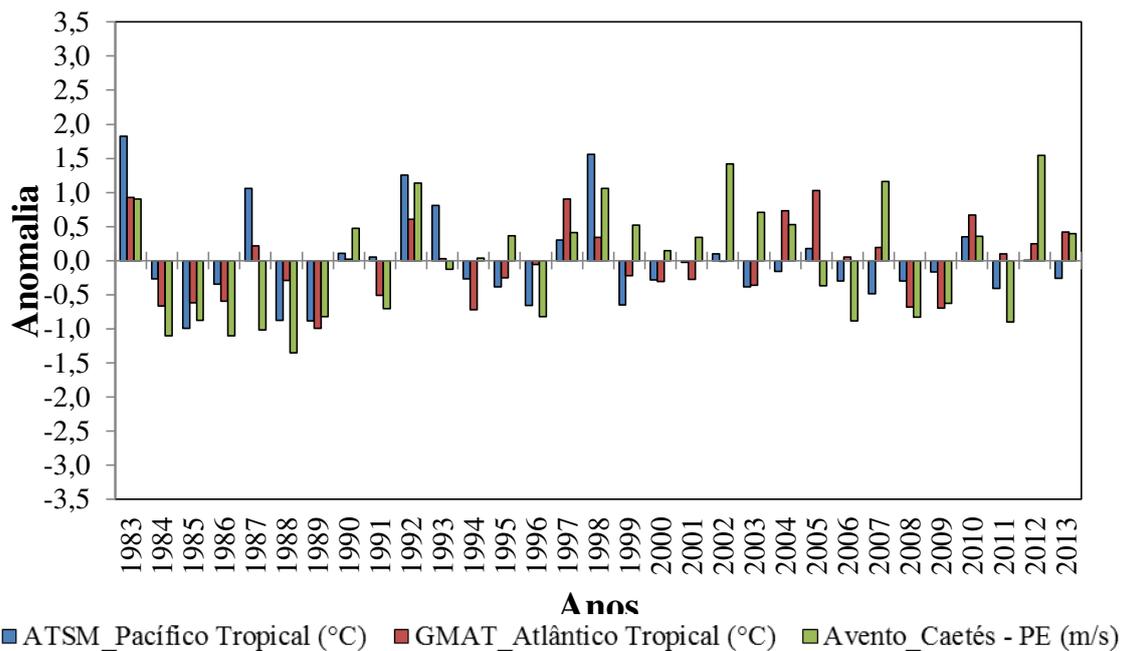


Figura 26. Série temporal da anomalia da velocidade do vento (março) e anomalias de TSM média do trimestre (março-maio) para Caetés - PE.

4.7. Variação espacial da climatologia dos ventos

As Figuras 27 e 28 representam a variação espacial da climatologia do vento e do desvio-padrão para o período de 1983 a 2013 no nordeste setentrional oriental, geradas a partir de dados provenientes do modelo BRAMS, para os meses de março e junho, que apresentam padrão de vento menos intenso nas cores azul e amarelo, para ventos mais intensos. Todas as figuras da climatologia possuem escalas de variações entre 4,0 e 12,0 m/s e o Desvio Padrão entre 1,0 e 2,0 m/s para a altura de 100 metros.

Nas Figuras 27a e 27c tem-se a climatologia da velocidade dos ventos para os meses de março e junho, respectivamente. Para março verificam-se valores de velocidade do vento entre 4,0 e 8,0 m/s. Nas Figuras 27b e 27d, observam-se os desvios padrão mais elevados são observados sobre o Planalto da Borborema e a Oeste do Ceará, coincidindo com os as áreas nas quais de velocidade média do vento é mais intensa. Padrão semelhante é observado para o mês de junho, entretanto, percebe-se intensificação dos ventos na faixa do Planalto da Borborema, que abrange aproximadamente o Sertão dos Estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. Também são observados ventos da ordem de 6,0 a 8,0 m/s em todo litoral, assim como, em áreas do Oeste do Ceará e Pernambuco.

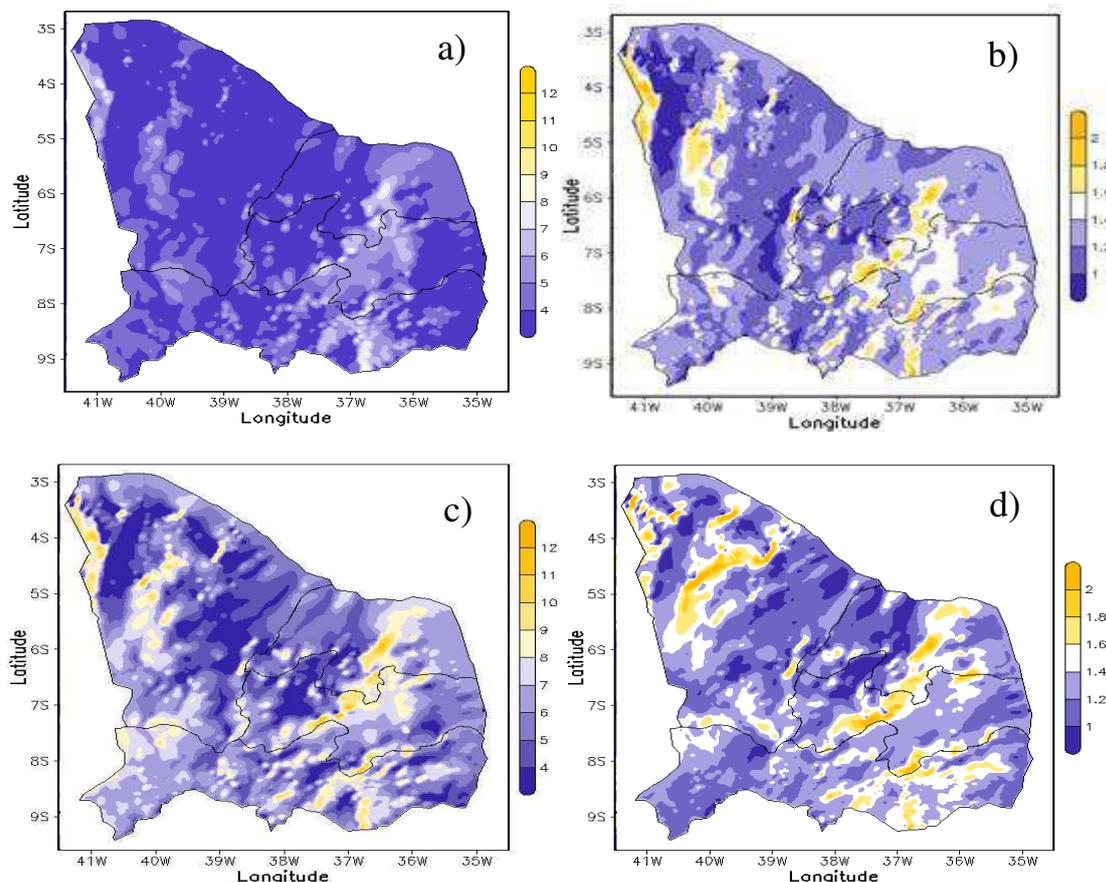


Figura 27. Distribuição espacial da climatologia dos ventos (m/s) para os meses de: a) março; c) junho. Desvio padrão, para os meses de: b) março; d) junho

O comportamento da variação espacial da velocidade do vento parece está bem relacionado com a topografia da região, visto que apresenta um padrão semelhante para os meses de março e junho. Portanto, áreas de topografia mais elevadas estão associadas a ventos mais intensos e maiores desvios padrão. No litoral, para o mês de junho, os ventos se mostraram intensos, no entanto, o desvio padrão permaneceu da mesma ordem do que foi verificado para março, exceto em áreas isoladas no norte do Ceará e Rio Grande do Norte.

Efeitos meteorológicos também contribuem para a variabilidade espacial e temporal do vento e são modulados pelas condições oceânicas de grande escala. Neste período do ano tem-se como sistemas atuantes a ZCIT, DOLs, além de sistemas de mesoescala (FERREIRA e MELLO, 2005) que acarretam modificação no balanço de energia e massa na superfície, induzido instabilidade na atmosfera associada à convergência nos baixos níveis com implicação direta na velocidade do vento. Entretanto, esses sistemas atuam com maior ou menor intensidade de acordo com as condições da TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical, que altera a circulação de grande escala (UVO, 1989; SERVAIN, 1991; ARAGÃO, 1998; SOUZA e NOBRE, 1998).

A distribuição espacial da média climatológica da velocidade do vento para os meses de setembro e dezembro são apresentadas através das Figuras 28a e 28c, respectivamente.

Para o mês de setembro (Figura 28a) a média climatológica da velocidade do vento, apresentou valores variados e mais intensos quando comparados aos meses de março e junho. Percebe-se que os maiores valores da velocidade do vento, entre 7,0 e 12,0 m/s, em grande parte da área do nordeste setentrional oriental nas quais correspondem às áreas de maiores altitudes. Já na parte leste do Ceará, oeste do Rio Grande do Norte e Paraíba e sudeste do litoral pernambucano, observaram-se valores de velocidade entre 3,0 e 5,0 m/s. setembro (Figura 28b) apresentou os menores desvios padrão dentre todos os meses do estudo, em que praticamente toda a área apresentou valores entre 1,0 e 1,2 m/s. Pontos específicos no interior do Ceará e Paraíba apresentaram maiores variações com cerca de 1,8 m/s. Esse fato se justifica por ser setembro mês característico de ausência de sistemas geradores de precipitação na região e portanto, de atmosfera mais estável e por conseguinte menores desvios padrão.

A Figura 28c resulta na climatologia da velocidade do vento (m/s) estimada pelo modelo BRAMS para o mês de dezembro. É observado que grande área do nordeste setentrional oriental apresentou valores de velocidade do vento entre 4,0 e 8,0 m/s. Sobre o Planalto da Borborema e oeste do Ceará, observa-se valores da velocidade do vento acima de 7,0 m/s. A exemplo dos meses analisados anteriormente, a influência topográfica na distribuição espacial da climatologia do vento persiste (Figura 1).

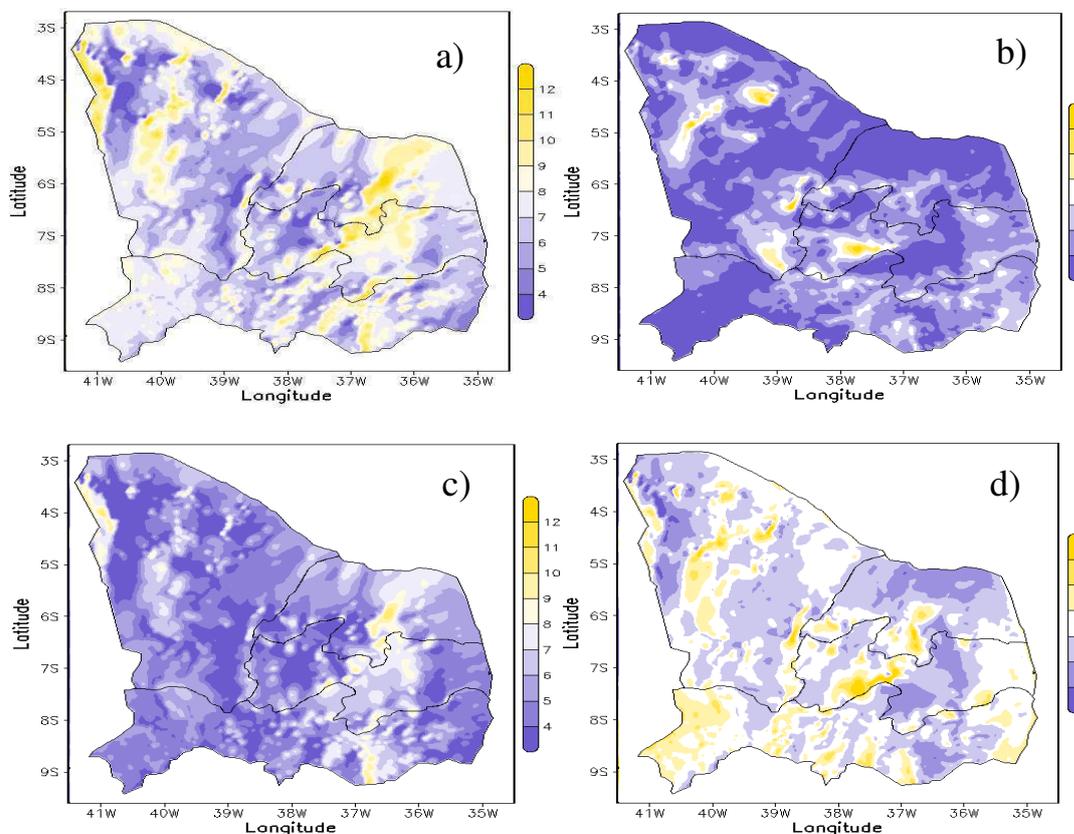


Figura 28. Distribuição Espacial da Climatologia dos Ventos (m/s) para os meses de: a) Setembro; c) Dezembro. Desvio padrão, para os meses de: b) Setembro; d) Dezembro

Com relação Figura 28d, observa-se maior variabilidade espacial do desvio padrão. Praticamente toda parte do litoral do Ceará, Paraíba e parte de Pernambuco apresentaram valores entre 1,4 e 1,6 m/s. Para o litoral norte do Rio Grande do Norte os valores mostraram-se menores, entre 1,0 e 1,4 m/s. Percebe-se ainda, no Planalto da Borborema e oeste do Ceará que os desvios foram relativamente baixos, em torno de 1,0 m/s.

Em dezembro ocorre maior incidência da radiação solar na superfície. Desse modo, o ar na Camada Limite Planetária se torna mais aquecido e menos denso, intensificando o processo turbulento que se reflete no desvio padrão da velocidade do

vento. O principal sistema atuante nesse período e que provoca variações do vento são os VCANs. Esse sistema possui grande variabilidade interanual, que apesar de suas características gerais conhecidas, podem contribuir com a precipitação em áreas distintas a depender do seu posicionamento irregular (KOUSKY e GAN, 1981).

A Figura 29 representa as distribuições médias da Densidade de Potência Eólica (DPE) na altura de 100 metros para a área do nordeste setentrional oriental geradas pelo modelo BRAMS do período de 1983 a 2013 (30 anos) calculadas através da Equação 2.

Obviamente, as discussões sobre as variações espaciais da DPE se assemelham aos obtidos pelas Figuras 27(a, c) e 28 (a, c) para os meses de março, junho, setembro e dezembro, devido esta ser proporcional à velocidade do vento elevado ao cubo. Destacam-se março como o mês de menor potência (100 a 300 W/m²) e setembro como o de maior potência (100 a 600 W/m²).

Vale salientar que a produção de energia eólica máxima em setembro coincide com o período de estiagem na região e conseqüentemente com o período de menor capacidade hídrica na produção de energia hidroelétrica em anos de seca. Portanto, a energia eólica, se devidamente explorada, poderá suprir essa deficiência. Do contrário, em março, mês de menor potência eólica ocorre maior disponibilidade de energia hidroelétrica, principalmente em anos chuvosos.

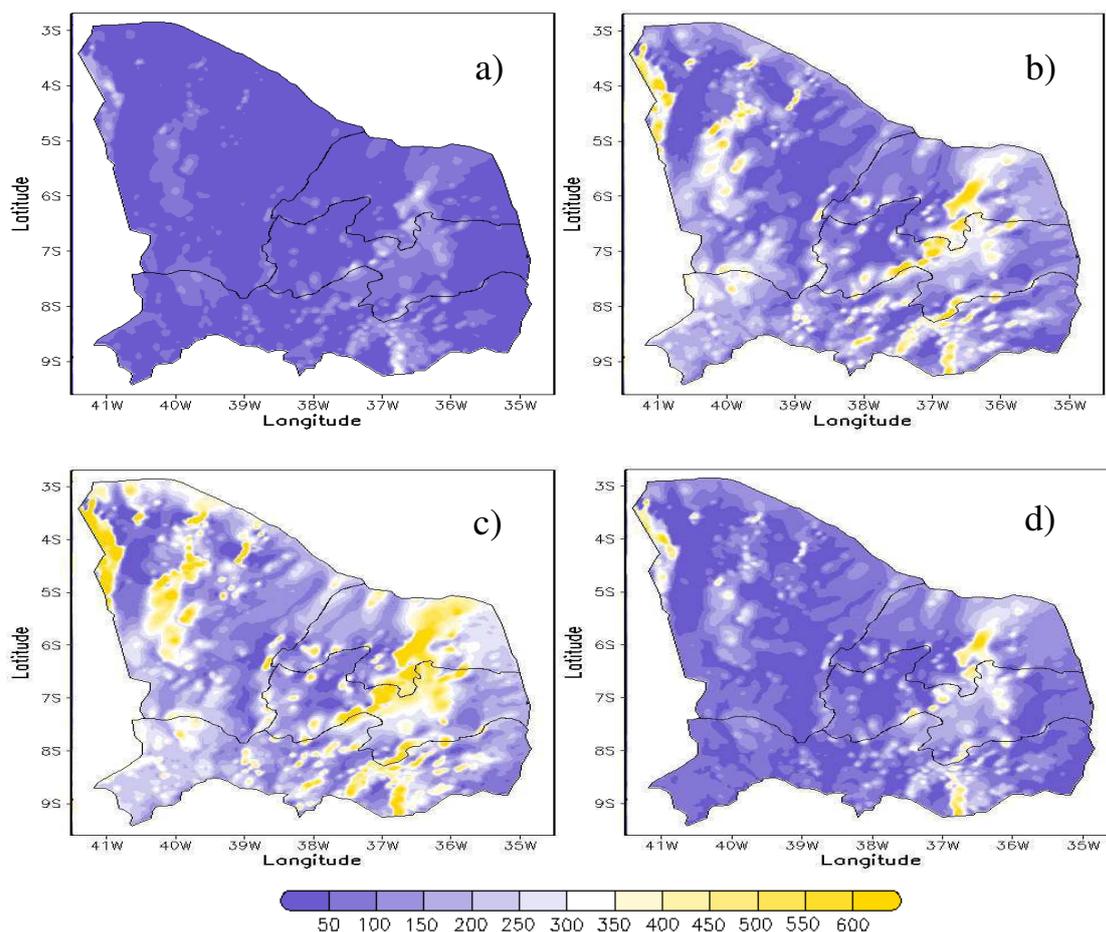


Figura 29. Distribuição espacial da Densidade de Potência Eólica (W/m^2): a) março; b) junho; c) setembro; d) dezembro

4.8. Anomalia do vento para março de 1998 (El Niño) e 1996 (La Niña)

A Figura 30 (a, b) refere-se aos cenários das anomalias da velocidade média do vento a 100 metros para a área do nordeste setentrional oriental, gerados através do modelo regional BRAMS para o mês de março dos anos de El Niño 1998 e La Niña 1996 (área do Niño3), tendo sido este mês considerado de baixa intensidade do vento (Figura 30a), dos anos de El Niño 1998 e La Niña 1996 (área do Niño3).

Na Figura 30a, referente ao ano de El Niño, constatou-se na parte noroeste do Estado do Ceará anomalias negativas com valores até $-1,0$ m/s, com pequenas áreas de anomalias positivas ($0,5$ m/s) indicando que o vento esteve menos intenso que o normal. No restante da região em estudo, prevalecem anomalias positivas sendo que para o leste do Ceará e litoral verificou-se anomalias menos intensas. Já na parte central do Rio

Grande do Norte e da Paraíba a anomalia da velocidade do vento se mostrou relativamente maior, atingindo cerca de 1,5 m/s. Para Pernambuco, tem-se os maiores valores de anomalias positivas de até 2,0 m/s cobrindo todo o estado.

Para a Figura 30b, relativa à atuação da La Niña para o mês de março do ano de 1996, observa-se que os valores de anomalias variaram de -2,0 m/s a 0,5 m/s. Entretanto, constata-se que as anomalias negativas predominam na região em estudo. Destacam-se anomalias negativas mais intensas no oeste do Ceará e parte do Planalto da Borborema sobre o Rio Grande do Norte e a Paraíba.

O El Niño (La Niña) atua como um forte inibidor (influenciador) da precipitação ativando subsidência (convecção) sobre a região do nordeste setentrional oriental alterando o padrão da circulação da célula de Walker (HASTENRAT e HELLER, 1977; UVO e NOBRE, 1989).

Os resultados apresentados pelo modelo BRAMS possibilitaram identificar que em anos de El Niño a velocidade do vento esteve mais intensa que o normal e menos intensa em anos de La Niña. Portanto, já que março é um mês crítico para geração de energia eólica devido à baixa intensidade do vento em sua variação sazonal, no ano de La Niña essa deficiência aumenta ao contrário do ano de El Niño que minimiza essa carência, visto que o El Niño contribui intensificando a velocidade do vento acima do normal.

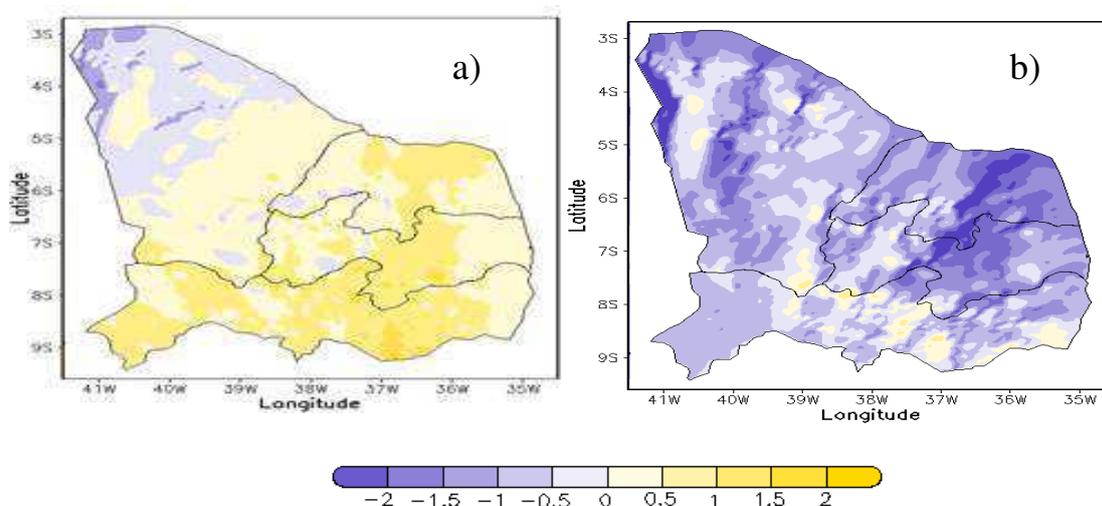


Figura 30. Distribuição espacial da anomalia do vento (m/s) para o mês de março de: (a) 1998 (ano de El Niño) e (b) (ano de La Niña)

4.9. Anomalia do vento para março de 2004 (Gradiente Positivo) e 1986 (Gradiente Negativo)

A Figura 31 (a, b) refere-se à distribuição espacial da anomalia do vento, simulada pelo modelo BRAMS, para o mês de março dos anos de 2004 e 1986 para a altura de 100 metros. Esses anos são referentes ao Gradiente Meridional Positivo (Figura 34a) e Negativo (Figura 34b), respectivamente.

De maneira geral, percebe-se na Figura 31a um predomínio de anomalias positivas do vento indicando velocidade mais intensa que a normal em até 2,0 m/s.

Na Figura 31b verificam-se anomalias negativas do vento de até -2,0 m/s em toda área do nordeste setentrional oriental. Nesse caso, o Gradiente Meridional Negativo age contribuindo para desintensificação da velocidade do vento (velocidade abaixo da normal).

Sabe-se que em anos de Gradiente Meridional Positivo (Negativo) ocorre uma diminuição (aumento) na intensidade da convecção sobre a região em estudo reduzindo (aumentando) a precipitação (ARAGÃO, 1998; SERVAIN, 1991). Neste contexto, os resultados apresentados mostram que no ano de 2004 (Gradiente Meridional Positivo) a intensidade do vento ficou acima da normal, ou seja, houve uma intensificação do vento em relação à média. O caso contrário, 1986 (Gradiente Meridional Negativo) a intensidade do vento ficou abaixo da normal, ou seja, houve uma desintensificação do vento em relação à média. Constata-se ainda que o Gradiente Meridional Positivo/Negativo se mostraram mais influentes na variação da velocidade do vento do que os efeitos causados pelo El Niño/La Niña.

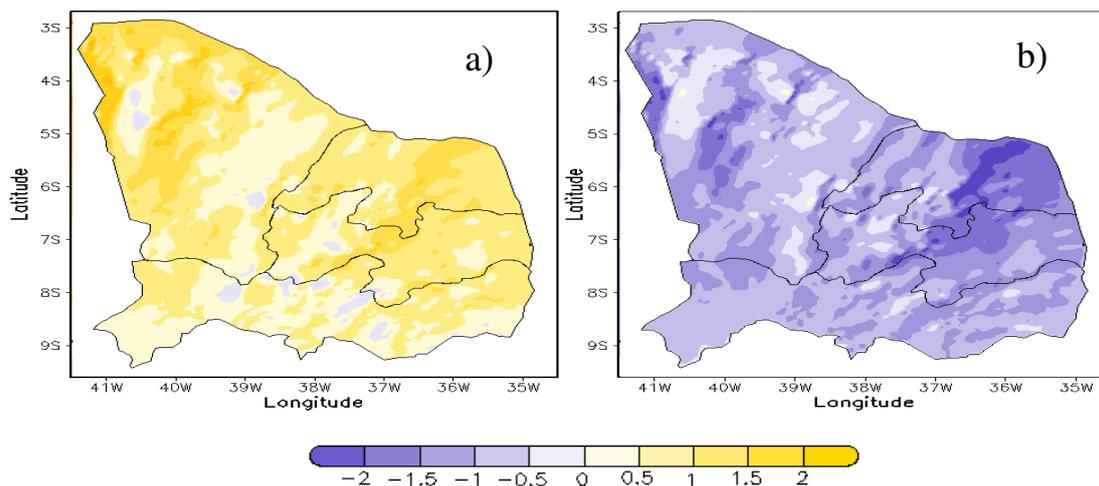


Figura 31. Distribuição espacial da anomalia do vento (m/s) para o mês de março de: (a) 2004 (Gradiente Meridional Positivo) e (b) 1986 (Gradiente Meridional Negativo)

4.10. Anomalia do vento para anos de El Niño (La Niña) e Gradiente Meridional Positivo (Negativo)

Na Figura 32 são apresentadas as anomalias da velocidade do vento (100 metros) para os casos de Gradiente Meridional Positivo coincidentemente com a atuação de El Niño para 1983 (Figura 32a) e 1992 (Figura 32b). Vê-se claramente que toda a área do nordeste setentrional oriental apresenta anomalias positivas até 3,0 m/s (Figura 35a). Isso indica que no mês de março de 1983 houve um aumento considerável nos valores da velocidade do vento. Da mesma forma, no ano de 1992 (Figura 32b) observa-se que os valores predominantes das anomalias da velocidade do vento também foram positivos na área em estudo, portanto, a velocidade do vento esteve mais intensa que a média climatológica.

Na Figura 33 (a, b), representa dois anos (1985 e 1988) de Gradiente Meridional Negativo e La Niña atuando simultaneamente, constatando-se que os valores da anomalia de velocidade do vento, foram predominantemente negativos (-0,5 e -3,0 m/s) na área do nordeste setentrional oriental. Isso indica que a velocidade do vento esteve mais baixa que a média climatológica.

Os casos acima se referem a modificações nas circulações de Hadley (zonal) e Walker (meridional) que produzem variações dos ventos alísios e no posicionamento da ZCIT, causando assim impactos diretos na velocidade do vento sobre a área de estudo. Desta forma, quando agindo simultaneamente (Gradiente Meridional Positivo e El

Niño) se somam, potencializando positivamente a intensidade do vento, caso contrário, negativamente (Gradiente Meridional Negativo e La Niña).

Resultados semelhantes obtidos a partir de reanálises do ECMWF foram obtidos por Chaves Filho (2016).

De forma geral, constatam-se consistências nas análises feitas a partir das simulações com o modelo BRAMS, concordando inclusive, com aspectos apresentados pelo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE *et al.*, 2001). Nesta pesquisa, a utilização do BRAMS possibilitou, também, avaliar características importantes da variação sazonal e interanual da velocidade do vento, de grande relevância no processo de zoneamento e monitoramento da potência eólica. Nesse contexto, as simulações geradas com o modelo BRAMS se credenciam como uma base de dados importante na avaliação da variabilidade espacial e temporal da velocidade do vento para outros estudos.

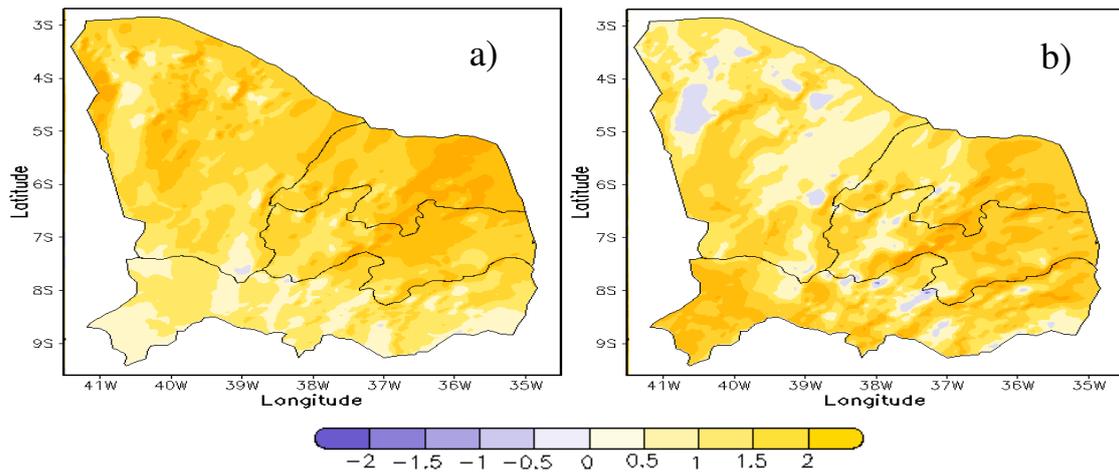


Figura 32. Distribuição espacial da anomalia do vento (m/s) para atuações do Gradiente Meridional Positivo e El Niño para o mês de março nos anos de: (a)1983 e (b)1992

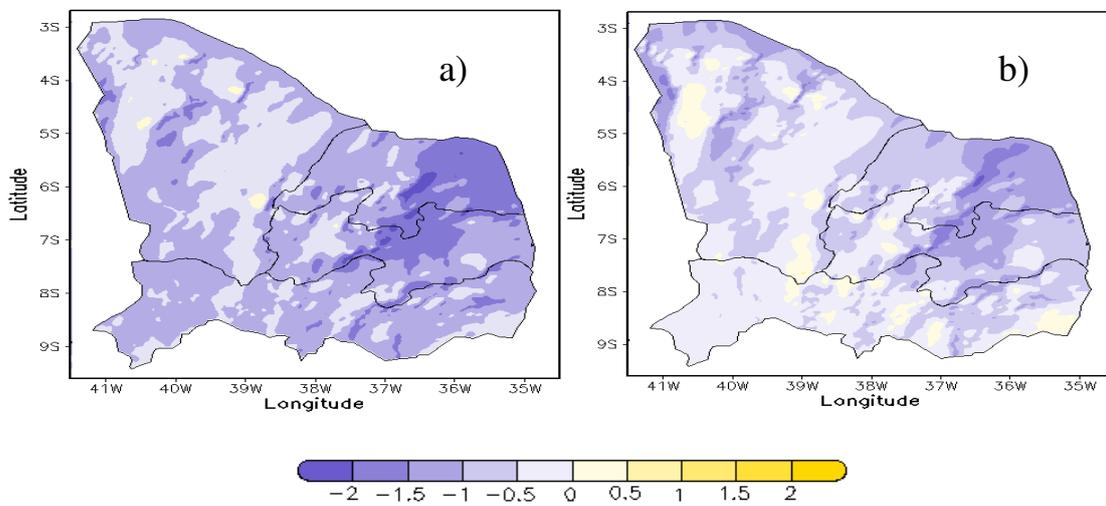


Figura 33. Distribuição espacial da anomalia do vento (m/s) para atuações do Gradiente Meridional Positivo e El Niño para o mês de março nos anos de: (a)1985 e (b)1989.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados verificados, conclui-se que:

1. A validação dos dados de vento observados com os obtidos pelo BRAMS e ERA-Interim obtiveram boas correlações com significâncias estatísticas de 99%;
2. A série média diária do vento observado, para outubro de 2010, foi muito bem representada pelo BRAMS, como também, pelo ERA-Interim nos três níveis estudados, chegando a reproduzir variações importantes de tendências crescentes e decrescentes, em virtude da atuação de uma Linha de Instabilidade que afetou por inteiro o Estado da Paraíba;
3. No geral, tanto o BRAMS quanto o ERA-Interim representaram satisfatoriamente o vento observado, quando considerados os parâmetros estatísticos avaliados. Entretanto, o BRAMS leva certa vantagem para propósitos de monitoramento e previsão por se tratar de uma aplicação com código livre e que requer uma infraestrutura computacional mais modesta com a possibilidade de proporcionar uma redução de escala para um maior detalhamento espacial.
4. Os dados de reanálises são de grande valia para se ter uma média da variabilidade do vento, na falta de modelos de mesoescala. Portanto, não é possível afirmar categoricamente que as simulações do BRAMS são superiores as do ERA-Interim ou que as do ERA-Interim são superiores as do BRAMS;
5. Dentre as três mesorregiões estudadas do Estado da Paraíba, a Borborema apresentou uma densidade de potência média estimada pelo BRAMS mais semelhante à observada;
6. O modelo BRAMS simulou melhor a variabilidade do vento real que as reanálises do ERA-Interim, nas demais simulações, o ERA-Interim apresentou os melhores resultados;
7. As análises do período 1983-2013, para os parques eólicos escolhidos, possibilitaram identificar variações sazonais com ventos intensos no mês de setembro e fracos em março, assim como, variações interanuais evidenciando efeitos de alterações na TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais;

8. Dentre os parques escolhidos, o localizado em Trairi (CE) apresentou menores valores de velocidade do vento;
9. As localidades de Caetés (PE) e Santa Luzia (PB), no geral, em termos de intensidade da velocidade do vento são aproximadamente iguais, porém, identificou-se que Caetés (PE) apresentou com menor variabilidade dos ventos, dentre as localidades escolhidas. Portanto, para uso de energia eólica, torna-se um local mais adequado para instalação de parques eólicos;
10. A distribuição espacial da média climatológica da velocidade do vento nos meses estudados é influenciada pela topografia da região, visto que áreas de topografia mais elevadas estão associadas a ventos mais intensos e maiores desvios padrão;
11. No mês de Setembro a média climatológica da velocidade do vento, apresentou valores mais intensos quando comparados aos meses de março, junho e dezembro;
12. No ano de El Niño (1998) a velocidade do vento esteve mais intensa que o normal e menos intensa no ano de La Niña (1996);
13. Semelhantemente, no ano de Gradiente Meridional Positivo (2004) a velocidade do vento esteve mais intensa que o normal e menos intensa no ano de Gradiente Meridional Negativo (1986);
14. Desta forma, quando agindo simultaneamente, Gradiente Meridional Positivo e El Niño, (1983 e 1992) se somam, potencializando positivamente a intensidade do vento, caso contrário, Gradiente Meridional Negativo e La Niña (1985 e 1989), a potencialização é negativa;
15. O modelo BRAMS se credencia como uma ferramenta útil para fins de monitoramento do vento em sistemas de geração de energia eólica;
16. As simulações geradas com o modelo BRAMS formam uma base de dados importante na avaliação da variabilidade espacial e temporal da velocidade do vento para estudos futuros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. Relatório Final. 2016. <http://www.aesa.pb.gov.br/perh/>

AMARANTE, O.A.C.; BROWER, M.; ZACK, J et al. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, Ministério de Minas e Energia** - Brasília, Brasil, 2001. disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/atlas_eolico_brasil/atlas.htm

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica: Energia Eólica**. 2ª ed. Brasília. 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)>. Acesso em: 02 de fev. de 2017.

ALTUNKAYNAK, A.; ERDIK, T.; DABANLI, I et al. "Theoretical derivation of wind power probability distribution function and applications". **Applied Energy**, vol. 92, pp. 809–814, 2012.

ANDREOLI, R.V; KAYANO, M.T. A importância relativa do Atlântico Tropical Sul e Pacífico Leste na variabilidade de precipitação do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n.1, 63-74, 2007.

ARAGÃO, J.O.R. A general circulation model: a investigation of the atmospheric response to El Niño. **NCAR/CT-100**. p. 144, 1986.

ARAGÃO, J.O.R. O Impacto do ENSO e do Dipolo do Atlântico no Nordeste do Brasil. **Bulletin de L'Institut Français d'Études Andines**, Grécia, v. 27, n 3, p. 839-844, 1998.

ARAÚJO JÚNIOR, L.M.; SILVA, E.M.; COSTA, A.A. et al. Avaliação dos recursos eólicos simulado no Estado do Ceará: um estudo de caso para o El Niño 97/98 e para La Niña 98/99. **Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)**, v. 29, p. 139-152, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862014000100013>

BETZ, A. Wind Energie und ihre Ausnutzung durch Windmhlen. Gttingen: Vandenhoeck and Ruprecht, 1926.

BEZERRA, A.C.N.; CAVALCANTI, E. P. Energia estática sobre o norte e Nordeste do Brasil relacionada com a temperatura da superfície do mar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.2, 239-263, 2008.

BORBA, B.S.M.C. et al. Energy-related Climate Change Mitigation In Brazil: Potential, Abatement Costs and Associated Policies. **Energy Policy**, v.49, p. 430-441, 2012.

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Caderno da Região Hidrográfica Atlântico no Nordeste Oriental**. Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 104p. 2006.
- CASTRO, A.L.C. **Manual de desastres: desastres naturais**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional, 182 p. 2003.
- CHAVES FILHO, J.B. **Variabilidade da velocidade do vento a metros para a região do nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- CHEN, C.; COTTON, W. R. A One-dimensional simulation of the stratocumulus capped mixed layer. **Boundary-Layer Meteorology**: v.25, p.289-321, 1983.
- CARTON, J.A.; CAO, X.; GIESE, B.S. et al. Decadal and intrannual SST variability in the tropical Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 26, 1996.
- CHU, P.S. Time and space variability of rainfall and surface circulation in the northeast Brazil - tropical Atlantic sector. **Journal Meteorological Society, Japan**, 62, 363-370. 1984.
- COELHO, M.S. **Estudo da Estrutura vertical e horizontal da Precipitação e da Circulação Atmosférica na região da ZCIT**. 160f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - INPE, São José dos Campos, 2002.
- COELHO, M. S.; GAN, M. A.; Conforte J.C. Estudo da variabilidade da posição e da nebulosidade associada à ZCIT do Atlântico, durante a estação chuvosa de 1998 e 1999 no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 19, p. 23-34, 2004.
- COSTA, G.B.; LYRA, R.: Análise dos padrões de vento no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n 1, p.31-38, 2012.
- COTTON, W.R.; PIELKE, R.A.; WALKO, R.L.; et al. RAMS 2001: Current Status and Future Directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 82, 5-29, 2003.
- CUSTÓDIO, R.S. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. 577p. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.
- DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; et al.. The ERA Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 137(656), pp.553-597. 2011.
- DEVORE, J.L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciência**. São Paulo: Thomson Pioneira, 706 p., 2006.
- DRACHMANN, A.G. "Heron's Windmill". **Centaurus**, v. 7, pp. 145–151. 1961.

FARIA, B.L de.. **Modelagem do potencial eólico do nordeste do Brasil sob condições atuais e de aquecimento global: uma interface entre modelos numéricos Computacionais de mesoescala e microescala.** Dissertação (Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, UFV, Brasil, 2010.

FAVERA, A.C.D.; LUIZ, E.W.; SCHUCH, N.J.; PEREIRA, E.B. Potencial eólico no Rio Grande do Sul distribuição estatística dos ventos na região central do estado. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 6, n. 1, p. 38-51, 2012.

FEDDERSEN, H.; NAVARRA, A.; WARD, M.N. Reduction of model systematic error by statistical correction for dynamical seasonal predictions. **Journal of Climate**, v. 12, n. 7, p. 1974–1989, 1999. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1974:ROMSEB>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1974:ROMSEB>2.0.CO;2)

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. 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, p. 15-26, 2005.

FREITAS, S.R; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P.; et al.. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) - Part 1: Model description and evaluation. **Atmospheric Chemistry and Physics (Online)**, v. 9, p. 2843-2861, 2009.

FREITAS, S.R.; PANETTA, J.; LONGO, K. M.; RODRIGUES, L. F., MOREIRA, D. S.. The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas, **Geoscientific Model Development**, 10, 189-222, 2017. doi:10.5194/gmd-10-189-2017

GARRAT, J.R.; PIELKE, R.A. On the sensitivity of mesoscale models to surface-layer parameterization constants. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 48, p.377-387, 1989. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00123060>

GIANNINI, A.; SARAVANAN, R.; CHANG, P. The preconditioning role of Tropical Atlantic variability in the development of the ENSO Teleconnection: implications for the prediction of Nordeste rainfall. **Climate Dynamics**, 22, 839-855, 2004.

GRELL, G.A.; DEVENYI, D. A New Approach to Parameterizing Convection Using Ensemble and Data Assimilation Techniques. *Geophysical Research Letters*. v. 29, 1693, 2002.

GRIMM, A.M. "Variabilidade Interanual do Clima no Brasil". **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 353 – 374. 2009.

GUNTURU, U.B.; SCHLOSSER, C.A. "Characterization of Wind Power Resource in the United States." **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.12.20: 9687–9702. 2012.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), v. 26, p. 591-608, 2011.

HASSAN, A.; HILL, D.R. Islamic Technology: An illustrated history, p. 54. **Cambridge University Press**. ISBN 0-521-42239-6. 1986.

HASTENRATH, S. **Climatic Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans**. University of Wisconsin Press, p.177. 1977.

HASTENRATH, S; GREISCHAR, L. Further work on the prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Climate**, V. 6, N. 4, P.743-758, 1993.

HASTENRATH, S; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. V.103, N. 435, p.77-92,1977.

HERNÁNDEZ-ESCOBEDO, Q.; ESPINOSA-ARENAL, F.; SALDAÑA FLORES, R., et al. Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz, México. **Dyna**, vol 79, no. 171, pp. 215-221, 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2016. Acesso em: 12/ de dezembro de 2016. Disponível: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/>>

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**. AMS, Boston, USA. 77, 3, 437- 471. 1996. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)

KAYANO, M.T. e ANDREOLI, R.V. **O clima da região Nordeste do Brasil**. Tempo e clima do Brasil. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, p.213-233, 2009.

KISTLER R.; COLLINS, W.; SAHA, S.; et al. The NCEP–NCAR 50 - Year Reanalysis: Monthly Means CD–ROM and Documentation. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v.82, 2, p. 247-267. 2001. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2)

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Economica. 478p. 1948.

KOUSKY, V.E.; GAN, M.A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v.33, p.538-551, 1981.

LIMA, F.J.L.de; CAVALCANTI, E.P.; SOUZA, E.P et al. Evaluation of the Wind Power in the State of Paraíba Using the Mesoscale Atmospheric Model Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System. **Renewable Energy**, v. 2012, p. 16, 2012. <http://dx.doi.org/10.5402/2012/847356>

- LIMA, L.A.; BEZERRA FILHO, C.R. Wind energy assessment and wind farm simulation in Triunfo - Pernambuco, Brazil. **Renewable Energy**. v. 35, p. 2705-2713, 2010.
- LIRA, M. A. T.; SILVA, E. M. ; ALVES, J.M.B. Estimativa dos Recursos Eólicos no Litoral Cearense Usando a Teoria da Regressão Linear. **Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)**, v. 26, p. 349-366, 2011.
- LOPEZ, R. A. **Energia Eólica. Energia e meio ambiente**. São Paulo: Artiliber. 2012.
- MAATALLAH, T.; ALIMI, S. E.; DAHMOUNI, A. W.; NASRALLAH, S. B. Wind power assessment and evaluation of electricity generation in the Gulf of Tunis, Tunisia. **Sustainable Cities and Society**, vol.6, no.1, pp.1–10, 2013.
- MARIA, P. H. S. de; COSTA, A.A.; SOMBRA, S.S. Modelagem Numérica em Alta Resolução para Previsão de Geração de Energia Eólica no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, p. 477-489, 2008.
- MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B.. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 30, n. 1, março, 2008.
- MELLO, A.B.; CAVALCANTI, I.F.A.; SOUZA, P. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina do texto, v.1, p. 25-41. 2009.
- MELLOR, G.; YAMADA, T. Desenvolvimento of a turbulence closure model for use in geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 20, p. 851-857, 1982.
- MORETTIN, L.G. **Estatística básica**. Editora McGraw-Hill do Brasil - Ltda, São Paulo - SP. 6ª Ed., 183p. ,1991.
- MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal Atmospheric Science**. v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.
- MOURA, G.B.A.; ARAGÃO, J.O.R.; MELO, J.S.P.; et al., Relação entre a precipitação do leste do Nordeste do Brasil e a temperatura dos oceanos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.4, p. 462-469, 2009.
- NIXON, N. "Timeline: The history of wind power". **The Guardian. Guardian News and Media Limited**. 2008.
- NOBRE, P.. A variabilidade interanual do Atlantico tropical e sua influencia no clima da América do Sul. *Climanálise* (São José dos Campos), v. online, p. Especial 10anos, 1996.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, p. 2464-2479, 1996.

NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G.A.C.F. Tendência de temperatura na superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico e a variabilidade de precipitação em Pernambuco. **Mercator (Fortaleza. Online)**, v. 13, p. 107-118, 2014.

OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. 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 (Impresso)**, v. 26, p. 53-66, 2011.

OLIVEIRA, S. S. Análise do Potencial Eólico do Estado da Paraíba Utilizando Modelo de Mesoescala, **Tese (Doutorado em Meteorologia)** – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande. 2013.

PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J. ; LYONS, W.A.. A comprehensive meteorological modeling system –RAMS. **Meteorological and Atmospheric Physical**, vol. 49, p. 69-91, 1992. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01025401>

PINTO, L.I.C. et al. Confiabilidade nas estimativas do regime do vento fornecidas pelo BRAMS no estado de Alagoas: influência do aninhamento e da resolução horizontal de grades. **Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)**, v. 29, p. 242-258, 2014.

PORTAL BRASIL. "**Brasil é o maior gerador da América Latina**". 2017. Disponível em < <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/03/brasil-e-o-maior-gerador-de-energia-eolica-da-america-latina>". Acesso: 23 de março de 2017

RAMOS, L.F.; KRUGER, C.; MORAES, M.R.. Levantamento do potencial eólico da região da campanha meridional do Rio Grande do Sul com o modelo de mesoescala WRF e o modelo CFD WINDSIM. **Delos: Desarrollo Local Sostenible**, v. 6, p. 18, 2013a.

RAMOS, D.N.S.; LYRA, R.F.F.; SILVA JUNIOR, R.S. Previsão do vento utilizando o modelo atmosférico WRF para o estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)**, v. 28, p. 163-172, 2013b.

RIENECKER, M. M., et al. MERRA – NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. **Journal Climate**, 24, 2011. doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.

SAHA, S.; MOORTHY, S.; PAN, H.L.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; et al.. The NCEP climate forecast system reanalysis, **Bulletin American Meteorological Society**. 90 v.8, p.1015 – 1057. 2010. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1

SERRA, A. L.; RATISBONA, L. R. As massas de ar da América do Sul. Rio de Janeiro: **Ministério da Agricultura**, Serviço de Meteorologia, 1942.

SERVAIN, J.. Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and Some Applications, **Journal Geophysical Research**, v.96, 15137–15146, 1991.

SHEPHERD, D.G. Historical Development of the Windmill. In: SPERA, S.A. Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering. **New York: ASME Press**, 1994. p. 1-46

SIGEL – **Sistemas de Informação Georreferenciadas do Setor Elétrico**. 2016. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>. Acesso em 20 de dez. de 2016.

SILVA, A.R. **Estudo observacional do regime do vento no Estado de Alagoas, nos períodos seco e de transição seco-chuvoso** (Trabalho de conclusão: Bacharelado em Meteorologia). Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 100p. 2009.

SILVA, B.B. da; ALVES, J.J.A.; CAVALCANTI, E.P. et al. 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.

SILVA, V. de P.R. da; NASCIMENTO, M.G. do; CAMPOS, J.H.B. da C.. Análises da Precipitação Pluvial no Estado da Paraíba com base na Teoria da Entropia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. vol.7, n.2, pp.269-274. 2003. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662003000200014>.

SILVA, G.R. **Características de Vento da Região Nordeste**. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

SOUZA, B.E.; NOBRE, P.. Uma revisão sobre o padrão de Dipolo no Atlântico Tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.13, n.1, 31-44, 1998.

SOUZA, E.P. **Estudo teórico e numérico da relação entre convecção e superfícies heterogêneas na região amazônica**. 121 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

UVO, C.B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasileiro**. 1989. f. 99. dissertação (Mestrado em Meteorologia) - INPE, São José dos Campos, 1989.

UVO, C.R.B.; NOBRE, C.A. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil. Parte I: A Influência dos Ventos e TSM do Atlântico Tropical. **Climanálise**, Vol. 4, número 07, 34 – 40. 1989

VALENÇA, D.A.A. **Proposição de uma metodologia para a avaliação do aproveitamento da energia eólica em ambiente urbano**. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2, Recife: 2006.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 3ª edição, p. 255, 2004.

WAGNER, R.G. Mechanisms controlling variability of the interhemispheric sea surface temperature gradient in the tropical Atlantic. **Journal Climate**, v. 9, p. 2010-2019, 1996.

WALKO, R.L.; TREMBACK, J.C.; HERTENSTEIN, R. F.A. RAMS - The regional atmospheric modeling system, version 3b, user's guide. **ASTER Division, Mission Research Corporation, Fort Collins, CO**, 1995.

WILBANKS, T.J. et al. "Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States, Washington, DC: US". **Climate Change Science Program. Synthesis and Assessment Product 4.5**. 2008.

ANEXO

Tabela 4 - Anomalias de TSM do Oceano Pacífico na área Niño3 (5° N - 5° S , 150° W - 90° W) em °C

Ano	MAM		JJA		SON		DJF	
	<i>Média</i>	<i>Anomalia</i>	<i>Média</i>	<i>Anomalia</i>	<i>Média</i>	<i>Anomalia</i>	<i>Média</i>	<i>Anomalia</i>
1983	29,1	1,8	26,9	1,2	24,7	-0,2	28,7	3,0
1984	27,0	-0,3	24,9	-0,7	24,1	-0,8	25,2	-0,6
1985	26,3	-1,0	24,9	-0,8	24,2	-0,7	24,5	-1,2
1986	26,9	-0,3	25,7	0,0	25,6	0,7	24,9	-0,8
1987	28,3	1,1	27,1	1,4	26,3	1,4	26,7	0,9
1988	26,4	-0,9	23,8	-1,8	23,3	-1,6	26,3	0,6
1989	26,4	-0,9	25,3	-0,4	24,5	-0,4	24,3	-1,4
1990	27,4	0,1	25,7	0,0	24,9	-0,1	25,5	-0,2
1991	27,3	0,1	26,5	0,8	25,5	0,6	25,7	0,0
1992	28,5	1,3	25,6	-0,1	24,6	-0,3	27,1	1,4
1993	28,1	0,8	25,9	0,3	25,1	0,2	25,7	0,0
1994	27,0	-0,3	25,5	-0,2	25,4	0,5	25,7	0,0
1995	26,9	-0,4	25,3	-0,4	24,0	-0,9	26,4	0,7
1996	26,6	-0,7	25,3	-0,4	24,4	-0,5	25,0	-0,8
1997	27,5	0,3	28,0	2,3	28,2	3,3	24,9	-0,8
1998	28,8	1,6	25,3	-0,4	24,1	-0,8	28,9	3,2
1999	26,6	-0,7	24,8	-0,9	23,6	-1,3	24,6	-1,1
2000	27,0	-0,3	25,1	-0,5	24,3	-0,6	24,2	-1,5
2001	27,2	0,0	25,5	-0,2	24,4	-0,6	25,2	-0,6
2002	27,3	0,1	26,2	0,5	25,9	1,0	25,3	-0,4
2003	26,9	-0,4	25,5	-0,1	25,2	0,3	26,5	0,8
2004	27,1	-0,2	25,6	-0,1	25,3	0,4	26,0	0,3
2005	27,4	0,2	26,0	0,3	24,5	-0,4	26,0	0,2
2006	26,9	-0,3	25,9	0,2	25,9	1,0	25,1	-0,6
2007	26,8	-0,5	24,8	-0,9	23,4	-1,6	26,4	0,7
2008	26,9	-0,3	26,1	0,4	24,9	0,0	24,3	-1,5
2009	27,1	-0,2	26,5	0,9	25,9	1,0	25,2	-0,6
2010	27,6	0,3	24,7	-1,0	23,4	-1,5	26,8	1,1
2011	26,8	-0,4	25,6	-0,1	24,0	-0,9	24,5	-1,3
2012	27,2	0,0	26,5	0,8	25,1	0,2	25,1	-0,6
2013	27,0	-0,3	25,1	-0,6	24,7	-0,2	25,3	-0,4

MMA: Março, Abril, Maio; JJA: Junho, Julho, Agosto; SON: Setembro, Outubro, Novembro; DJF: Dezembro, Janeiro, Fevereiro.

Tabela 5 – Gradiente Meridional de Anomalia TSM na área do Oceano Atlântico Tropical em °C

Ano	MAM	JJA	SON	DJF
	<i>Anomalia</i>	<i>Anomalia</i>	<i>Anomalia</i>	<i>Anomalia</i>
1983	0,9	0,6	-0,2	-0,3
1984	-0,7	-1,0	-1,0	-0,4
1985	-0,6	-0,3	-0,4	-0,7
1986	-0,6	-0,8	-0,5	-0,5
1987	0,2	0,2	0,0	-0,4
1988	-0,3	-0,3	-0,3	-0,1
1989	-1,0	-0,3	-0,3	-0,7
1990	0,0	0,1	0,0	0,3
1991	-0,5	-0,5	0,0	-0,1
1992	0,6	0,6	0,4	0,1
1993	0,0	-0,1	-0,8	0,2
1994	-0,7	-0,3	-0,2	-0,7
1995	-0,3	0,1	0,5	-0,3
1996	-0,1	-0,5	-0,1	0,6
1997	0,9	0,7	0,0	0,7
1998	0,2	0,3	0,3	-0,4
1999	-0,2	-0,3	0,0	0,2
2000	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1
2001	-0,3	0,0	0,3	-0,3
2002	0,0	-0,2	0,2	0,9
2003	-0,4	-0,1	0,1	-0,3
2004	0,7	0,4	0,5	0,3
2005	1,0	1,2	0,5	0,5
2006	0,1	-0,1	0,4	0,5
2007	0,2	-0,1	0,0	0,3
2008	-0,7	-0,3	0,3	-0,2
2009	-0,7	-0,2	0,1	0,0
2010	0,7	0,7	0,5	0,1
2011	0,1	0,5	0,3	0,4
2012	0,3	0,5	0,8	0,9
2013	0,4	0,2	0,5	0,4

MMA: Março, Abril, Maio; JJA: Junho, Julho, Agosto; SON: Setembro, Outubro, Novembro; DJF: Dezembro, Janeiro, Fevereiro.