



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Análise de Agrupamento na Otimização de Futuras Aplicações de Modelagem Numérica na Estimativa e Previsão de Recurso Eólico

Lucía I. Chipponelli Pinto¹, Francisco J. L. Lima², Fernando R. Martins³, Enio B. Pereira⁴

¹Aluno do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, SP, Brasil. Autor correspondente: E-mail: lucia.chipponelli@inpe.br. ²Ex Bolsista CNPq (Rede Clima) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, SP, Brasil. E-mail: francisco.lima@inpe.br. ³Prof. Doutor, Universidade Federal de São Paulo (Instituto do Mar), Santos, SP, Brasil. E-mail: fernando.martins@unifesp.br. ⁴ Pesquisador Doutor, Coordenador do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, SP, Brasil. E-mail: enio.pereira@inpe.br.

Artigo recebido em 06/05/2017 e aceito em 11/10/2017

RESUMO

A confiabilidade da estimativa e da variabilidade do vento num local ou região de interesse é essencial, principalmente para empreendimentos de energia eólica. Atualmente o mapeamento de áreas com elevado potencial para a exploração comercial pode ser realizado com o uso de modelos atmosféricos que demandam um investimento relativamente baixo. Porém para realizar as simulações com modelos atmosféricos de mesoescala são necessários determinar os domínios (grades) do modelo que podem variar de alguns poucos km a dezenas de km. Com o objetivo de auxiliar na determinação destes domínios será utilizada a técnica de análise de agrupamento (*Cluster Analysis*) nas séries de dados observados nas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o nordeste do Brasil. Esta classificação consiste em determinar o nível de similaridade ou dissimilaridade entre indivíduos aplicando uma função de agrupamento a uma determinada variável. Esta análise tem como principal objetivo determinar regiões com padrões de intensidade do vento semelhante dentro do domínio do estudo, e assim facilitar a localização das grades nas simulações dos modelos, evitando grades que possuam pontos com diferentes padrões de vento. Foram utilizados dados horários de velocidade do vento a 10 m de altura de 121 estações meteorológicas automáticas, no período de janeiro de 2005 a dezembro de 2013. Os resultados obtidos confirmaram que há regiões com diferentes padrões de vento no nordeste, que necessitam configurações de grade distintas e parametrizações físicas adequadas aos fenômenos meteorológicos observados em cada região.

Palavras Chaves: Estimativa do vento, Energia eólica, Análise de agrupamento.

Research for Optimization of Numerical Modeling Applied to Estimate and Forecast Wind Resource

ABSTRACT

The dependability of estimate and variability of the wind in a place or region of interest is essential, primarily for wind power projects. Currently the mapping of areas with high potential for commercial exploitation is carried out with the use of atmospheric models that require a relatively low investment. However to make simulations with mesoscale atmospheric models are required to identify model domains (grids) that can range from few kilometers to tens of kilometers. The goal is determine this domains cluster, the analysis will be made to the observed data from automated weather stations of the National Institute of Meteorology (INMET) to Northeast Brazil. This classification determine the level of similarity or dissimilarity between individuals applying a clustering function to a given variable. This analysis has as main goal, determine regions with intensity patterns of similar wind within domain of the study, and thus facilitate the location of the grids in the simulations of the models, avoiding spots gratings with patterns different of wind. Hourly data were used for wind speed at 10 m height of 121 automatic weather stations, from January 2005 to December 2013. The results confirmed that there are regions with different wind patterns in Northeast, which require different grid settings, and appropriate physical parameterizations for meteorological phenomena observed in each region.

Keywords: Wind estimate, Wind power, Cluster analysis.

Introdução

Novas fontes de geração de energia que reduzam as emissões de gases de efeito estufa tais

como, energias renováveis, tem visto um crescimento significativo em todo o mundo. Como parte deste, a energia eólica parece ser uma das

fontes de energia renováveis mais usados hoje em dia (Vos e Sawin, 2012). No ano de 2015 foram ultrapassados os 60 GW de novas instalações na geração de energia eólica a nível global, o que representou um crescimento anual do mercado eólico de 17% (GWEC, 2016). Este crescimento, principalmente na capacidade instalada a nível global, tem sido impulsionado não só pela energia eólica *onshore*, mas também pela energia eólica *offshore*.

A quantificação da energia eólica é um dos primeiros passos necessário em qualquer projeto de geração deste tipo energia, é fundamental o conhecimento apurado, tanto da disponibilidade desse recurso energético, quanto de sua variabilidade temporal, que está fortemente relacionado com as condições de tempo e clima, seja em escala regional ou local. Para fazer isso, no local ou região de interesse para o setor são necessárias campanhas de medições, embora nem sempre disponíveis e muitas vezes insuficientes para o bom desenvolvimento de projetos eólicos. Por esta razão, a falta de medições das forças dos ventos em diferentes níveis de altura são escassas (Hasager et al., 2015). Neste contexto as simulações numéricas voltadas para energia eólica vêm cada vez sendo mais aplicadas em diversos estudos para estimar de forma mais precisa o comportamento do vento para um determinado local ou região (Mattar e Borvarán, 2016).

A aplicação de modelos numéricos de mesoescala também pode ser utilizada para a previsão em curto e médio prazo do regime de vento, imprescindíveis para o planejamento da operação dos parques eólicos e do sistema de distribuição de energia (Martins et al., 2008; Monteiro et al., 2009; Lima et al., 2012; Mattar e Borvarán, 2016). Estes modelos são uma ferramenta que demandam um investimento relativamente baixo (Martins et al., 2008; Alamillos et al., 2013).

A técnica da análise multivariada por meio da análise de agrupamento (AA) serve como importante ferramenta estatística em diversos estudos que envolvem variáveis meteorológicas quando se deseja encontrar regiões homogêneas sob o ponto de vista de suas características peculiares, ou seja, com isso técnicas estatísticas de homogeneização são fundamentais para captar características semelhantes e assim obter um padrão de similaridades regionalizado (Freitas et al., 2013).

Ao realizar as simulações com modelos atmosféricos de mesoescala são necessários determinar os domínios (grades) do modelo que podem variar de alguns poucos km a dezenas de

km. Para melhores resultados das simulações é importantes que estas grades representem melhor a climatologia e os fenômenos meteorológicos que atuam na região, por exemplo, no nordeste do Brasil (NEB) e não serem posicionadas ao acaso.

O objetivo principal deste trabalho foi o uso da técnica de AA para a divisão do NEB em regiões semelhantes com relação à intensidade do vento e precipitação utilizando as séries de dados observados nas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia. Assim posteriormente o resultado deste estudo auxiliar na localização dos domínios e com isso configurar o modelo de mesoescala WRF (Weather Research and Forecasting).

Dados e metodologia

Nesta seção serão descritos os dados utilizados, área de estudo e a metodologia empregada no estudo.

Caracterização e localização da área de estudo

A região em estudo compreende o NEB, que está localizado entre as latitudes 1°02' S a 18°20' S e longitudes 34°47' W a 48°45' W, e possui uma área com cerca de 1,5 milhão de km² (~18 % do território brasileiro). Aproximadamente 760.000 km² desta área apresentam um clima semiárido (Moura et al., 2007). Apesar de sua localização, o NEB não apresenta uma distribuição de chuvas típica de áreas equatoriais sendo influenciado principalmente por três tipos de clima: clima litorâneo úmido (se estendendo do litoral da Bahia ao litoral do Rio Grande do Norte); clima tropical (em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí); e clima tropical semiárido (em todo o sertão nordestino) (Cavalcanti et al., 2009).

O NEB apresenta elevados valores de médios anuais de temperatura do ar, que variam de 20 a 28°C, em virtude da alta incidência de radiação solar, o que também lhe confere o maior potencial de energia solar disponível no Brasil (Pereira et al., 2006).

A precipitação no NEB possui uma distribuição desigual, tendo grande variabilidade espaço-temporal. A precipitação está associada a sistemas sinóticos ou circulações atmosféricas regionais, tais como os Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e Atlântico Norte (ASAN) e o cavado equatorial (Kayano e Andreoli, 2009). Sendo assim, a caracterização das chuvas no NEB é bastante complexa, é possível identificar três regimes de precipitação: no norte da região (Ceará, Rio Grande do Norte, interior da Paraíba e Pernambuco) as chuvas ocorrem no outono associadas ao deslocamento mais ao sul da Zona de

Convergência Intertropical (ZCIT) (Meneghetti e Ferreira, 2009; Molion e Bernardo, 2002; Kousky, 1979); no litoral leste (desde o litoral do Rio Grande do Norte até a Bahia) as precipitações são devido à influência das massas de ar tropical ou por distúrbios ondulatórios de leste (Meneghetti e Ferreira, 2009), e na parte sul (Bahia e partes do Maranhão, Piauí e Pernambuco) a precipitação ocorre no verão pela atuação de sistemas frontais, convecção local e vórtices ciclônicos (Meneghetti e Ferreira, 2009; Costa, 2006).

O vento resulta da atuação de diversos sistemas de circulação atmosférica de várias escalas, por exemplo, El Niño – Oscilação Sul (ENOS), Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), ZCIT, ASAS, sistemas frontais, e etc. Porém dependendo da região a influência de um sistema atmosférico pode ser mais frequente que outro e também em intensidade diferentes. As circulações de mesoescala e microescala, que ocorrem em função da variação das propriedades da superfície, podem influenciar nos regimes de vento, gerando ventos locais que podem diferir significativamente do perfil de larga escala da circulação atmosférica (Pes, 2015; Compagnucci e Salles, 1997).

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro as regiões do Brasil com maiores médias anuais de vento são as regiões nordeste, sul e sudeste para altura de 50m. E como visto anteriormente no NEB, os ventos em superfície estão associados principalmente pelos ventos alísios de nordeste e de sudeste, os quais determinam a velocidade média anual do vento entre 6,5 e 8,5 m/s e com direção predominante de nordeste para altura de 50 m (Amarante et al., 2001). Estudos recentes mostram que este potencial é ainda maior em níveis mais altos (80, 100 e 120 m) altura dos aerogeradores mais usais nos empreendimentos de energia eólica no NEB (Pinto et al., 2014).

Dados

Os dados utilizados foram observações médias horárias de intensidade do vento e totais de precipitação diários para um período de nove anos, janeiro de 2005 a dezembro de 2013, coletados em estações distribuídas em toda a região NEB. No total de 121 estações meteorológicas automáticas de superfície operadas pelo INMET, Figura 1. Devido a grande quantidade de falhas nos primeiros anos de medições das estações meteorológicas automáticas optou-se por usar a série de dados a partir do ano de 2008, sendo assim um total de seis anos de dados para realizar o estudo.

Estas estações contêm sensores para medição de parâmetros meteorológicos como pressão atmosférica, temperatura, precipitação, vento, radiação solar, entre outras. As medições da velocidade do vento observado em cada uma das estações, são realizadas a 10 metros acima do nível do solo, como recomenda a Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Estes dados do INMET passaram por uma qualificação, que consiste em analisar os arquivos estruturalmente realizando uma análise exploratória, pois alguns fatores podem afetar a confiabilidade dos dados medidos por equipamentos automáticos como os anemômetros, como a interrupção da alimentação do sensor, as descargas elétricas, as mudanças no ambiente onde está localizado o equipamento, entre outras (Lima, 2015; Pes, 2015). A metodologia utilizada foi a mesma usada pela rede SONDA/INPE (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para elaboração do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2017) disponível no site: sonda.ccst.inpe.br/index.html.

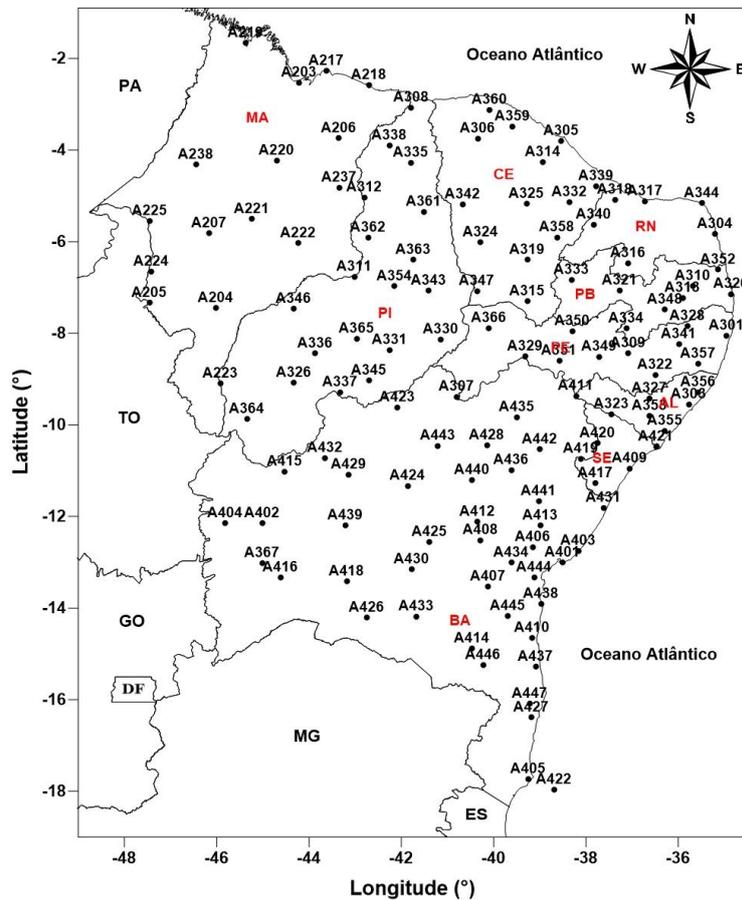


Figura 1 – Distribuição espacial de todas as estações localizadas no NEB, total de 121 estações meteorológicas automáticas do INMET.

Análise de agrupamento (AA)

A análise de agrupamento (AA) é uma técnica estatística de análise multivariada tem como objetivo classificar os indivíduos de uma população que são conhecidos por suas características, em grupos que sejam homogêneos intragrupos e heterogêneos intergrupos (Silva et al., 2013; Lima et al., 2010). As técnicas de agrupamento diminuem a subjetividade, pois quantificam a similaridade ou dissimilaridade entre os indivíduos. A classificação dos indivíduos em grupos distintos é feita a partir de uma função de agrupamento denominada distância ou similaridade e de um critério matemático de agrupamento (Lima, 2015).

As regiões homogêneas foram identificadas através de uma matriz de dados, organizada da seguinte forma: as linhas são compostas pelas estações meteorológicas e as colunas pelas médias dos meses de todo o período, ou seja, uma matriz de (estações x meses). Nesta matriz também foram incluídas as coordenadas de posição geográfica de cada estação, o que exigiu a padronização dos dados. Para o agrupamento, foi aplicado o método hierárquico aglomerativo de

agrupamento à matriz de dados, sendo usado o método de Ward (1963), também empregado por autores em suas pesquisas (Lima, 2015) com função de agrupamento a Distância Euclidiana que é a soma dos quadrados das diferenças (Hair et al., 2005).

A distância euclidiana é a medida de dissimilaridade mais comumente usada em agrupamentos, embora muitas outras medidas de distância existam. Uma discussão detalhada de várias dissimilaridades é apresentada em (Duran e Odell, 1974). De acordo com Wilks (2006) esta função é usada como critério para medir a distância entre dois pontos X_i e X_j ou para estabelecer o quanto eles são parecidos. Logo, esta distância entre dois indivíduos é dada pela Equação 1.

$$d_{ij} = [X_i - X_j] = \left[\sum_{k=1}^n (X_{i,k} - X_{j,k})^2 \right]^{1/2}$$

Equação 1

O método hierárquico de Ward (1963) procura por partições que minimizem a perda associada a cada agrupamento (Everitt, 1974; Bussab et al. 1990; Mingoti, 2005). Essa perda é quantificada pela diferença entre a soma dos erros quadráticos de cada padrão e a média da partição em que está contido, ou seja, a perda de

informação, que resulta do agrupamento de indivíduos em grupos, pode ser medida pela soma total do quadrado dos desvios de todos os pontos em torno da média do grupo para o qual estão contidos. A soma dos erros quadrados é definida como:

$$SQD = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \quad \text{Equação 2}$$

As etapas descritas anteriormente, embora instrutivas acerca do processo de agrupar indivíduos, não facilitam a interpretação dos resultados a respeito de como serão obtidos os grupos e o número deles num processo de agrupamento. Necessita-se de instrumentos mais apropriados; um deles é o dendrograma que é uma representação gráfica muito usada na análise de agrupamento para apresentar o resultado de um agrupamento.

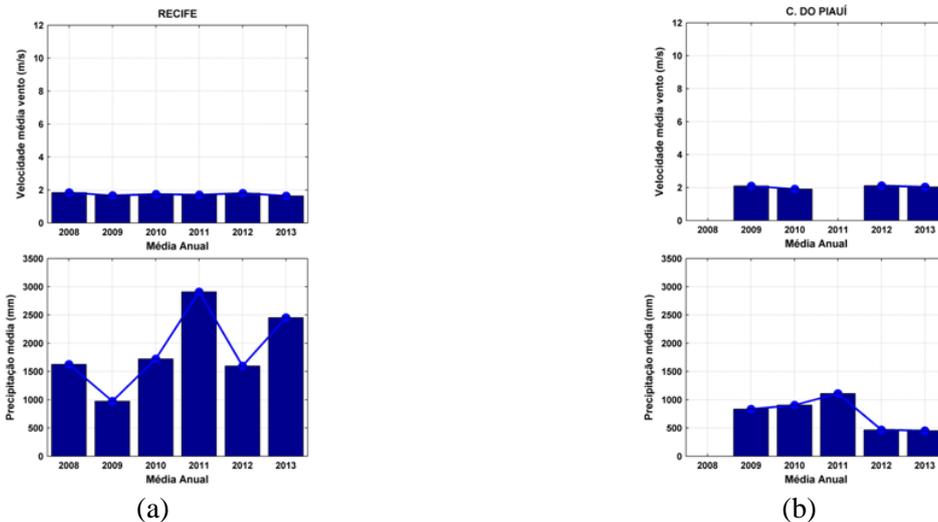


Figura 2 - Média total anual da velocidade do vento e precipitação acumulada para todo o período em estudo para a verificação dos dados: (a) Recife-PE e (b) Castelo do Piauí-PI.

O resultado da análise de qualificação dos dados para todas as estações (espaço amostral) resultou em 13 excluídas. Assim, 108 estações, ou pontos no espaço amostral, foram selecionados para serem submetidos AA.

A determinação das regiões homogêneas no NEB em relação à intensidade do vento foi realizada através de vários métodos de classificação, utilizando como dados de entrada a intensidade do vento e precipitação na AA.

Separou-se em duas etapas a AA, na primeira foram levadas em conta as coordenadas geográficas (latitude e longitude) das estações e na outra não, assim podemos verificar se este tipo de informação a mais tem uma influência significativa no resultado da quantidade e espacialização das regiões homogêneas. Também optou-se em verificar três conjuntos de dados para realizar a

Resultados e discussão

Como descrito anteriormente o primeiro passo foi submeter os dados a um controle de qualidade, assim eliminando dados e estações que apresentaram erros grosseiros ou falhas muito longas. Foram calculadas as médias anuais, mensais, diárias e horárias para cada uma das estações meteorológicas automáticas da região NEB. Na Figura 2 há exemplos de uma estação com dados satisfatórios (Figura 2a) para o período e outra estação com falhas (necessário pelo menos 70% dos dados para um ano) Figura 2b, para as variáveis de intensidade do vento e precipitação. Após esta primeira análise observa-se que mesmo os dados tendo passado na validação, existem séries com muitas falhas e que devem também ser retiradas do estudo.

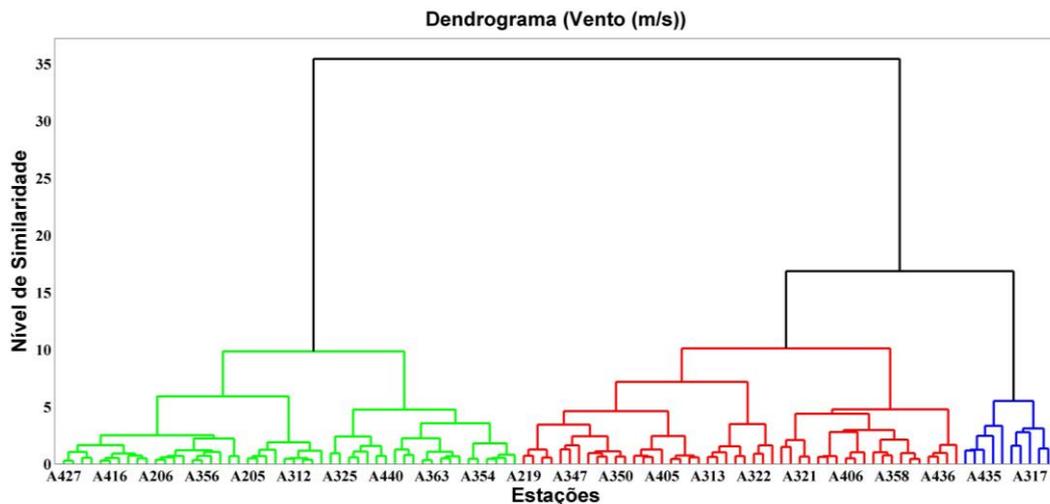
AA: 1º) intensidade do vento; 2º) precipitação e 3º) intensidade do vento + precipitação.

Foram realizadas as análises com a precipitação, pois como descrito na seção 2.1 ela está fortemente relacionada à formação ou aproximação de sistemas meteorológicos em diferentes escalas, que modificam o padrão do vento a nível local ou regional durante sua permanência na região.

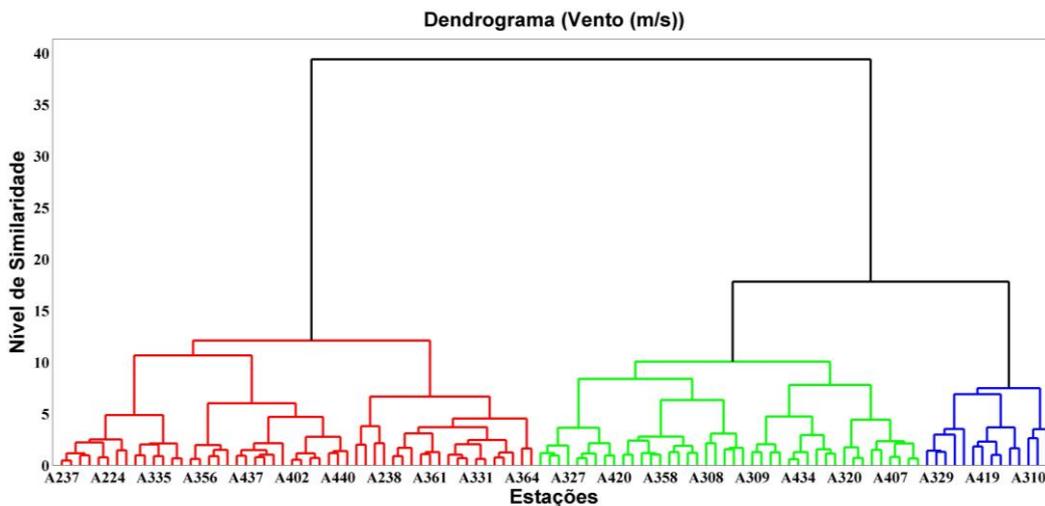
Nas Figuras 3, 4 e 5 a escala vertical mostra o nível de similaridade, pois a cada partição corresponde um valor numérico que representa o nível em que ocorre o agrupamento. Quanto maior for o índice, mais heterogêneos são os indivíduos, ou neste caso, estações meteorológicas agrupadas. As estações são apresentadas na horizontal, ou seja, 108 pontos referenciados pelos seus respectivos ID's (códigos de identificações das estações).

Existem dois métodos de determinação do número de grupos a ser obtido e dos indivíduos que os constituem: um método objetivo (variação da inércia) e outro subjetivo (corte transversal no dendrograma) que determina, através da necessidade e dos dados agrupados, o número de grupos a ser obtido. Tanto o número de grupos bem como as estações contidas em cada um deles, foram determinadas de forma subjetiva através de corte transversal no dendrograma (Araújo, 2005).

Os dendrogramas mostram que dependendo do banco de dados o corte para a divisão do NEB varia entre 3 a 5 regiões, utilizando como medida de similaridade a distância euclidiana e considerando como variável de agrupamento os valores padronizados de intensidade do vento e precipitação médios para todos os meses dos conjuntos de dados qualificados do INMET, além das coordenadas das estações.



(a)



(b)

Figura 3 - Dendrograma resultante da análise objetiva das 108 estações meteorológicas, usando o método hierárquico de Ward para intensidade do vento (a) sem considerar latitude e longitude, e (b) com coordenadas geográficas de cada uma das estações (latitude e longitude).

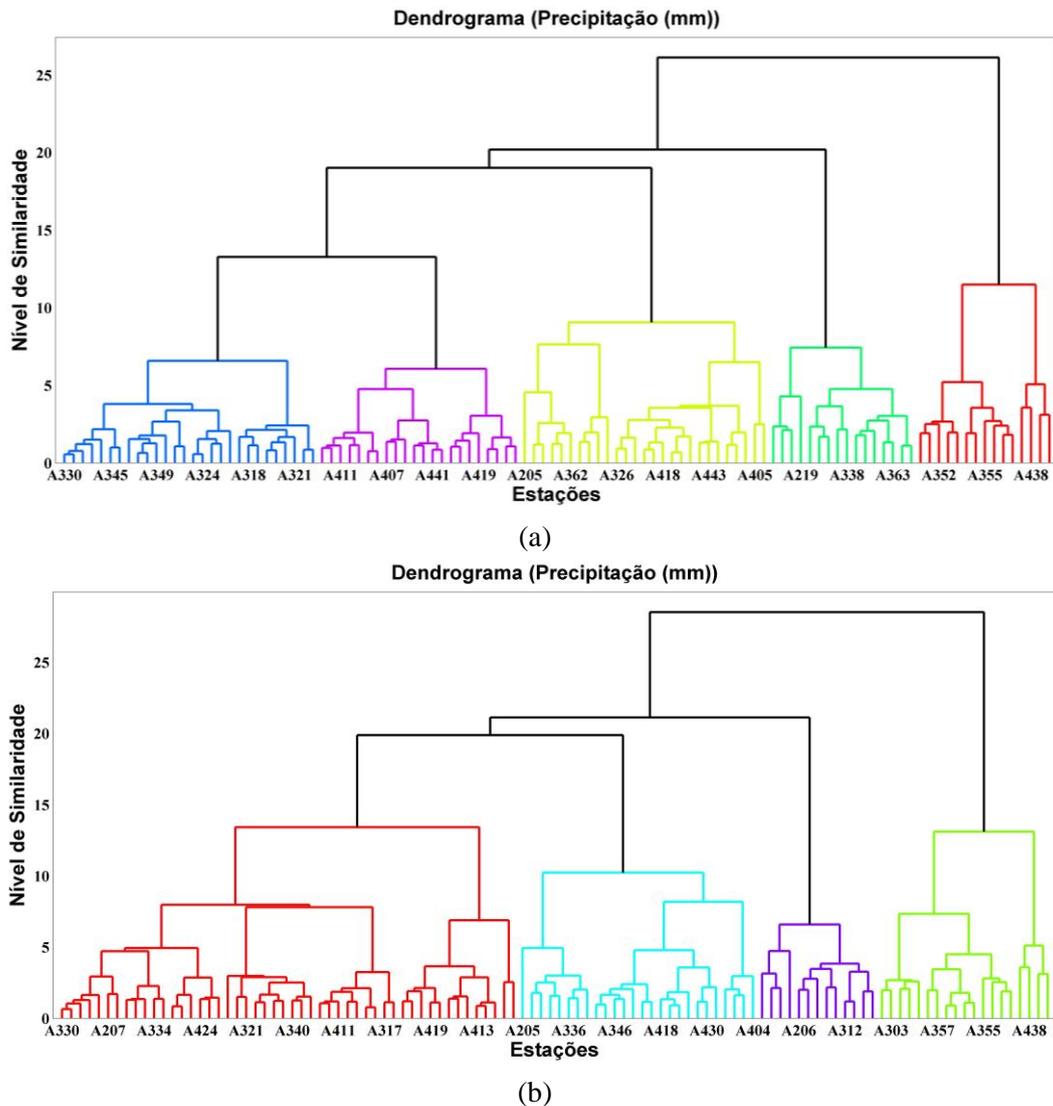


Figura 4 - Dendrograma resultante da análise objetiva das 108 estações meteorológicas, usando o método hierárquico de Ward para precipitação (a) sem considerar latitude e longitude, e (b) com coordenadas geográficas de cada uma das estações (latitude e longitude).

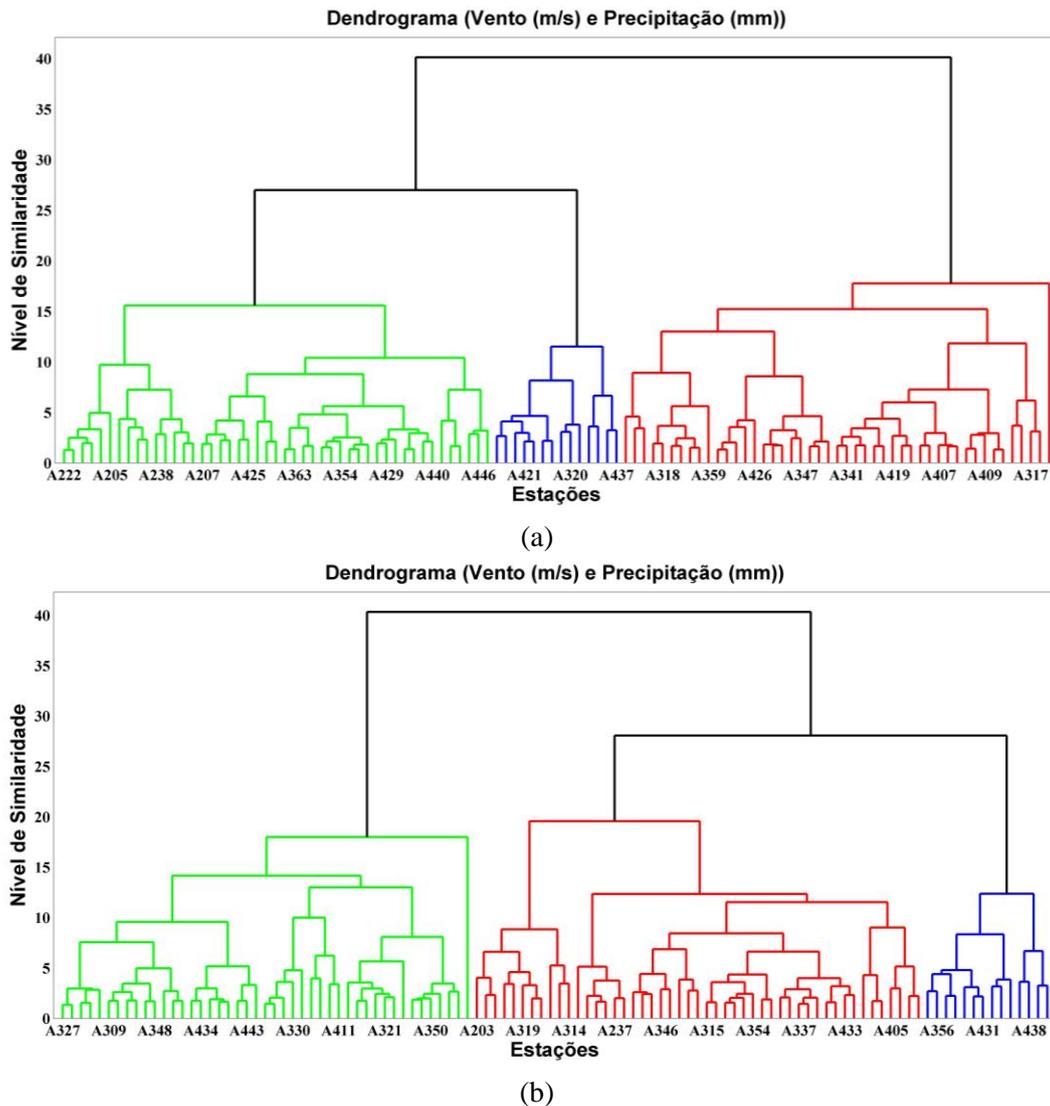


Figura 5 - Dendrograma resultante da análise objetiva das 108 estações meteorológicas, usando o método hierárquico de Ward para intensidade do vento e precipitação (a) sem considerar latitude e longitude, e (b) com coordenadas geográficas de cada uma das estações (latitude e longitude).

Na Figura 6 estão representadas as distribuições espaciais das regiões homogêneas encontradas pela AA para intensidade do vento. Ao acrescentar as coordenadas geográficas o número de regiões permanece o mesmo (Figura 6b). Porém há uma concordância melhor entre as regiões homogêneas no que diz respeito à distribuição

espacial da intensidade do vento quando se leva em conta a latitude e longitude, principalmente para influencias locais (região central da Bahia – Chapada Diamantina, bacia do Rio São Francisco e divisa entre os estados do Ceará e Rio Grande do Norte - Chapada do Apodi) e na parte mais oeste do NEB.

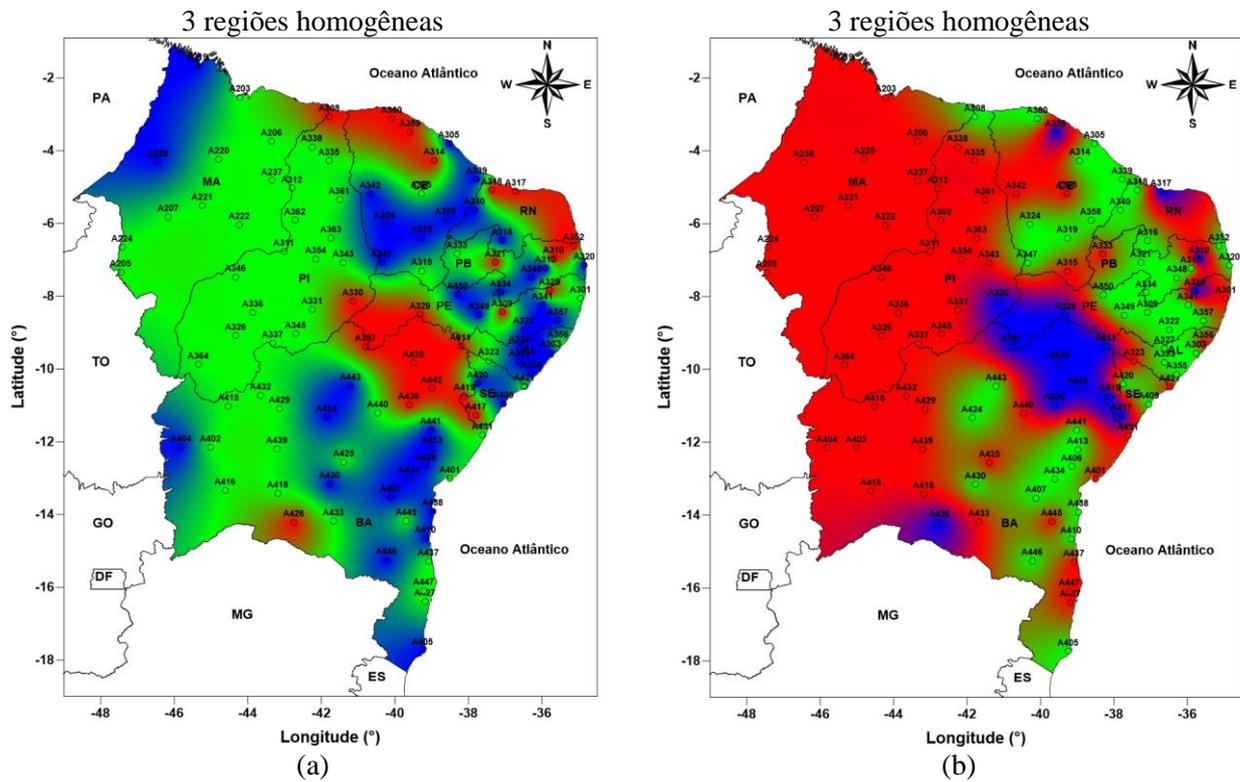


Figura 6 - Distribuição espacial das regiões homogêneas em relação às estações para a intensidade do vento: (a) sem considerar latitude e longitude, e (b) considerando as coordenadas geográficas de cada uma das estações (latitude e longitude).

Na AA para os dados de precipitação (Figura 7) houve diferença no número de regiões homogêneas entre a análise que não levou em conta as coordenadas geográficas 4 regiões homogêneas (Figura 7a) e 5 regiões homogêneas para AA onde foram consideradas as coordenadas de latitude e longitude (Figura 7b). Em ambos os mapas da Figura 7 observa-se uma situação de contorno realizada na interpolação espacial das regiões, isso ocorre pelo fato de se ter uma ou mais estações distantes do resto do grupo que compõem a região homogênea.

Mesmo tendo um número a mais de regiões ao analisar a distribuição espacial de cada AA (Figura 7a e 7b) consegue-se identificar padrões diferentes, na análise que levou-se em conta as coordenadas geográficas há uma melhor representabilidade dos regimes de precipitação conhecidos no NEB (Reboita et al., 2010). Onde houve uma melhor divisão de grupo da região do litoral leste, sertão e parte do litoral e interior do Maranhão e assim representando uma melhor distribuição dos regimes de precipitações do NEB.

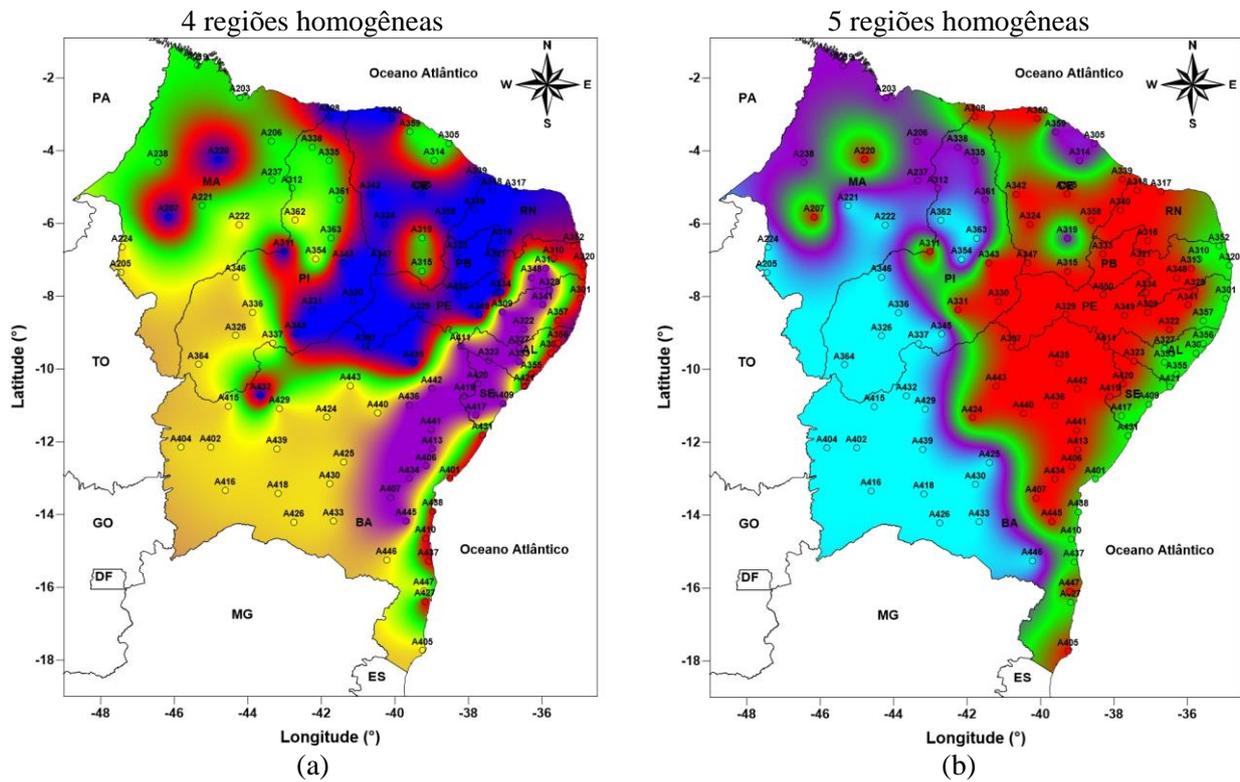


Figura 7 - Distribuição espacial das regiões homogêneas em relação às estações para a precipitação: (a) sem considerar latitude e longitude, e (b) considerando as coordenadas geográficas de cada uma das estações (latitude e longitude).

Na combinação dos dados de intensidade do vento e precipitação para realizar a AA o número de regiões homogêneas encontradas foi igual independente de levar em conta as coordenadas geográficas ou não, três regiões (Figura 8). Também se observa uma forte concordância entre os grupos formados e a climatologia conhecida no NEB para o regime de precipitação [Menezes, 2003 (apud Costa, 2006)]. Assim o resultado da AA com as duas variáveis

meteorológicas (intensidade do vento e precipitação) apresenta um resultado mais coerente para determinar regiões homogêneas levando em conta a climatologia da região.

Sobre utilizar ou não as coordenadas para estimar as regiões homogêneas através da AA, verificamos que os resultados tendem a melhorar quando são utilizadas, principalmente para as análises feitas com apenas uma variável meteorológica (Figura 6b e 7b).

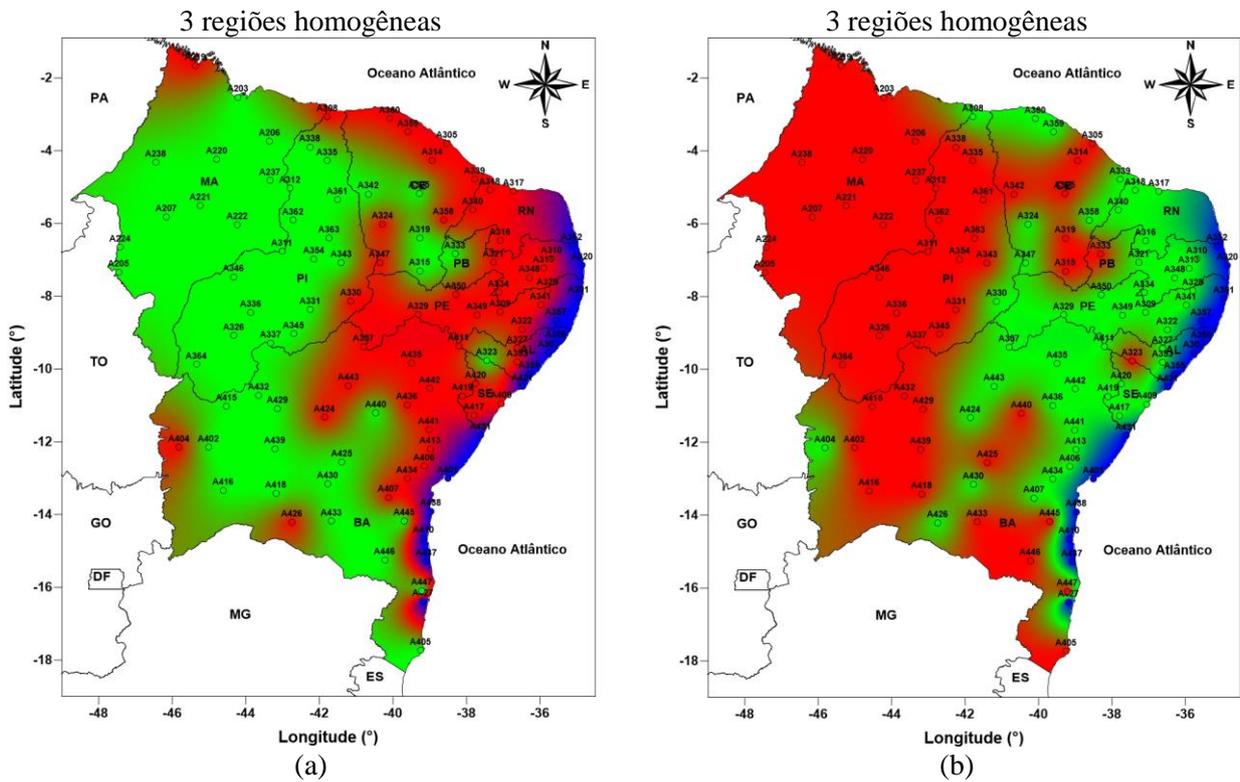
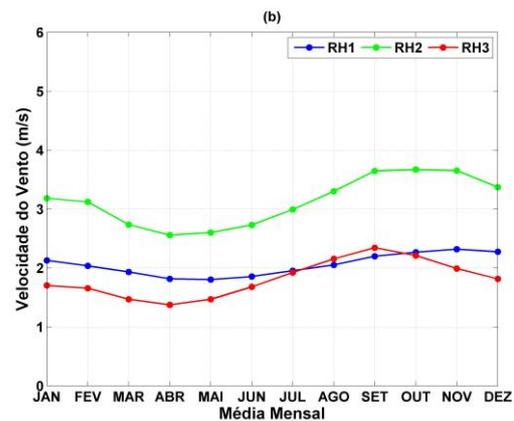
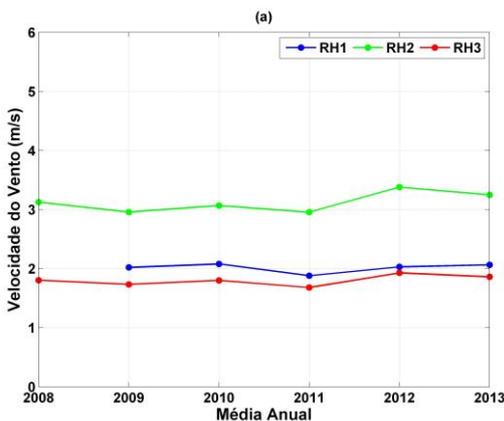


Figura 8 - Distribuição espacial das regiões homogêneas em relação às estações para a intensidade do vento e precipitação: (a) sem considerar latitude e longitude, e (b) considerando as coordenadas geográficas de cada uma das estações (latitude e longitude).

Com a definição dos grupos (Figura 8b), foi realizada uma análise climatológica, onde verificando a velocidade média anual do vento para RH2, Figura 9a, observa-se que esta não obteve dados para o ano de 2008, ou que a quantidade de estações das regiões foi inferior a 70% das localidades que compõem este grupo. Analisando a variabilidade sazonal, Figura 9b e 9c, RH2 e RH3 apresentam a mesma concordância com os maiores valores no início e final do ano e menores valores no período de março a junho. Já para a R1, observa-se um padrão similar entre as outras regiões, porém com valores mais acentuados entre o período de maior e menor incidência de velocidade do vento,

com maiores valores nos meses de agosto a janeiro e menores valores de fevereiro a julho, período de maior intensidade convectiva na RH. Para todas as regiões, os menores valores foram encontrados no mês de abril e os maiores valores no mês de setembro, períodos chuvoso e seco no nordeste, respectivamente. O fator primordial que afeta a velocidade do vento é o regime de chuvas; o período de chuvas mais significativas no NEB inicia-se em dezembro de cada ano e pode estender-se até junho ou julho, dependendo das condições oceânicas e atmosféricas atuantes.



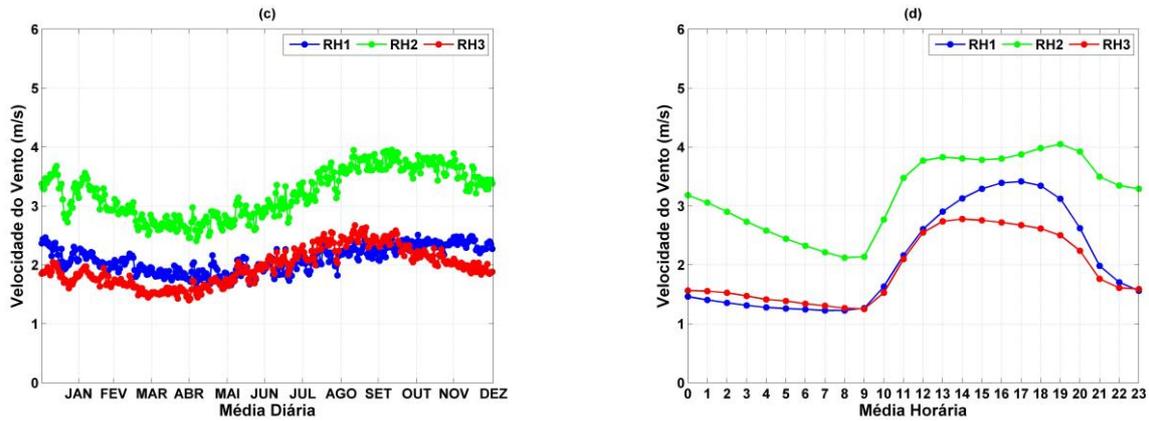


Figura 9 - Médias anuais, mensais, diários e horários para as três regiões homogêneas para a velocidade do vento.

A Figura 9d apresenta-se o ciclo horário de cada região homogênea. Como verificado nos gráficos acima a RH2 apresenta-se os maiores valores de intensidade de vento com menores valores no período da 0 às 9 horas e maiores valores no período compreendido entre as 10 e 23 horas, com valores médios chegando a 4 m/s. As RH1 e RH3 apresentam o mesmo padrão de variação do ciclo horários, exceto para o período das 12h as 22h, onde a RH1 é sempre superior a RH3, provavelmente devido a sua localização. A RH2 é sempre superior às demais devido a sua localização privilegiada, localizada no litoral norte e parte do semiárido do NEB, exceto o litoral do Maranhão, que compõe a RH3, em seguida os maiores valores anuais médios são verificados na RH1.

A RH2 compreende a faixa litorânea do Piauí ao extremo sul no Rio Grande do Norte. As condições de vento em toda região são conduzidas, principalmente, pelo ciclo anual de posição e intensidade da ZCIT e pelas fortes ocorrências de brisas marítimas. A principal causa dos bons resultados de vento nesta região é a ação conjunta dos Ventos Alísios e das fortes brisas marítimas, ambas positivamente influenciadas pela aproximação da ZCIT (Reboitaet al., 2010).

A RH1 se entende do extremo norte da Paraíba até o extremo sul da Bahia. A menor intensidade de vento nesta região em relação a RH2 pode ser ocasionada por uma redução dos Ventos Alísios, a ocorrência de brisas marítimas mais fracas, devido à redução na magnitude dos gradientes térmicos oceano-terra e a ação de frentes frias remanescentes que chegam ao sul da Bahia (Costa, 2006). A RH3 engloba praticamente todo o Maranhão, interior do Piauí e parte leste da Bahia, possui regimes de vento anuais mais amenos, com decréscimo gradual à medida que se aproxima da ZCIT. Pode-se observar nos meses de verão, efeitos negativos da aproximação da Massa

Equatorial Continental, originada na Amazônia Central e com característica de altas temperaturas e umidade (Cavalcanti et al, 2009).

Conclusão

No Nordeste do Brasil - NEB existem micros regiões com padrões climáticos distintos, principalmente se tratando da variável vento que esta fortemente relacionada com a microescala. Em virtude de representar melhor a climatologia e os fenômenos que atuam no NEB, esta análise de agrupamento - AA apresenta uma facilidade para a configuração das grades de modelos atmosféricos, por exemplo, WRF. As regiões criadas pela AA usando as duas variáveis (intensidade do vento e precipitação) apresentaram uma boa divisão do NEB em três regiões homogêneas.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (Bolsa de Doutorado) e ao INMET por disponibilizar os dados das estações meteorológicas automáticas utilizadas neste estudo.

Referências

- Alamillos, S.F.J., Vázquez, P.D., Arias, R.J.A., Fanego, L.V., Pescador, T.J., 2013. Analysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52, 1592-1609.
- Amarante, O.A.C., Brower, M., Zack, J., de Sá, A.L., 2001. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.
- Araújo, S.M.B., 2005. Estudo da Variabilidade Climática em Regiões Homogêneas de Temperaturas Médias do ar no Rio Grande do

- Sul. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Pelotas, UFPEL.
- Bussab, W.O., Miazaki, E.S., Andrade, D., 1990. Introdução à análise de agrupamentos. Associação Brasileira de Estatística, São Paulo.
- Cavalcanti, I.F.A., Ferreira, N.J., Silva, M.G.A. J., Dias, M.A.F., 2009. Tempo e clima no Brasil. Editora Oficina de Textos, São Paulo, cap. 13, pp. 197-212.
- Compagnucci, R.H., Salles, M.A., 1997. Surface pressure patterns during the year over southern South America. *International Journal of Climatology* 17, 635 - 653.
- Costa, R.S., 2006. Avaliação do desempenho do modelo de mesoescala MM5 na simulação de eventos de precipitação extrema no estado de Alagoas. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Rio de Janeiro, UFRJ.
- Duran. B.S., Odell, P.L., 1974. Cluster analysis. Asurvey Springer.
- Everitt, B.S., 1974. Cluster analysis. London, Heinemann Educational Books Ltd.
- Freitas, J.C. de, Andrade, A.R.S. de, Braga, C.C., Neto, A.H.G., Almeida, T.F. de, 2013. Análise de agrupamentos na identificação de regiões homogêneas de índices climáticos no estado da Paraíba, PB – Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 6, 732 - 748.
- GWEC, 2016. Global wind report annual market update 2015. Disponível http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf
- Hair, Jr.J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L., Black, W.C., 2005. Análise multivariada de dados, 5 ed. Porto Alegre.
- Hasager, C., Mouchem, A., Badger, M., Bingol, F., Karagali, I., Driesenaar, T., Stoffelen, A., Peña, A., Longépé, N., 2015. Offshore wind climatology based on synergetic use of Envisat ASAR, ASCAT and QuikSCAT. *Remote Sensing of Environment*, 156, 247-263.
- Kayano, M.T., Andreoli, R.V., 2009. Clima da região Nordeste do Brasil. In: Iracema F. A. Cavalcanti et al. (orgs). Tempo e Clima no Brasil, editora Oficina dos Textos, São Paulo, pp. 213-233.
- Kousky, V.E., 1979. Frontal influences on northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, 107(9), 1140-1153.
- Lima, F.J.L., 2015. Previsão de irradiação solar no nordeste do Brasil empregando o modelo WRF ajustado porredes neurais artificiais (RNAs). Tese (Doutorado em Meteorologia). São Jose dos Campos, INPE.
- Lima, F.J.L., Cavalcanti, E.P., de Souza, E.P., Silva, E.M., 2012. 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*.
- Lima, F.J.L., Amanajás, J.C., Guedes, R.V.S., Silva, E.M., 2010. Análises de Componente Principal e de Agrupamento para estudo de ventos para ageração de energia eólica na região do Ceará, Paraíba, Pernambuco e RioGrande do Norte, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, 5,188-201.
- Martins, F.R., Guarnieri, R.A., Pereira, E.B., 2008. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*.
- Mattar, C., Borvarán, D., 2016. Offshore wind power simulation by using WRF in the central coast of Chile. *Renewable Energy*, 94, 22-31.
- Meneghetti, G.T., Ferreira, N.J., 2009. Variabilidade sazonal e interanual da precipitação no nordeste Brasileiro. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, (XIVSBSR), Natal, p. 1685-1689.
- Menezes, D.C., 2003. Estudos dos casos de vórtices ciclônicos em altos níveis e influência destes na precipitação observada sobre a cidade de Maceió noperíodo de dezembro de 2001 a janeiro de 2002. Monografia (Graduação em Meteorologia). Maceió, UFAL.
- Mingoti, S.A., 2005. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte, Editora UFMG.
- Molion, L.C.B., Bernardo, S.O., 2002. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17, 1,10.
- Monteiro, C., Bessa, R., Miranda, V., Botterud, A., Wang, J., Conzelmann, G., 2009. Wind Power forecasting: State-of-the-art 2009.
- Moura, M.S.B., Galvinctio, J.D., Brito, L.T. de L., Souza, L.S.B. de, Sá, I.I.S., Silva, T.G.F. da, 2007. Clima e água de chuva no semi-árido. EMBRAPA Semi-árido, Petrolina/PE, cap. 2, 37-59. Disponível: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/159649>.
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima F. J. L.; Rüter, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G, 2017. Atlas Brasileiro de energia Solar. 2. ed. São José dos Campos, INPE.
- Pes, M. P., 2015. Impactos das variações e mudanças climáticas sobre os ventos extremos

- e seus efeitos no setor elétrico brasileiro. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre). São Jose dos Campos, INPE.
- Pinto, L.I.C., Martins, F.R., Pereira, E.B., Fisch, G.F., Lyra, R.F. da F., 2014. 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* 29, 242-258.
- Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P. da, Ambrizzi, T., 2010. Regime de precipitação na América do Sul: Umarevisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25, 185 - 204.
- Silva, P.K. de O., Santos, S. de A., Aragão, M.R. da S., Correia, M. de F., Santos, W.S. dos, 2013. Análise de agrupamento em área de potencial eólico na região do submédio São Francisco. *Revista Ciência e Natura*, 13 -15.
- Vos, R. de, Sawin, J., 2012. Chapter One e Global and Regional Trends in Renewable Energy. In: *Ready: Renewable Energy Action on Deployment*, p. 3-28.
- Ward, J. H., 1963. Hierarchical grouping of otimizada objective function. *Journal of American Statistical Association*, 58, 236-244.
- Wilks, D.S., 2006. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2 ed., Academic Press.