

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE MULTIVARIADA APLICADA AO VENTO NA
ÁREA COSTEIRA DO NORDESTE DO BRASIL

AUTORA: POLLYANNA KELLY DE OLIVEIRA SILVA

FEVEREIRO – 2011

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

**ANÁLISE MULTIVARIADA APLICADA AO VENTO NA ÁREA
COSTEIRA DO NORDESTE DO BRASIL**

POLLYANNA KELLY DE OLIVEIRA SILVA

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO -2011

POLLYANNA KELLY DE OLIVEIRA SILVA

**ANÁLISE MULTIVARIADA APLICADA AO VENTO NA ÁREA
COSTEIRA DO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Orientadora: Dra. Maria Regina da Silva Aragão

**CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO DE 2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL

DA UFCG

S586a Silva, Pollyanna Kelly de Oliveira.

Análise multivariada aplicada ao vento na área costeira do Nordeste do Brasil / Pollyanna Kelly de Oliveira Silva. — Campina Grande, 2011.

61 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia)- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria Regina da Silva Aragão.

1. Meteorologia em Meso e Grande Escala. 2. Análise em Componentes Principais. 3. Análise de Agrupamento. 4. Vento à Superfície. 5. Regiões Homogêneas. 6. Padrões Sazonais. I. Título.

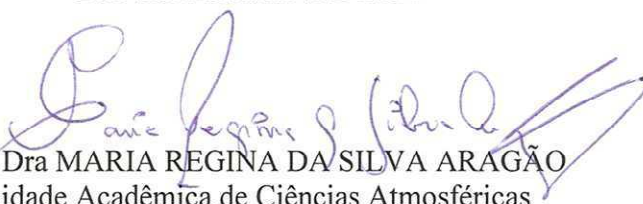
CDU – 551.515.6(043)


POLLYANNA KELLY DE OLIVEIRA SILVA

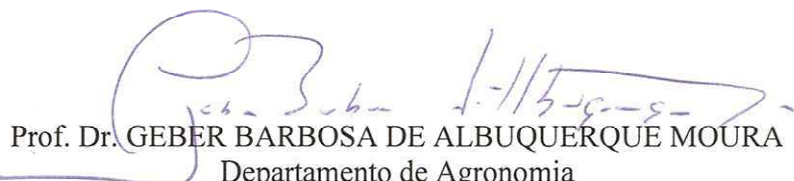
ANÁLISE MULTIVARIADA APLICADA AO VENTO NA ÁREA COSTEIRA DO
NORDESTE DO BRASIL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25/02/2011

BANCA EXAMINADORA


Profa Dra MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Profa. Dra. CELIA CAMPOS BRAGA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. GEBER BARBOSA DE ALBUQUERQUE MOURA
Departamento de Agronomia
Universidade Federal Rural de Pernambuco

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,

João Maria & Sandra Margarete,

que sempre me apoiaram nos estudos.

Tornando-me motivo de orgulho para eles.

As minhas irmãs,

Priscylla, Palloma e Pâmella,

pelo grande amor que tenho por elas.

Ao meu noivo,

Wenderson,

*pelo incentivo, companheirismo
e compreensão durante este período.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por estar presente nos momentos difíceis e pelas oportunidades em momentos certos da minha vida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudo.

À professora Dra. Maria Regina da Silva Aragão pelos ensinamentos e pela dedicação e orientação deste trabalho. À professora Dra. Magaly de Fatima Correia pelos ensinamentos e auxílio no decorrer deste trabalho.

A todos os amigos do curso de mestrado e da graduação. Em especial, as minhas amigas Richelle Kehrlé e Samira Azevedo que estiveram sempre presentes em todas as dificuldades que enfrentei, como também na solução de problemas.

À Ewerton Cleudson de Sousa Melo pelos ensinamentos e esclarecimento de dúvidas no decorrer do trabalho. À Alexandra Barbosa Silva pelo auxílio na obtenção dos dados. À Madson Tavares pela paciência e dedicação durante a fase final da dissertação, auxiliando na elaboração de figuras.

À subdiretoria do ICEA pela cessão de dados que não estavam disponíveis na página eletrônica da REDEMET. Ao diretor do ICEA Cel Av Ricardo Barion, e em especial, a Antonio Luís Cardoso Neto (3°S QSS BMT) pela atenção e prontidão no envio dos dados.

Aos professores e funcionários da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande (DCA-UFCG), fundamentais na construção do aprendizado. Em especial, a Divanete Cruz Rocha, pela atenção e assistência em diversos momentos.

De forma geral, a todos os familiares e amigos que, mesmo distantes, compartilharam desse ideal, incentivando-me a prosseguir e ultrapassar todos os obstáculos.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho técnicas multivariadas (análise fatorial em componentes principais e análise de agrupamento) são empregadas com o objetivo de identificar regiões homogêneas e padrões sazonais do vento à superfície na área costeira do Nordeste do Brasil. Dados horários do vento à superfície disponibilizados na página eletrônica da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET) para as oito capitais litorâneas da região, referentes ao período 2003-2009, são utilizados. Os campos médios mensais do vento à superfície evidenciam o contraste entre a direção do vento em São Luís (leste-nordeste) e nas demais capitais (leste-sudeste). A velocidade do vento varia no decorrer do ano em toda a área litorânea; nos meses menos (mais) chuvosos os valores são maiores (menores), entre 4 e 6 m/s (1 e 3 m/s). A variabilidade encontrada nos padrões do vento médio mensal é devida principalmente à alta subtropical do Atlântico Sul, e a outros sistemas atmosféricos de grande escala que atuam nos meses de maior pluviosidade. Na análise temporal sazonal é possível identificar três regiões homogêneas na área litorânea. A primeira é formada apenas por São Luís, devido aos ventos de leste-nordeste. A segunda, formada por João Pessoa e Maceió, é caracterizada por baixas velocidades do vento. A terceira, formada por Fortaleza, Natal, Recife, Aracaju e Salvador, se caracteriza por velocidades do vento maiores. Resultados semelhantes são encontrados na análise temporal trimestral. Na análise espacial sazonal e interanual são obtidas duas componentes principais rotacionadas com 95% de variância explicada. A CP1 (CP2) é bem explicada por Fortaleza e as seis capitais do litoral leste (São Luís). Os fatores identificam dois regimes de vento no litoral do Nordeste do Brasil, em consequência do modo de atuação da alta subtropical do Atlântico Sul. A aplicação de técnicas de agrupamento resulta em grupos homogêneos que representam padrões sazonais distintos. São obtidos Grupos das Velocidades Máximas, Grupos Mistos, Grupos das Velocidades Mínimas e Grupos das Direções Iguais, nos quais meses de condições climáticas extremas são destacados, a exemplo de janeiro de 2004 que integra os Grupos das Velocidades Mínimas.

ABSTRACT

In this work multivariate techniques (factorial analysis by principal components and cluster analysis) are used for identification of homogeneous regions and seasonal patterns of the surface wind on the coastal area of Northeast Brazil. Hourly surface wind data available on the electronic page of the Meteorological Network of the Brazilian Air Force Command (REDEMET) for the eight coastal northeastern metropolis, covering the period 2003-2009, are used. The monthly mean surface wind fields show the São Luís wind direction (east-northeast) to be in contrast with the direction on the other seven metropolis (east-southeast). The wind speed varies throughout the year on the entire coastal area; the values are lower (higher) in the rainiest (less rainy) months, varying from 4 to 6 m/s (1 to 3 m/s). The seasonal variability found on the mean surface wind patterns is mainly due to the South Atlantic subtropical high, and other large scale atmospheric systems that occur during the higher rainfall months. Three homogeneous regions are identified on the coastal area by performing a temporal seasonal analysis. The first region is formed by São Luís only, due to the east-northeasterly winds there. The second one, formed by João Pessoa and Maceió, is characterized by low wind speeds. The third one, comprised by Fortaleza, Natal, Recife, Aracaju and Salvador, is characterized by higher wind speeds. Similar results are obtained by performing a temporal analysis of four three-month periods. Two rotated principal components accounting for 95% of the explained variance are obtained by means of a seasonal and interannual spatial analysis. The PC1 (PC2) is well explained by Fortaleza and the six metropolis located on the east coast (São Luís). The factor loadings identify two wind regimes on the coastal area of Northeast Brazil as a consequence of the South Atlantic subtropical high circulation. Homogeneous groups representing distinct seasonal patterns are identified by applying cluster analysis techniques. Maxima Speeds Groups, Mixed Groups, Minima Speeds Groups and Equal Directions Groups are obtained among which months of extreme climatic conditions are highlighted as, for example, January 2004 in the Groups of Minima Speeds.

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO	
ABSTRACT	
I. LISTA DE FIGURAS.....	i
II. LISTA DE TABELAS.....	iv
III. LISTA DE QUADROS.....	v
IV. LISTA DE ABREVIATURAS.....	vi
V. LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	10
3.2 MATERIAIS.....	11
3.3 MÉTODOS.....	13
3.3.1 Decomposição do Vento e Cálculo das Médias.....	13
3.3.1.1 Cálculo das Médias Mensais das Componentes do Vento à Superfície	13
3.3.2 Análise Fatorial (AF).....	14
3.3.2.1 Análise em Componentes Principais (ACP).....	16
3.3.2.2 Rotação de Fatores.....	17
3.3.2.3 Número de Componentes Principais Retidas.....	18
3.3.3 Análise de Agrupamento (AA).....	18
3.3.3.1 Medidas de Similaridade.....	19
3.3.3.2 Critérios de Agrupamento.....	20
3.3.4 Análise da Matriz de Dados.....	21
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
4.1 MÉDIAS MENSAIS DO VENTO À SUPERFÍCIE.....	22
4.2 PADRÕES DE VARIABILIDADE DO VENTO À SUPERFÍCIE.....	25
4.2.1 Análise Temporal Sazonal.....	25
4.2.2 Análise Temporal Trimestral.....	27

4.2.2.1	Análise em Componentes Principais (ACP).....	27
4.2.2.2	Análise de Agrupamento (AA)	30
4.2.3	Análise Espacial Sazonal e Interanual	33
4.2.3.1	Análise em Componentes Principais	33
4.2.3.2	Análise de Agrupamento (AA)	36
4.2.4	Análise Espacial Mensal	41
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....		56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		58

I. LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1– Distribuição espacial das estações (aeroportos) do Nordeste do Brasil utilizadas no estudo. A sigla dos estados, dos aeroportos e o nome das respectivas cidades são vistos no mapa..... 12
- Figura 4.1 - Vento médio à superfície nos aeroportos do litoral do Nordeste do Brasil para o período de 2003-2009 para os meses de janeiro a dezembro (a – l). As setas indicam a direção e o círculo representa a velocidade do vento (m/s) de acordo com a legenda acima. (Fonte dos dados: [http:// www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br))..... 24
- Figura 4.2 – Definição de região homogênea das duas componentes (zonal e meridional) médias mensais do período 2003-2009: (a) curva de inércia e (b) dendrograma. (Fonte dos dados: [http:// www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br)). 26
- Figura 4.3 – Correlações dos dois primeiros fatores comuns temporais dos trimestres: (a) ASO (agosto – setembro – outubro), (b) NDJ (novembro – dezembro – janeiro), (c) FMA (fevereiro – março – abril) e (d) MJJ (maio- junho – julho), das componentes zonal e meridional do vento à superfície. A primeira (segunda) componente está representada pela linha azul (vermelha). (Fonte dos dados: [http:// www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br))..... 30
- Figura 4.4 – Definição de região homogênea das componentes zonal e meridional média mensal do período 2003-2009, através da curva de inércia e dendrograma para os trimestres: (a) ASO, (b) NDJ, (c) FMA e (d) MJJ. (Fonte dos dados: [http:// www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br))..... 32
- Figura 4.5– (a) Dois primeiros fatores comuns espaciais (correlações) das componentes zonal e meridional do vento à superfície que explicam 95,15% da variância total dos dados (73,85%; 21,3%) na área litorânea do Nordeste. A primeira e segunda componente estão representadas, respectivamente, pela linha azul e vermelha; (b) Projeções das componentes principais (CPs) no plano fatorial delimitado pelo primeiro e segundo fator. (Fonte dos dados: [http:// www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br))..... 35

- Figura 4.6 – Definição de meses homogêneos para análise conjunta das CZV e CMV no período de 2003 a 2009: (a) curva de inércia e (b) dendrograma (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>)..... 36
- Figura 4.7 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta: (a) Grupo I (Grupo das Velocidades Máximas), (b) Grupo II (Grupo Mist), (c) Grupo III (Grupo das Velocidades Mínimas), (d) Grupo IV (Grupo das Direções Iguais). 38
- Figura 4.8 – Dendrograma da definição de anos homogêneos entre os meses de: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>)..... 41
- Figura 4.9 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de janeiro: (a) Grupo I (2006), (b) Grupo II (2003, 2004) e (c) Grupo III (2005, 2007, 2008, 2009). 44
- Figura 4.10 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de fevereiro: (a) Grupo I (2003, 2004), (b) Grupo II (2007, 2008, 2009) e (c) Grupo III (2005 e 2006). 45
- Figura 4.11 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de março: (a) Grupo I (2003, 2004, 2007), (b) Grupo II (2005, 2006, 2009) e (c) Grupo III (2008). 46
- Figura 4.12 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de abril: (a) Grupo I (2003, 2004, 2007), (b) Grupo II (2005) e (c) Grupo III (2006, 2008, 2009). 47
- Figura 4.13 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de maio: (a) Grupo I (2005, 2006, 2007), (b) Grupo II (2009), (c) Grupo III (2008) e (d) Grupo IV (2003, 2004). 48

Figura 4.14 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de junho: (a) Grupo I (2003, 2004), (b) Grupo II (2008, 2009) e (c) Grupo III (2005, 2006, 2007).	49
Figura 4.15 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de julho: (a) Grupo I (2003, 2004, 2005, 2006, 2007), (b) Grupo II (2008) e (c) Grupo III (2009).	50
Figura 4.16 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de agosto: (a) Grupo I (2005, 2006, 2008, 2009), (b) Grupo II (2003, 2004) e (c) Grupo III (2007).	51
Figura 4.17 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de setembro: (a) Grupo I (2003, 2005, 2006), (b) Grupo II (2009), (c) Grupo III (2007, 2008) e (d) Grupo IV (2004).	52
Figura 4.18 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de outubro: (a) Grupo I (2003, 2004, 2005, 2007, 2008), (b) Grupo II (2006) e (c) Grupo III (2009).	53
Figura 4.19 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de novembro: (a) Grupo I (2003, 2004, 2005, 2007), (b) Grupo II (2008, 2009) e (c) Grupo III (2006).	54
Figura 4.20 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de dezembro: (a) Grupo I (2003, 2004, 2005, 2007), (b) Grupo II (2008, 2009) e (c) Grupo III (2006).	55

II. LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada para análise do trimestre ASO.....	28
Tabela 4.2 Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada para análise do trimestre NDJ.	28
Tabela 4.3 Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada para análise do trimestre FMA.	29
Tabela 4.4 Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada para análise do trimestre MJJ.	29
Tabela 4.5 - Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada para análise.	34

III. LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Informações dos Aeroportos das Capitais Litorâneas do Nordeste.....	12
Quadro 4.1– Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática, para análise trimestral no modo-T.	33
Quadro 4.2 – Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática para matriz de dados no modo-S.	37
Quadro 4.3 – Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática para matriz de dados no modo-S do Tipo 3.....	43

IV. LISTA DE ABREVIATURAS

AA- Análise de Agrupamento

ACP- Análise em Componentes Principais

AF – Análise Fatorial

ASO – Agosto – Setembro - Outubro

ASAS – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

CMV – Componente Meridional do Vento

CP1 – Componente Principal 1

CP2 - Componente Principal 2

CZV- Componente Zonal do Vento

DOL – Distúrbios Ondulatórios de Leste

ENOS – El Niño-Oscilação do Sul

FOE – Funções Ortogonais Empíricas

FMA – Fevereiro – Março – Abril

GDI – Grupo das Direções Iguais

GMX – Grupo Misto

GVM – Grupo das Velocidades Máximas

GVN – Grupo das Velocidades Mínimas

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

KMO – Kaiser – Main - Olkin

MJJ- Maio – Junho - Julho

NDJ- Novembro – Dezembro - Janeiro

REDEMET – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica

SBFZ – Fortaleza

SBJP - João Pessoa

SBMO – Maceió

SBNT- Natal

SBRF – Recife

SBSL- São Luís

SBSV- Salvador

VCAN – Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

V. LISTA DE SÍMBOLOS

a	cargas fatoriais
b	autovetor da matriz de dados
d	determinado dia
e	parcela de variação da variável (erro)
F	matriz dos fatores comuns
F*	matriz dos fatores rotacionados
g	cargas fatoriais rotacionadas
G	matriz das cargas rotacionadas
h	determinada hora
i	número de colunas
j	número de linhas
μ	vetor de médias
m	número de fatores
n	determinado mês
N	número de meses para uma determinada estação
λ	autovalor da matriz de dados
θ	direção do vento (radianos)
p	número de variáveis
ρ	matriz de correlações
r	correlação entre as variáveis
u	componente zonal do vento (m/s)
v	componente meridional do vento (m/s)
V	módulo da velocidade do vento (m/s)
X	matriz de dados originais (variáveis padronizadas)
y	determinado ano
Y	número de anos para uma determinada estação
Z	componentes principais

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A área litorânea do Nordeste do Brasil abriga grandes centros urbanos onde vive a maioria da população da região. Nessa área é crescente a valorização do espaço urbano. Os investimentos financeiros em diversos setores de atividades, a exemplo do turismo, tem melhorado aspectos da infra-estrutura (saneamento básico, recuperação de patrimônios históricos, proteção ambiental, etc.) e desenvolvido o setor da construção civil de pequeno, médio e grande porte. Dentre as diversas questões relacionadas à intensificação de tais investimentos, destacam-se as de alcance ambiental e as referentes ao uso dos recursos ambientais e paisagísticos.

O vento observado à superfície nas cidades costeiras do Nordeste do Brasil é resultado da interação entre circulações do tipo brisa (marítima/terrestre) e circulações de grande escala. Os ventos alísios associados à alta subtropical do Atlântico Sul dominam essa área, com intensidade e direção que variam ao longo do ano. A área litorânea também pode ser afetada por aspectos associados a mudanças climáticas globais como elevações significativas do nível médio do mar provocadas pela expansão térmica dos oceanos ou pelo aumento da velocidade do vento. Esses fatores devem ser considerados no planejamento urbano e controle ambiental das grandes cidades da área costeira e tem sido bastante discutidos. Neste contexto, o vento é uma variável meteorológica de suma importância por ter influência significativa na determinação do tempo e clima de uma região. Por outro lado, há poucos estudos sobre esta variável em contraste, por exemplo, com a precipitação.

Assim, neste trabalho o objetivo foi investigar a variabilidade sazonal e interanual do vento à superfície na área litorânea do Nordeste do Brasil. Para tanto, foram utilizados dados horários do vento coletados nos aeroportos das oito capitais litorâneas do Nordeste do Brasil no período de 2003 a 2009. As técnicas estatísticas multivariadas de Análise Fatorial em Componentes Principais e Análise de Agrupamento permitiram identificar regiões homogêneas e padrões sazonais da circulação atmosférica à superfície no litoral da região.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O vento à superfície é uma importante variável climática, com diversas aplicações práticas e ecológicas. É fundamental na agricultura, construção civil, transportes aéreos e marítimos, geração de energia eólica, controle da qualidade do ar, entre outros. Uma compreensão das atuais condições do vento se torna importante sob o ponto de vista das mudanças climáticas.

É evidente que a determinação do clima de uma região não depende apenas do conhecimento do regime de vento, mas também de outras variáveis como precipitação, temperatura, radiação solar, evaporação, umidade do solo e do ar, entre outras. A maioria das pesquisas sobre o tempo e o clima do Nordeste investiga a temperatura e precipitação em diversas escalas espaciais e temporais. Por outro lado, alguns estudos buscam uma inter-relação entre a circulação atmosférica e a precipitação no Nordeste do Brasil.

KOUSKY (1979) analisou dados à superfície de temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento, pressão e nebulosidade de um período de 10 anos (1961-1970) para identificar a passagem de sistemas frontais no sul da Bahia e sua influência sobre as condições de tempo no Nordeste do Brasil. O autor observou que grande parte da precipitação no período novembro-fevereiro está associada aos sistemas frontais. Na costa leste da região, o máximo de precipitação ocorre no período maio-julho, tendo como um dos fatores para esse aumento a passagem de sistemas frontais. Os eventos de precipitação da costa norte parecem, por vezes, estar associados aos sistemas de origem frontal. Flutuações na pressão são observadas em quase toda a região, sendo que com maior amplitude na área mais ao sul.

KOUSKY (1980) estudou a variação diária da precipitação no Nordeste para o período de 1961-1970 a partir de dados de precipitação observados em três horários locais: 09:00 h, 15:00 h e 21:00 h. Na maioria das áreas costeiras foi observado um máximo noturno na precipitação, provavelmente devido à convergência entre o escoamento médio em direção ao continente (alísios) e o escoamento da brisa terrestre (em direção ao mar). Um máximo diurno ocorre em áreas situadas a 100-300 km de distância do litoral, no interior, que estão associadas ao desenvolvimento e avanço da brisa marítima para o interior. A variabilidade diurna da precipitação, na maioria das localidades do interior, parece ser devida a brisas de vale-montanha. Variações sazonais são vistas em áreas da costa norte do Brasil. As variações sazonais na precipitação média mensal de áreas do litoral leste mostram boa correlação com a intensidade da brisa terrestre.

RAO et al. (1993) utilizaram séries de precipitação de 63 estações situadas na costa leste do Nordeste do Brasil no período de 1914-1983 e dados de vento das ilhas de Abrolhos e Trindade para estudar a variação sazonal e interanual da precipitação nesta região. Os autores constataram que a estação chuvosa ocorre nos meses de abril a julho (60% da precipitação anual) e que a estação seca é de setembro a dezembro (10% da precipitação anual). As chuvas nas estações de outono e inverno estão associadas a ventos de sudeste que sopram perpendicularmente à costa. A intensidade e localização da alta subtropical do Atlântico Sul (ASAS) tem papel importante na modulação da direção e intensidade do vento na costa leste e influencia nas chuvas, uma relação comprovada devido à forte correlação positiva da estação de Abrolhos com a precipitação dessa região.

MOSCATI & GAN (2007) analisaram a variabilidade da precipitação e do vento em 850hPa na região semi-árida do Nordeste, utilizando dados médios diários de reanálises do NCEP/NCAR das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento, altura geopotencial, temperatura, umidade específica e temperatura potencial em 850 hPa, 500 hPa e 250 hPa, além de dados de precipitação do Climate Prediction Center para o período de 1977-1997. Diversos índices foram determinados a partir das componentes do vento (u, v), da precipitação e da diferença entre as componentes. Como resultado os autores observaram a correlação positiva da precipitação com a componente zonal (u) e com a diferença entre as componentes, e correlação negativa da precipitação com a componente meridional (v). Essa relação pode indicar que quando as componentes de leste e sul intensificam (enfraquecem) a chuva diminui (aumenta) na região. Além disso, os autores concluíram que, sob o ponto de vista estatístico, a diferença entre as componentes parece

ser mais eficaz para descrever a variabilidade diária da precipitação no interior da região semi-árida em comparação com as componentes zonal e meridional isoladamente.

A busca de relações entre os elementos meteorológicos também tem se beneficiado com a aplicação de técnicas de análise multivariada como a Análise Fatorial em Componentes Principais (ACP) e a Análise de Agrupamento (AA). Elas possibilitam identificar regiões homogêneas e padrões de variabilidade espacial e temporal, facilitando a identificação e a compreensão dos mecanismos físicos envolvidos em diversas escalas de tempo e espaço.

GONG & RICHMAN (1995) empregaram a análise de agrupamento hierárquico e não hierárquico utilizando vários métodos de classificação (ligação simples, ligação completa, ligação média entre os grupos, ligação média dentro de um novo grupo, método de Ward, *k-means*, núcleos aglomerativos e análise de componentes principais rotacionadas) e três diferentes medidas de similaridade (distância Euclidiana, correlação inversa e ângulo teta) para analisar dados diários de precipitação da América do Norte central e leste. Os autores observaram que os métodos hierárquicos superaram os não hierárquicos e que os métodos de *k-means* e Ward apresentaram melhores resultados.

ESTEBAN-PARRA et al. (1998) aplicaram ACP a dados sazonais e anuais de precipitação de 40 localidades na Espanha, utilizando o período 1880-1992. A técnica foi utilizada para reduzir os dados de precipitação e mostrar a importância das circulações dominantes que afetam a região. Assim, foram encontrados três fatores, exceto para o verão, que foi identificado com quatro fatores. O primeiro fator está associado com o sul e interior da Espanha, o segundo e terceiro fatores compreendem a costa leste do Mediterrâneo, e o quarto fator (apenas para o período de verão, como consequência da forte presença da alta dos Açores) inclui o norte da costa Cantábrica. Essas componentes conseguiram distinguir, de maneira geral, um período seco de 1910 a meados de 1920, um período úmido a seco de 1945 a 1950 e um período mais úmido de 1960 a 1970.

MUÑOZ-DÍAZ & RODRIGO (2004) aplicaram ACP e AA a dados sazonais de precipitação de 32 localidades espanholas para o período de 1912-2000, com o objetivo de dividir a Espanha em regiões climaticamente homogêneas. Usando a técnica de agrupamento hierárquico através do método de Ward, foram obtidos três grupos no inverno e na primavera, e quatro grupos no verão e outono. Resultados semelhantes foram obtidos com ACP. A comparação dos dois métodos indicou que a análise de agrupamento foi

adequada para estabelecer padrões espaço-temporais para a distribuição sazonal da precipitação na Espanha.

FRAGOSO & GOMES (2008) utilizaram dados diários de precipitação para um período de 15 anos (1983-1998) de 98 estações do sul de Portugal cedidos pelo Instituto Nacional de Recursos Hídricos, além de observações diárias de outras variáveis, incluindo pressão ao nível médio do mar, água precipitável e altura geopotencial disponibilizados pelo NCEP/NCAR para realizar duas classificações objetivas relativas à ocorrência de episódios de chuvas fortes no Sul de Portugal.. A primeira classificação visou definir os principais padrões de distribuição espacial associados aos dias com chuvas abundantes na região. Os autores constataram que o Algarve é a região na qual os episódios de chuva são mais frequentes e de grande intensidade. A maior frequência de dias com chuva ocorre no outono e no início do inverno. Através da combinação da ACP e do método de *k-means*, foram identificados quatro padrões de precipitação, cada um com sua particularidade. A segunda classificação foi obtida utilizando a mesma combinação (ACP e *k-means*) com a finalidade de definir os tipos de circulação atmosférica de grande escala associada com as chuvas abundantes na região, com base em dados de pressão ao nível médio do mar. Cinco tipos de circulação foram obtidos nessa classificação, indicando uma diversidade considerável entre as condições de circulação atmosférica que são favoráveis à ocorrência de chuvas torrenciais no sul de Portugal.

STATHIS & MYRONIDIS (2009) aplicaram ACP no modo-T a dados médios mensais de precipitação de 75 estações meteorológicas para um período de 35 anos (1960-1994) para a região da Tessália (Grécia Central), para caracterizar os padrões de precipitação na região. Foram obtidas duas componentes principais que descreveram 87,7% da variância total dos dados. A primeira componente principal está relacionada com a frequência de ciclones que atravessam a região, enquanto que a segunda está relacionada com as condições de tempo anticiclônico e não-gradiente, e com ar frio em níveis superiores. Assim, a primeira componente explica os totais anuais de precipitação, e a segunda explica as chuvas das tempestades de verão. O método possibilitou também identificar quatro regiões homogêneas de precipitação.

ESTEBAN et al. (2006) utilizaram ACP e agrupamento através do método de *k-means* para caracterizar os padrões diários de circulação, utilizando dados diários de pressão ao nível médio do mar do NCEP/NCAR para a região entre 30°-60°N de latitude e

15°-30°W de longitude, com resolução de 2,5°, num período de 42 anos (1960-2001). Com base nos processos de seleção foram retidas 10 componentes principais que, juntas, representaram 92,5 % da variância total. De acordo com os resultados da ACP associada à análise de agrupamento foram obtidos 20 padrões de circulação, que foram distribuídos em cinco categorias gerais: oeste, gradiente meridional, área de baixa, bloqueio e ciclônica.

GREEN et al. (1993) aplicaram ACP a séries temporais de temperatura, precipitação e vento do sul da Califórnia. As cargas fatoriais das componentes principais foram utilizadas na formação dos grupos de meses (estações) com padrões espaciais semelhantes. Os resultados indicaram seis componentes principais, sendo duas para cada variável, e três para os períodos distintos: verão, inverno e uma fase de transição (outono e primavera). O agrupamento resultante dos meses difere da definição convencional de que cada estação tem duração de três meses. As análises de vento e temperatura agrupam os mesmos meses, mostrando longos períodos de verão e inverno, períodos curtos de primavera e períodos muito curtos de outono. Na análise da precipitação, o período de inverno foi longo (novembro-maio) e esteve associado a sistemas sinóticos vindos do Pacífico, enquanto que o período de verão (julho-agosto) foi caracterizado pelas tempestades de verão associadas a fluxo de umidade do sul, além dos meses intermediários secos que separam essas estações. Os autores também constataram uma grande variabilidade na direção do vento no inverno devido à penetração de sistemas frontais na região.

CORREIA (2000) utilizou dados horários de direção e velocidade do vento de 77 estações meteorológicas de superfície da Rede Climatológica do Nordeste operada pelo INMET coletados num período de 5 anos (1977-1981) para identificar regiões homogêneas dessa variável. Na análise das componentes zonal e meridional o método de ACP resultou em três fatores comuns temporais que explicaram 88,4% da variância total das médias decendiais e a AA, através do método de Ward, resultou em cinco grupos homogêneos. Estes resultados foram associados especialmente aos sistemas atmosféricos de grande escala e à topografia acidentada.

BARRETO (2001) utilizou as mesmas séries de dados descritas em CORREIA (2000) para estudar o ciclo diário do vento à superfície. A aplicação das técnicas multivariadas (ACP e AA) às componente zonal e meridional, em conjunto, resultou em seis fatores comuns temporais explicando 97% da variância total da série, sendo que os primeiros quatro fatores mostraram núcleos localizados em áreas litorâneas e

em áreas de relevo acidentado. A região de estudo foi dividida em seis grupos homogêneos de acordo com a topografia acidentada da região.

CORRÊA et al. (2007) utilizaram a ACP para entender as relações dos Jatos de Baixos Níveis (JBN) e dos fluxos no perfil vertical do vento na geração de convecção em escala sinótica e a sua associação com a precipitação. Para tanto utilizaram perfis verticais do vento de radiossondagens realizadas no aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre-RS. Estimaram características predominantes da dinâmica dos fluxos dentro da baixa atmosfera, descrevendo a interação dos JBN e fluxos na geração da precipitação. De acordo com os autores, o emprego da ACP possibilita comparar as componentes com a precipitação de 64 estações pluviométricas sobre o Estado do Rio Grande do Sul, facilitando o entendimento da complexidade das interações das diferentes escalas meteorológicas envolvidas nos processos de macro e mesoescala e uma melhor representação das características dinâmicas dos processos baroclínicos na convecção.

BURLANDO et al. (2008) aplicaram AA para a identificação dos principais regimes de vento da Córsega, França. Foram utilizadas séries temporais horárias de intensidade do vento de um período de três anos (outubro de 1996-setembro de 1999) de 11 estações anemométricas situadas ao longo da costa da Córsega. Os autores utilizaram um total de quinze diferentes técnicas de agrupamento: três medidas de distância (Euclidiana, Quadrática de Pearson e o Índice de Crámer) e cinco métodos de classificação (ligação simples, ligação completa, ligação média, método de Ward e Mc Quitty) a fim de testar diferentes técnicas e identificar a mais adequada. Dentre as técnicas, destacou-se o método de agrupamento hierárquico de Ward. Os resultados possibilitaram identificar três regiões eólicas distintas: a região leste, a região noroeste e a região sudoeste. Os regimes de vento foram identificados por meio de duas fases de classificação, a primeira baseada no agrupamento hierárquico e a segunda por um agrupamento de partição. A classificação final identificou oito regimes: quatro regimes de vento correspondentes aos padrões climáticos principais da Europa Ocidental propostos por Plaut e Simonnet, e os quatro grupos restantes correspondentes aos regimes de brisa.

JIMENEZ et al. (2008) analisaram a variabilidade diária do vento em áreas de topografia acidentada no norte da Espanha usando dados de 35 estações meteorológicas para o diagnóstico de sub-regiões com variabilidade temporal semelhante. Foram utilizadas duas metodologias de análise multivariada: (1) análise de agrupamento e (2) componentes principais rotacionadas. Esses dois métodos produziram resultados de acordo com as

características topográficas do terreno. A variabilidade temporal da componente meridional foi semelhante em todas as sub-regiões, enquanto que a variabilidade da componente zonal foi responsável pela diferença entre as sub-regiões. Os autores mostram que os resultados contribuem para a caracterização da variabilidade do vento numa região de topografia acidentada, constituindo um cenário para a validação de simulações numéricas do vento em mesoescala sobre a região.

A revisão apresentada evidencia a importância da variabilidade do vento no espaço e no tempo e que a aplicação da análise multivariada é válida nos estudos da circulação atmosférica no Nordeste do Brasil, inclusive na área costeira.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A maior área costeira do Brasil está situada na Região Nordeste; são 3338 km de praias. Esse litoral é conhecido mundialmente pelo clima tropical úmido, bastante agradável, com sol e temperaturas altas durante todo o ano. Ele guarda belezas paradisíacas: coqueirais, mangues, rios, cachoeiras, praias selvagens, falésias, piscinas naturais, recifes, etc.

De acordo com TESSLER & GOYA (2005), a costa brasileira foi dividida em cinco grandes compartimentos considerando parâmetros geomorfológicos, climáticos e oceanográficos. A faixa litorânea do Nordeste, que abrange o trecho entre a foz do rio Parnaíba (entre os estados do Maranhão e Piauí) e Salvador-BA, foi classificada como Litoral Nordestino de Barreiras. O aspecto mais comum neste litoral é a Formação de Barreiras. Sedimentar e de idade terciária, ela apresenta um relevo de tabuleiros. Arenitos ou rochas de praias (“*beach rocks*”) também são bastante comuns. Neste segmento a plataforma continental é bastante estreita (menos de 80 km).

A vegetação nativa predominante na costa leste é a Mata Atlântica. Ela constitui a chamada Zona da Mata Costeira, que tem largura média de 200 km, chegando a 300 ou 350 km em alguns pontos. Há ainda as outras formas de vegetação que ocorrem nos litorais arenosos, tais como a de praias, dunas e restingas. A vegetação de praias e as dunas são afetadas pela ação contínua dos ventos marinhos, carregados de sal. Dentre as espécies vegetais encontradas estão o capim de areia, o alecrim da praia, a pimenteira, a grama da praia e o capim paraturá (www.sudene.gov.br).

Na área litorânea o vento resulta da atuação de diversos sistemas de circulação atmosférica, de várias escalas. As oscilações de 30-60 dias de Madden e Julian, o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e o Dipolo do Atlântico, todos de escala planetária, afetam todo o litoral nordestino. Sistemas convectivos de mesoescala e circulações locais (brisa marítima e terrestre) também atuam em todo o litoral. A Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) afetam o litoral norte e leste, enquanto que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) influencia o litoral norte e o extremo norte do litoral leste. Além dos sistemas já citados, há também a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e os Sistemas Frontais, que atuam preferencialmente sobre o litoral da Bahia.

Na faixa costeira do Nordeste do Brasil estão as capitais dos estados nordestinos, com exceção de Teresina-PI, que está localizada a 366 km do litoral. Banhadas a leste ou norte pelo Oceano Atlântico, elas são as cidades mais importantes de seus estados devido ao número de habitantes, atividade econômica, atividade cultural, etc. Nelas estão situados os principais aeroportos do Nordeste do Brasil, que recebem milhões de turistas anualmente em voos regulares com diversas cidades brasileiras, além das cidades européias e norte-americanas. A partir do final do século XX, grandes investimentos na área turística têm beneficiado os aeroportos através da ampliação e modernização de sua infra-estrutura.

3.2 Materiais

Os dados meteorológicos utilizados neste trabalho foram obtidos dos registros horários das estações meteorológicas situadas nos aeroportos das oito capitais litorâneas do Nordeste do Brasil: Salvador-BA, Aracaju-SE, Maceió-AL, Recife-PE, João Pessoa-PB, Natal-RN, Fortaleza-CE e São Luís-MA (Fig. 3.1 e Quadro 3.1). Os dados são disponibilizados na Internet através da REDEMET (A Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica), na forma do código METAR (CORREIA, 1995). Foram coletados dados de velocidade e direção do vento para o período de 2003 a 2009.

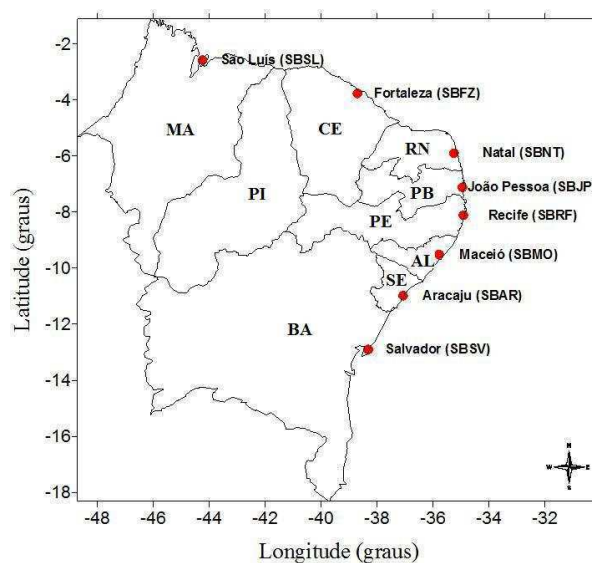


Figura 3.1– Distribuição espacial das estações (aeroporos) do Nordeste do Brasil utilizadas no estudo. A sigla dos estados, dos aeroportos e o nome das respectivas cidades são vistos no mapa.

Quadro 3.1 – Informações dos Aeroportos das Capitais Litorâneas do Nordeste.

Nome	Cidade	Indicador	Nº. Sinótico	Latitude (° ’)	Longitude (° ’)	Altitude (m)
Dep. Luis Eduardo Magalhães	Salvador	SBSV	83248	12°54’ S	38°19’ W	19
Santa Maria	Aracaju	SBAR	83095	10°59’ S	37°04’ W	8
Zumbi dos Palmares	Maceió	SBMO	82993	09°31’ S	35°47’ W	117
Guararapes-Gilberto Freyre	Recife	SBRF	82899	08°07’ S	34°55’ W	11
Presidente Castro Pinto	João Pessoa	SBJP	82800	07°07’ S	34°57’ W	65
Augusto Severo	Natal	SBNT	82599	05°54’ S	35°15’ W	49
Pinto Martins	Fortaleza	SBFZ	82398	03°46’ S	38°42’ W	25
Marechal Cunha Machado	São Luís	SBSL	82281	02°35’ S	44°14’ W	54

3.3 Métodos

3.3.1 Decomposição do Vento e Cálculo das Médias

Os METAR foram processados (decodificação e controle de qualidade) para obtenção dos valores horários da direção e da velocidade do vento usando um programa em linguagem Fortran desenvolvido para esse fim. A seguir, os dados horários do vento à superfície foram decompostos na componente zonal (u) e meridional (v) da seguinte forma:

$$u = |V| \sin \theta \quad (3.1)$$

$$v = -|V| \cos \theta \quad (3.2)$$

em que:

u é a componente zonal (m/s),

v é a componente meridional (m/s),

$|V|$ é a velocidade do vento (m/s),

θ é a direção do vento (em radianos).

3.3.1.1 Cálculo das Médias Mensais das Componentes do Vento à Superfície

Após a decomposição do vento à superfície, a média diária das componentes, o vento sinótico, foi calculado de acordo com:

$$\bar{V}_{d,n,y} = \frac{\sum_{h=1}^{h=l} V_{h,d,n,y}}{H_{d,n,y}} \quad (3.3)$$

em que:

$\bar{V}_{d,n,y}$ = componente média diária do d -ésimo dia, do n -ésimo mês, do y -ésimo ano,

$H_{d,n,y}$ = número de observações horárias no d -ésimo dia, do n -ésimo mês, do y -ésimo ano,

$V_{h,d,n,y}$ = componente zonal ou meridional na h -ésima hora, do d -ésimo dia, do n -ésimo mês, do y -ésimo ano,

$h = 1, 2, 3, \dots, h(l)$ determinada hora do d -ésimo dia,

$d = 1, 2, 3, \dots, d(i)$ determinado dia do n -ésimo mês,

$n = 1, 2, 3, \dots, n(j)$ determinado mês do y -ésimo ano,

$y = 1, 2, 3, \dots, y(k)$ determinado ano do período 2003-2009.

As componentes médias mensais para cada ano foram determinadas como:

$$V^*_{n,y} = \frac{\sum_{d=1}^{d=d(i)} \bar{V}_{d,n,y}}{H_{d,n,y}} \quad (3.4)$$

em que:

$D_{n,y}$ = número de observações diárias do n -ésimo mês, do y -ésimo ano.

As médias mensais do período 2003-2009 foram obtidas da seguinte forma:

$$V_n = \frac{\sum_{a=1}^{a=A} V^*_{n,y}}{Y} \quad (3.5)$$

em que

Y = número de anos do período.

3.3.2 Análise Fatorial (AF)

A Análise Multivariada é um ramo da estatística aplicado a problemas que envolvem um grande número de variáveis. Dentre as técnicas mais utilizadas destacam-se a Análise Discriminante, Análise Fatorial, Análise em Componentes Principais e a Análise de Agrupamento (“clusters”).

A análise de fatores (AF) tem objetivos que são similares àqueles da análise em componentes principais. A idéia básica é que talvez seja possível descrever um conjunto de p variáveis X_1, X_2, \dots, X_p em termos de um número menor de índices ou fatores, e no processo obter uma melhor compreensão do relacionamento destas variáveis. Há, no entanto, uma diferença importante. A análise de componentes principais não é baseada em um modelo estatístico particular, enquanto que a análise de fatores é baseada em um modelo. O desenvolvimento inicial da AF foi realizado por Charles Spearman (MANLY, 2008).

De acordo com CORRAR et al. (2007), a partir dos resultados obtidos por Spearman as mudanças em uma variável podem ser explicadas com base em um conjunto de fatores. O modelo matemático é dado pela equação 3.6:

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{im}F_{jm} + e_i \quad (3.6)$$

em que X_i são as variáveis padronizadas (média zero e variância igual a um), a_i são as cargas fatoriais, F_m são os fatores comuns não relacionados entre si e o e_i é um erro que representa a parcela de variação da variável i que é exclusiva dela e não pode ser explicada por um fator nem por outra variável no conjunto analisado.

Com este modelo, pode ser mostrado que a correlação entre X_i e X_j é dada pela equação 3.7:

$$r_{ij} = a_{i1}a_{j1} + a_{i2}a_{j2} + \dots + a_{im}a_{jm} \quad (3.7)$$

A aplicação da análise fatorial requer que a matriz de dados tenha correlações suficientes. Existem três testes estatísticos para determinar a adequação da análise fatorial. O primeiro se dá aplicando o teste de esfericidade de *Bartlett* que testa a hipótese da matriz de correlação ser uma matriz identidade (correlação zero entre as variáveis) e o seu determinante ser igual a um; o segundo é a estatística de *Kaiser-Meyer-Olkin* (KMO) que indica o grau de explicação dos dados a partir dos fatores encontrados na AF; valores de KMO maiores que 0,5 indicam que a AF consegue descrever satisfatoriamente as variações dos dados originais; o terceiro é através da matriz anti-imagem que indica o poder de explicação dos fatores em cada uma das variáveis analisadas (REIS 2001, CORRAR et al. 2007, HAIR et al. 2005).

Para obter as soluções fatoriais deve-se determinar o método de estimação ou extração dos fatores. Dentre os mais conhecidos estão o método das componentes principais e da máxima verossimilhança.

Um dos pioneiros na aplicação da análise multivariada a dados meteorológicos foi LORENZ (1956) que utilizou a análise de componentes principais, denominando-as de Funções Ortogonais Empíricas (FOE). Desde então diversos pesquisadores têm utilizado tais técnicas como: BRAGA (1992), CEBALLOS & BRAGA (1995), SILVA (1996) dentre outros que a aplicaram a uma variedade de elementos meteorológicos. Assim, neste trabalho será utilizado o método fatorial em análise em componentes principais (ACP).

3.3.2.1 Análise em Componentes Principais (ACP)

Seguindo o processo mostrado por MANLY (2008) para encontrar os fatores não rotacionados pelo método das componentes principais, considere $\mathbf{X}' = [X_1, X_2, \dots, X_p]$ um vetor aleatório p -dimensional com vetor de médias $\boldsymbol{\mu}$ e matriz de correlações $\boldsymbol{\rho}$ e autovalores: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$. Assim, as p combinações lineares das variáveis originais são:

$$\begin{aligned} Z_1 &= b_{11}X_1 + b_{12}X_2 + \dots + b_{1p}X_p \\ Z_2 &= b_{21}X_1 + b_{22}X_2 + \dots + b_{2p}X_p \\ &\cdot \\ &\cdot \\ Z_p &= b_{p1}X_1 + b_{p2}X_2 + \dots + b_{pp}X_p \end{aligned} \tag{3.8}$$

em que os valores b_{ij} são dados pelos autovetores da matriz de correlações.

Esta transformação dos valores X para valores Z é ortogonal, de modo que o relacionamento inverso é simplesmente:

$$\begin{aligned} X_1 &= b_{11}Z_1 + b_{21}Z_2 + \dots + b_{p1}Z_p \\ X_2 &= b_{12}Z_1 + b_{22}Z_2 + \dots + b_{p2}Z_p \\ &\cdot \\ &\cdot \\ X_p &= b_{1p}Z_1 + b_{2p}Z_2 + \dots + b_{pp}Z_p \end{aligned} \tag{3.9}$$

Para uma análise de fatores, somente m das componentes principais são retidas, assim as últimas equações se tornam:

$$\begin{aligned} X_1 &= b_{11}Z_1 + b_{21}Z_2 + \dots + b_{p1}Z_p + e_1 \\ X_2 &= b_{12}Z_1 + b_{22}Z_2 + \dots + b_{p2}Z_p + e_2 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ X_p &= b_{1p}Z_1 + b_{2p}Z_2 + \dots + b_{mp}Z_m + e_p \end{aligned} \tag{3.10}$$

em que e_p é uma combinação linear dos componentes principais Z_{m+1} a Z_p .

Deve-se agora escalonar os componentes principais Z_1, Z_2, \dots, Z_m para terem variâncias unitárias, como requerido pelos fatores. Para fazer isto, Z_i precisa ser dividido pelo seu desvio-padrão, o qual é $\sqrt{\lambda_i}$, a raiz quadrada do correspondente autovalor na matriz de correlações. As equações se tornam:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \sqrt{\lambda_1} b_{11} F_1 + \sqrt{\lambda_2} b_{21} F_2 + \dots + \sqrt{\lambda_m} b_{p1} F_p + e_1 \\
 X_2 &= \sqrt{\lambda_1} b_{12} F_1 + \sqrt{\lambda_2} b_{22} F_2 + \dots + \sqrt{\lambda_m} b_{p2} F_p + e_2 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 X_p &= \sqrt{\lambda_1} b_{1p} F_1 + \sqrt{\lambda_2} b_{2p} F_2 + \dots + \sqrt{\lambda_m} b_{mp} F_m + e_p
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

em que $F_i = Z_i / \sqrt{\lambda_i}$.

Assim, o modelo de fatores não rotacionados é dado por (3.12):

$$\begin{aligned}
 X_1 &= a_{11} F_1 + a_{12} F_2 + \dots + a_{1m} F_m + e_1 \\
 X_2 &= a_{21} F_1 + a_{22} F_2 + \dots + a_{2m} F_m + e_2 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 X_p &= a_{p1} F_1 + a_{p2} F_2 + \dots + a_{pm} F_m + e_p
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

com $a_{ij} = \sqrt{\lambda_i} b_{ji}$

3.3.2.2 Rotação de Fatores

É bastante comum realizar uma rotação dos fatores comuns, tornando mais fáceis as suas interpretações, já que os novos fatores deverão apresentar correlações relativamente fortes com algumas (poucas) variáveis. Existem diversos tipos de rotação de eixos. Aqui é utilizado o método de rotação ortogonal Varimax. É o tipo de rotação mais utilizado e que tem como característica o fato de minimizar a ocorrência de uma variável possuir altas cargas fatoriais para diferentes fatores, permitindo que uma variável seja facilmente identificada com um único fator (CORRAR et al., 2007). Assim uma nova solução dos fatores tem a forma dada pela equação (3.13):

$$\begin{aligned}
X_1 &= g_{11}F_1^* + g_{12}F_2^* + \dots + g_{1m}F_m^* + e_1 \\
X_2 &= g_{21}F_1^* + g_{22}F_2^* + \dots + g_{2m}F_m^* + e_2 \\
&\cdot \\
&\cdot \\
&\cdot \\
X_p &= g_{p1}F_1^* + g_{p2}F_2^* + \dots + g_{pm}F_m^* + e_p
\end{aligned} \tag{3.13}$$

em que F_i^* representa o novo i -ésimo fator.

Os valores do i -ésimo fator não rotacionado são justamente os valores do i -ésimo componente principal após serem escalonados para ter variância um. Os valores dos fatores rotacionados são mais complicados de obter, mas pode-se observar que estes são dados pela equação matricial (3.14):

$$F^* = XG(G'G)^{-1} \tag{3.14}$$

em que F^* é uma matriz $n \times m$ contendo os valores para os m fatores rotacionados em suas colunas, com uma linha para cada uma das n linhas originais de dados; X é a matriz $n \times p$ dos dados originais para p variáveis e n observações, após padronizar as variáveis X_1 a X_p para terem média zero e variância um; e G é a matriz $p \times m$ das cargas rotacionadas dada pela Equação (3.13) (MANLY, 2008).

3.3.2.3 Número de Componentes Principais Retidas

A determinação do número de componentes principais a serem retidas segue o critério proposto por Kaiser (REIS, 2001) que retém apenas as componentes principais com autovalores maiores que um.

3.3.3 Análise de Agrupamento (AA)

A análise de Agrupamento, ou “*Cluster Analysis*”, é uma das técnicas de análise multivariada cujo objetivo principal é reunir objetos, baseando-se nas características dos mesmos. Ela classifica objetos segundo o que cada elemento tem de similar em relação a outros determinados grupos, considerando um critério de seleção predeterminado. O grupo resultante dessa classificação deve então exibir um alto grau de homogeneidade interna (“*within-cluster*”) e alta heterogeneidade externa (“*between-*

cluster”) (CORRAR et al., 2007). Assim, se a classificação for bem sucedida, os objetos dentro dos agrupamentos estarão próximos quando representados graficamente e diferentes agrupamentos estarão distantes (HAIR et al., 2005).

Essa técnica é comparável à análise de componentes principais em seu objetivo de determinar a estrutura. Portanto, o problema que se pretende resolver é: dada uma amostra de n objetos (ou indivíduos), cada um deles medido segundo p variáveis, procurar um esquema de classificação que agrupe objetos em g grupos. Deve ser determinado também o número e as características desses grupos.

3.3.3.1 Medidas de Similaridade

A similaridade é uma medida de correspondência, ou semelhança, entre objetos a serem agrupados. As características que definem similaridades são especificadas primeiramente. Após isso, elas são combinadas segundo uma medida de similaridade e calculadas para todos os pares de objetos. Nesse sentido, qualquer objeto pode ser comparado com outro através da medida de similaridade. De acordo com CORRAR et al. (2007), a similaridade dos objetos pode ser mensurada de várias maneiras, mas três métodos dominam as aplicações em Análise de Agrupamentos: medidas de correlação, medidas de distância e medidas de associação. Neste trabalho a similaridade dos dados é mensurada através das medidas de distância d .

Segundo REIS (2001), os métodos de classificação exigem que os índices de semelhança respeitem as propriedades métricas, que são: *simetria*, *desigualdade triangular*, *diferenciabilidade de não idênticos*, *indiferenciabilidade de idênticos*.

Existem várias medidas que podem ser utilizadas como medidas de distância ou “dessemelhança” entre os elementos de uma matriz de dados. Dentre uma série de medidas possíveis, as mais utilizadas são: Distância Euclidiana; Distância Absoluta ou City-Block Metric; Distância de Minkowski; Distância Mahalanobis; Distância de Chebishev (REIS, 2001).

Neste trabalho é utilizada a distância euclidiana que é empregada para calcular medidas específicas como a distância euclidiana simples e a distância euclidiana quadrática ou absoluta, que é a soma dos quadrados das diferenças, sem calcular a raiz quadrada (HAIR et al., 2005). Esse tipo de distância é a recomendada para os métodos de agrupamento centróide e de Ward. A distância euclidiana é obtida pela equação (3.15):

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{v=1}^p (X_{iv} - X_{jv})^2} \quad (3.15)$$

em que:

v são as variáveis ($v = 1, 2, 3, \dots, p$);

X_{iv} é a v -ésima característica da i -ésima observação;

X_{jv} é a v -ésima característica da j -ésima observação;

3.3.3.2 Critérios de Agrupamento

Escolhida uma medida de distância, surge um novo problema a resolver, que é o critério de (des)agregação dos indivíduos. As técnicas mais utilizadas podem ser classificadas em duas categorias gerais: hierárquica e não-hierárquica. Neste estudo são aplicadas as técnicas hierárquicas. Segundo HAIR et al. (2005) e CORRAR et al. (2007), as mais utilizadas são: ligação simples, ligação completa, ligação média, critério do centróide e método de Ward.

Neste trabalho é utilizado o método proposto por WARD (1963), também empregado por CORREIA (2000), BARRETO (2001) e CORREIA FILHO (2010) para dados de vento à superfície. O método se baseia na perda de informação decorrente do agrupamento de objetos em conglomerados, medida pela soma total dos quadrados dos desvios de cada objeto em relação à média do conglomerado no qual o objeto foi inserido. A cada estágio de agrupamento, a soma dos quadrados dos desvios das variáveis em relação a cada objeto é minimizada. Esse procedimento tende a formar grupos com um número menor de observações. Ele também tende a produzir grupos com aproximadamente o mesmo número de observações. Assim, a função objetivo é expressa como:

$$W = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})'(x_j - \bar{x}) \quad (3.16)$$

onde x_j é o vetor multivariado de medidas associado com o j -ésimo item e \bar{x} é a média de todos os itens.

Os resultados do método de Ward podem ser apresentados sob a forma de um dendrograma, usando na ordenada os valores de W .

3.3.4 Análise da Matriz de Dados

CORRAR et al. (2007) abordam os diversos modos de análise das variáveis em uma AF. Neste trabalho são utilizados o modo-T e o modo-S na análise da matriz de dados, de forma tal que os pressupostos associados a uma AF são satisfeitos.

Na análise no modo-T (temporal) é avaliada apenas uma variável (vento) e a matriz de dados tem nas linhas os casos e nas colunas a variação no tempo. Assim, a matriz de dados tem nas linhas os aeroportos e nas colunas a média mensal para as CZV e CMV. O objetivo nesse tipo de análise é determinar regiões homogêneas.

Na análise no modo-S (espacial) também é avaliada apenas uma variável (vento) e a matriz de dados tem nas linhas a variação no tempo e nas colunas os diversos casos. O objetivo nesse tipo de análise é identificar condições climáticas específicas. Neste modo são utilizados três tipos de matrizes:

- Tipo 1: apresenta nas linhas os dados dos doze meses de todos os anos das CZV e CMV e nas colunas os aeroportos.
- Tipo 2: apresenta nas linhas os dados dos doze meses de todos os anos e nas colunas os aeroportos com as CZV e CMV.
- Tipo 3: apresenta nas linhas os dados de um único mês para todos os anos e nas colunas os aeroportos com as CZV e CMV.

Vale salientar que estas matrizes também são válidas para a AA.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Médias Mensais do Vento à Superfície

Na Figura 4.1 são vistos os resultados obtidos para o escoamento médio mensal à superfície nas capitais litorâneas do Nordeste para o período de 2003 a 2009.

No trimestre janeiro, fevereiro e março (Fig. 4.1 a-c) é possível perceber que o vento médio é do quadrante sudeste em todos os aeroportos, com exceção de São Luís que tem vento médio de nordeste. Nesses meses a direção permanece sem alterações em São Luís, Natal e Maceió. Os ventos são de fraco a moderado, variando entre 1 e 4 m/s; os valores menores são vistos no litoral de João Pessoa (Fig. 4.1 a-c). Entre os meses de fevereiro e março tem início o processo de desintensificação do vento, especialmente em Fortaleza, João Pessoa e Aracajú (Fig. 4.1 b-c). A variabilidade vista é provocada pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que começa a se afastar do continente, o que contribui para desintensificar os ventos alísios. Concomitantemente, ocorre a migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para sua posição mais ao sul, o que também contribui para a desintensificação.

Na passagem do primeiro para o segundo trimestre o processo de desintensificação do vento continua, agora nas áreas costeiras de São Luís, Natal, Maceió e Salvador, enquanto que as demais permanecem com as mesmas velocidades (Fig. 4.1 c-d). O vento sofre alterações na direção em São Luís, que passa a ter ventos de leste, e Maceió, ventos de sudeste (Fig. 4.1 d-f). No mês de junho as intensidades são maiores, com exceção de Maceió e Aracaju que permanecem com os mesmos valores. O incremento na

velocidade do vento é devido ao deslocamento da ASAS para o continente, intensificando os ventos alísios.

Na transição entre o segundo e terceiro trimestre não são vistas alterações na direção e intensidade do vento, com exceção de São Luís que passa a ter ventos de nordeste (Fig. 4.1 f-g). A partir de agosto nota-se a intensificação do vento em todas as capitais, com exceção de João Pessoa, Maceió e Salvador (Fig. 4.1 h). No mês de setembro continua a intensificação dos ventos, do litoral de São Luís a João Pessoa (Fig. 4.1 i). A partir desse trimestre é possível associar o aumento da velocidade à intensificação da ASAS e sua atuação sobre o continente. A direção do vento sofre variação em Fortaleza, e do litoral de João Pessoa a Maceió. No mês de setembro João Pessoa registra sua maior velocidade (entre 3 e 4 m/s) durante o ano; Fortaleza tem velocidades entre 5 e 6 m/s (Fig.4.1 i).

O aumento na velocidade do vento na passagem do terceiro para o quarto trimestre é evidente em São Luís e Salvador, com o litoral norte apresentando a maior intensidade do vento durante o ano (Fig. 4.1 j). O período entre outubro e novembro é a época em que as velocidades são máximas em toda a área litorânea, com exceção de João Pessoa (Fig. 4.1 j, k). A direção do vento também sofre variações, com destaque para as capitais situadas no sul do litoral leste, de Maceió a Salvador, apresentando ventos de leste e de leste-sudeste (Fig. 4.1 j-l). As mudanças na direção do vento nesta região podem estar associadas à maior ocorrência de sistemas frontais que atingem o sul da Bahia, influenciando também latitudes mais baixas. KOUSKY (1979) observou a ocorrência desses sistemas nessa área e a mudança na direção do vento provocada por sua passagem.

Portanto, com o escoamento médio mensal visto na Figura 4.1 a capital São Luís é a única com ventos médios de leste-nordeste; nas demais predominam ventos de leste-sudeste. BASTOS & FERREIRA (2000) e CORREIA (2000) também identificaram esse regime de nordeste na costa norte do Nordeste, no litoral do Maranhão. De maneira geral, essa variabilidade no decorrer do ano é semelhante aos resultados obtidos por SERVAIN & LUKAS (1990), e por RAO et al. (2008) na análise sazonal da tensão média do vento na área do Oceano Atlântico.

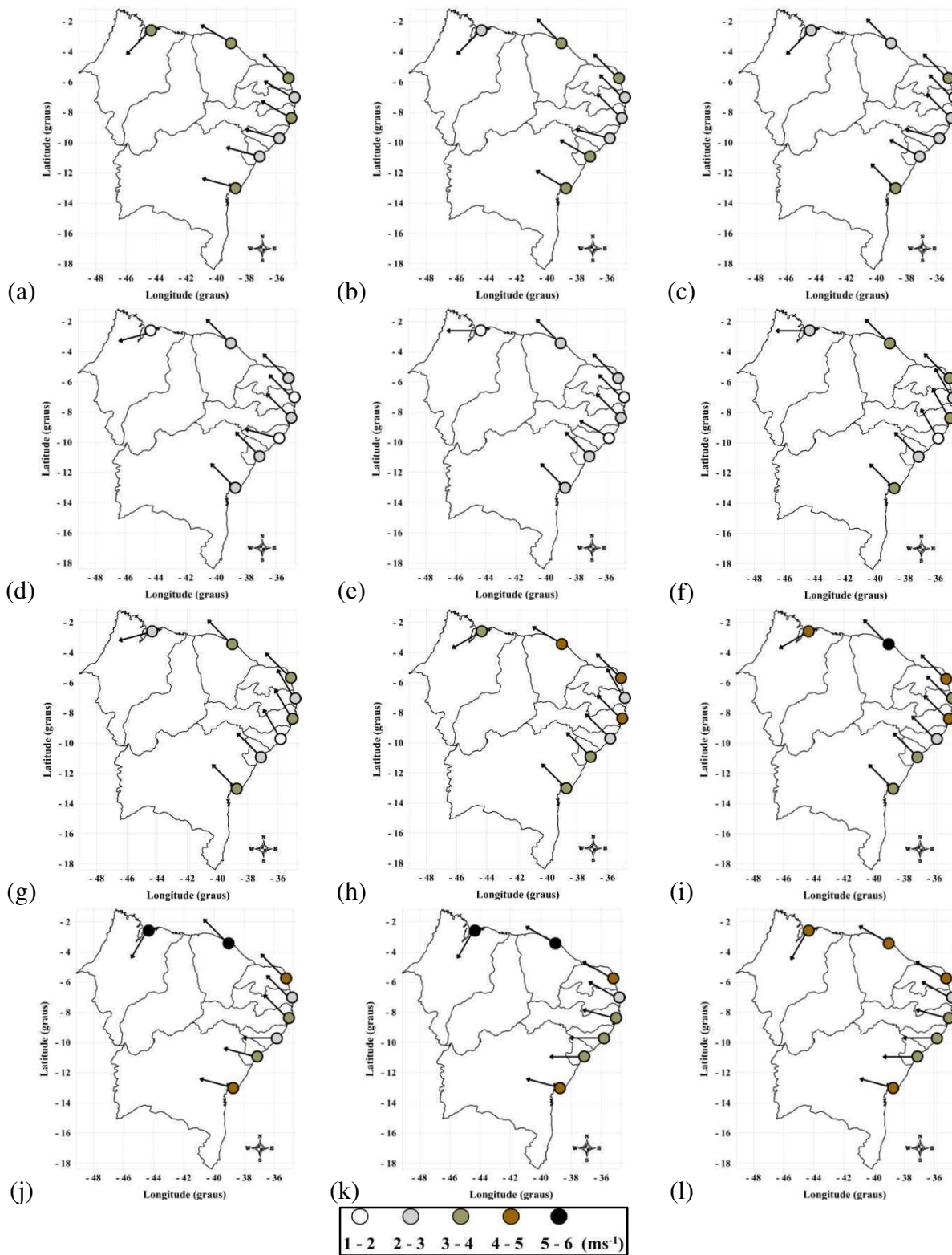


Figura 4.1 - Vento médio à superfície nos aeroportos do litoral do Nordeste do Brasil para o período de 2003-2009 para os meses de janeiro a dezembro (a – l). As setas indicam a direção e o círculo representa a velocidade do vento (m/s) de acordo com a legenda acima. (Fonte dos dados: [http:// www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br)).

4.2 Padrões de Variabilidade do Vento à Superfície

As técnicas multivariadas de análise fatorial utilizando o método das componentes principais e a análise de agrupamento foi aplicada ao vento médio mensal à superfície, decomposto na componente zonal do vento (CZV) e componente meridional do vento (CMV).

Nas análises foram utilizados dados observados nos oito aeroportos situados nas capitais litorâneas do Nordeste do Brasil para um período de sete anos (2003 a 2009). Os resultados obtidos mostram o padrão de variabilidade do vento à superfície no litoral da região.

4.2.1 Análise Temporal Sazonal

Na análise temporal sazonal são obtidas regiões homogêneas do vento à superfície. A matriz de dados foi utilizada no modo-T com as CZV e CMV em conjunto para a aplicação da análise de agrupamento.

Esta análise permite caracterizar, de maneira geral, quais capitais litorâneas apresentam características semelhantes em seus regimes de vento. Os resultados encontram-se na forma de dendrograma, em que no eixo das abscissas estão as estações e no eixo das ordenadas o nível de agregação entre elas. A determinação do número de grupos no dendrograma é feita de maneira visual, utilizando-se a técnica de inércia entre saltos.

De acordo com a curva de inércia e o dendrograma (Fig. 4.2) foram obtidas três regiões homogêneas do vento para a análise conjunta das CZV e CMV. Esse resultado contrasta com os dois grupos sugeridos pelos campos da Figura 4.1.

Com uma distância reescalada de 5 são formados dois grupos: Grupo I com as estações de Salvador, Aracajú, Recife, Natal e Fortaleza; Grupo II constituído pelas estações de Maceió e João Pessoa (Fig. 4.2 b). A associação dos aeroportos do Grupo I e do Grupo II deve-se, em especial, à variabilidade na velocidade do vento, como pode ser observado pela análise dos campos médios mensais (Fig. 4.1). As capitais do Grupo I apresentam as maiores intensidades do vento, enquanto que as capitais do Grupo II têm as menores intensidades. Esse padrão mostra a atuação da ASAS nessas áreas. No Grupo II, além da ASAS circulações locais relacionadas com o relevo também podem ser importantes.

Já o Grupo III é formado apenas por São Luís com uma distância reescalada de 25. A formação desse grupo deve-se ao contraste entre o regime de vento dessa localidade, em especial na direção, e o regime das demais capitais litorâneas do Nordeste. No litoral de São Luís há ventos de leste-nordeste e nos demais ventos de leste-sudeste (Fig. 4.1). A forma de atuação da ASAS e da ZCIT nessa área é responsável por esse regime de vento diferenciado.

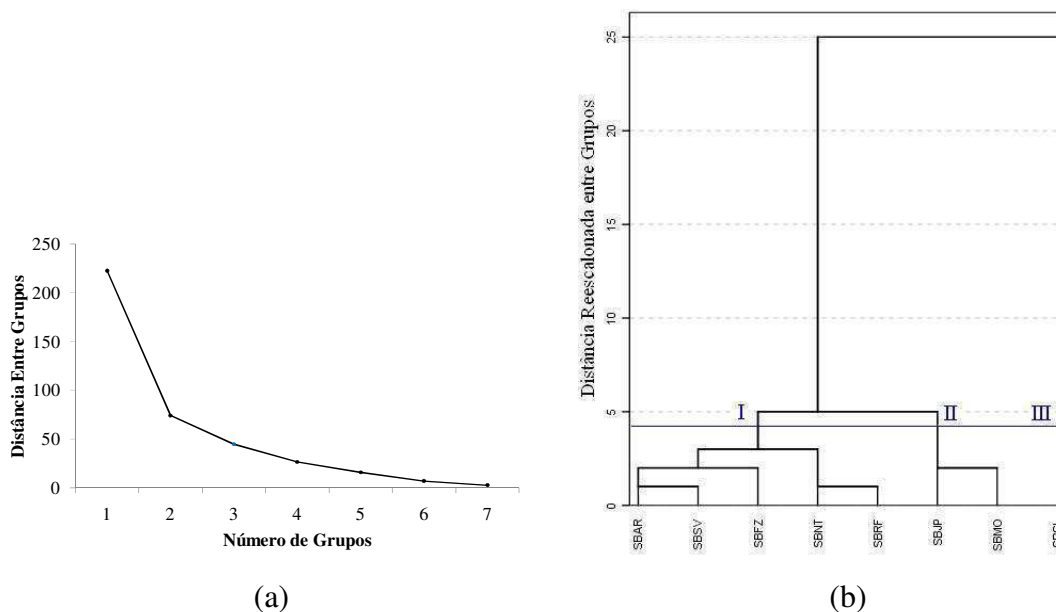


Figura 4.2 – Definição de região homogênea das duas componentes (zonal e meridional) médias mensais do período 2003-2009: (a) curva de inércia e (b) dendrograma. (Fonte dos dados: [http:// www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br)).

Na análise sazonal o número de observações é menor que o de variáveis, logo não é possível aplicar o modelo fatorial a essa matriz de dados. Para aplicação é necessário diminuir o número de variáveis a serem analisadas. Por este motivo, a análise temporal é realizada com trimestres, conforme pode ser visto a seguir na sub-seção 4.2.2.

4.2.2 Análise Temporal Trimestral

Na análise temporal a matriz de dados é utilizada no modo-T para a aplicação da análise fatorial em componentes principais. Foram realizadas análises trimestrais das CZV e CMV em conjunto por apresentarem melhores resultados nos testes estatísticos de KMO e de Barlett. Também foi utilizada a rotação Varimax. A escolha dos trimestres foi determinada com base nos índices de precipitação, tendo como referência o trimestre menos chuvoso (agosto – setembro – outubro). Também foi realizada uma AA para verificar quais capitais litorâneas apresentam características similares entre si em cada trimestre.

4.2.2.1 Análise em Componentes Principais (ACP)

As Tabelas 4.1 a 4.4 apresentam os resultados da análise fatorial pelo método das componentes principais para os trimestres ASO (agosto – setembro – outubro), NDJ (novembro – dezembro – janeiro), FMA (fevereiro – março – abril) e MJJ (maio – junho – julho). Elas contêm informações dos autovalores, da variância explicada e da variância explicada acumulada para cada componente retida.

Para as análises trimestrais foi possível reter duas CP's utilizando o critério de Kaiser. As duas componentes tem variâncias explicadas aproximadamente iguais (em torno de 50%) em todos os trimestres, explicando de 96 a 98% da variância total dos dados. Dessa forma, as CZV e CMV têm as mesmas contribuições para a variabilidade do vento.

As correlações associadas a essas componentes retidas mostram para a CP1 maiores associações com a CMV, enquanto que a CP2 tem maiores correlações com a CZV para todos os trimestres (Fig. 4.3).

Tabela 4.1 Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada para análise do trimestre ASO.

CP	Autovalores Iniciais Cargas não rotacionadas			Cargas Rotacionadas (VARIMAX)		
	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
1	3,99	66,55	66,55	2,95	49,30	49,30
2	1,91	31,96	98,52	2,95	49,21	98,52
3	0,71	1,18	99,70			
...			
6	0,001	0,013	100,00			

Tabela 4.2 Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada para análise do trimestre NDJ.

CP	Autovalores Iniciais Cargas não rotacionadas			Cargas Rotacionadas (VARIMAX)		
	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
1	3,21	53,61	53,61	3,02	50,39	50,39
2	2,67	44,52	98,43	2,86	47,73	98,13
3	0,09	1,65	99,78			
...			
6	0,00	,001	100,00			

Tabela 4.3 Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada para análise do trimestre FMA.

CP	Autovalores Iniciais Cargas não rotacionadas			Cargas Rotacionadas (VARIMAX)		
	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
1	3,92	65,46	65,46	2,97	49,62	49,62
2	1,90	31,67	97,14	2,85	47,52	97,13
3	0,09	1,61	98,75			
...			
6	0,01	,014	100,00			

Tabela 4.4 Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada para análise do trimestre MJJ.

CP	Autovalores Iniciais Cargas não rotacionadas			Cargas Rotacionadas (VARIMAX)		
	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
1	3,98	66,43	66,43	2,94	49,08	49,08
2	1,81	30,23	96,16	2,85	47,58	96,66
3	0,10	1,70	98,37			
...			
6	0,002	,032	100,00			

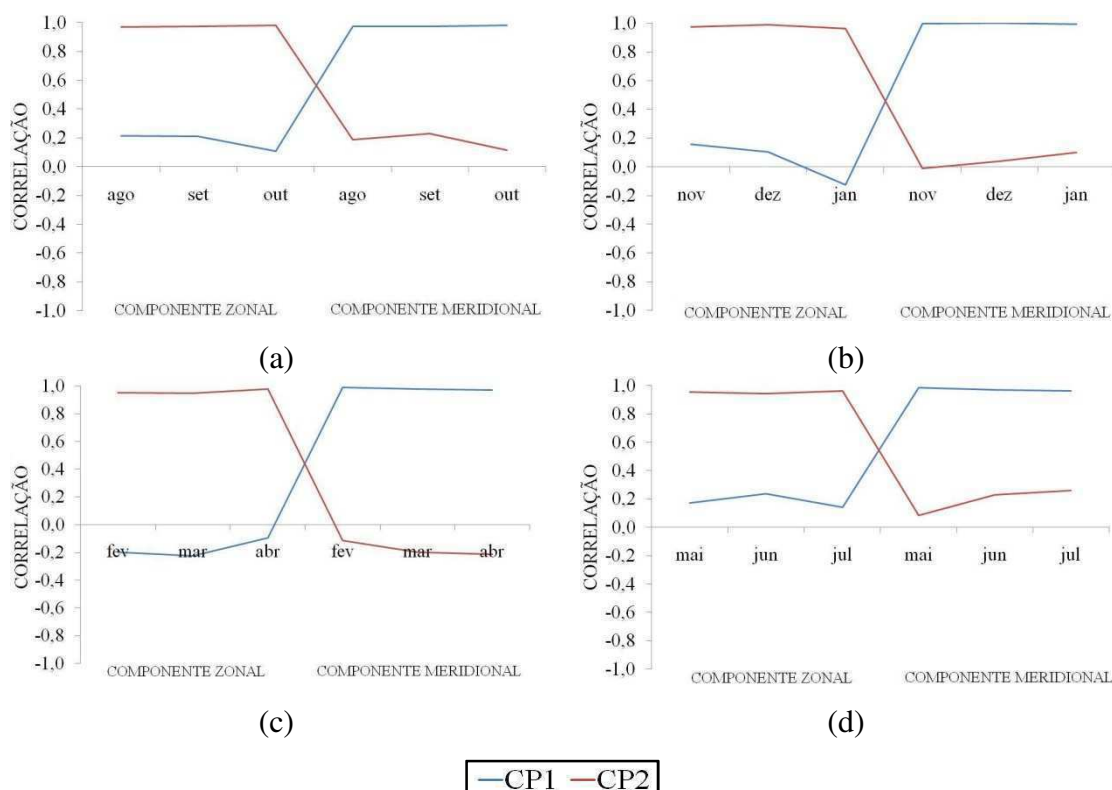


Figura 4.3 – Correlações dos dois primeiros fatores comuns temporais dos trimestres: (a) ASO (agosto – setembro – outubro), (b) NDJ (novembro – dezembro – janeiro), (c) FMA (fevereiro – março – abril) e (d) MJJ (maio- junho – julho), das componentes zonal e meridional do vento à superfície. A primeira (segunda) componente está representada pela linha azul (vermelha). (Fonte dos dados: [http:// www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br)).

4.2.2.2 Análise de Agrupamento (AA)

Na AA a verificação de quais aeroportos tem características em comum, em cada trimestre, é realizada através do dendrograma. Utilizando as curvas de inércia e os dendrogramas é possível distinguir três grupos homogêneos entre os trimestres para a análise conjunta das CZV e CMV (Fig. 4.4).

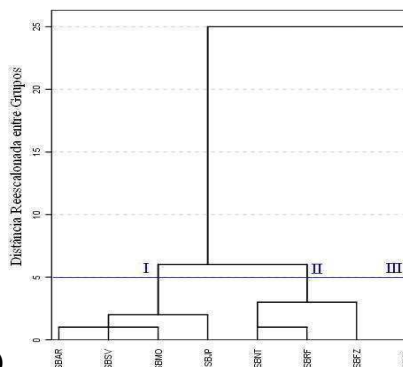
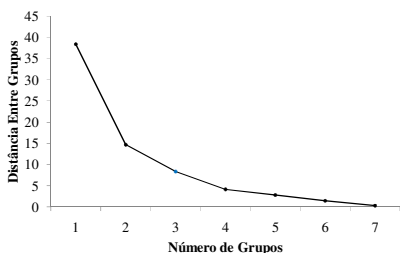
No trimestre ASO o Grupo I é formado pelos aeroportos de João Pessoa, Maceió, Aracaju e Salvador, o Grupo II é formado pelos aeroportos de Recife, Natal e Fortaleza, enquanto que o Grupo III é formado apenas pelo aeroporto de São Luís (Quadro 4.1). Neste trimestre as regiões litorâneas do Grupo II apresentam maiores intensidades do vento se comparadas com as do Grupo I; já o Grupo III se destaca dos demais por apresentar comportamento diferente na direção do vento, com ventos do quadrante nordeste (Fig. 4.1 h-j).

No trimestre NDJ o primeiro grupo é formado pelos aeroportos do litoral leste, com exceção de Natal, o Grupo II é formado pelos aeroportos de Natal e Fortaleza, e do Grupo III faz parte apenas o aeroporto de São Luís (Quadro 4.1). Estas associações estão relacionadas com a velocidade do vento nessas localidades, além da direção do vento em São Luís, que contrasta com as demais (Fig. 4.1 k, l, a).

Ao fazer a AA para FMA e MJJ os três grupos obtidos apresentaram modificações, se comparados com os trimestres já analisados. No Grupo I estão os aeroportos de Salvador, Aracaju, Recife, Natal e Fortaleza. O Grupo II apresenta similaridades na área litorânea de João Pessoa e Maceió. Já o terceiro grupo contém apenas a capital São Luís (Quadro 4.1). Nesses dois trimestres as associações do Grupo II são devidas a velocidades do vento menores nessas áreas; já no Grupo I são observados valores máximos e mínimos e direções semelhantes (Fig. 4.1 b-g). No Grupo III, formado por São Luís, os ventos de leste-nordeste a diferenciam das demais capitais litorâneas (Fig. 4.1 b-g).

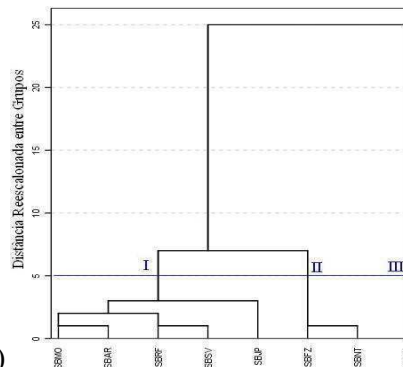
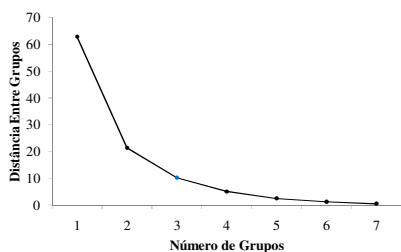
Portanto, com as análises temporais foi possível identificar as regiões homogêneas do vento. Seus padrões de vento mostram regiões de velocidades mínimas e máximas e uma região com padrão de direção do vento diferente das demais. Essas associações estão relacionadas com a atuação da ASAS, da ZCIT, dos VCAN, dos Distúrbios Ondulatórios de Leste, dos sistemas frontais e circulações locais em diversas épocas do ano.

ASO



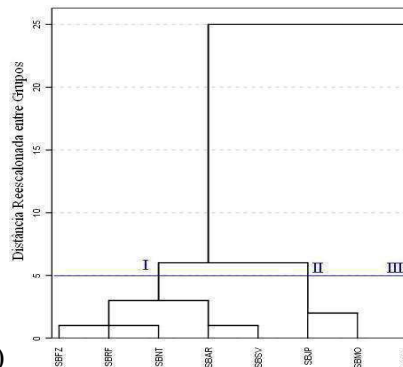
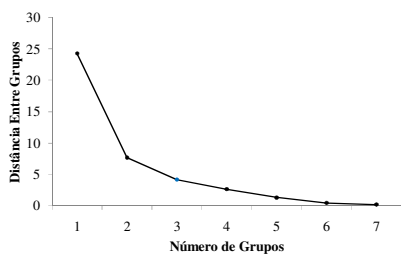
(a)

NDJ



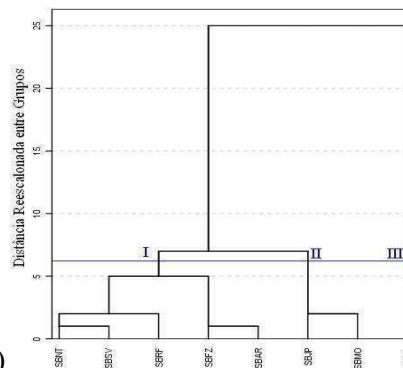
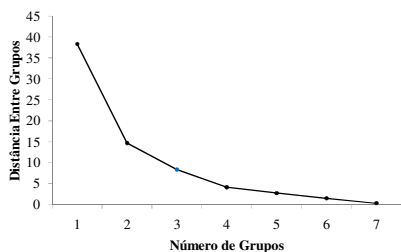
(b)

FMA



(c)

MJJ



(d)

Figura 4.4 – Definição de região homogênea das componentes zonal e meridional média mensal do período 2003-2009, através da curva de inércia e dendrograma para os trimestres: (a) ASO, (b) NDJ, (c) FMA e (d) MJJ. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

Quadro 4.1– Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática, para análise trimestral no modo-T.

Trimestre	Grupo I	Grupo II	Grupo III
ASO	João Pessoa, Maceió, Aracaju, Salvador	Fortaleza, Natal, Recife	São Luís
NDJ	João Pessoa, Recife, Maceió, Aracaju, Salvador	Fortaleza, Natal	São Luís
FMA	Fortaleza, Natal, Recife, Aracaju, Salvador	João Pessoa, Maceió	São Luís
MJJ	Fortaleza, Natal, Recife, Aracaju, Salvador	João Pessoa, Maceió	São Luís

4.2.3 Análise Espacial Sazonal e Interanual

Nesta análise a matriz de dados é usada no modo-S para análise conjunta das duas componentes do vento (CZV e CMV). É aplicada a técnica da análise fatorial em componentes principais para verificar a importância relativa dos aeroportos nas componentes utilizando a matriz do Tipo 1. Também é utilizada a AA para identificar quais meses e anos apresentam características similares entre si, considerando a variação sazonal e interanual dos dados observados. Neste caso é utilizada a matriz do Tipo 2 (ver sub-seção 3.3.4).

4.2.3.1 Análise em Componentes Principais

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados da análise fatorial pelo método das componentes principais utilizando o método de rotação Varimax contendo informações dos autovalores, da variância explicada e da variância explicada acumulada por cada componente retida. Os testes de KMO e *Barlett* validaram a aplicação da AF.

Inicialmente, utilizando o critério de Kaiser (REIS, 2001) foi retida apenas uma componente principal (CP1) cujo autovalor foi de 6,99 com variância explicada de 87,44% dos dados originais. Ao observar as correlações para a primeira componente retida (CP1) foi possível verificar que os aeroportos do litoral leste e o de Fortaleza apresentam

as maiores correlações para esta componente, tendo assim baixas correlações com o aeroporto de São Luís (não mostrado).

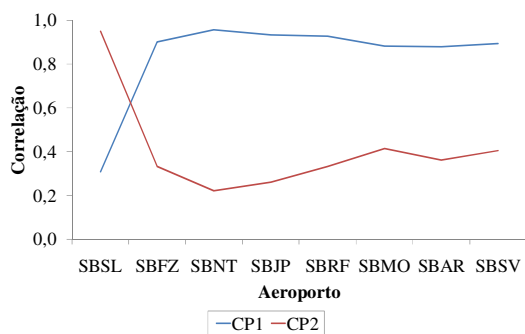
Uma nova análise foi realizada para verificar se as demais componentes conseguiriam explicar detalhes não representados pela primeira componente. Para tanto, não foi usado o critério de Kaiser utilizado anteriormente e, adicionalmente, foi realizada a rotação das cargas fatoriais pelo método Varimax (Tabela 4.5). Como resultado foram retidas duas componentes principais com poder de explicação de 95,15% (um aumento de 7,7 pontos percentuais em relação à tentativa anterior).

Ao observar as correlações de cada componente com os aeroportos é possível verificar que a CP1 é bem explicada pelos aeroportos da costa leste e Fortaleza, com 73,85% da variância, enquanto que a segunda componente (CP2) é explicada apenas pelo aeroporto de São Luís, com 21,3% da variância explicada (Fig. 4.5 a). Nas projeções das componentes no plano fatorial identificam-se nitidamente dois grupos distintos na variabilidade do vento (Fig. 4.5 b).

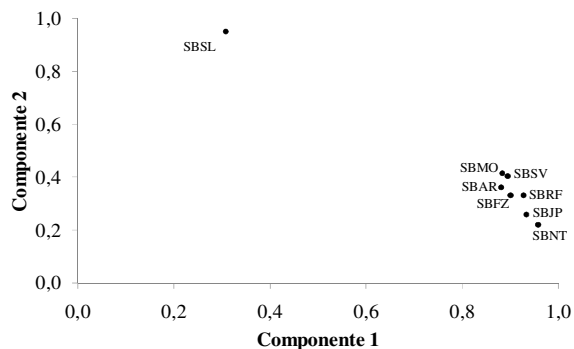
O aumento no número de componentes principais consegue mostrar a distinção entre os regimes do vento médio mensal no litoral do Nordeste, que estão associados à atuação da ASAS e de sistemas atmosféricos como a ZCIT, VCAN, DOL, ZCAS e sistemas frontais. No litoral de São Luís os ventos são de leste-nordeste e nas demais capitais os ventos são de leste-sudeste (Fig. 4.1).

Tabela 4.5 - Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada para análise.

CP	Autovalores Iniciais Cargas não rotacionadas			Cargas Rotacionadas (VARIMAX)		
	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
1	6,99	87,44	87,44	5,09	73,85	73,85
2	0,61	7,71	95,15	1,70	21,3	95,15
3	0,14	1,78	96,93			
...			
8	0,02	0,28	100,00			



(a)

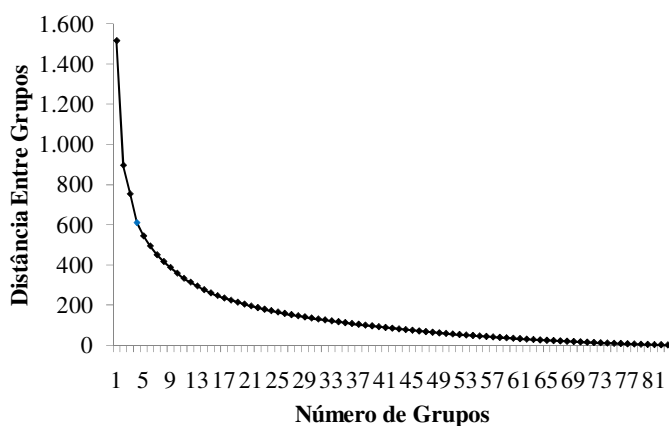


(b)

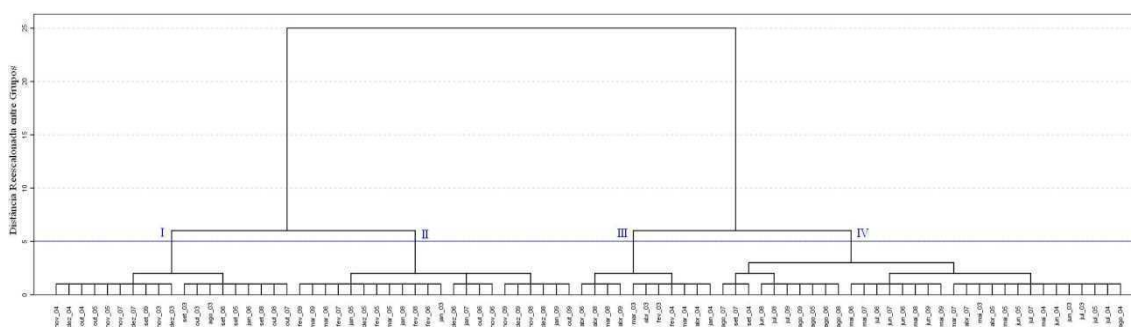
Figura 4.5– (a) Dois primeiros fatores comuns espaciais (correlações) das componentes zonal e meridional do vento à superfície que explicam 95,15% da variância total dos dados (73,85%; 21,3%) na área litorânea do Nordeste. A primeira e segunda componente estão representadas, respectivamente, pela linha azul e vermelha; (b) Projeções das componentes principais (CPs) no plano fatorial delimitado pelo primeiro e segundo fator. (Fonte dos dados: [http:// www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br)).

4.2.3.2 Análise de Agrupamento (AA)

Os resultados obtidos na AA são mostrados na Figura 4.6 através da curva de inércia e do dendrograma. De acordo com os procedimentos de corte baseados na diferença entre as distâncias entre grupos, foi possível distinguir quatro grandes grupos homogêneos entre os meses e anos analisados (Quadro 4.2). A Figura 4.7 ilustra o vento médio do conjunto de meses de cada grupo.



(a)



(b)

Figura 4.6 – Definição de meses homogêneos para análise conjunta das CZV e CMV no período de 2003 a 2009: (a) curva de inércia e (b) dendrograma (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

Quadro 4.2 – Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática para matriz de dados no modo-S.

Agrupamento	Característica	Meses agrupados
Grupo I	Grupo das Velocidades Máximas (GVX)	Ago: 03 Set: 03, 05, 06, 08, 09 Out: 03, 04, 05, 07, 08 Nov: 03, 04, 05, 07 Dez: 03, 04, 07 Jan: 06
Grupo II	Grupo Misto (GMS)	Out: 06,09 Nov: 06, 08, 09 Dez: 05, 06, 08, 09 Jan: 03, 05, 07, 08, 09 Fev: 05, 06, 07, 08, 09 Mar: 05, 06, 09
Grupo III	Grupo das Velocidades Mínimas (GVN)	Jan: 04 Fev: 03,04 Mar: 03, 04,08 Abr: 03, 04, 06, 08, 09
Grupo IV	Grupo das Direções Iguais (GDI)	Mar: 07 Abr: 05, 07 Mai: 03 a 09 Jun: 03 a 09 Jul: 03 a 09 Ago: 04 a 09 Set: 04, 07

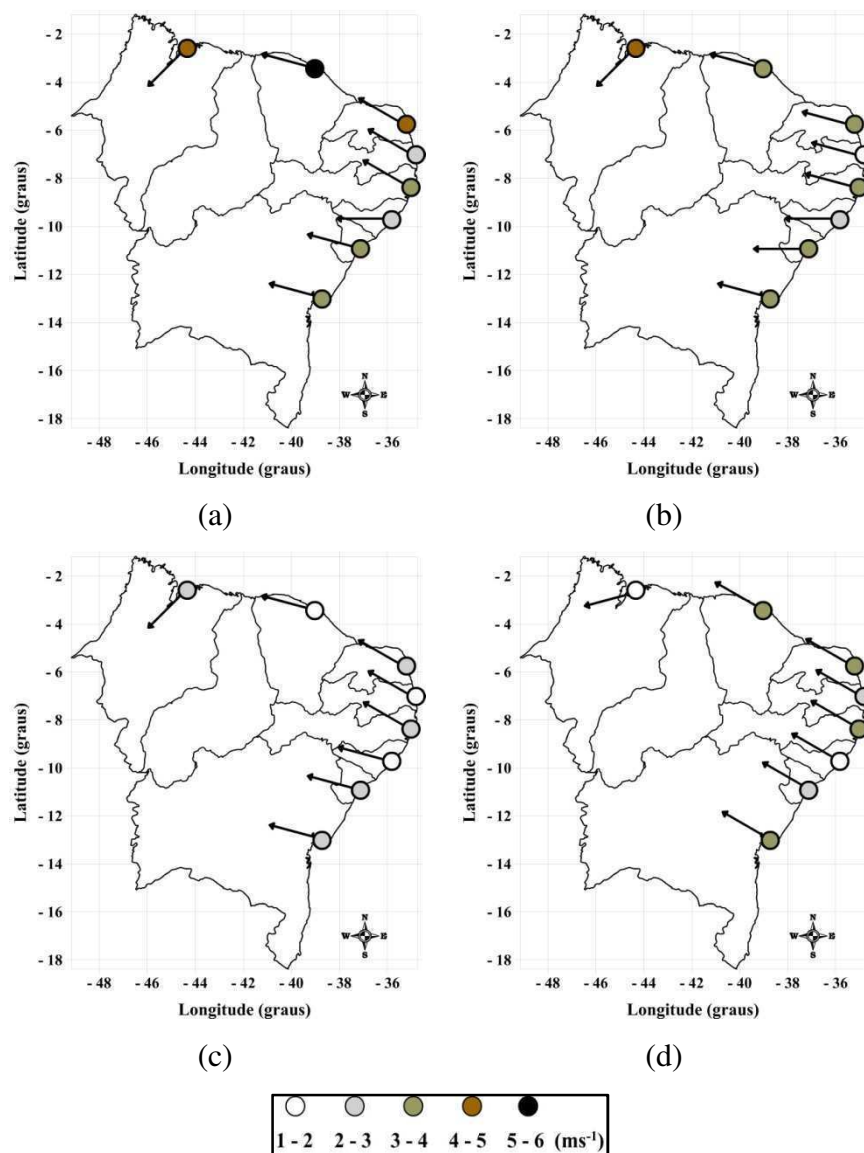


Figura 4.7 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta: (a) Grupo I (Grupo das Velocidades Máximas), (b) Grupo II (Grupo Misto), (c) Grupo III (Grupo das Velocidades Mínimas), (d) Grupo IV (Grupo das Direções Iguais).

O Grupo I, que se caracteriza por apresentar, em todos os aeroportos, o valor máximo da velocidade do vento, é denominado Grupo das Velocidades Máximas (GVX) (Fig. 4.7 a). É formado pelos meses de agosto a janeiro, especialmente pelo ano de 2003 (Quadro 4.2). Neste grupo há casos isolados como agosto de 2003 e janeiro de 2006, mostrando que esses anos não apresentaram características semelhantes com os demais anos nesses meses. O posicionamento do centro do VCAN sobre o leste do Nordeste em janeiro, bem como a influência da ASAS em agosto, foram responsáveis por precipitações abaixo da média histórica nestes dois meses (CLIMANÁLISE, 2003; CLIMANÁLISE,

2006). Os meses de setembro, outubro e novembro têm características similares entre os anos da análise, com exceção do ano de 2004 e 2007 em setembro, 2006 e 2009 em outubro e 2006, 2008 e 2009 em novembro. O mês de dezembro só apresenta características similares entre os anos de 2003, 2004 e 2007. Na análise do vento médio para este grupo as capitais João Pessoa e Maceió têm as menores intensidades (entre 2 e 3 m/s); as capitais no sul do litoral leste (Aracaju e Salvador), e Recife, têm intensidades moderadas (entre 3 e 4 m/s), enquanto que nas capitais situadas mais ao norte (São Luís, Fortaleza e Natal) as intensidades são superiores a 4 m/s (Fig. 4.7 a). O vento médio é de nordeste em São Luís; de leste em Maceió; de leste-sudeste em Fortaleza, Salvador e Aracaju; Natal, João Pessoa e Recife têm ventos de sudeste (Fig. 4.7 a).

O Grupo II apresenta velocidades máximas e mínimas, como também direções de leste, leste-sudeste e nordeste nas capitais litorâneas, sendo assim classificado como Grupo Misto (GMS). O GMS associa os meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março (Quadro 4.2). No mês de outubro os anos de 2006 e 2009 tiveram regimes de vento semelhantes, bem como novembro de 2006, 2008 e 2009. No mês de dezembro se associam os anos de 2005, 2006, 2008 e 2009. O mês de janeiro de todos os anos tem a mesma distribuição, com exceção de 2004 e 2006 que não se associaram a este grupo. No caso de fevereiro os anos semelhantes compreendem o período de 2005 a 2009. O mês de março só apresenta similaridade entre os anos de 2005, 2006 e 2009. As intensidades médias nesse grupo mostram valores baixos em João Pessoa (entre 1 e 2m/s) e Maceió (entre 2 e 3 m/s), valores mais elevados em São Luís (entre 4 e 5 m/s) e intensidades moderadas (entre 3 e 4m/s) nas demais capitais (Fig. 4.7 b). Os ventos são de leste-sudeste em quase toda a área litorânea, com exceção de São Luís com ventos de nordeste e de Maceió e Aracaju com ventos de leste (Fig. 4.7 b).

O Grupo III se caracteriza por apresentar, em todos os aeroportos, o valor mínimo da velocidade do vento (Fig. 4.7 c), sendo assim denominado Grupo das Velocidades Mínimas (GVN). O GVN é formado pelos meses de janeiro a abril (Quadro 4.2), com intensidade do vento entre 1 e 3 m/s e direção de leste-sudeste, com exceção de São Luís com ventos de nordeste (Fig. 4.7 c). Integrando o GVN, janeiro de 2004 mostra a não associação com esse mesmo mês dos outros anos. Esse mês de janeiro se caracterizou pela atuação de sistemas meteorológicos como os VCAN, a ZCIT, os sistemas frontais e a ZCAS, que interagiram resultando num extremo de precipitação (GUEDES et al., 2004; BRITO & BRAGA, 2005; CLIMANÁLISE, 2004). O mês de fevereiro apresenta

semelhanças no regime de vento nos anos de 2003 e 2004, nos quais é possível destacar a atuação de VCAN sobre a região (CLIMANÁLISE, 2003; CLIMANÁLISE, 2004). O mês de março tem associação entre os anos de 2003, 2004 e 2008. Já o mês de abril tem variabilidade semelhante em todos os anos, com exceção de 2005 e 2007 que não fazem parte desse grupo. As precipitações nos meses do Grupo III foram, em média, entre 100 e 300 mm.

O Grupo IV se caracteriza por apresentar, em todos os aeroportos, direções de sudeste, com exceção de São Luís com ventos de nordeste (Fig. 4.7 d), o que sugere denominá-lo Grupo das Direções Iguais (GDI). Assim, destaca-se a associação de todos os anos do período 2003 a 2009 entre os meses de maio a agosto, com exceção de agosto de 2003 (Quadro 4.2). Esse resultado indica que não houve grandes alterações no padrão de circulação atmosférica desse quadrimestre. No período de estudo houve atuação no litoral leste e no litoral norte dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) que favoreceram a precipitação, bem como sistemas de circulação local do tipo brisa e da ASAS, que transportaram umidade da região oceânica para o litoral do continente (CLIMANÁLISE, 2003-2009). Os demais meses associados neste grupo, como março de 2007, abril de 2005 e 2007, e setembro de 2004 e 2007, apresentaram características similares aos outros meses já descritos devido a semelhanças em seu regime de ventos (Quadro 4.2). As intensidades do vento neste grupo podem ser consideradas de fraca a moderada (1 a 4 m/s) (Fig. 4.7 d). A variabilidade neste grupo está associada aos ventos alísios da ASAS, à atuação da ZCIT e, especialmente, aos distúrbios ondulatórios de leste que ocorrem com maior frequência no período de maio a julho.

4.2.4 Análise Espacial Mensal

Nesta análise é feita uma AA com matriz de dados no modo-S e do Tipo 3 (ver sub-seção 3.3.4). Foi possível distinguir três grandes grupos homogêneos entre os meses analisados, com exceção de maio e setembro que formaram quatro grupos homogêneos (Fig. 4.8). Vale salientar que a definição das características de cada grupo foi feita através da comparação entre os grupos de um mesmo mês. Os grupos obtidos podem ser visualizados mais facilmente no Quadro 4.3.

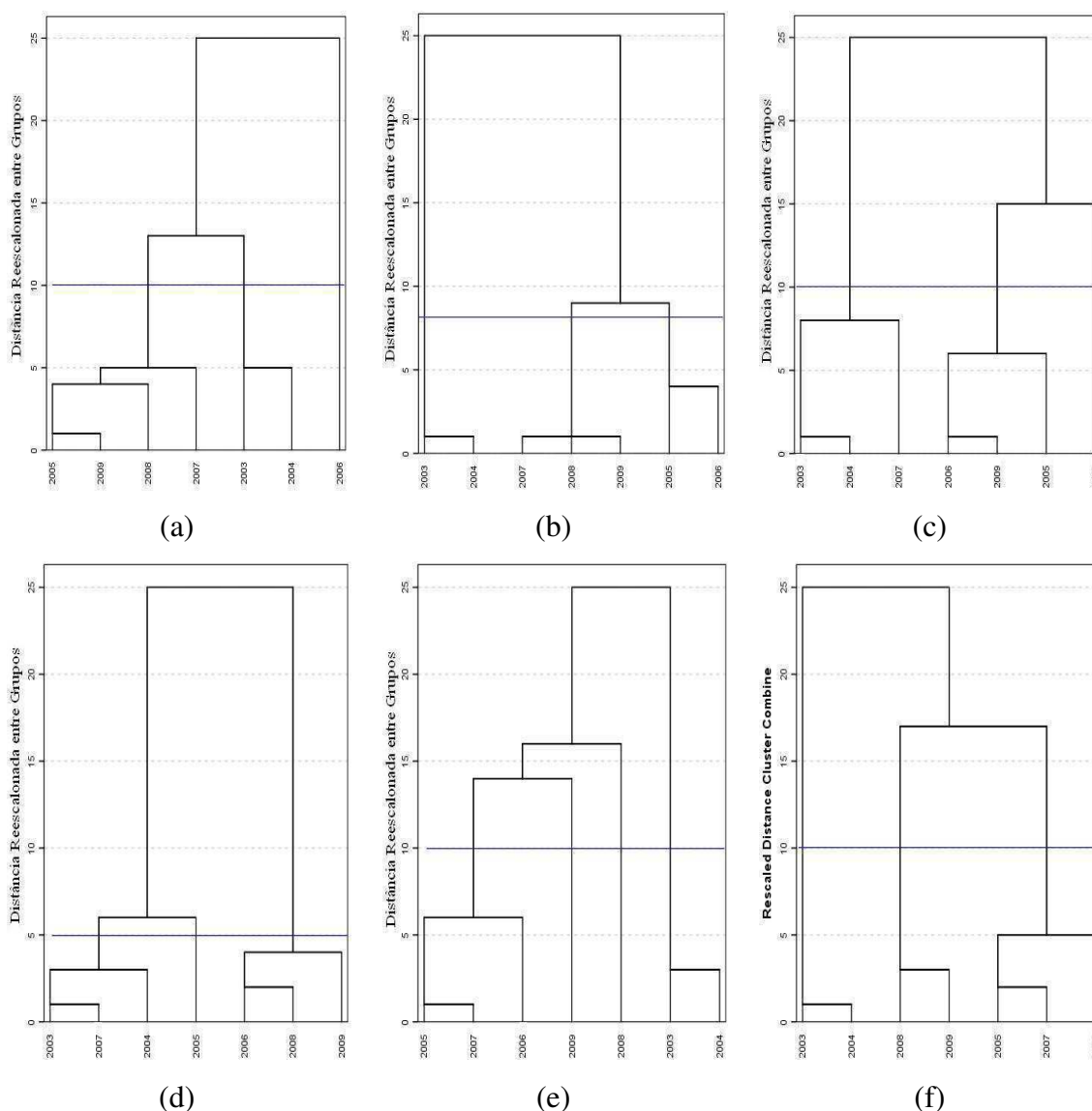
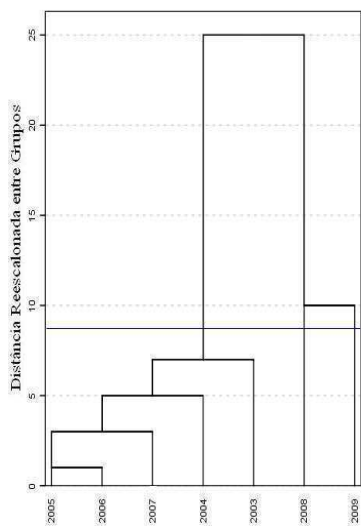
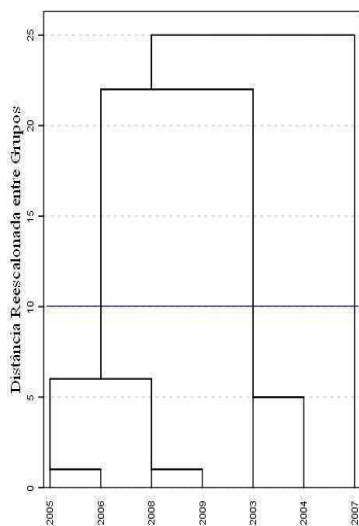


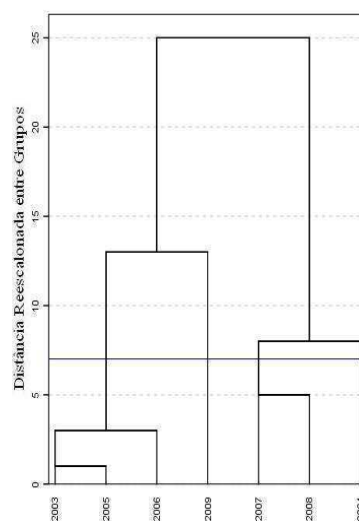
Figura 4.8 – Dendrograma da definição de anos homogêneos entre os meses de: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).



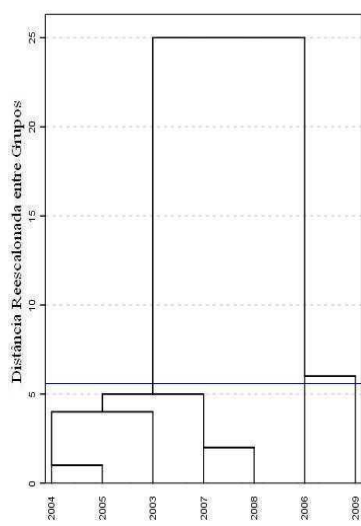
(g)



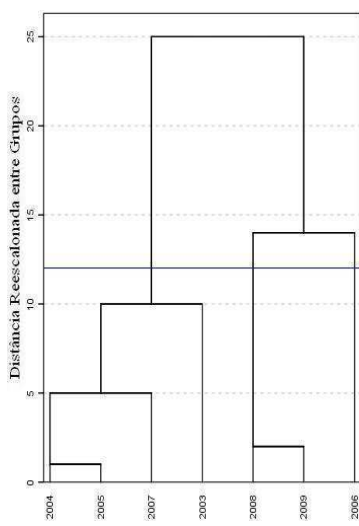
(h)



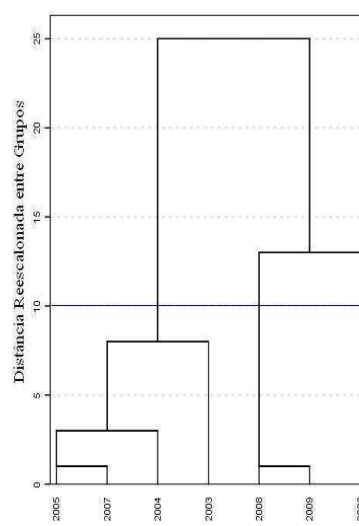
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura 4.8 – Conclusão.

Quadro 4.3 – Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática para matriz de dados no modo-S do Tipo 3.

Meses	Agrupamentos			
	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV
Janeiro	2006	2003, 2004	2005, 2007, 2008, 2009	
Fevereiro	2003, 2004	2007, 2008, 2009	2005, 2006	
Março	2003, 2004, 2007	2005, 2006, 2009	2008	
Abril	2003, 2004, 2007	2005	2006, 2008, 2009	
Mai	2005, 2006, 2007	2009	2008	2003, 2004
Junho	2003, 2004	2008, 2009	2005, 2006, 2007	
Julho	2003, 2004, 2005, 2006, 2007	2008	2009	
Agosto	2005, 2006, 2008, 2009	2003, 2004	2007	
Setembro	2003, 2005, 2006	2009	2007, 2008	2004
Outubro	2003, 2004, 2005, 2007, 2008	2006	2009	
Novembro	2003, 2004, 2005, 2007	2008, 2009	2006	
Dezembro	2003, 2004, 2005, 2007	2008, 2009	2006	

No agrupamento para o mês de janeiro o primeiro grupo foi formado pelo ano de 2006, o segundo grupo pelos anos de 2003 e 2004 e o terceiro grupo pelos anos de 2005, 2007, 2008 e 2009 (Fig. 4.8 a e Quadro 4.3). O Grupo I é caracterizado por velocidades máximas nas capitais, com exceção de Salvador (Fig. 4.9 a); nele o ano de 2006 não se associou com nenhum outro devido principalmente ao posicionamento do VCAN sobre o leste do NEB (CLIMANÁLISE, 2006). A característica que identifica o Grupo II são os valores mínimos da velocidade do vento e regime de ventos de leste, com exceção de Natal e São Luís (Fig. 4.9 b). Como já discutido na sub-seção anterior, janeiro de 2004 se destacou pela interação entre diversos sistemas meteorológicos como ZCIT, VCAN, ZCAS e sistemas frontais. Seu agrupamento com janeiro de 2003 indica que a variabilidade espacial do vento médio mensal foi semelhante nesses meses, um resultado que difere daquele obtido para o conjunto dos meses (Quadro 4.2). O terceiro grupo apresenta velocidades máximas e mínimas e direções de leste, leste-sudeste e nordeste (Fig. 4.9 c) entre os anos deste grupo, o que sugere classificá-lo como um grupo misto. A direção do vento é constante em São Luís (Fig. 4.9 a-c).

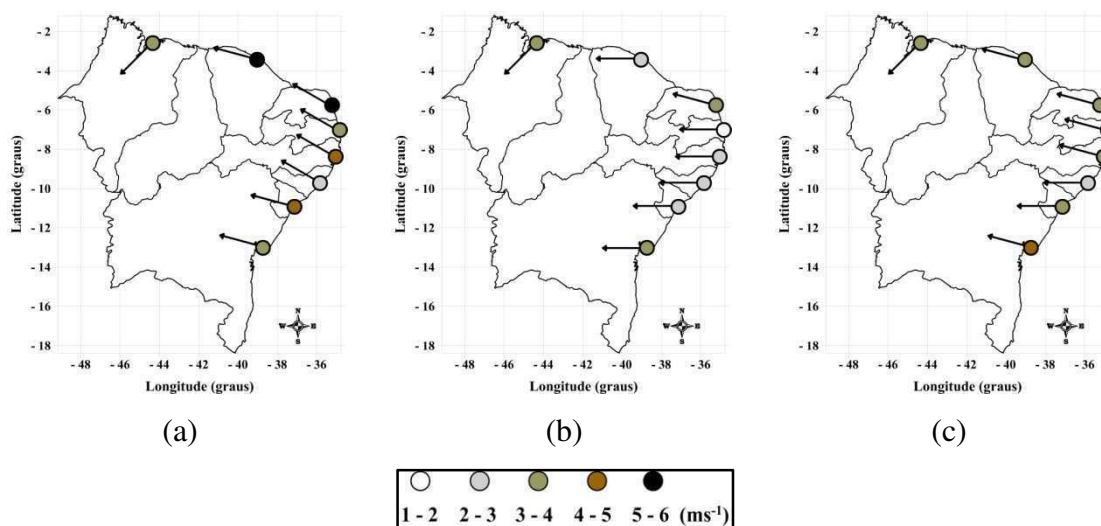


Figura 4.9 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de janeiro: (a) Grupo I (2006), (b) Grupo II (2003, 2004) e (c) Grupo III (2005, 2007, 2008, 2009).

No agrupamento do mês de fevereiro o primeiro grupo, formado pelos anos de 2003 e 2004 (Fig. 4.8 b), tem como principal característica as menores velocidades do vento desse mês, com exceção de João Pessoa nesses anos (Fig. 4.10 a). O segundo grupo, formado pelos anos de 2007 a 2009 (Fig. 4.8 b), apresenta intensidade moderada na maior parte da costa leste e ventos fracos no litoral norte, e em Aracaju e João Pessoa (Fig. 4.10 b). Este grupo pode ser considerado como misto já que, além das velocidades, as direções do vento são de leste, leste-sudeste e nordeste. Já o terceiro grupo, formado pelos anos de 2005 e 2006 (Fig. 4.8 b), é caracterizado pelas máximas velocidades do vento nesse mês (Fig. 4.10 c). Este grupo de velocidades máximas tem ventos de nordeste em São Luís, de leste em Salvador, Maceió e João Pessoa, e de leste-sudeste nas demais capitais (Fig. 4.10 c). A direção do vento é constante em Fortaleza e Aracaju (Fig. 4.10 a-c).

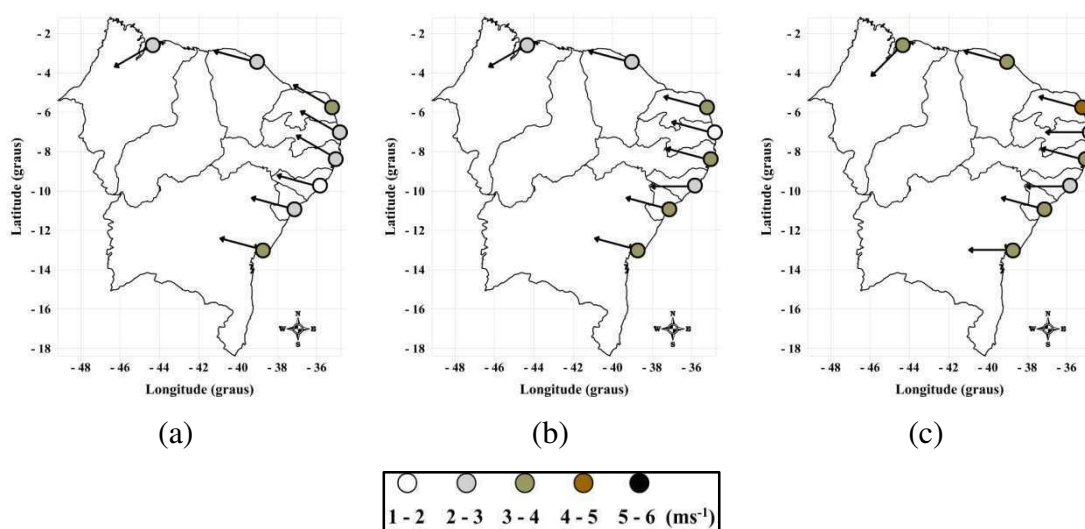


Figura 4.10 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de fevereiro: (a) Grupo I (2003, 2004), (b) Grupo II (2007, 2008, 2009) e (c) Grupo III (2005 e 2006).

No mês de março o Grupo I foi formado pelos anos de 2003, 2004 e 2007, que é caracterizado por velocidades fracas e moderadas e direções de leste-sudeste, com exceção de São Luís com ventos de nordeste e Maceió com ventos de leste (Fig. 4.11 a), o que sugere sua classificação como grupo misto. No segundo grupo, formado pelos anos de 2005, 2006 e 2009 (Fig. 4.8 c), a principal característica são as máximas velocidades do vento, exceto em João Pessoa (Fig. 4.11 b). O grupo das velocidades máximas apresenta ventos de leste-sudeste, com exceção de Maceió, com ventos de leste, e São Luís, com vento de nordeste. O terceiro grupo, formado apenas pelo ano de 2008 (Fig. 4.8 c), é caracterizado pelas mínimas velocidades do vento (Fig. 4.11 c). Este grupo de velocidades mínimas tem ventos de leste-sudeste, com exceção de São Luís com ventos de nordeste, e Maceió e Fortaleza com ventos de leste. A direção do vento é constante em todas as capitais, com exceção de Fortaleza (Fig. 4.11 a-c).

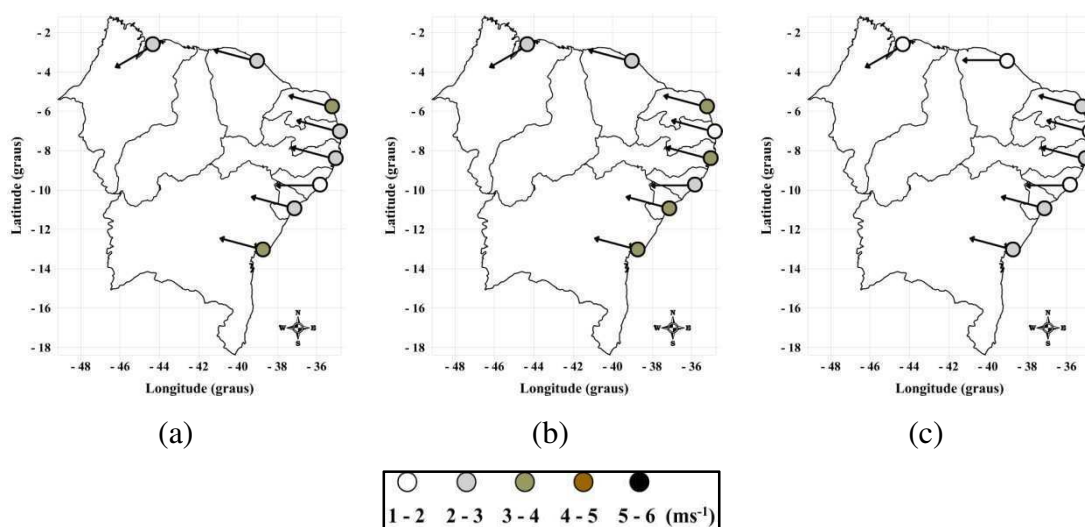


Figura 4.11 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de março: (a) Grupo I (2003, 2004, 2007), (b) Grupo II (2005, 2006, 2009) e (c) Grupo III (2008).

O primeiro grupo do mês de abril foi formado pelos mesmos anos do Grupo I do mês de março, ou seja, 2003, 2004 e 2007 (Fig. 4.8 d). Ele também pode ser considerado como um grupo misto, com as mesmas características já descritas para março, com exceção de São Luís e Salvador cujos valores de intensidade diminuíram (Figs. 4.11 a e 4.12 a). O segundo grupo, formado apenas pelo ano de 2005 (Fig. 4.8 d), é caracterizado pelas máximas velocidades do vento nas capitais litorâneas (Fig. 4.12 b). Já no terceiro grupo, os anos de 2006, 2008 e 2009 (Fig. 4.8 d) foram associados por apresentarem mínimos de velocidade (entre 1 e 3 m/s) (Fig. 4.12 c). Vale assinalar que esses anos integram o GVN, assim como 2003 e 2004 (Quadro 4.2). No grupo das velocidades mínimas os ventos são de leste-sudeste, com exceção de São Luís, com ventos de nordeste, e Maceió, com ventos de leste (Fig. 4.12 c). A direção do vento é constante em todas as capitais, com exceção de São Luís e Maceió (Fig. 4.12 a-c).

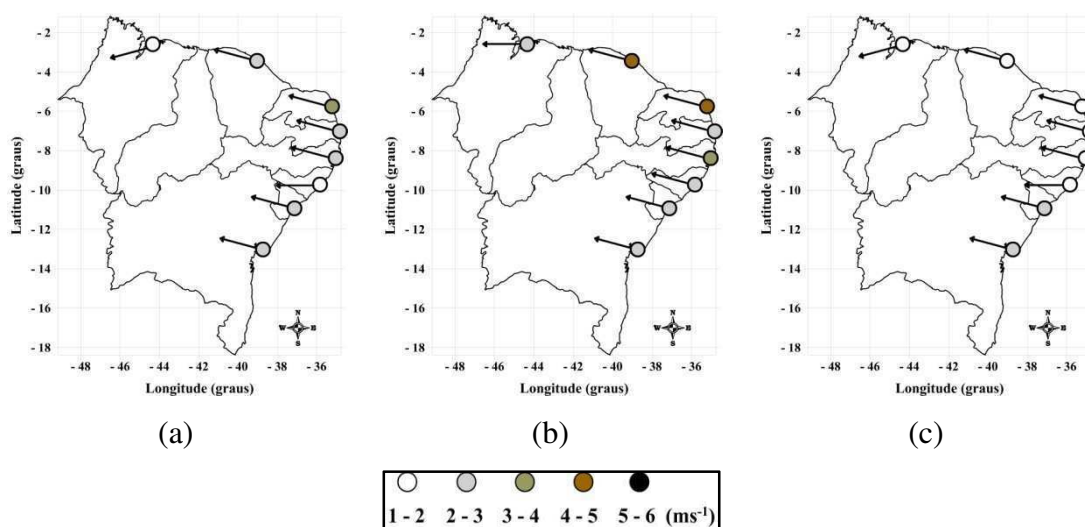


Figura 4.12 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de abril: (a) Grupo I (2003, 2004, 2007), (b) Grupo II (2005) e (c) Grupo III (2006, 2008, 2009).

No agrupamento do mês de maio são observados quatro grupos (Fig. 4.8 e). O Grupo I, formado pelos anos de 2005, 2006 e 2007, apresenta direções iguais (sudeste), exceto São Luís, com vento de nordeste; as intensidades também são máximas, com exceção de São Luís, Recife e Aracaju (Fig. 4.13 a). O segundo grupo contém apenas o ano

de 2009 (Fig. 4.8 e) e sua principal característica são as mínimas velocidades do vento, com valores entre 1 e 3 m/s, na maioria das capitais, e ventos de leste-sudeste, com exceção de São Luís, com vento de leste, e João Pessoa, com vento de sul (Fig. 4.13 b). O Grupo III, formado pelo ano de 2008 (Fig. 4.8 e), é caracterizado por máximas velocidades do vento, com exceção de Fortaleza, Natal e João Pessoa; neste grupo os ventos são de leste-sudeste, com exceção de João Pessoa e Maceió, com ventos de sul (Fig. 4.13 c). O Grupo IV, formado pelos anos de 2003 e 2004 (Fig. 4.8 e), pode ser considerado um grupo misto, pois apresenta intensidade de fraca a moderada (entre 1 e 3 m/s) e direção de leste-sudeste, com exceção de São Luís com vento de leste-nordeste, e Maceió com vento de leste (Fig. 4.13 d). A direção do vento é constante em Salvador (Fig. 4.14 a-d).

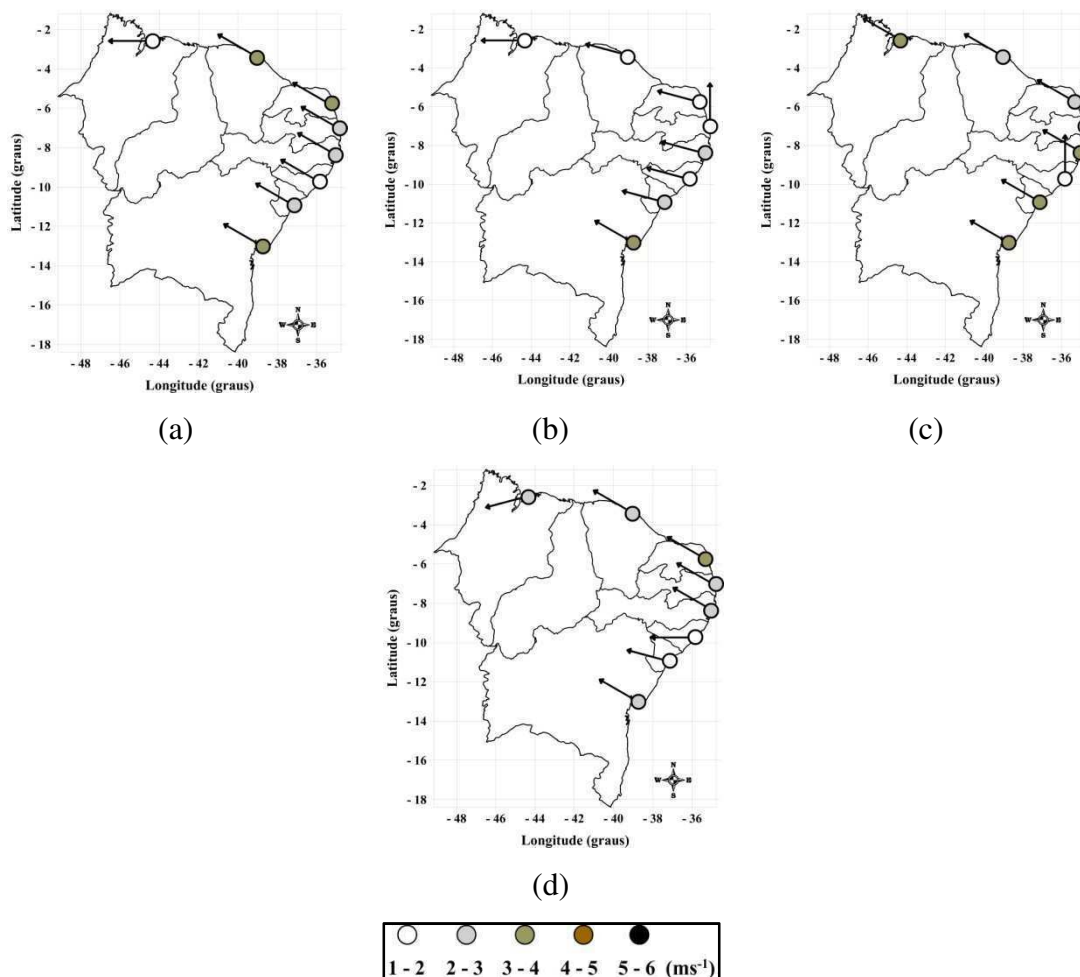


Figura 4.13 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de maio: (a) Grupo I (2005, 2006, 2007), (b) Grupo II (2009), (c) Grupo III (2008) e (d) Grupo IV (2003, 2004).

No agrupamento do mês de junho, o primeiro grupo, formado pelos anos de 2003 e 2004 (Fig. 4.8 f), é caracterizado por velocidades mínimas, com exceção de São Luís e João Pessoa (Fig. 4.14 a). O Grupo II, formado pelos anos de 2008 e 2009 (Fig. 4.8 f), é considerado um grupo misto por apresentar intensidades de fraca a moderada (entre 1 e 4m/s) e ventos de sudeste, sul-sudeste, sul e leste (Fig. 4.14 b). O Grupo III, formado pelos anos de 2005 a 2007 (Fig. 4.8 f), apresenta direções iguais e velocidades máximas (Fig. 4.14 c). Os ventos são de sudeste em todo o litoral, à exceção de São Luís, com vento de leste; as intensidades são máximas em todo litoral, com exceção de Aracaju (Fig. 4.14 c). A direção do vento é constante em São Luís e Natal (Fig. 4.14 a-c).

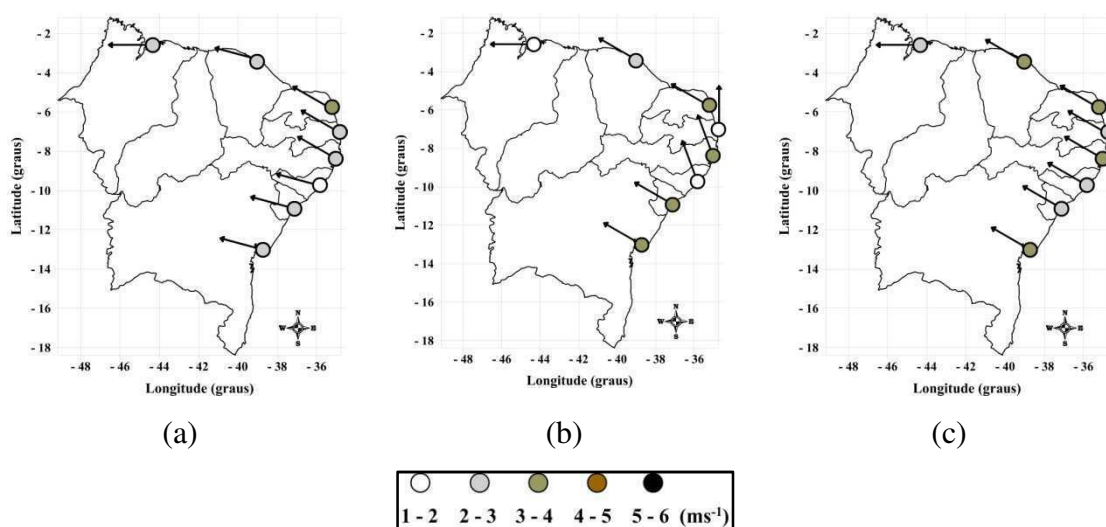


Figura 4.14 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de junho: (a) Grupo I (2003, 2004), (b) Grupo II (2008, 2009) e (c) Grupo III (2005, 2006, 2007).

No agrupamento do mês de julho, o Grupo I, formado pelos anos de 2003 a 2007 (Fig. 4.8 g), é caracterizado por direções iguais, apresentando ventos de sudeste, com exceção de São Luís com vento de nordeste (Fig. 4.15 a). Neste grupo de direções iguais também são observados mínimos de velocidade, com exceção de João Pessoa. O Grupo II, formado apenas pelo ano de 2008 (Fig. 4.8 g), é caracterizado por máximas velocidades do vento, com valores entre 2 e 5 m/s; os ventos são de sudeste, com exceção de João Pessoa, com vento de sul, e São Luís, com vento de leste. O Grupo III é formado apenas pelo ano de 2009 (Fig. 4.8 g), e pode ser considerado como um grupo misto; apresenta ventos de sudeste, com exceção de São Luís, com vento de nordeste, e João Pessoa, com vento de sul; as velocidades variam de 1 a 4 m/s (Fig. 4.15 c). A direção do vento é constante em todas as capitais, à exceção de São Luís e João Pessoa (Fig. 4.15 a-c).

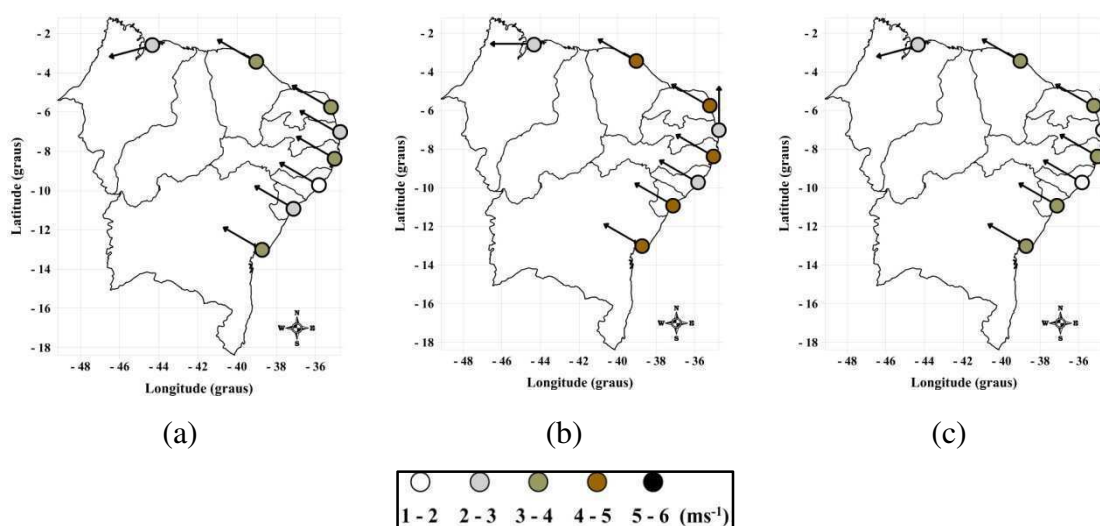


Figura 4.15 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de julho: (a) Grupo I (2003, 2004, 2005, 2006, 2007), (b) Grupo II (2008) e (c) Grupo III (2009).

No agrupamento do mês de agosto o primeiro grupo mostra associação entre os anos de 2005, 2006, 2008 e 2009 (Fig. 4.8 h). Neste grupo a característica marcante são as direções iguais, com ventos de leste-sudeste em todas as capitais, com exceção de São Luís com vento de leste-nordeste (Fig. 4.16 a). O Grupo II, formado pelos anos de 2003 e 2004 (Fig. 4.8 h), é considerado um grupo misto já que há velocidades máximas e mínimas e ventos de leste-nordeste, leste-sudeste e sudeste (Fig. 4.16 b). O terceiro grupo, formado apenas pelo ano de 2007 (Fig. 4.8 h), é caracterizado por máximas velocidades do vento (entre 2 e 6 m/s); apresenta também diferentes direções do quadrante sudeste, com exceção de São Luís, com vento de nordeste (Fig. 4.16 c). A direção do vento é constante em todas as capitais, à exceção de Natal, João Pessoa e Recife (Fig. 4.16 a-c).

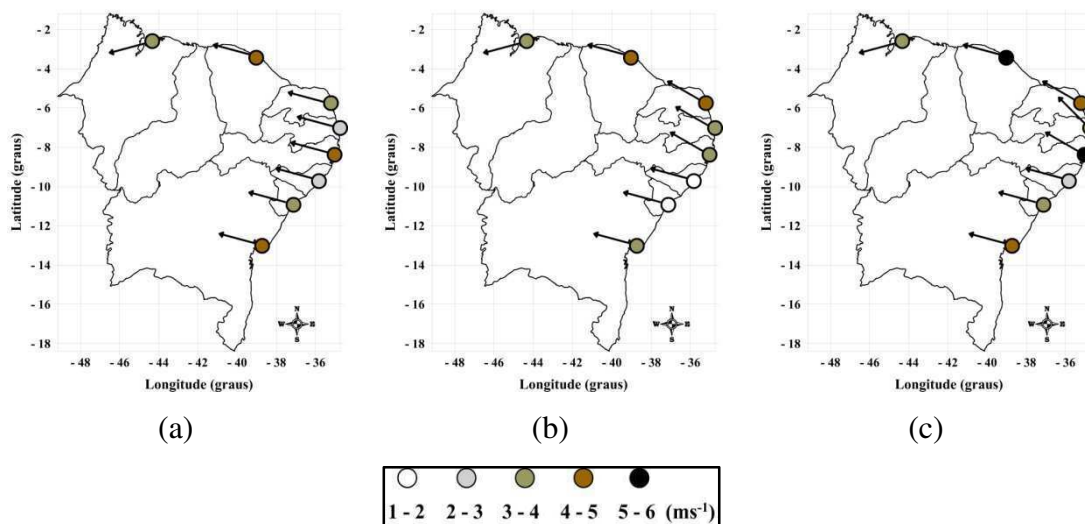


Figura 4.16 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de agosto: (a) Grupo I (2005, 2006, 2008, 2009), (b) Grupo II (2003, 2004) e (c) Grupo III (2007).

No agrupamento do mês de setembro são observados quatro grupos homogêneos (Fig. 4.8 i). O Grupo I, formado pelos anos de 2003, 2005 e 2006 (Fig. 4.8 i), apresenta as velocidades mínimas desse mês, exceto em João Pessoa; os ventos são de leste-sudeste entre o litoral da Bahia e o de Alagoas, e no Ceará; de sudeste do litoral de Pernambuco ao do Rio Grande do Norte, e de nordeste no litoral do Maranhão (Fig. 4.17 a). O Grupo II, que contém apenas o ano de 2009, apresenta direções iguais entre o litoral

da Bahia e Alagoas (leste), e entre Pernambuco e Ceará (leste-sudeste) (Fig. 4.17 b). As intensidades variam entre 5 e 6 m/s no litoral norte e entre 1 e 5 m/s no litoral leste (Fig. 4.17 b). No Grupo III os anos de 2007 e 2008 tiveram as mesmas características (Fig. 4.8 i). Esse grupo pode ser classificado como misto, por apresentar variabilidade nas direções entre as capitais e por ter velocidades entre 2 e 6 m/s (Fig. 4.17 c). O Grupo IV, formado apenas por 2004 (Fig. 4.8 i), é caracterizado por máximas velocidades do vento, exceto em São Luís e Recife; apresenta ventos de leste-sudeste, sudeste e leste-nordeste (Fig. 4.17 d). A direção do vento varia entre os grupos, em todas as capitais (Fig. 4.17 a-d).

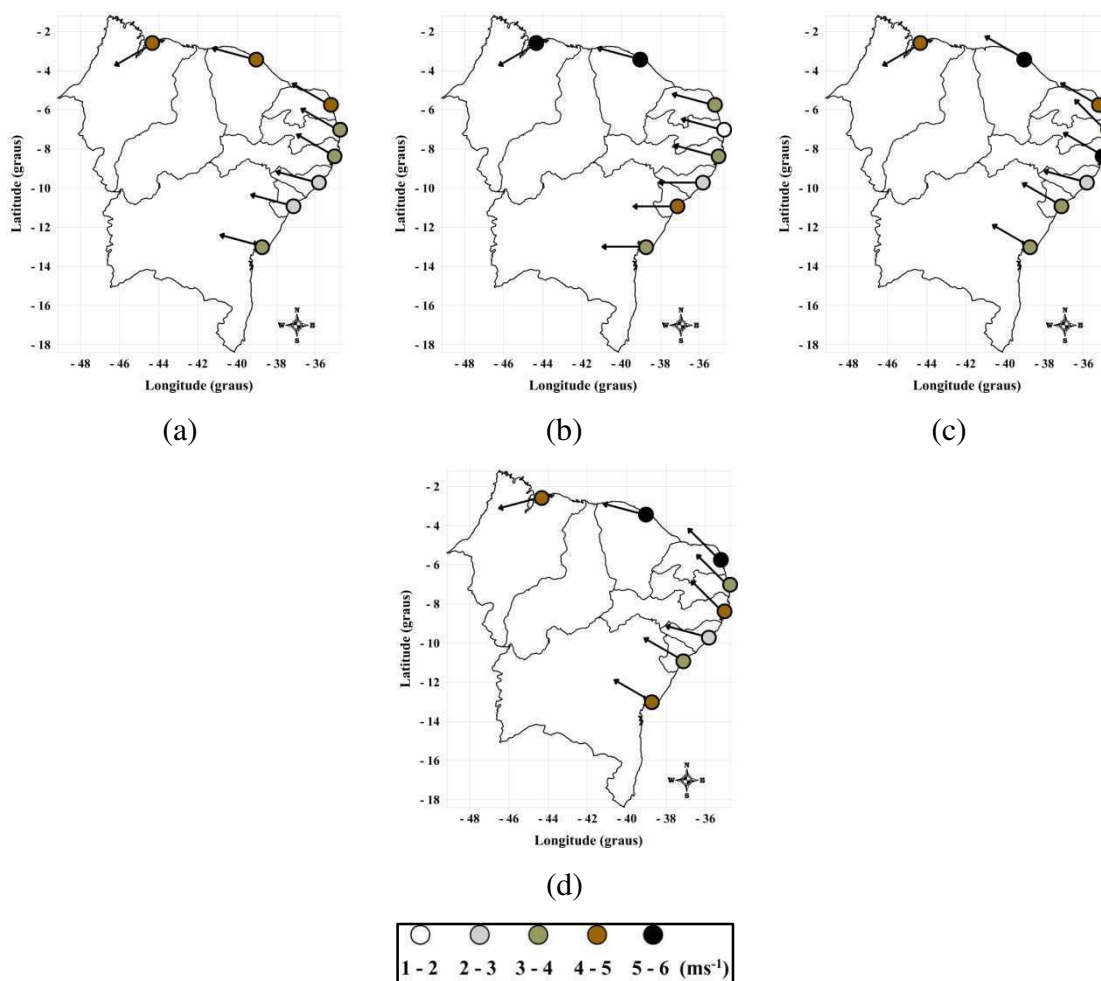


Figura 4.17 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de setembro: (a) Grupo I (2003, 2005, 2006), (b) Grupo II (2009), (c) Grupo III (2007, 2008) e (d) Grupo IV (2004).

No mês de outubro o Grupo I, formado pelos anos de 2003, 2004, 2005, 2007 e 2008 (Fig. 4.8 j), é caracterizado por velocidades máximas em todas as capitais litorâneas (Fig. 4.18 a). Neste grupo a direção entre o litoral da Bahia e Alagoas, e no Ceará, é de leste-sudeste, entre Pernambuco e Rio Grande do Norte é de sudeste, e é de nordeste em São Luís (Fig. 4.18 a). O Grupo II, formado apenas pelo ano de 2006, pode ser considerado um grupo misto, já que apresenta velocidades máximas e mínimas e ventos de leste, leste-sudeste e nordeste (Fig. 4.18 b). O terceiro grupo, constituído pelo ano de 2009 (Fig. 4.8 j), tem ventos de leste, à exceção do litoral norte e entre o litoral de Natal e João Pessoa. Nesse grupo as intensidades são de fraca a forte (entre 1 e 5 m/s) na costa leste e fortes (entre 4 e 6 m/s) no litoral norte (Fig. 4.18 c). A direção do vento é constante em São Luís e Fortaleza (Fig. 4.18 a-c).

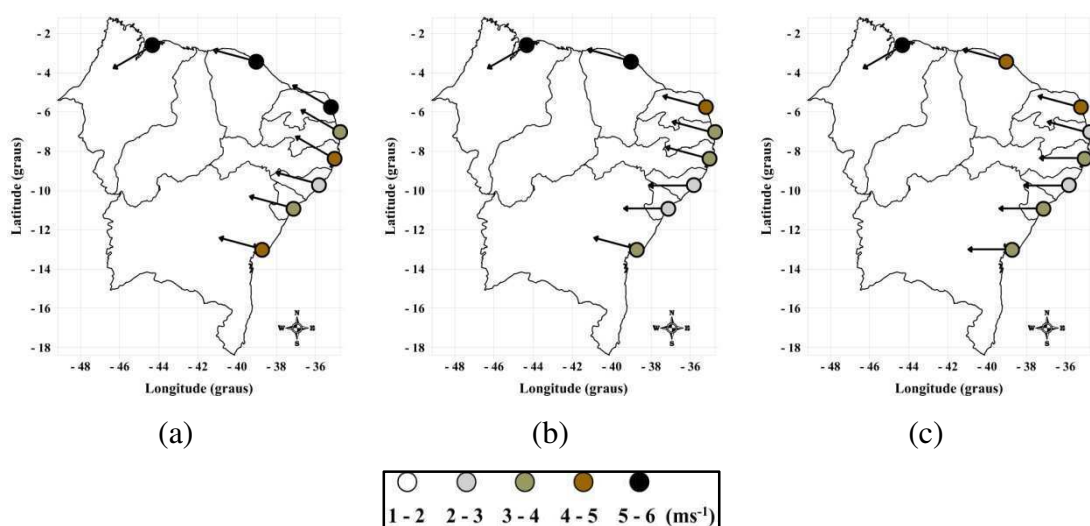


Figura 4.18 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de outubro: (a) Grupo I (2003, 2004, 2005, 2007, 2008), (b) Grupo II (2006) e (c) Grupo III (2009).

O agrupamento do mês de novembro resultou em três grupos homogêneos (Fig. 4.8 k). O Grupo I, formado pelos anos de 2003, 2004, 2005 e 2007 (Quadro 4.3), é caracterizado por máximas velocidades do vento, exceto em Recife, Maceió e Aracaju. Neste grupo os ventos são de leste-sudeste, à exceção de Maceió com ventos de leste e São Luís com ventos de nordeste (Fig. 4. 19 a). O Grupo II contém os anos de 2008 e 2009 (Fig. 4.8 k). Ele pode ser considerado um grupo de direções iguais já que há ventos de leste do litoral da Bahia a Pernambuco, de leste-sudeste entre a Paraíba e o Ceará, e de nordeste no Maranhão; os ventos são de moderados a fortes (entre 3 e 6 m/s), com exceção de João Pessoa (Fig. 4.19 b). O Grupo III, formado apenas pelo ano de 2006 (Fig. 4.8 k), é considerado um grupo misto, com velocidades variando entre 2 e 6 m/s e direções de leste, leste-sudeste e leste-nordeste (Fig. 4.19 c). A direção do vento é constante em todas as capitais, à exceção de Recife, Aracaju e Salvador (Fig. 4.19 a-c).

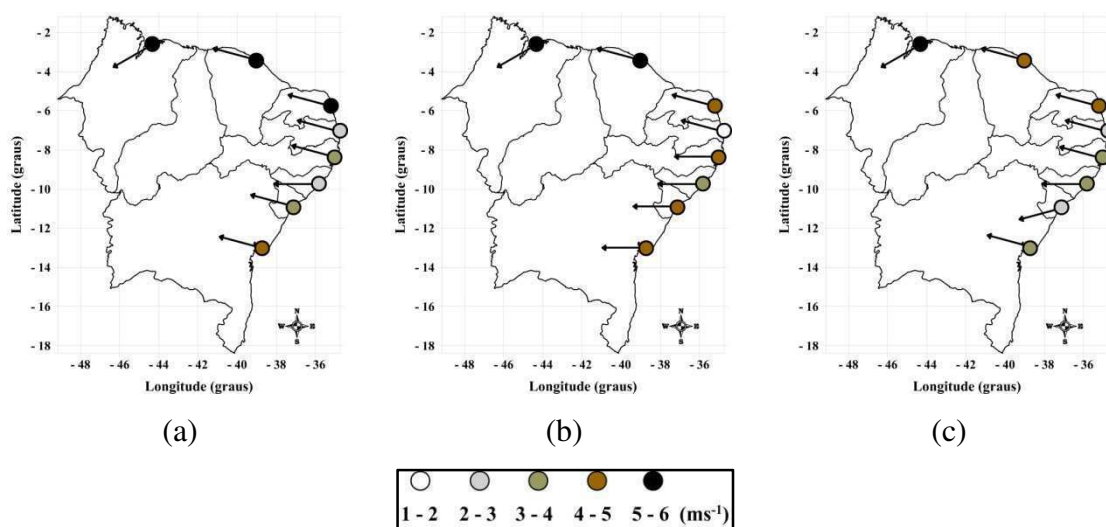


Figura 4.19 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de novembro: (a) Grupo I (2003, 2004, 2005, 2007), (b) Grupo II (2008, 2009) e (c) Grupo III (2006).

O agrupamento do mês de dezembro apresenta os mesmos grupos do mês de novembro (Fig. 4.8 1 e Quadro 4.3). Comparando O Grupo I é caracterizado por velocidades máximas (Natal, João Pessoa, Aracaju e Salvador) e direções iguais (leste-sudeste), exceto Maceió (leste) e São Luís (nordeste); as intensidades variam entre 2 e 5 m/s (Fig. 4.20 a). O Grupo II pode ser considerado um grupo de velocidades mínimas (São Luís, Natal, João Pessoa e Salvador), com direções iguais às do Grupo I, exceto em Fortaleza e Aracaju (leste) (Fig. 4.20 b). No Grupo III há velocidades máximas (São Luís, João Pessoa e Maceió) e mínimas (Natal, Aracaju e Salvador), o que sugere sua caracterização como grupo misto (Fig. 4.20 c). As direções são as mesmas do Grupo II, exceto em Aracaju, com vento de leste-nordeste. A direção do vento é constante em todas as capitais, à exceção de Fortaleza e Aracaju (Fig. 4.20 a-c).

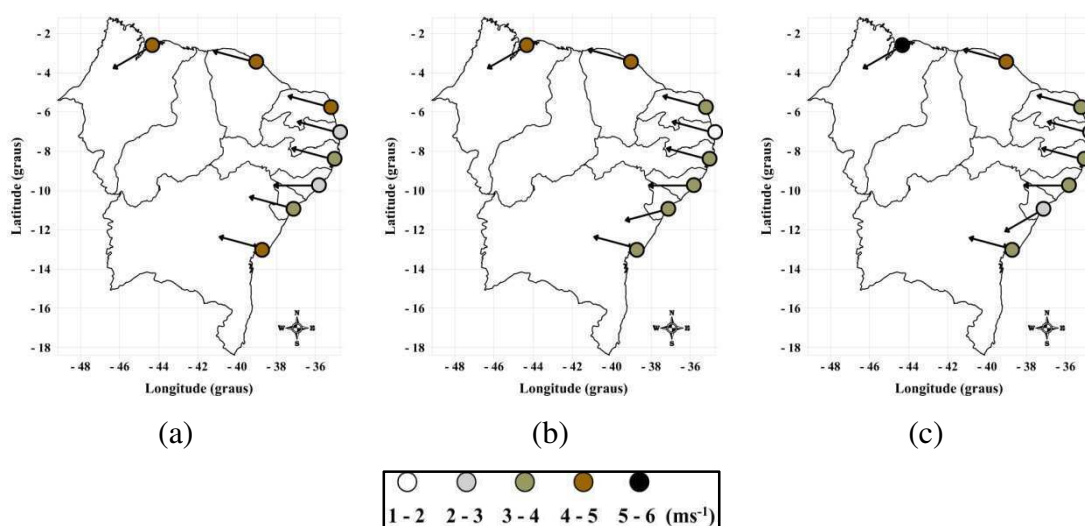


Figura 4.20 – Vento médio à superfície dos grupos homogêneos formados na análise conjunta para o mês de dezembro: (a) Grupo I (2003, 2004, 2005, 2007), (b) Grupo II (2008, 2009) e (c) Grupo III (2006).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho técnicas multivariadas foram aplicadas a dados horários do vento à superfície coletados nas capitais litorâneas nordestinas com o objetivo de avaliar a variabilidade e os padrões de vento na área costeira do Nordeste do Brasil.

Nas análises do vento médio mensal à superfície foi observado que o regime de vento de São Luís é o mais distinto dentre as capitais litorâneas por apresentar ventos de leste-nordeste, enquanto que as demais têm ventos de leste-sudeste. A velocidade do vento varia no decorrer do ano em toda a área litorânea; nos meses menos (mais) chuvosos, agosto a novembro (março a julho), as intensidades são maiores (menores), com valores entre 4 e 6 m/s (1 e 3 m/s). Essa variabilidade nos padrões do vento médio mensal está associada à atuação da alta subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e outros sistemas atmosféricos, particularmente sistemas de grande escala (ZCIT, VCAN, DOL, ZCAS, sistemas frontais).

A aplicação da análise fatorial em componentes principais e da análise de agrupamento possibilitou identificar regiões homogêneas através das análises no modo temporal e padrões sazonais nas análises no modo espacial.

Na análise temporal sazonal foram identificadas três regiões homogêneas na área litorânea. A primeira, formada apenas por São Luís, devido aos ventos de leste-nordeste. A segunda, constituída por João Pessoa e Maceió, é caracterizada por baixas velocidades do vento. A terceira, formada por Fortaleza, Natal, Recife, Aracaju e Salvador, é caracterizada por velocidades do vento maiores. Na análise temporal trimestral os resultados foram semelhantes.

Na análise espacial sazonal e interanual foram obtidas duas componentes principais rotacionadas com 95% de variância explicada. A CP1 foi bem explicada pelas capitais do litoral leste e por Fortaleza, enquanto que a CP2 explicou o regime de São Luís. Os fatores identificaram os dois regimes de vento existentes no litoral do Nordeste do Brasil em consequência da circulação da ASAS. A análise de agrupamento resultou em quatro grupos homogêneos que representam padrões sazonais distintos: Grupo das Velocidades Máximas, Grupo Misto, Grupo das Velocidades Mínimas e Grupo das Direções Iguais. Nestes grupos meses de condições climáticas extremas são destacados, a exemplo de janeiro de 2004 que integra o Grupo das Velocidades Mínimas.

A análise espacial mensal resultou em três grandes grupos homogêneos para os meses analisados, com exceção dos meses de maio e setembro que formaram quatro grupos. Foram identificados grupos de velocidades máximas, grupos de velocidades mínimas, grupos mistos e grupos de direções iguais.

As técnicas multivariadas possibilitaram identificar regiões homogêneas e padrões sazonais do vento à superfície na área litorânea do Nordeste do Brasil. Os resultados encontrados podem ser utilizados na validação de experimentos numéricos para simulação do vento em mesoescala. Além disso, tem potencial para subsidiar o desenvolvimento de projetos em diversas áreas, a exemplo da construção civil (engenharia e arquitetura), geração de energia eólica, controle da poluição atmosférica, etc. Uma extensão deste trabalho seria aplicar as mesmas técnicas para analisar a variabilidade horária do vento à superfície e a circulação local desta área, como também investigar a inter-relação entre o vento e outras variáveis meteorológicas com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre os processos atmosféricos na área costeira do Nordeste do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRETO, A.B. **Estudo do Ciclo Diário do Vento à Superfície no Nordeste do Brasil**, Campina Grande, 2001. 56p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal da Paraíba.

BASTOS, C. C.; FERREIRA, N. J. Análise climatológica da alta subtropical do Atlântico Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro, **Anais...**, Rio de Janeiro: SBMET, 2000.

BRAGA, C.C. Análise em componentes principais da precipitação média decenal no Estado da Paraíba. In: I CONGRESSO IBEROAMERICANO, V CONGRESSO INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA, 1992, Madrid. **Anais...**, v.1, p. 292-298, 1992.

BRITO, J. I. B.; BRAGA, C. C. Chuvas no estado da Paraíba em 2004. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.1, p.27-32, 2005. ISSN-1676-014X.

BURLANDO, M.; ANTONELLI, M.; RATTO, C. F. Mesoscale wind climate analysis: identification of anemological regions and wind regimes. **International Journal of Climatology**, v. 28, p. 629-241, 2008.

CEBALLOS, J.C; BRAGA, C.C. Missing data assessment in a solarimetric network. **International Journal of Climatology**, v. 15, p. 325-340, 1995.

CLIMANÁLISE. Cachoeira Paulista-SP: INPE/CPTEC, 2003-2009. Mensal. Boletim de Monitoramento e Análise Climática. ISSN 0103-0019 CDU-555.5.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. **Análise Multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia**. Ed. Atlas. São Paulo, 2007. ISBN 978-85-224-4707-7.

CORRÊA, C. L.; CLARKE, R. T.; SILVEIRA, A. L. L. Estudo da ocorrência de fluxos no perfil vertical do vento na baixa atmosfera com análise das componentes principais (ACP) e a sua relação com a precipitação no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.1, p. 121-127, 2007.

CORREIA, A. A. **Padrões de Variabilidade do Vento à Superfície no Nordeste do Brasil**. Campina Grande, 2000. 66p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba.

CORREIA, M. F. **Meteorologia Aplicada I. Códigos Meteorológicos (Versão Preliminar)**, Parte 2, 1995.

CORREIA FILHO, W. L. F. **Variabilidade do Vento à Superfície em Mesorregiões da Bahia: Uma análise com Plataformas Automáticas de Coleta de Dados**. Campina Grande, 2010. 50p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande.

ESTEBAN, P.; MARTIN-VIDE, J.; MASES, M. Daily atmospheric circulation catalogue for western Europe using multivariate techniques. **International Journal of Climatology**, v. 26, p. 1501-1515, 2006.

ESTEBAN-PARRA, M.J.; RODRIGO, F.S.; CASTRO-DIEZ, Y. Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880-1992. **International Journal of Climatology**, v. 18, p. 1557-1574, 1998.

FRAGOSO, M.; GOMES, P.T. Classification of daily abundant rainfall patterns and associated large-scale atmospheric circulation types in Southern Portugal. **International Journal of Climatology**, v. 28, p. 537-544, 2008.

GONG, X.; RICHMAN, M.R. On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America East of the Rockies. **Journal of Climate**, v. 8, p. 897-924, 1995.

GREEN, M.C.; FLOCCHINI, R.G.; MYRUP, L. O. Use of temporal principal component analysis to determine seasonal periods. **Journal of Applied Meteorology**, v. 32, p. 986-995, 1993.

GUEDES, M. J. F.; LACERDA, F. F.; SOUZA, W. M. S.; SILVA JÚNIOR, H. D. Análise das chuvas intensas ocorridas nos meses de janeiro e fevereiro de 2004 no estado de Pernambuco. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, XIII, Fortaleza, 2004, **Anais...**, Fortaleza: SBMET, 2004.

HAIR, Jr. J. F.; ANDERSON, R. E. ;TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise Multivariada de Dados**. Ed. Bookman. 5ª edição, 593 pág.. Porto Alegre, 2005. ISBN 85-363-0482-0.

JIMÉNEZ, P. A.; GONZÁLEZ-ROUCO, F.; MONTÁVEZ, J. P.; NAVARRO, J. ; GARCÍA-GUSTAMANTE, E.; VALERO, F. Surface wind regionalization in complex terrain. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, p. 308-325, 2008.

KOUSKY, V. E. Frontal Influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, p. 1140-1153, 1979.

KOUSKY, V. E. Diurnal Rainfall Variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, p. 488-498, 1980.

LORENZ, E. N. **Empirical orthogonal function and statistical weather prediction**. Sci. Rep. n.1. Cambridge, Massachusetts (EUA), Statistical Forecasting Project, Department of Meteorology, MIT, 49p, 1956.

MANLY, B. F. J. **Métodos Estatísticos Multivariados: uma introdução**. Ed. Bookman. 3ª edição, 229 pág., Porto Alegre, 2008. ISBN 978-85-7780-185-5.

MOSCATI, M.C. de L.; GAN, M.A. Rainfall variability in the rainy season of semiarid zone of Northeast Brazil (NEB) and its relation to wind regime. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 493-512, 2007.

MUÑOZ-DÍAZ, D.; RODRIGO, F. S. Spatio-temporal patterns of seasonal rainfall in Spain (1912–2000) using cluster and principal component analysis: comparison. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 1435-1448, 2004.

RAO, V. B.; LIMA, M.C.; FRANCHITO, S.H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 6, p. 1754-1763, 1993.

RAO, V. B.; GIAROLLA, E.; SANTO, C. M. E.; FRANCHITO, S. H. Comparison of surface wind stress characteristics over the tropical Atlantic (10°N-40°S) in fields derived from the UWM/COADS, NCEP/NCAR and QuikSCAT datasets. **Journal of Oceanography**, v. 64, p. 551-560, 2008.

REIS, E. **Estatística Multivariada Aplicada**. 2ed. Edições Sílabo. Lisboa, 2001. ISBN 972-618-247-6.

SERVAIN, J.; LUKAS, S. **Climatic Atlas os the Tropical Atlantic Wind Stress and Sea Surface Temperature**. Plouzané, Institut Français de Recherche pou le Développement en Coopération, 143pp, 1990.

SILVA, S. T. A. **Influência do El Niño - Oscilação Sul na Distribuição Espacial da Precipitação no Estado da Paraíba**. 1996. 63f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1996.

STATHIS, D.; MYRONIDIS, D. Principal component analysis of precipitation in Thessaly Region (Central Greece). **Journal Nest Global**, v.11, n.4, p. 467-476, 2009.

TESSLER, M.G; GOYA, S. C. Processos costeiros condicionantes do litoral brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 17, p. 11-23, 2005. Disponível em:<http://www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/rdg/RDG_17/Moyses_Gonsalez_Tessler.>. Acesso em: 20 jun. 2010, 15:30.

WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, Alexandria, v. 58, n. 301, p. 236-244, 1963.