



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

SAMIRA DE AZEVEDO SANTOS

**APROVEITAMENTO DE ENERGIA SOLAR NO ESTADO DO RIO
GRANDE DO NORTE: APLICAÇÃO DO MODELO SPDH NA GERAÇÃO
E ANÁLISE DE DADOS EM ALTA RESOLUÇÃO**

Campina Grande
2015

SAMIRA DE AZEVEDO SANTOS

**APROVEITAMENTO DE ENERGIA SOLAR NO ESTADO DO RIO
GRANDE DO NORTE: APLICAÇÃO DO MODELO SPDH NA GERAÇÃO
E ANÁLISE DE DADOS EM ALTA RESOLUÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Doutor em Meteorologia.

Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Magaly de Fatima Correia

Campina Grande

2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S237a Santos, Samira de Azevedo.
Aproveitamento de energia solar no Estado do Rio Grande do Norte: aplicação do modelo SPDH na geração e análise de dados em alta resolução / Samira de Azevedo Santos. – Campina Grande, 2015.
149f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2015.
"Orientação: Profa. Dra. Magaly de Fatima Correia".

1. Meteorologia - Energia Solar. 2. Meteorologia - SPDH. 3. Meteorologia - Heliogramas. I. Correia, Magaly de Fatima. II. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (PB). III. Título.


CDU 551.521.37(043)

SAMIRA DE AZEVEDO SANTOS


APROVEITAMENTO DE ENERGIA SOLAR NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE: APLICAÇÃO DO MODELO SPDH NA GERAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS EM ALTA RESOLUÇÃO

TESE APROVADA EM 28/08/2015


BANCA EXAMINADORA




Profa. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande




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



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



Prof. Dr. WEBER ANDRADE GONÇALVES
Centro de Ciências Exatas.
Universidade Federal do Rio Grande do Norte



Profa. Dra. ALDINETE BEZERRA BARRETO
Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento
Universidade Federal de Campina Grande

*Aos meus pais Angelton, Fátima
E à minha tia Cilene,
Os maiores incentivadores do meu sonho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela proteção e pelo amparo principalmente nos momentos mais difíceis.

À Professora Magaly, que me acompanhou pelos caminhos da pesquisa desde a graduação, e que enxergou em mim o meu melhor. Principalmente pela disponibilidade, atenção e paciência, que estiveram presentes durante todo o percurso. Pelos conselhos valiosos, pelas argumentações e sobretudo, pela oportunidade que me foi dada... eu não teria chegado aqui sem o seu incentivo.

Gostaria de agradecer à Professora Regina por seus comentários sobre o trabalho e, principalmente, pelas relevantes conversas e sábios conselhos.

À Bernadete Anjos pelo fornecimento dos heliogramas.

Agradeço ao Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis por permitir o desenvolvimento de uma parte do trabalho em suas instalações e pelo apoio logístico durante minhas idas frequentes a Campina Grande para a finalização do trabalho.

Agradeço a equipe de energia solar, em especial ao Bruno Soares, por sua compreensão e apoio fundamentais para a finalização do trabalho, esse trabalho é também uma vitória da nossa equipe.

Aos meus amigos e colegas, por todo o apoio dado, com certeza com vocês foi mais fácil.

Ao Angelo, por estar ao meu lado quando precisei. Obrigada pela cumplicidade.

Ao pessoal Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Campina Grande.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro.

Façamos com que os dados falem!

(Subhash Sharma)

Não diga que as estrelas estão mortas

Só porque o céu está nublado

(Alvinho Cabral / George Bourdoukan)

Aproveitamento de Energia Solar no Estado do Rio Grande do Norte: Aplicação do Modelo SPDH na Geração e Análise de Dados em Alta Resolução

RESUMO

O uso simultâneo de dados otimizados de insolação e técnicas estatísticas multivariadas foi usado neste trabalho com o objetivo de avaliar a relação entre a variação no padrão de chuva em Natal/RN e a disponibilidade da radiação solar como fonte alternativa na geração de eletricidade. A pesquisa tem caráter exploratório e multivariado. O caráter exploratório se deve ao fato de ainda não existir na literatura um modelo validado de geração de dados de insolação em partição horária que contemple todos os tipos de heliogramas. O caráter multivariado resulta da necessidade de investigar relações complexas entre múltiplos processos atmosféricos. A utilização de técnicas estatísticas (análise fatorial, análise de agrupamentos e análise de discriminante) permitiu avaliar padrões de associação entre a insolação e outras variáveis meteorológicas. Foi possível inferir sobre a influência de condições atmosféricas extremas na disponibilidade de radiação solar como fonte de geração de energia elétrica. Os resultados evidenciam que a circulação atmosférica (vento) exerce um controle importante nas condições ambientais e conseqüentemente na transferência de energia. O padrão de nebulosidade e chuvas representa um fator determinante na modulação da radiação solar que atravessa a atmosfera e desempenha um papel importante na disponibilidade de energia solar. No entanto, verificou-se que independentemente do período analisado (anômalo seco ou chuvoso) existe grande potencial para aproveitamento de energia solar em Natal, dado que mesmo em períodos com atuação de fenômenos causadores de chuva, como é o caso dos DOLs, em muitos casos a chuva se concentra em poucos dias do mês e a períodos restritos do período diurno, garantindo condições ambientais privilegiadas de aproveitamento da energia solar. Indicadores estatísticos obtidos no processo de calibração e validação do modelo SPDH, através de análises comparativas entre dados de insolação calculados e observados, mostraram que os valores calculados estiveram altamente correlacionados com os valores registrados nos heliogramas com erros médios calculados menores que 0,1. As maiores discrepâncias, entretanto, estiveram presentes nos intervalos de horário entre 06 e 07 horas (-0,060) e entre 17 e 18 horas (-0,071). Esses horários correspondem aos horários com menores índices de radiação direta o que implica na queima mais suave do heliograma.

Palavras Chave: Energia Solar, SPDH, Heliogramas.

Solar Energy Utilization in the State of Rio Grande do Norte: SPDH Model Application in the Generation and Data Analysis in High Resolution

ABSTRACT

The simultaneous use of optimized insolation data and multivariate statistical techniques was used in this work aiming to evaluate the relationship between the variations in rain rainfall pattern of Natal-RN and the availability of solar radiation as an alternative resource for electricity production. The research is exploratory and multivariate character. The exploratory nature is due to the fact it does not exist in the literature a validated model generation insolation data on hourly partition. The multivariate character from the need to investigate complex relationships between multiple atmospheric processes. The use of statistical techniques (factor analysis, cluster analysis and discriminant analysis) allowed to evaluate patterns of association between sunlight and other weather variables. It was possible to infer the influence of extreme weather conditions on the availability of solar radiation as a source of electricity generation. The results show that the atmospheric circulation (wind) plays an important control environmental conditions and consequently the energy transfer. The pattern of cloudiness and rain is a determining factor in the modulation of solar radiation that passes through the atmosphere and plays an important role availability of solar energy. However, it was found that regardless of the period analyzed (dry or rainy anomalous) convective nature of the precipitation in the region and with rains generally concentrated in a few days of the month ensures privileged environmental conditions of use of solar energy. Statistical data obtained in the calibration process and model validation through comparative analysis between calculated and observed insolation data, demonstrate good performance and reliability in the use of SPDH as an important tool in the development of solar energy utilization projects. However, results of statistical analyzes based on scatter measurement and the mean square error diagrams, it is clearly observed a tendency to underestimate the values. The biggest discrepancies, however, are associated mainly with data obtained in the early hours of the day and from 17 and 18 local time. These times correspond to times with lower rates of direct irradiance which implies softer burning heliogram.

Keywords: Solar Energy, SPDH, Heliograms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Estimativa do balanço de energia médio global e anual da Terra. (Fonte: Braghieri, 2013).	29
Figura 3.2: Heliógrafo Campbell-Stokes da estação climatológica do INMET em Natal.	35
Figura 3.3: Ilustrações dos diferentes tipos de heliogramas utilizados na região tropical mostrando-se, à direita, o perfil da concha do heliógrafo com as ranhuras correspondentes (Adaptado de Varejão-Silva, 2006).	36
Figura 3.4: Esquema representando a relação entre a insolação e a espessura óptica das nuvens (transmitância). (Adaptado de Suercke <i>et al.</i> , 2013).	37
Figura 3.5: Usina Fotovoltaica de Alto do Rodrigues –UFVAR situada na cidade de Alto do Rodrigues-RN.	39
Figura 3.6: Tipos de sistemas de concentração solar: (a) coletor cilíndrico parabólico, (b) refletor linear Fresnel, (c) disco parabólico e (d) torre central (Fonte: Renewable Energy World 06/2003).	40
Figura 3.7: Sistema fotovoltaico concentrado instalado no CTGAS-ER (a) e coletores solares instalados em residências populares (b).	40
Figura 4.1: Localização geográfica do Estado do Rio Grande do Norte com destaque para a localização da cidade do Natal assinalada pela circunferência vermelha no mapa da direita..	46
Figura 4.2: Localização geográfica aproximada das estações meteorológicas utilizadas. Destacado em verde a estação meteorológica do INMET, em vermelho a estação solarimétrica do INPE e em azul a estação meteorológica pertencente à REDEMET.	49
Figura 4.3: Gráfico Boxplot: (a) climatologia da insolação mensal (1961-2014), (b) climatologia da precipitação mensal (1961-2014), climatologia da precipitação mensal (1961-2014) e precipitação mensal observada em (c) 2010, (d) 2011 e (e) 2012 para a cidade do Natal. O retângulo vermelho indica os meses escolhidos para a análise (Fonte dos dados: INMET).	54
Figura 4.4: Heliogramas: (a) Tipo1, para a estação do inverno; (b) Tipo 2, para a estação do verão e (c) Tipo 3, para as estações do outono e primavera.	55
Figura 4.5: Convenção de eixos para representação de imagens digitais.	56

Figura 4.6: Síntese das etapas do processo de leitura automática de heliogramas dentro do SPDH: (a) imagem digitalizada do heliograma, (b) contagem dos pixels da cor magenta referentes à área queimada do heliograma e (c) binarização da informação. Os eixos dos gráficos representam a quantidade de pixels da imagem, sendo o comprimento do heliograma de 2400 pixels.....57

Figura 4.7: Possível sombreamento sobre o heliógrafo nas medições dos dias 28 a 30 de setembro de 2011, na cidade de Apodi-RN.....58

Figura 5.1: Boxplot (a) da climatologia de precipitação mensal e (b) da climatologia de insolação mensal para a cidade de Natal-RN referente ao período de 1961 a 2014. O ponto em vermelho representa os valores mensais de precipitação e insolação observados em junho de 2010 (Fonte dos dados: INMET).....68

Figura 5.2: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao primeiro fator (a) e escores fatoriais referentes ao primeiro fator (b).....69

Figura 5.3: Escores Fatoriais referentes ao primeiro fator (a), Irradiação Global Horizontal em Wh/m²dia (b), Insolação em horas (c), Temperatura máxima em °C (d), Déficit de Pressão de Vapor em hPa (e), Radiação de Onda Longa em W/m² (f), Frequência do setor Sul em % (g) e Frequência do setor Sudeste em % (h) para o mês de junho de 2010. Os retângulos pretos indicam período com os escores negativos de magnitude mais elevada.70

Figura 5.4: Imagens do satélite meteorológico GOES-12m na banda do infravermelho térmico para os dias: 04 de junho de 2010 às (a) 12:00 UTC, (b) 15:00 UTC e (c) 18:00 UTC; dia 15 às (d) 12:00 UTC, (e) 15:00 UTC e (f) 18:00 UTC; dia 17 às (g) 12:00 UTC, (h) 15:00 UTC e (i) 18:00 UTC; dia 29 às (j) 12:00 UTC; (k) 15:00 UTC e (l) 18:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é HL=UTC-3 horas. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://www.sat.dundee.ac.uk>).71

Figura 5.5: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao segundo fator (a), Escores Fatoriais referentes ao segundo fator (b), Velocidade Média do Vento em m/s (c), Umidade Específica em g/kg (d) e Frequência da direção do vento do setor Sudoeste em % (e) para o mês de junho de 2010. Os retângulos pretos indicam período com registro dos maiores escores negativos. 74

Figura 5.6: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao terceiro fator (a), escores fatoriais referentes ao terceiro fator (b), acumulado diário de precipitação em mm (c), frequência do

setor leste em % (d) e evaporação em mm (e) para o mês de junho de 2010. O retângulo preto indica o período com registro do maior escore positivo.....	76
Figura 5.7: Curva de inércia (a) e dendrograma (b) para junho 2010.	78
Figura 5.8: Valores médios dos grupos homogêneos formados na análise de agrupamento para o mês de junho de 2010: (a) Insolação (horas) e Irradiação Global Horizontal (kWh/m ² dia), (b) Insolação (Horas) e Velocidade do vento (m/s), (c) Déficit de Pressão do Vapor (hPa) e Irradiância Global Horizontal (W/m ²) e (d) Insolação (horas) e Temperatura máxima (°C)...	80
Figura 5.9: Boxplot (a) da climatologia de precipitação mensal e (b) da climatologia de insolação mensal para a cidade de Natal-RN referente ao período de 1961 a 2014. O ponto em vermelho representa os valores mensais de precipitação e insolação observados em junho de 2011 (Fonte dos dados: INMET).....	83
Figura 5.10: Cargas Fatoriais (correlações) referentes ao primeiro fator (a), Escores Fatoriais referentes ao primeiro fator (b), Insolação em horas (c), Irradiância Global Horizontal em W/m ² (d), Temperatura máxima em °C (e), Radiação de Onda Longa em W/m ² na qual a linha vermelha indica o limiar (f) e Déficit de Pressão de Vapor em hPa (g) para o mês de junho de 2011. Os retângulos pretos indicam os dias com os escores negativos de magnitude mais elevada.....	84
Figura 5.11: Imagens do satélite meteorológico GOES-12 na banda do infravermelho térmico para os dias: 09 de junho de 2011 às (a) 12:00 UTC, (b) 15:00 UTC e (c) 18:00 UTC; dia 19 às (d) 12:00 UTC, (e) 15:00 UTC e (f) 18:00 UTC; dia 27 às (g) 12:00 UTC, (h) 15:00 UTC e (i) 18:00 UTC; dia 29 às (j) 12:00 UTC; (k) 15:00 UTC e (l) 18:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é HL=UTC-3 horas. (Fonte das imagens: Adaptado de http://www.sat.dundee.ac.uk).	86
Figura 5.12: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao segundo fator (a), escores fatoriais referentes ao segundo fator (b), evaporação em mm (c), velocidade do vento em m/s (d) e frequência do setor leste em % (e) para o mês de junho de 2011. Os retângulos pretos indicam o período com escores de magnitude mais elevada.....	87
Figura 5.13: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao terceiro fator (a), escores fatoriais referentes ao terceiro fator (b), total diário de precipitação mm (c) e frequência do setor	

Sudoeste em % (d) para o mês de junho de 2011. Os retângulos pretos indicam o período com escores de magnitude mais elevada.	89
Figura 5.14: Curva de inércia (a) e dendrograma (b) para junho 2011.	90
Figura 5.15: Valores médios dos grupos homogêneos formados na análise de agrupamento para o mês de junho de 2011: Irradiação Global Horizontal (kWh/m ² dia) e (a) Radiação de Onda Longa (W/m ²) e (b) Frequência do Setor Sudeste (%); Insolação (Horas) e (c) Temperatura máxima (°C) e (d) Umidade específica (g/kg).	91
Figura 5.16: Boxplot (a) da climatologia de precipitação mensal e (b) da climatologia de insolação mensal para a cidade de Natal-RN referente ao período de 1961 a 2014. O ponto em vermelho representa os valores mensais de precipitação e insolação observados em junho de 2012 (Fonte dos dados: INMET).	93
Figura 5.17: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao primeiro fator (a) e escores fatoriais referentes ao primeiro fator (b).	94
Figura 5.18: Escores Fatoriais referentes ao primeiro fator (a), Irradiação Global Horizontal em Wh/m ² dia (b), Insolação em horas (c), Temperatura máxima em °C (d), Déficit de Pressão de Vapor em hPa (e), Radiação de Onda Longa em W/m ² (f), Frequência do setor Sudeste em % (g) para o mês de junho de 2012. Os retângulos pretos indicam período com escores negativos de magnitude mais elevada.	95
Figura 5.19: Imagens do satélite meteorológico GOES-12 na banda do infravermelho térmico para os dias: 14 de junho de 2012 às (a) 12:00 UTC, (b) 15:00 UTC e (c) 18:00 UTC; dia 19 às (d) 12:00 UTC, (e) 15:00 UTC e (f) 18:00 UTC; dia 22 às (g) 12:00 UTC, (h) 15:00 UTC e (i) 18:00 UTC; dia 25 às (j) 09:00 UTC; (k) 12:00 UTC e (l) 18:00 UTC; dia 29 às (m) 12:00 UTC; (n) 15:00 UTC e (o) 18:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é HL=UTC-3 horas. (Fonte das imagens: Adaptado de http://www.sat.dundee.ac.uk).	96
Figura 5.20: Cargas fatoriais (correlações) referente ao segundo fator (a), escores fatoriais referentes ao segundo fator (b), Precipitação em mm (c), Frequência do setor Sudoeste em % (d), Evaporação de piche em mm (e), Velocidade do vento em m/s (f) para o mês de junho de 2012. Os retângulos pretos indicam período com escores negativos de magnitude mais elevada.	98
Figura 5.21: Curva de inércia (a) e dendrograma (b) para junho 2012.	99

Figura 5.22: Valores médios dos grupos homogêneos formados na análise de agrupamento para o mês de junho de 2012: Irradiação Global Horizontal (kWh/m ² dia) e (a) Insolação (Horas), (b) Velocidade do Vento (m/s), (c) Radiação de Onda Longa (W/m ²) e (d) Temperatura máxima (°C).....	100
Figura 5.23: Boxplot (a) da climatologia de precipitação mensal e (b) da climatologia de insolação mensal para a cidade de Natal-RN referente ao período de 1961 a 2014. O ponto em vermelho representa os valores mensais de precipitação e insolação observados em novembro de 2011 (Fonte dos dados: INMET).....	102
Figura 5.24: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao primeiro fator (a) e escores fatoriais referentes ao primeiro fator (b).....	103
Figura 5.25: Escores Fatoriais referentes ao primeiro fator (a), Irradiação Global Horizontal em Wh/m ² dia (b), Temperatura máxima em °C (c), Insolação em horas (d), Déficit de Pressão de Vapor em hPa (e), Evaporação em mm (f), Precipitação em mm (g) para o mês de novembro de 2011. Os retângulos pretos indicam o período com escores negativos de magnitude mais elevada.....	104
Figura 5.26: Imagens do satélite meteorológico GOES-12 na banda do infravermelho térmico para os dias: 09 de novembro de 2011 às (a) 12:00 UTC, (b) 15:00 UTC e (c) 18:00 UTC; dia 10 às (d) 12:00 UTC, (e) 15:00 UTC e (f) 18:00 UTC; dia 11 às (g) 12:00 UTC, (h) 15:00 UTC e (i) 18:00 UTC; dia 12 às (j) 12:00 UTC; (k) 15:00 UTC e (l) 18:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é HL=UTC-3 horas. (Fonte das imagens: Adaptado de http://www.sat.dundee.ac.uk).....	105
Figura 5.27: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao segundo fator (a), Escores Fatoriais referentes ao segundo fator (b), Umidade Específica em g/kg (c), Frequência do setor Sudeste em % (d) e Frequência do setor Leste em % (e). Os retângulos pretos indicam período com escores negativos de magnitude mais elevada.....	106
Figura 5.28: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao terceiro fator (a), Escores Fatoriais referentes ao terceiro fator (b), Radiação de Onda Longa em W/m ² (c) e Velocidade do Vento em m/s (d). Os retângulos pretos indicam período com escores positivos de magnitude mais elevada.....	107
Figura 5.29: Curva de inércia (a) e dendrograma (b) para novembro 2011.....	108

Figura 5.30: Valores médios dos grupos homogêneos formados na análise de agrupamento para o mês de novembro 2011: Irradiação Global Horizontal (kWh/m ² dia) e (a) Insolação (Horas), (b) Evaporação (mm), (c) Temperatura Máxima (°C) e (d) Precipitação (mm).	109
Figura 5.31: Boxplot (a) da climatologia de precipitação mensal e (b) da climatologia de insolação mensal para a cidade de Natal-RN referente ao período de 1961 a 2014. O ponto em vermelho representa os valores mensais de precipitação e insolação observados em novembro de 2012 (Fonte dos dados: INMET).	111
Figura 5.32: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao primeiro fator (a) e escores fatoriais referentes ao primeiro fator (b) Umidade Específica em g/kg (c), Temperatura máxima em °C (d) e Déficit de Pressão de Vapor em hPa (e) para o mês de novembro de 2012. Os retângulos pretos indicam o período com escores negativos de magnitude mais elevada.	113
Figura 5.33: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao segundo fator (a), Escores Fatoriais referentes ao segundo fator (b), Umidade Específica em g/kg (c), Frequência do setor Sudeste em % (d) e Frequência do setor Leste em % (e). Os retângulos pretos indicam escores de magnitude mais elevada.	115
Figura 5.34: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao terceiro fator (a), Escores Fatoriais referentes ao terceiro fator (b), Irradiação Global Horizontal em Wh/m ² dia (c) e Insolação em horas (d) e Evaporação em mm. Os retângulos pretos indicam escores positivos de magnitude mais elevada.	116
Figura 5.35: Curva de inércia (a) e dendrograma (b) para novembro 2012.	117
Figura 5.36: Valores médios dos grupos homogêneos formados na análise de agrupamento para o mês de novembro 2012: Irradiância Global Horizontal (W/m ² dia) e (a) Evaporação (mm), (b) Radiação de Onda Longa (W/m ²); Insolação e (c) Umidade Específica (g/kg) e (d) Velocidade do Vento (m/s).	118
Figura 5.37: Insolação horária valores calculados versus observados: (a) para todo o período, (b) em junho 2010, (c) junho 2011, (d) junho 2012, (e) novembro 2011 e (f) em novembro de 2012. Os retângulos vermelhos indicam valores subestimados pelo modelo.	121
Figura 5.38: Casos de superestimativas na leitura dos heliogramas (registro de valores maiores do que o período de tempo com queima do heliograma). Os retângulos pretos indicam as áreas de queima e o registro feito pelo observador.	122

Figura 5.39: Evolução temporal da insolação horária calculada pelo SPDH (linha vermelha) e observada (linha azul) para: (a) junho 2010, (b) junho 2011, (c) junho 2012, (d) novembro 2011 e (e) novembro de 2012.	123
Figura 5.40: Evolução temporal da insolação horária calculada pelo SPDH (linha vermelha) e observada (linha azul) (a) e imagem digital do heliograma original (b) para o dia 09 de novembro de 2012.	124
Figura 5.41: Imagem digital dos heliogramas referente aos dias (a) 17, (b) 18 e (c) 19 de novembro de 2011.	125
Figura 5.42: Variabilidade horária ao longo do mês de junho de 2010 para (a) Irradiância Global Horizontal (W/m^2), (b) da Insolação (Horas), do Índice de Transmissividade (Kt) (c) e Média horária mensal da insolação para o mês de junho de 2010. A linha laranja em (d) indica o valor médio mensal.....	128
Figura 5.43: Imagens do satélite meteorológico GOES-E na banda do infravermelho térmico para o dia 16 de junho de 2010 às (a) 09:00 UTC, (b) 12:00 UTC, (c) 15:00 UTC e (d) 18:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é $HL=UTC-3$ horas. (Fonte das imagens: Adaptado de http://www.sat.dundee.ac.uk).	129
Figura 5.44: Variabilidade horária ao longo do mês de junho de 2011 para (a) Irradiância Global Horizontal (W/m^2), (b) da Insolação (Horas), do Índice de Transmissividade (Kt) (c) e Média horária mensal da insolação para o mês de junho de 2011. A linha laranja em (d) indica o valor médio mensal.....	131
Figura 5.45: Imagens realçadas do satélite meteorológico GOES-12 na banda do infravermelho térmico para o dia 04 de junho de 2011 às (a) 10:00 UTC, (b) 12:00 UTC, (c) 14:00 UTC e (d) 16:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é $HL=UTC-3$ horas. (Fonte das imagens: Adaptado de http://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic).....	132
Figura 5.46: Variabilidade horária ao longo do mês de junho de 2012 para (a) Irradiância Global Horizontal (W/m^2), (b) da Insolação (Horas), do Índice de Transmissividade (Kt) (c) e Média horária mensal da insolação para o mês de junho de 2012. A linha laranja em (d) indica o valor médio mensal.....	133

Figura 5.47: Variabilidade horária ao longo do mês de novembro de 2011 para (a) Irradiância Global Horizontal (W/m^2), (b) da Insolação (Horas), do Índice de Transmissividade (Kt) (c) e Média horária mensal da insolação para o mês de novembro de 2011. A linha laranja em (d) indica o valor médio mensal..... 135

Figura 5.48: Variabilidade horária ao longo do mês de novembro de 2012 para (a) Irradiância Global Horizontal (W/m^2), (b) da Insolação (Horas), do Índice de Transmissividade (Kt) (c) e Média horária mensal da insolação para o mês de novembro de 2012. A linha laranja em (d) indica o valor médio mensal..... 136

LISTA DE TABELAS

Quadro 3.1: Condições de geração de energia elétrica ou aproveitamento da energia solar térmica.	41
Quadro 4.1: Classificação dos setores de direção do vento.....	50
Quadro 4.2: Descrição das variáveis utilizadas. O símbolo [*] significa que o dado é uma média diária, o símbolo [**] significa que o dado é o total diário.	52
Tabela 5.1: Autovalores e porcentagens de variância.	68
Tabela 5.2: Dados METAR coletados no Aeroporto Augusto Severo, localizado na cidade de Parnamirim, região metropolitana de Natal no dia 24 de junho de 2010.	75
Tabela 5.3: Dados horários METAR coletados no Aeroporto Augusto Severo, localizado na cidade de Parnamirim, região metropolitana de Natal para os dias 17 e 18 de junho de 2010. A cor amarela assinala condições de tempo significativo em horários entre horas inteiras. Os códigos relacionados à presença de chuva foram destacados.....	77
Tabela 5.4: Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamentos de Ward com medida de distância euclidiana quadrática e média dos valores formados por cada grupo.....	79
Tabela 5.5: Autovalores das funções discriminantes e seus respectivos valores de porcentagem de variância acumulada e correlação canônica.	81
Tabela 5.6: Matriz de Estrutura	82
Tabela 5.7: Autovalores e porcentagens de variância.	83
Tabela 5.8: Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamentos de Ward com medida de distância euclidiana quadrática e média dos valores formados por cada grupo.....	90
Tabela 5.9: Teste Lambda de Wilks.	92
Tabela 5.10: Matriz de Estrutura	92
Tabela 5.11: Autovalores e porcentagens de variância.	93
Tabela 5.12: Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamentos de Ward com medida de distância euclidiana quadrática e média dos valores formados por cada grupo.....	99
Tabela 5.13: Teste Lambda de Wilks.	101

Tabela 5.14: Matriz de Estrutura	101
Tabela 5.15: Autovalores e porcentagens de variância acumulada.	102
Tabela 5.16: Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamentos de Ward com medida de distância euclidiana quadrática e média dos valores formados por cada grupo....	108
Tabela 5.17: Teste Lambda de Wilks.	110
Tabela 5.18: Matriz de Estrutura	110
Tabela 5.19: Autovalores e porcentagens de variância.	112
Tabela 5.20: Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamentos de Ward com medida de distância euclidiana quadrática e média dos valores formados por cada grupo....	117
Tabela 5.21: Teste Lambda de Wilks.	119
Tabela 5.22: Matriz de Estrutura	120
Tabela 5.23: Valores dos erros e coeficientes de correlação entre os dados estimados pelo SPDH e os dados observados para todo período e para cada mês separadamente.....	126
Tabela 5.24: Valores dos erros e coeficientes de correlação entre os dados horários estimados pelo SPDH e os dados observados.	126

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Análise de Agrupamentos
AD	Análise Discriminante.
AF	Análise Fatorial em Componentes Principais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
ASAS	Anticlone Subtropical do Atlântico Sul
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
COSERN	Companhia Energética do Rio Grande do Norte
CPC	<i>Climate Prediction Center</i>
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CTGAS-ER	Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis
DHI	Irradiância Difusa Horizontal
DNI	Irradiância Direta Normal
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
DPV	Déficit de Pressão de Vapor
E	Direção do Vento de Leste
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Evap	Evaporação de Piche
FIERN	Federação das Indústrias do Rio Grande do Norte
GHI	Irradiância Global Horizontal
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Insol	Insolação
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
Prec	Precipitação
Press	Pressão Atmosférica
q	Umidade Específica

RN	Rio Grande do Norte
ROL	Radiação de Onda Longa
S	Direção do Vento de Sul
SE	Direção do Vento de Sudeste
SO	Direção do Vento de Sudoeste
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
SPDH	Sistema de Processamento Digital de Heliogramas
T	Temperatura do Ar
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
V	Velocidade do Vento a 10 metros
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
2	OBJETIVOS	27
	2.1 Objetivo geral	27
	2.2 Objetivos específicos	27
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
	3.1 A radiação solar e sua interação com a atmosfera e a superfície	28
	3.2 Considerações sobre a insolação	34
	3.3 Principais tecnologias da energia solar	38
	3.4 Técnicas Estatísticas Multivariadas	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	46
	4.1 Área de Estudo	46
	4.2 Dados	47
	4.3 Obtenção de Parâmetros	49
	4.4 Seleção do Período de Análise	53
	4.5 Sistema de Processamento Digital de Heliogramas (SPDH): procedimentos	55
	4.6 Técnicas de Análise Multivariada	60
	4.7 Modos de Análise	65
5	RESULTADOS	67
	5.1 Análise Multivariada: Estudos de Caso	67
	5.1.1 Junho de 2010: Anômalo Negativo	67
	5.1.2 Junho de 2011: Anômalo Positivo	82
	5.1.3 Junho de 2012: Anômalo Normal	92
	5.1.4 Novembro de 2011: Anômalo Positivo	101
	5.1.5 Novembro de 2012: Anômalo Negativo	111
	5.2 Sistema de Processamento Digital de Heliogramas (SPDH): Ajuste e Validação ..	120
	5.2.1 Indicadores de Avaliação	125
	5.2.2 Insolação na partição horária como alternativa em estimativa da Irradiância Global Incidente	126
6	CONCLUSÕES	137

7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
8	PÁGINAS ELETRÔNICAS	149

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2004 foi instituído no Brasil o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA, este programa governamental tinha como objetivo aumentar a participação da energia elétrica com base em fontes renováveis no Sistema Elétrico Interligado Nacional e com isso promover a diversificação da matriz energética brasileira.

O PROINFA tinha ainda como objetivos, buscar alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica, permitindo a valorização das características regionais e locais e fomentar a indústria de base dessas fontes. O programa visava também o domínio da cadeia produtiva, através da exigência de 60% de nacionalização dos empreendimentos e a garantia estabelecida da realização de leilões regulares específicos para atender esses empreendimentos. Em dezembro de 2004, a carteira de projetos do PROINFA somava R\$ 1,3 bilhão, reunindo 24 diferentes projetos, esse investimento transformou o programa em um dos maiores incentivos ao desenvolvimento das energias renováveis no Brasil.

No âmbito proposto pelo PROINFA de diversificação da matriz energética brasileira, a conversão de energia solar em energia elétrica surge como uma das mais promissoras fontes de energias renováveis que pode ser inserida na matriz energética brasileira nos próximos anos. Estrategicamente, o Brasil tem entre uma série de características naturais favoráveis, altos níveis de insolação e grandes reservas de quartzo de qualidade, que podem gerar significantes vantagens competitivas para a produção de silício com alto grau de pureza que é a matéria prima para a fabricação de células e módulos solares, produtos estes de alto valor agregado. Estes fatores potencializam a atração de investidores e o desenvolvimento de um mercado interno neste segmento, permitindo que se vislumbre um papel importante na matriz energética do Brasil e um grande desenvolvimento tecnológico nessa área (CEMIG, 2012).

A estimativa mais precisa do potencial energético solar para um local específico é determinada com a instalação de piranômetros, instrumentos que registram o fluxo de radiação solar incidente à superfície, na área de interesse de desenvolvimento de um projeto de exploração do recurso solar. Contudo, os custos relativamente altos para aquisição e manutenção dos equipamentos, podem dificultar ou até mesmo inviabilizar o

desenvolvimento de projetos (Martins e Pereira, 2011). Dessa forma, no desenvolvimento de projetos ou estudos sobre mapeamento dos recursos de energia solar, a variável insolação desponta como um dos parâmetros de grande relevância não apenas pela simplicidade no processo de medição, mas principalmente pela quantidade de estações de coleta e disponibilidade de séries históricas de dados.

No Brasil os dados provenientes da Rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) constitui o maior banco de dados solarimétricos (dados de radiação medidos por piranômetros com a qualidade exigida para a elaboração de projetos de energia solar) disponível, composto por 16 estações solarimétricas. Dos quais, apenas 4 estão situadas na Região Nordeste. Por outro lado, o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) também dispõe de uma rede de estações climatológicas que disponibilizam dados diários de insolação. Esta condição representa uma fonte de informações valiosa sobre o recurso solar para mapeamento do potencial energético solar, todavia, ainda pouco explorada.

Os dados diários de insolação disponibilizados publicamente pelos órgãos responsáveis são amplamente utilizados em modelos matemáticos para a geração de séries sintéticas de radiação global diária. Contudo, não são disponibilizados dados horários dessa variável. O dado horário de insolação fornece informações sobre a variabilidade da radiação solar que chega à superfície e permite uma melhor avaliação do recurso solar no dimensionamento de projetos para o aproveitamento da energia solar.

Este trabalho apresenta a utilização do modelo SPDH (Sistema de Processamento Digital de Heliogramas) como ferramenta fundamental na otimização das informações extraídas dos heliogramas. O uso do modelo possibilita realizar a leitura automatizada da insolação e fornecer dados com alta resolução temporal (partição horária). O SPDH está sendo desenvolvido no Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis – CTGAS-ER, é uma contribuição para a otimização de futuras atividades operacionais de coleta, avaliação e monitoramento do potencial solar.

O desenvolvimento deste trabalho também tem como propósito contribuir para geração de novos conhecimentos na área de aproveitamento da energia solar (sistema solar térmico e sistema solar fotovoltaico). A pesquisa tem caráter exploratório e multivariado. O caráter exploratório se deve ao fato de que ainda não existe na literatura um modelo validado de geração de dados de insolação em partição horária. O caráter multivariado resulta da necessidade de investigar relações complexas entre múltiplos processos atmosféricos.

Três grandes fatores nortearam a escolha das técnicas multivariadas utilizadas nesse trabalho. De acordo com Johnson e Wichern (2007), o primeiro refere-se à redução dos dados ou à simplificação estrutural, neste caso pode-se representar um fenômeno de uma forma mais simples, proporcionando uma interpretação mais clara e sem que haja perda considerável de informação. O segundo refere-se à seleção ou agrupamento, onde é possível estabelecer grupos de observações similares ou variáveis similares com base em suas características. E por último, o terceiro fator refere-se à investigação da existência de dependência entre variáveis, neste caso pode-se investigar a natureza das relações entre as variáveis.

Para satisfazer essas necessidades, foram utilizadas as técnicas estatísticas multivariadas: Análise Fatorial, Análise de Agrupamentos e Análise Discriminante.

A área escolhida para o estudo é a cidade de Natal capital do Rio Grande do Norte. O Estado do Rio Grande do Norte vem despontando no cenário de geração de energia elétrica através de fontes renováveis. De acordo com a FIERN - Federação das Indústrias do Rio Grande do Norte além de produzir o suficiente para a demanda estadual ainda produz excedentes que são exportados para outras regiões. A eletricidade gerada no Estado tem origem de duas principais fontes: térmica e eólica. A energia solar fotovoltaica também vem ganhando destaque e segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE, o primeiro leilão de energia de reserva realizado em 31 de outubro de 2014, atraiu mais de 7,1 bilhões de reais em investimentos e evidenciou o Estado do Rio Grande do Norte como aquele com maior oferta de projetos de energia solar. A área foco deste estudo é a sua capital Natal, cidade que detém a maior demanda energética do Estado, ou seja, é aquela que mais consome energia elétrica e tem altos índices de insolação o ano inteiro.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo central deste trabalho é avaliar a relação entre a variação no padrão da precipitação em Natal-RN e a disponibilidade da radiação solar como fonte alternativa de geração de energia a partir do uso simultâneo de dados otimizados de insolação e técnicas estatísticas multivariadas.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar o desempenho do SPDH - Sistema de Processamento Digital de Heliogramas, validando os resultados estimados pelo modelo a partir de conjuntos de dados constituídos por medições realizadas por técnicos habilitados e instrumentos de referência;
- Estabelecer relações entre a insolação e outras variáveis meteorológicas, que permitam inferir sobre a influência de condições atmosféricas em interrupções na geração e transmissão de energia elétrica através de sistemas de energia solar, decorrente da atuação de sistemas atmosféricos;
- Determinar indicadores estatísticos inerentes à condições atmosféricas anômalas que permitam um melhor planejamento e avaliação de programas e políticas públicas;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A radiação solar e sua interação com a atmosfera e a superfície

Radiação ou energia radiante é a energia que se propaga sem necessidade de um meio material. O termo radiação é igualmente aplicado para designar o próprio processo de transferência desse tipo de energia. São conhecidas radiações com comprimentos de onda (λ) que variam desde 10^{-10} cm (raios gama) até cerca de 10^7 cm (ondas longas de rádio). O espectro eletromagnético é definido como o conjunto de todas elas (Varejão-Silva, 2006). Os fluxos relevantes se situam em três faixas principais: ultravioleta ($0,1 \leq \lambda \leq 0,4 \mu\text{m}$), visível ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7 \mu\text{m}$) e infravermelho solar ($0,7 \leq \lambda \leq 4 \mu\text{m}$) (Iqbal, 1983).

Na composição da atmosfera terrestre estão diversos constituintes químicos, como o oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono, metano, vapor d'água e etc. Estes constituintes estão presentes nas diferentes fases de estado: fase gasosa, fase líquida como as gotículas de água e até constituintes sólidos como os aerossóis, poeira, granizo, cristais de gelo e etc. Cada um deles, de acordo com suas propriedades, físicas e químicas, interage com a radiação de maneiras diferentes e de acordo com o comprimento de onda da mesma. Sendo assim, é conveniente classificarmos a radiação em dois tipos:

- a) Radiação solar, de ondas curtas ($0,3$ a $4 \mu\text{m}$).
- b) Radiação terrestre, ou radiação de ondas longas (4 a $100 \mu\text{m}$).

Segundo Santos (2011) a atmosfera interfere de forma significativa na transmissão da radiação terrestre. Ela absorve ou espalha a radiação de forma diferenciada em função dos comprimentos de onda e de características físicas das partículas que são atingidas pela radiação eletromagnética. Assim, ao atingir a superfície terrestre a radiação solar interage com as diversas feições da superfície, podendo ocorrer: reflexão, absorção e transmissão (Figura 3.1).

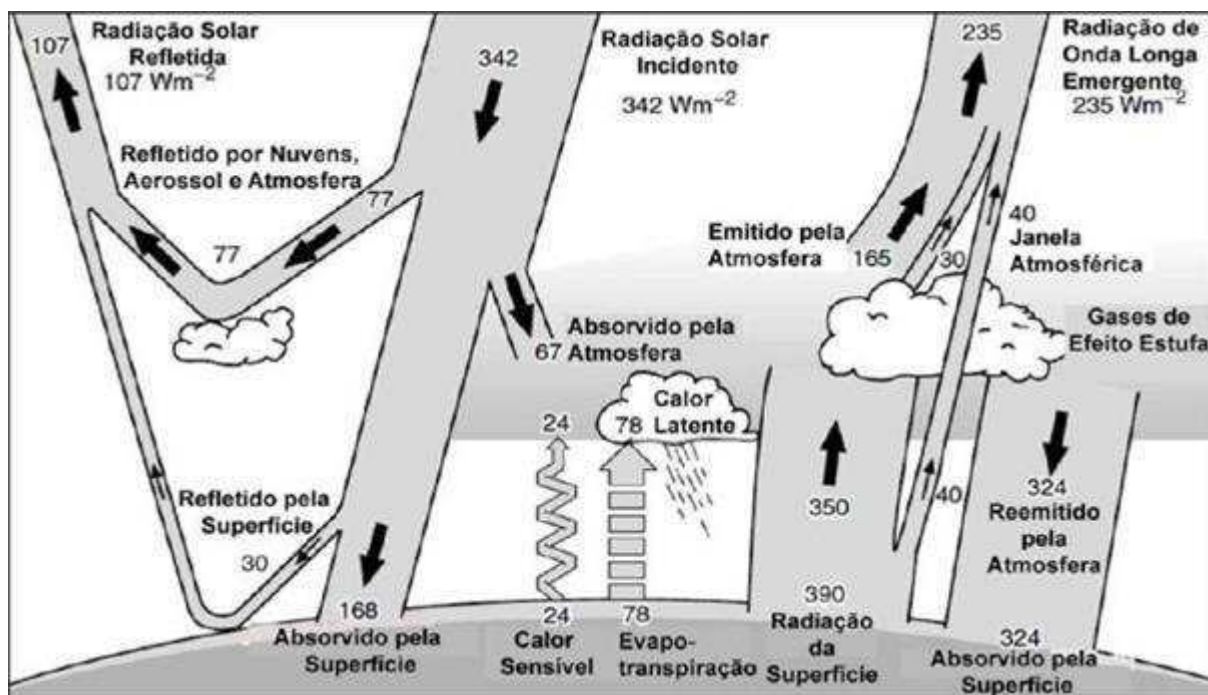


Figura 3.1: Estimativa do balanço de energia médio global e anual da Terra. (Fonte: Braghieri, 2013).

Em suma, o balanço radiativo implica que a quantidade de energia que entra no sistema Terra-Atmosfera proveniente do Sol, é aproximadamente igual a que o sistema dissipa, principalmente pela emissão de radiação de volta ao espaço (Rosário, 2011). A quantidade de radiação solar absorvida pela atmosfera e superfície da Terra, em longo prazo, é equilibrada pela mesma quantidade de radiação de onda longa emitida pelas mesmas. Aproximadamente metade da radiação solar é absorvida pela superfície da Terra. Essa energia é transferida para a atmosfera por meio do aquecimento do ar em contato com a superfície (termas), por evapotranspiração e por radiação de onda longa, que é absorvida pelas nuvens e gases de efeito estufa. A atmosfera por sua vez emite energia de onda longa para a superfície, assim como para o espaço (Kiehl e Trenberth, 1997; Braghieri, 2013).

De acordo com Yamasoe (2006), a medição de radiação solar, englobando todo ou grande parte do espectro de onda curta é em geral realizada por meio da irradiância global incidente sobre uma superfície plana horizontal (orientada para o zênite) ou Irradiância Global Horizontal -GHI (*Global Horizontal Irradiance*). O termo global indica que a radiação provém de um hemisfério. A radiação solar pode ser decomposta em dois termos ao atingir a superfície:

a) Radiação solar direta, medida no plano normal, ou seja, perpendicular aos raios solares e, portanto, denominada de Irradiância Direta Normal – DNI (*Direct Normal Irradiance*). Sua transmissão decresce com o aumento da distância zenital (aumento do caminho óptico) e particularmente quando a concentração de constituintes atmosféricos aumenta (gases, partículas de aerossol, nuvens, cristais de gelo, etc).

b) Radiação solar difusa proveniente de todo o céu, medida no plano horizontal, é denominada de Irradiância Difusa Horizontal (*Diffuse Horizontal Irradiance*). É resultante do espalhamento de radiação solar pelas moléculas de gases, partículas de aerossol, nuvens, excluindo a região do disco solar, mas incluindo a contribuição da reflexão da superfície que é novamente espalhada pela atmosfera, ou por outras superfícies vizinhas.

A distribuição espectral das duas componentes acontece de maneira distinta. A componente DHI, devido à forte dependência espectral do espalhamento molecular, que remove de forma mais eficaz radiação do feixe solar direto com comprimento de onda menor, é composta por uma parcela maior de onda curta do que a componente DNI.

As nuvens assim como as características físicas da superfície sobre a qual a radiação solar incide também desempenham um papel importante no balanço de radiação do sistema atmosfera-superfície. Segundo Thomas e Stamnes (1999), as nuvens alteram a distribuição de radiação solar incidente e emitem e absorvem radiação infravermelha. Alterações no fluxo incidente de radiação solar resultam em diferentes respostas na atmosfera e superfície, podendo haver alterações em vários processos meteorológicos e climáticos na Terra (Mendoza, 2005; Martins *et al.*, 2004).

Souza Echer *et al.* (2006) discutiram a importância do conhecimento de informações sobre a cobertura de nuvens, uma vez que elas atuam como principal agente modulador da principal fonte de energia em nosso planeta: a radiação solar. Utilizando observações em plataformas orbitais constataram que a cobertura de nuvens (parâmetro que caracteriza a quantidade de nuvens no céu em um determinado instante de tempo), embora variável, pode atingir aproximadamente 50% do planeta. Esse percentual de cobertura aliado ao potencial de reflexão que pode chegar a 23% para radiação solar incidente, tornam as nuvens os agentes mais significativos para o balanço radiativo da Terra.

Alterações nos constituintes da atmosfera que interagem com a radiação eletromagnética podem afetar o perfil de temperatura do ar e, por conseguinte, o perfil de pressão atmosférica. A alteração da distribuição vertical e horizontal da pressão atmosférica

afeta a velocidade e a direção do vento. No que diz respeito aos processos que ocorrem na superfície, um exemplo é a realização de fotossíntese pela vegetação a partir da absorção da radiação solar na região espectral do visível ou fotossinteticamente ativa. A radiação eletromagnética afeta também a concentração de alguns gases na atmosfera a partir de reações fotoquímicas (Yamasoe, 2006).

Ainda segundo Yamasoe (2006), a instabilidade convectiva próxima à superfície é resultado dos processos de realimentação (*feedback process*) do sistema Terra-atmosfera, ou seja, do mesmo modo como o meio afeta o campo de radiação, o campo de radiação pode alterar o meio e assim por diante. Algumas parcelas de ar sofrem movimentos ascendentes e outras descendentes. O movimento ascendente da parcela de ar causa resfriamento adiabático e, se a atmosfera estiver suficientemente úmida, ocorre condensação e formação de nuvens.

O ramo da Meteorologia que se dedica a medição de parâmetros relativos à radiação solar é a solarimetria. Segundo Tiba *et al.* (2000) parâmetros tais como insolação, radiação direta, radiação difusa, radiação global e, em casos mais específicos, a radiação em determinados comprimentos de onda, são usados em diversas aplicações de diferentes áreas do conhecimento.

No Brasil pesquisadores do CPTEC- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, juntamente com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE criaram o Sistema Organizacional de Dados Ambientais - Rede SONDA. As várias etapas previstas no Projeto SONDA estão em pleno desenvolvimento pelo CPTEC/INPE com financiamento da FINEP e da PETROBRAS, cujo objetivo principal é prover dados de alta qualidade para a validação de modelos físicos ou empíricos utilizados em diversas áreas da atividade humana para estimativa de potencial energético de fontes renováveis. Atualmente existe em operação uma rede de estações de superfície distribuídas no território nacional, compostas por equipamentos de primeira linha para aquisição de dados anemométricos, solarimétricos e meteorológicos. Os critérios básicos que nortearam a seleção dos locais das estações foram: áreas caracterizadas por diferentes microclimas existentes no Brasil, o potencial de exploração de energia solar e eólica em função de resultados apresentados por estudos ou experimentos anteriores e a presença de instituições e/ou pesquisadores que possam colaborar com a operação e manutenção de estações nas localidades onde a infraestrutura do INPE não está presente (Martins *et al.*, 2005). No entanto, embora já existam diversas estações medindo o

recurso solar, em virtude da grande extensão territorial do Brasil esse tipo de medição pode ser considerado ainda bastante escasso.

Uma outra forma de conhecer o recurso solar se dá através do aperfeiçoamento de modelos numéricos capazes de estimar com precisão medidas de radiação solar, essa opção tornou-se uma maneira eficiente e econômica, dado os elevados custos de instalação de estações solarimétricas e vem se desenvolvendo cada dia mais.

Kratzenberg *et al.* (2003) fizeram o mapeamento do potencial solar monitorado pelo LABSOLAR e INPE, com o modelo físico BRASIL-SR, desenvolvido no Brasil em parceria com pesquisadores parceiros do GKSS de *Geesthacht* – Alemanha. Os dados derivados de satélites foram comparados com dados coletados na superfície, nas bases de totais horários, diários, mensal e anual no intuito de calibrar instrumentos solarimétricos. As incertezas agregadas aos radiômetros utilizados na validação devem ser minimizadas em relação à escala pireliométrica internacional estabelecida pela WMO (*World Meteorological Organization*)/UN (*United Nations*), no contexto do projeto BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*). Os resultados da calibração foram apresentados em termos do intervalo de incerteza da constante de calibração, para os pireliômetros de Angström e Eppley NIP, bem como para os piranômetros Eppley PSP, Kipp&Zonen CM11, CM22 e CM3B e também os piranômetros SP LITE e LICOR.

Martins *et al.* (2007) desenvolveram mapas de irradiação global e irradiação direta normal para o Brasil utilizando o modelo BRASIL-SR para o período de 1995 a 2002. Os resultados mostraram que a parametrização simples utilizada para avaliar a transmitância da nuvem para a irradiação direta normal obteve desvios maiores. Além disso, os autores ressaltam que o modelo BRASIL-SR subestimou a transmitância atmosférica para a componente direta, o que provocou uma superestimativa de irradiação direta normal, principalmente em dias nublados. Contudo, os autores observaram que em grande parte do território brasileiro os níveis de irradiação global são superiores aos observados para a maioria dos países europeus. Além disso, mencionaram que mesmo com essa disponibilidade de energia poucos são os projetos voltados para o aproveitamento desse recurso quando comparado com alguns países europeus, como Alemanha, Espanha e França.

Menezes Neto *et al.* (2009) apresentaram uma metodologia para o mapeamento da energia solar incidente ao nível do solo para a região Nordeste do Brasil utilizando um modelo atmosférico de mesoescala (*Regional Atmospheric Modeling System – RAMS*),

validado e ajustado por meio dos dados medidos pela rede de plataformas de coleta de dados (PCDs) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Os resultados mostraram que o modelo apresenta erros sistemáticos, superestimando a radiação na superfície, porém após as devidas correções estatísticas, utilizando uma relação entre a fração de cobertura de nuvens prevista pelo modelo e a radiação observada na superfície e estimada no topo da atmosfera, encontraram correlações de 0,92 com intervalos de confiança de 13,5 W/m² para dados com base mensal. Usando essa metodologia, a estimativa do valor médio anual (após ajustes) da radiação solar incidente no estado do Ceará é de 215 W/m² (máximo em outubro: 260 W/m²).

Fiorin *et al.* (2011) discutiram de forma sucinta a metodologia matemática conhecida como redes neurais artificiais em algumas aplicações na área de energias renováveis. O trabalho demonstrou a aplicação da ferramenta para o levantamento de disponibilidade de recursos de energia solar no Brasil a partir de dados de superfície coletados em estações da rede SONDA operada pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Os resultados obtidos mostraram que as redes neurais podem fornecer estimativas com a confiabilidade necessária para avaliação da disponibilidade de energia solar e com melhor desempenho que outras técnicas estatísticas utilizadas na literatura.

Porfírio (2012) desenvolveu um método de estimativa de irradiância direta normal (DNI) e irradiação direta normal (Q_N) à superfície baseando-se em informações meteorológicas (dentre elas a insolação) e satélites para a região Nordeste do Brasil. O modelo físico desenvolvido denominado PC12, foi avaliado através de análise teórica e experimental, juntamente com outros quatro modelos físicos de estimativa de DNI sob condições de céu claro. Os resultados mostraram que os modelos com melhor desempenho foram o REST, Yang e PC12, nesta ordem. O modelo REST foi utilizado para avaliar a DNI sob céu claro e seus resultados mostraram que as estimativas de insolação por satélite foram coerentes com as observações pireliométricas, enquanto que diferiram da insolação por heliógrafo. As estimativas de DNI e Q_N por satélite foram comparadas com medidas obtidas em estações solarimétricas da rede SONDA no Nordeste brasileiro para o período 2007/2008. Os resultados indicaram que o modelo representou satisfatoriamente o ciclo diário de DNI, tanto em dias claros como em dias parcialmente nublados, com erros médios variando entre -18,4 e 22,4 W m⁻². Por fim, elaborou mapas de Q_N no NEB para o ano de 2008. A análise indicou que as condições meteorológicas sazonais influenciam a variabilidade espaço-

temporal dos níveis de Q_N e que as regiões que se destacam por apresentarem maiores valores de irradiação direta normal localizam-se no semiárido do Nordeste brasileiro.

Vários estudos usam dados de satélites meteorológicos como uma alternativa viável na avaliação da nebulosidade e irradiância em superfície (Perez et al., 1997; Martins et al., 2007; Martins e Pereira, 2011). Outra linha de pesquisa bastante estudada é a geração de séries sintéticas de radiação global por meio de dados de diários de insolação, neste caso as observações de radiação solar podem ser estimadas através de modelos matemáticos, que diferem entre si pelo grau de complexidade e pelas variáveis de entrada (Belúcio *et al.* 2014).

3.2 Considerações sobre a insolação

A insolação é definida como o número de horas de brilho solar. A determinação da variabilidade da insolação pode ser investigada a partir da inter-relação entre a radiação solar que chega à superfície com outras variáveis meteorológicas como precipitação, temperatura, vento, evaporação, umidade do solo e do ar, radiação de onda longa, entre outras.

O instrumento que registra a insolação é denominado heliógrafo e suas medições possuem alta correlação com os componentes da radiação solar (Azevedo e Marques, 1987; Porfírio *et al.*, 2011). O princípio de medição de um heliógrafo é simples e foi introduzido no século 19 (Coulson, 1975). Uma esfera de quartzo ou de vidro concentra os raios solares sobre uma fita de papel graduada em horas (heliograma). A convergência da radiação solar direta no heliograma produz a queima pontual do papel quando o Sol não está oculto por nuvens. O resultado gerado é uma medida do tempo durante o qual houve incidência de raios solares diretos durante um dia (Ceballos *et al.*, 1992).

O heliógrafo mais conhecido é o de Campbell-Stokes (Figura 3.2), que é composto por uma esfera de quartzo ou vidro transparente, montada em um eixo inclinável, cujo suporte contém uma calha disposta transversalmente. Quando instalado, seu eixo deve ficar paralelo ao eixo terrestre, permanecendo a calha orientada na direção Leste-Oeste. O foco da queima, causado pela convergência dos raios solares ao incidir sobre a esfera, deve sempre estar situado no interior da calha (em qualquer hora do dia, de qualquer dia do ano). Visando atender esta exigência existem modelos apropriados aos trópicos, bem como às regiões temperadas e às áreas circumpolares (vale salientar que nos polos, devido a trajetória circular

do Sol, são utilizados dois heliógrafos montados em oposição). Diariamente é colocado na calha o tipo de heliograma correspondente a cada época do ano (Varejão-Silva, 2006).



Figura 3.2: Heliógrafo Campbell-Stokes da estação climatológica do INMET em Natal.

A qualidade do papel e a umidade atmosférica são fatores limitantes para a estimativa da insolação sendo, portanto, indefinida a quantidade de radiação solar direta necessária para que ocorra a queima do heliograma (Iqbal, 1983). A Organização Mundial de Meteorologia – WMO (do inglês *World Meteorological Organization*) adotou o heliógrafo como instrumento padrão de medida da insolação e definiu o valor de 120 W/m^2 como limite de queima do heliograma, admitindo 20% de flutuação em torno desse valor, e indicando o pireliômetro como sensor de referência para estimativa do brilho solar (WMO, 1985). No entanto, segundo Coulson (1975), em condições de céu claro e baixa umidade atmosférica seriam necessários para a queima apenas 70 W/m^2 , enquanto que em céu nublado e alta umidade atmosférica essa quantidade aumentaria para 280 W/m^2 .

Os heliogramas são disponibilizados em três modelos diferentes, um para cada época do ano. No Hemisfério Sul, o heliograma do tipo 1 (curva comprida), é fabricado para utilização no período de 16 de outubro até 28 ou 29 de fevereiro do ano seguinte compreendendo o período do solstício de verão. O heliograma do tipo 2 (fita reta), é fabricado para utilização no período de 1º de março a 15 de abril e para o período de 1º de setembro a 15 de outubro, compreendendo o período do equinócio de outono e o período do equinócio de primavera. O heliograma do tipo 3 (fita curva curta) é fabricado para utilização no período de 16 de abril até 31 de agosto e compreende o período do solstício de inverno. Ilustrações dos três tipos de heliogramas são apresentadas na Figura 3.3.

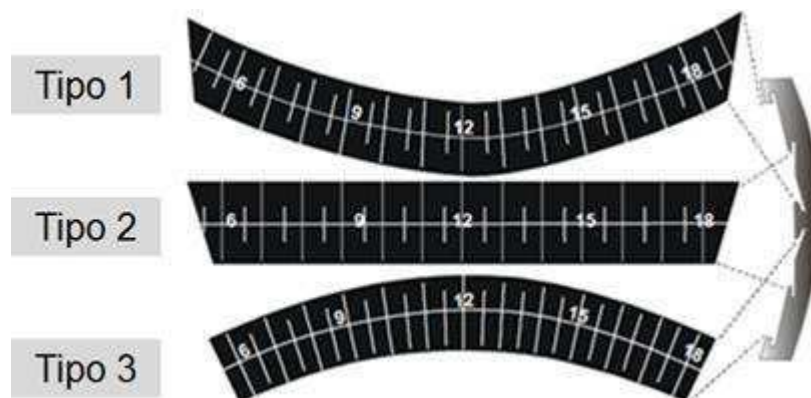


Figura 3.3: Ilustrações dos diferentes tipos de heliogramas utilizados na região tropical mostrando-se, à direita, o perfil da concha do heliógrafo com as ranhuras correspondentes (Adaptado de Varejão-Silva, 2006).

É importante ressaltar que alguns cuidados devem ser tomados em relação ao manuseio e instalação do heliógrafo. É necessário estar atento para o uso do tipo de heliograma correto, visto que varia em função do período do ano. O heliógrafo deve ser instalado em um local livre de sombreamento, principalmente quando o Sol estiver no horizonte. Durante a instalação, o arco graduado em graus que envolve a esfera precisa ser ajustado de acordo com a latitude do local. O instrumento precisa ser orientado na direção Norte-Sul geográfica e não da bússola (Norte Magnético) (WMO, 1985).

Tais cuidados na instalação são importantes, pois permitem que o instrumento meça corretamente a insolação ao longo de todo o dia, recebendo a luz solar sempre que o Sol estiver visível. Em dias completamente nublados, não é possível observar o disco solar. Nessas condições, o heliógrafo não grava o brilho solar e o heliograma fica sem nenhum registro. A existência de nuvens transitórias durante o dia, podem temporariamente cobrir o disco solar fazendo com que o instrumento pare de registrar. Logo que o Sol esteja visível o instrumento volta a queimar o heliograma (WMO, 1985).

A existência de uma relação direta entre a radiação global diária e a insolação foi sugerida inicialmente por Kimball em 1919. Posteriormente, outros pesquisadores passaram a desenvolver modelos estatísticos que permitissem estimar a radiação solar que chega à superfície a partir dos dados de insolação. O primeiro modelo com esse propósito foi desenvolvido por Angström (1924). Em seguida, Prescott (1940) simplificou o modelo de Angström, permitindo que, a partir dos coeficientes linear e angular da equação de regressão linear simples entre a razão de insolação e de radiação solar global, fosse possível estimar a

radiação solar global com base nos dados de insolação. O modelo denominado de Angström- Prescott, teve como base adaptações em função de condições climáticas locais e vem sendo utilizado universalmente (Blanco e Sentelhas, 2002; Santos *et al.*, 2003; Almorox e Hontoria, 2004; Tiba *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2006; Yorukoglu e Celik, 2006; Buriol *et al.*, 2012; Okonkwo e Nwokoye, 2014).

Recentemente, Suehrcke *et al.* (2013) estudaram com mais profundidade as relações entre a insolação e a radiação solar a partir de uma generalização da equação de Angström- Prescott. Os resultados indicam que a relação entre a transmitância média diária e a insolação não é linear. Os autores verificaram que quando a cobertura de nuvens no céu aumenta, a atmosfera tende a tornar-se menos transparente à radiação solar. Isso significa que uma redução na fração de insolação, simultaneamente provoca uma redução na transmitância da radiação solar através das nuvens. Esta alteração adicional na transmitância atmosférica provoca uma relação de não linearidade entre a insolação e a radiação solar. Esse comportamento é ilustrado através do esquema apresentado na Figura 3.4. O estudo evidenciou que a medição precisa da insolação é uma realidade desafiadora, pois em muitos casos os dados estão sujeitos a erros nas medições, o que pode impactar na qualidade dos dados observados e posteriormente nas estimativas da radiação.

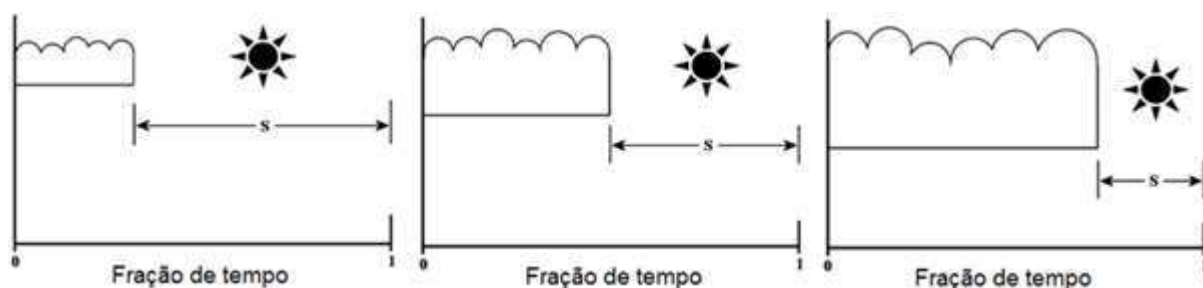


Figura 3.4: Esquema representando a relação entre a insolação e a espessura óptica das nuvens (transmitância). (Adaptado de Suercke *et al.*, 2013).

Uma metodologia para contagem de horas de brilho solar por meio de processamento de imagens digitais, semelhante à apresentada nesta pesquisa, foi anteriormente proposta por Dal Pai (2009). Com o objetivo de melhorar a qualidade das medições da insolação o *software* desenvolvido em linguagem Delphi foi aplicado a dados coletados na primavera e outono (fitas retas). O modelo apresentou bons resultados apesar de alguns valores indicarem subestimativas. Vale ressaltar que os heliogramas usados tinha coloração preta (atualmente pouco utilizados). O autor concluiu ainda que novas pesquisas deveriam ser realizadas

utilizando heliogramas curvilíneos (usados no verão e no inverno) para que fosse possível efetivamente avaliar os métodos manual e automatizado.

Estimativas mais precisas da insolação representam um aprimoramento na disponibilidade de informações de boa qualidade. Essa é uma condição que certamente terá reflexos positivos nos projetos futuros com foco no aproveitamento da energia solar. A maior quantidade de estações climatológicas com observações contínuas da insolação permite estimar com maior confiabilidade sobre a radiação solar. Isso não acontece com a rede de radiômetros instalados no País, por ser muito recente onerosa e mal distribuídas.

A realização de um estudo mais aprofundado sobre a insolação visa, dentre outros objetivos, otimizar as medições e fornecer resultados em alta resolução. Esses resultados, por sua vez, são usados na estimativa da radiação solar que chega à superfície, seja por modelos estatísticos ou por modelos dinâmicos.

3.3 Principais tecnologias da energia solar

A energia solar pode ser convertida em energia elétrica através de dois sistemas: sem concentração ou com concentração dos raios solares.

Os sistemas fotovoltaicos são considerados sistemas sem concentração. A energia solar fotovoltaica é a conversão direta da energia luminosa (geralmente tendo o Sol por fonte) em energia elétrica. O dispositivo elementar é a célula fotovoltaica, que pode ser manufaturada através de diversas tecnologias, cada uma com uma diferente eficiência de conversão.

No Rio Grande do Norte foi instalada a primeira usina fotovoltaica na cidade de Alto do Rodrigues, como parte das atividades de um projeto de pesquisa desenvolvido no CTGAS-ER em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Norte e a PETROBRAS. Uma visão parcial da Usina Fotovoltaica de Alto do Rodrigues – UFVAR pode ser vista na ilustração apresentada na Figura 3.5.



Figura 3.5: Usina Fotovoltaica de Alto do Rodrigues –UFVAR situada na cidade de Alto do Rodrigues-RN.

As tecnologias heliotérmicas concentram os raios solares por meio de refletores ou lentes que rastreiam o Sol, focalizando os raios solares sobre um receptor, onde a energia solar é absorvida na forma de calor para, em seguida, ser convertida em eletricidade. O sistema heliotérmico, utiliza a irradiação solar convertendo-a em calor, é utilizado em usinas termelétricas para a produção de eletricidade. Este processo é dividido em quatro etapas: coleta da irradiação, conversão em calor, transporte e armazenamento e, por fim, conversão em eletricidade. As principais tecnologias que se destacam atualmente para esse tipo de conversão são: coletores cilíndricos parabólicos, refletor linear de Fresnel, discos parabólicos e torre central.

O coletor cilíndrico parabólico utiliza refletores com forma parabólica para concentrar os raios solares em um receptor localizado na linha óptica focal do coletor. O tipo de receptor móvel segue continuamente o percurso aparente do Sol. Refletores lineares Fresnel se assemelham aos coletores parabólicos, mas utilizam espelhos planos ou ligeiramente curvados para refletir os raios solares num refletor linear fixo, são mais baratos que os coletores cilíndricos. O sistema coletor através de discos (antenas) parabólicos capta a radiação solar e reflete para um ponto focal sustentado acima da antena. Já o sistema solar torre central utiliza centenas de refletores pequenos (heliostatos) que seguem o movimento aparente do Sol e direcionam os raios solares para um receptor fixo localizado no topo de uma torre central (Porfírio, 2011). Os principais tipos de tecnologia com concentração solar são ilustrados na Figura 3.6.

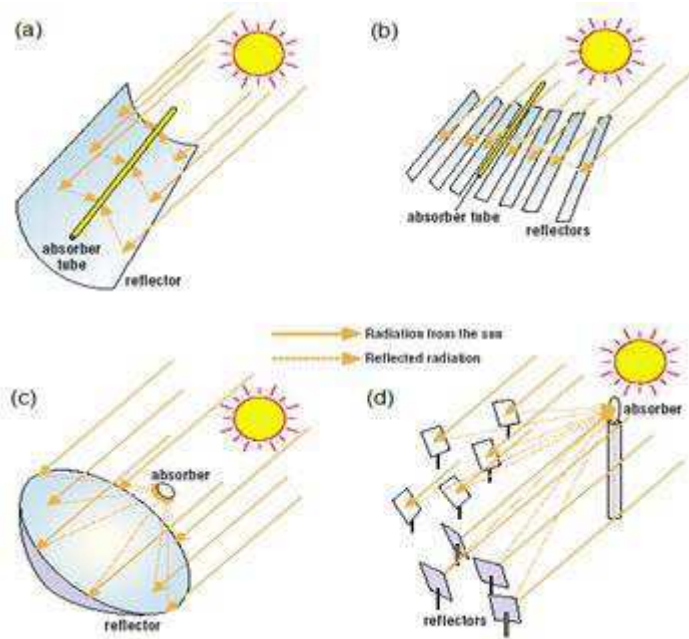


Figura 3.6: Tipos de sistemas de concentração solar: (a) coletor cilíndrico parabólico, (b) refletor linear Fresnel, (c) disco parabólico e (d) torre central (Fonte: Renewable Energy World 06/2003).

Existe ainda um tipo de sistema que associa a tecnologia fotovoltaica à heliotérmica (com concentração), denominado sistema fotovoltaico concentrado. Nesse tipo de tecnologia um conjunto de lentes é utilizado para focar luz solar em pequenas células fotovoltaicas. A luz concentrada melhora a eficiência das células, e permite reduzir a quantidade de dispendioso material fotovoltaico necessário para a produção de determinada quantidade de energia elétrica. Uma ilustração de painéis fotovoltaicos concentrados instalados no CTGAS-ER pode ser vista na Figura 3.7a.



Figura 3.7: Sistema fotovoltaico concentrado instalado no CTGAS-ER (a) e coletores solares instalados em residências populares (b).

Por fim existem os coletores solares, também conhecidos como painéis solares, que podem ter uma grande variedade de formas e tipos. Esses sistemas de captação utilizam basicamente a radiação solar direta sendo, portanto, altamente dependente da insolação. Os coletores solares são consideravelmente mais baratos do que as outras tecnologias, devido ao seu princípio de funcionamento que é aquecer a água através da radiação solar. Devido aos custos mais baixos e o benefício da economia no consumo de energia gerado com o uso dos coletores, recentemente o governo federal utilizou coletores solares em programas sociais de habitação, como uma política pública para economia de energia, principalmente para os beneficiados que possuem baixa renda (Figura 3.7b).

A escolha do tipo de tecnologia a ser utilizada depende de vários fatores. Sob o ponto de vista do recurso solar e das condições atmosféricas foram elencados os principais critérios que norteiam essa escolha na Quadro 3.1. As tecnologias heliotérmicas são altamente dependentes da parcela da radiação direta (DNI), ou seja, maior a produção de energia quanto mais baixa for a interferência de nuvens. Já a tecnologia fotovoltaica não requer altos índices de radiação solar e mesmo estando nublado os painéis fotovoltaicos geram eletricidade com menor produção do que quando o céu está com pouca nebulosidade (aproveitam a parcela difusa – DHI). No caso dos painéis fotovoltaicos temperaturas ambientes elevadas implicam em baixo rendimento do sistema, enquanto que os coletores solares que são usados apenas para o aquecimento da água aproveitam as duas parcelas da radiação global (GHI).

Quadro 3.1: Condições de geração de energia elétrica ou aproveitamento da energia solar térmica.

	Fotovoltaica	Heliotérmica	Coletores Térmicos
GHI	normal	elevada	normal
DNI	normal	elevada	normal
DHI	pouco	-	pouco
Temperatura do ar	Maior rendimento com temperaturas baixas	Maior rendimento com temperaturas elevadas	Maior rendimento com temperaturas elevadas

De um modo geral, a quantidade de radiação solar pode ser aproveitada tanto por sistemas solar fotovoltaicos quanto por sistemas solar térmicos. Entender como sistemas atmosféricos atuantes na cidade de Natal podem interferir no aproveitamento da energia solar por essas tecnologias motivaram o uso das técnicas estatísticas multivariadas.

3.4 Técnicas Estatísticas Multivariadas

Análise Multivariada é definida como um conjunto de técnicas estatísticas utilizadas em situações nas quais variáveis são medidas simultaneamente em cada unidade experimental, isto é, tem por objetivo o resumo, a representação, a análise e a interpretação de dados amostrados. Os métodos de análise de dados multivariados permitem um estudo global dessas variáveis, colocando em evidência ligações, semelhanças ou diferenças entre elas, perdendo o mínimo de informação (Sartorio, 2008).

Devido à grande quantidade de cálculos necessários para a realização das análises, a sua expansão só foi possível com o desenvolvimento da tecnologia computacional disponível atualmente, que permite avanços extraordinários na análise de dados, o que seria impensável algumas décadas atrás.

São muitas as técnicas de análise multivariada e, cada uma, com sua finalidade específica. A dificuldade na aplicação dessas técnicas não está nos cálculos, fácil e rapidamente executados num computador com software adequado. A dificuldade consiste em escolher o método mais apropriado ao tipo de dados, usá-lo corretamente, saber interpretar os resultados e retirar deles conclusões corretas (Reis, 1997). Na Meteorologia essas técnicas são amplamente utilizadas em diversos estudos que envolvem parâmetros atmosféricos. Muitos trabalhos bastante conhecidos e difundidos utilizaram essas técnicas e, em sua maioria, com o objetivo de fornecer um melhor entendimento dos padrões de variabilidade espaço-temporal como, por exemplo, da precipitação (Green *et al.*, 1993; Gong e Richman, 1995; Muñoz-Díaz e Rodrigo, 2004; Fragoso e Gomes, 2008; Stathis e Myronidis, 2009; Grimm, 2011, Amanajás e Braga, 2012) e do escoamento atmosférico (Correia, 2000; Esteban *et al.*, 2006; Burlando *et al.*, 2008; Oliveira *et al.*, 2011).

Outra forma de aplicação das técnicas multivariadas se dá utilizando um grupo de variáveis medidas numa estação. A análise fatorial busca agrupar variáveis com altas correlações entre si. Karume *et al.* (2007) aplicaram a análise fatorial com o objetivo de avaliar a correlação entre a insolação e variáveis meteorológicas e identificar os parâmetros mais adequados para a previsão de horas de brilho solar em Uganda. Os resultados indicam que as variáveis umidade relativa do ar e temperatura máxima foram suficientes para explicar a variabilidade da insolação em Uganda.

A análise fatorial foi utilizada por Farias e Correia (2008) com a finalidade de estabelecer relações entre variáveis meteorológicas que permitissem definir padrões atmosféricos associados com a formação e desenvolvimento de sistemas convectivos intensos em áreas de clima semiárido. A técnica permitiu equacionar a influência de condições ambientais na intensificação de atividade convectiva responsável por interrupções no fornecimento de energia elétrica por descargas atmosféricas em anos de El Niño e La Niña na região de atuação da CHESF (Companhia Hidrelétrica do Rio São Francisco). Os VCANs (vórtices ciclônicos de altos níveis) foram os principais responsáveis pelo desenvolvimento de sistemas precipitantes intensos e ocorrência de falhas transitórias no sistema de transmissão da CHESF.

Com o objetivo de quantificar aspectos da dinâmica dos fluxos de água, energia e CO₂ no bioma caatinga, durante o período chuvoso em Petrolina-PE, Santos *et al.* (2011) aplicaram análise fatorial a um conjunto de variáveis micrometeorológicas. As variáveis agrupadas no primeiro fator indicaram que o efeito da variabilidade no teor de vapor da atmosfera e da quantidade de nuvens é mais pronunciado no período úmido e tem influência direta na difusão turbulenta (efeitos térmicos). O segundo fator mostrou a influência marcante da sazonalidade e da transferência de água para a atmosfera controlada pelos estômatos ou pela disponibilidade de energia.

A análise de agrupamentos, por sua vez, classifica o conjunto de dados em grupos, sendo que os indivíduos são homogêneos dentro dos grupos e heterogêneos entre grupos enquanto que a análise discriminante surge como uma técnica confirmatória, validando os resultados obtidos pela análise de agrupamentos.

Ceballos e Braga (1995) utilizaram a técnica de análise de agrupamentos em regiões homogêneas de radiação global diária para estimar dados faltosos locais. Os autores verificaram que os resultados obtidos foram satisfatórios com erros padrão que não ultrapassaram 5%.

Com o objetivo de determinar regiões homogêneas de vento, Lima *et al.* (2010) aplicaram análise fatorial e análise de agrupamentos a dados de velocidade média horária do vento obtidos em 28 estações localizadas em quatro Estados do Nordeste. Os resultados mostraram que a análise identificou as regiões litorâneas e serranas as mais favoráveis à geração de energia eólica, em especial as estações de Acaraú no Ceará e Macau no Rio Grande do Norte, enquanto que Barbalha no Ceará como a menos favorável. Num estudo

similar aplicado a dados obtidos nos aeroportos das capitais dos estados do Nordeste, Oliveira Silva *et al.* (2011) empregaram a técnica de análise de agrupamento com o objetivo de caracterizar a variabilidade trimestral do vento à superfície na área litorânea do Nordeste do Brasil. As análises temporais trimestrais possibilitaram identificar regiões homogêneas de vento.

As técnicas de análise fatorial, análise de agrupamentos e análise discriminante foram utilizadas por Wu e Kuo (2013) com a finalidade de analisar dados de qualidade do ar de oito estações automáticas em Taiwan, definir com precisão as diferenças entre cada estação e estabelecer um sistema de classificação de qualidade do ar adequada para o conjunto de estações de Taiwan. Nos resultados da análise fatorial sete poluentes foram agrupados em três fatores dominantes na qualidade do ar em Taiwan: orgânicos, fotoquímicos e combustíveis. A análise de agrupamentos permitiu classificar o ar em cinco grupos que apresentam diferentes características e graus de poluição.

O clima pré-monçônico e a previsão de tempestades pré-monçônicas de Calcutá foi estudado por Ghosh *et al.* (2003) aplicando as técnicas de análise de componentes principais e análise discriminante. Foram analisados 20 parâmetros dinâmicos e termodinâmicos derivados de dados diários de radiossondagem na cidade de Calcutá e realizada uma análise com 10 componentes principais. O estudo permitiu encontrar um índice conhecido como Função Linear Discriminante capaz de prever o clima pré-monçônico.

Stefeson *et al.* (2009) aplicaram três técnicas multivariadas (análise de agrupamentos, análise discriminante e análise de correlações canônicas) com o objetivo de investigar a possibilidade do clima da Região Mossoroense estar sendo afetado pelo comportamento dos Oceanos Pacífico e Atlântico Tropical. Os resultados mostraram que houve correlação entre as variáveis oceânicas e atmosféricas. Uma divisão entre período chuvoso e seco discriminou a região. Apenas os dois primeiros pares canônicos tiveram significância e auxiliaram na interpretação dos conjuntos de variáveis atmosféricas e oceânicas.

Com o objetivo de conhecer os climas das áreas de montanha dos Altos Planaltos da Serra da Estrela, Mora (2009) utilizou a análise de agrupamentos e análise discriminante. Com a análise de agrupamentos foi possível classificar quatro padrões térmicos na região através da análise de classificação k-means. A partir da análise discriminante foi possível entender as causas da ocorrência de diferentes padrões utilizando fatores explicativos

meteorológicos e topográficos. A análise discriminante mostrou que os padrões 2 e 3 estão associados a condições de instabilidade atmosférica, com velocidade do vento e umidade relativa superiores às encontradas nos outros padrões e movimentos verticais das massas de ar mais intensos. Os padrões 1 e 4 estão associados a condições de estabilidade atmosférica.

Em suma, suponha que as variáveis meteorológicas podem ser agrupadas por suas correlações, isto é, todas as variáveis dentro de um particular grupo sejam altamente correlacionadas entre si, mas tenham correlações relativamente pequenas com variáveis de grupos diferentes. Então, é admissível que cada grupo de variáveis represente um único fator, que é responsável pelas correlações observadas. É esse tipo de estrutura que a análise fatorial pretende confirmar. Com a técnica de análise de agrupamentos busca-se encontrar nos dados uma estrutura natural de agrupamento, ou seja, identificar padrões de comportamento em banco de dados através da formação de grupos homogêneos de casos. Com a análise discriminante deseja-se estimar a relação entre uma variável dependente não-métrica (categórica) e um conjunto de variáveis independentes (Hair Jr. *et al.*, 2006; Johnson e Wichern, 2002; Barroso e Artes, 2003).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

A cidade do Natal, área foco deste estudo, está situada no Estado do Rio Grande do Norte localizado no extremo nordeste do Brasil, tendo ao norte e leste o Oceano Atlântico, a oeste o Estado do Ceará e ao sul o Estado da Paraíba. A localização geográfica do Estado do Rio Grande do Norte, com destaque para a cidade do Natal é apresentada na Figura 4.1.

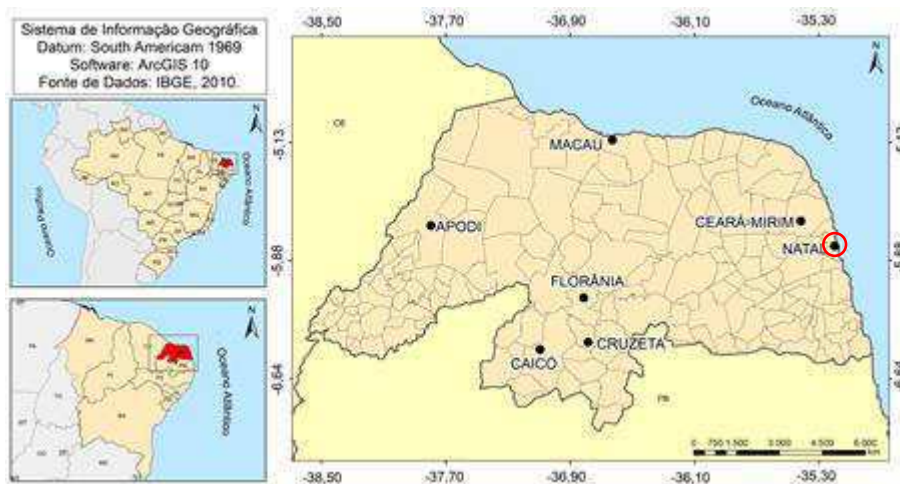


Figura 4.1: Localização geográfica do Estado do Rio Grande do Norte com destaque para a localização da cidade do Natal assinalada pela circunferência vermelha no mapa da direita

O clima dominante na cidade de Natal é quente e árido, exceto durante a estação chuvosa, quando é quente e úmido. Sua estação chuvosa é o resultado da atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e principalmente dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs). A ZCIT é formada a partir da interação entre a confluência dos ventos alísios, a região do cavado equatorial, as áreas de máxima temperatura da superfície do mar (TSM) e de máxima convergência de massa (Uvo, 1989). A ZCIT atua com maior intensidade nos Estados nordestinos do Ceará, Rio Grande do Norte, norte e centro do Maranhão e Piauí e sertões da Paraíba e Pernambuco. Segundo Melo (1997) nessa região a estação chuvosa vai de janeiro a junho com máximos de precipitação durante março e abril, meses nos quais a ZCIT atua de forma mais sistemática.

Os DOLs são perturbações na área dos ventos alísios que se propagam para oeste, apresentando configurações ondulatórias nos campos de vento e pressão (Berry et al., 1945). São de grande relevância por provocarem alterações significativas nas condições sinóticas,

principalmente na componente meridional do vento, tendo como consequência uma umidificação da camada, aumento de nebulosidade e precipitação (Santos et al., 2011, Coutinho e Fish, 2007; Paiva Neto, 2003; Mota, 1997). Os DOLs atuam com maior frequência na costa do leste do Nordeste nos meses de junho a agosto (Espinoza, 1996). Em Natal a frequência é maior no mês de junho (Mota, 2004). Esses distúrbios são caracterizados como sendo o principal sistema que provoca precipitação no leste do Nordeste do Brasil (Mota, 1997; Coutinho e Fish, 2007, Da Silva, 2011). Os DOLs são responsáveis tanto por precipitação extremas como pelo aumento da nebulosidade sobre o leste do Nordeste, e vem sendo alvo de muitos estudos (Yamazaki e Rao, 1977; Hastenrath, 1988; Chou, 1990; Mota, 1997; Espinoza, 1996; Varejão-Silva, 2005).

4.2 Dados

O principal conjunto de informações utilizado nesta pesquisa é constituído por um banco de dados de heliogramas originais cedidos pelo INMET-DISME/Recife-PE. Os heliogramas fornecem dados de insolação que foram otimizados através da leitura automatizada de heliogramas realizada com a utilização do modelo SPDH, cuja descrição detalhada é apresentada na seção 4.5. O novo banco de dados de insolação representa um avanço em termos de aperfeiçoamento não apenas no método de obtenção dos dados, mas principalmente na qualidade e precisão das informações.

Os heliogramas foram selecionados com base nos seguintes critérios:

- Meses com todos os dados diários (sem falhas);
- Meses com o maior número possível de heliogramas em bom estado de conservação, o que permite uma melhor digitalização e processamento das imagens.

Na geração dos dados com o SPDH e processo de validação foram utilizados os heliogramas obtidos nos anos de 2010, 2011 e 2012.

Neste trabalho foram utilizados outros conjuntos de dados. Um deles é constituído por dados horários de superfície de irradiância global horizontal, velocidade e direção do vento, pressão e umidade do ar, referentes aos meses de junho de 2010, 2011 e 2012 e novembro de 2011 e 2012. Os dados foram observados na estação solarimétrica com coordenadas (5,84°S,

35,2°W, 58m) pertencente a Rede SONDA, situada na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Outro conjunto de dados de superfície utilizado é formado por observações feitas na estação climatológica do INMET com coordenadas (5,91°S, 35,2°W, 48,6m). Foram utilizados os dados diários de insolação, precipitação, temperatura máxima.

Foram utilizados dados diários de radiação de onda longa (ROL) derivados dos satélites meteorológicos de órbita polar da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Os dados de ROL (coletados no período de 1980-2012) estão dispostos numa grade regular com resolução horizontal de 2.5° nas coordenadas 5,83°S e 35,2°W.

Para complementar as análises estatísticas foram utilizadas as mensagens com codificação METAR e SPECI, que são informações meteorológicas sobre condições do tempo em um aeródromo (Silva, 2014; Brasil, 2008; Brasil, 2012; Correia, 1995). Elas se encontram disponíveis na Internet através da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET). As mensagens METAR são informes registrados em intervalos regulares de uma hora, enquanto que as SPECI descrevem informações meteorológicas com variações significativas nos intervalos das observações regulares (Brasil, 2012). As coordenadas da estação são (5,91°S; 35,2°W; 49m). A localização aproximada das estações meteorológicas utilizadas é ilustrada na Figura 4.2.

Informações do CLIMANÁLISE e mapas disponíveis na página eletrônica do CPTEC foram utilizados como base para avaliação das condições atmosféricas e sistemas sinóticos atuantes na região no período de estudo.

Os sistemas meteorológicos na área em estudo foram acompanhados através das imagens dos satélites meteorológicos METEOSAT e GOES-E disponíveis em intervalos de três horas no canal do infravermelho térmico, na página eletrônica <http://www.sat.dundee.ac.uk/>, e de imagens realçadas que possibilitam a fácil visualização de áreas de convecção profunda, organizada ou não, disponibilizadas na página eletrônica <http://www.cptec.inpe.br/> pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do CPTEC.

Para a realização das análises e construção de gráficos foram utilizados os *softwares* MATLAB 7.9 disponibilizado pela Universidade Federal de Campina Grande e Surfer 11, e ArcGIS 10.0 disponibilizados pelo CTGAS-ER.

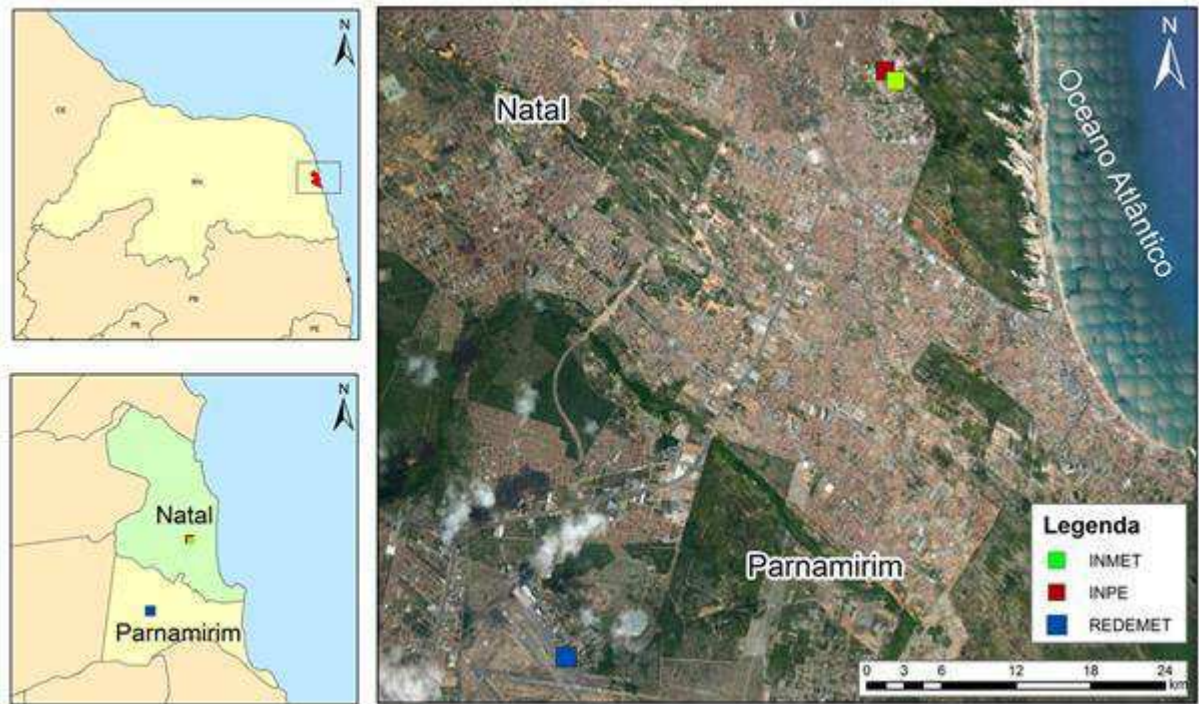


Figura 4.2: Localização geográfica aproximada das estações meteorológicas utilizadas. Destacado em verde a estação meteorológica do INMET, em vermelho a estação solarimétrica do INPE e em azul a estação meteorológica pertencente à REDEMET.

4.3 Obtenção de Parâmetros

Para complementar o conjunto de dados necessários para atingir os objetivos desta proposta foram obtidas as seguintes variáveis:

- Déficit de vapor de água na atmosfera (DPV) calculada com base na equação

$$DPV = e_s - e \quad (4.1)$$

- Umidade específica (q) calculada através da equação 2.

$$q = \frac{622e}{P - 0,378e} \quad (4.2)$$

em que,

$e = UR \times e_s(T)$, é a pressão de vapor (hPa);

UR é a umidade relativa (%), e

$$e_s(T) = 6,11 \times \exp \left[\frac{(17,67T)}{(T + 243,5)} \right] \text{ é a pressão de vapor de saturação (hPa).}$$

em que, P (mb) é a pressão atmosférica e “e” a pressão de vapor (hPa).

- Setores de direção do vento

Para análise da direção do vento foi utilizada a frequência diária considerando 8 setores de 45° da rosa dos ventos, conforme descritos no Quadro Tabela 4.1.

Quadro 4.1: Classificação dos setores de direção do vento.

Setor	Código	Direção Central	Intervalo de Direção
Norte	N	0°	342,5° + 360° U 0° + 27,5°
Nordeste	NE	45°	27,5° + 72,5°
Leste	E	90°	72,5° + 117,5°
Sudeste	SE	135°	117,5° + 162,5°
Sul	S	180°	162,5° + 207,5°
Sudoeste	SO	225°	207,5° + 252,5°
Oeste	O	270°	252,5° + 297,5°
Noroeste	NO	315	297,5° + 342,5°

- Índice de transmissividade Kt

O índice de transmissividade (Kt) é definido como a razão entre a radiação solar que chega ao topo da atmosfera (Ro) e a radiação solar global, neste estudo denominada Irradiância Global Horizontal – GHI (*Global Horizontal Irradiance*) (Iqbal, 1983).

$$K_t = \frac{R_o}{GHI} \quad (4.3)$$

A Ro é estimada através da expressão definida por Iqbal (1983):

$$R_o = S_o E_o \mu_0 \quad (4.4)$$

em que $S_o = 1367 \text{ W/m}^2$, E_o é o raio da órbita terrestre calculado através da seguinte expressão:

$$E_o = 1 + 0,0033 \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \quad (4.5)$$

d_n é o dia do ano correspondente ao calendário Juliano.

μ_0 é igual ao cosseno do ângulo zenital sendo definido por:

$$\mu_0 = \cos AZS = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \phi \text{ sen } \delta \quad (4.6)$$

Se $AZS > 90^\circ$, μ_0 é considerado nulo.

O símbolo δ é a declinação solar e depende do valor do dia juliano (d_n) e tem variação entre $-23^\circ 27'$ no solstício de verão e $23^\circ 27'$ no solstício de inverno e é dado por:

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left\{ \frac{360}{365} (d_n + 284) \right\} \quad (4.7)$$

O símbolo ω é o ângulo horário solar e corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido a rotação da Terra e varia entre -90° e 90° . Cada hora corresponde a 15° de variação do ângulo solar. Por convenção, nas manhãs são negativos, nas tardes positivos e ao meio dia é igual a zero. Pode ser calculado conhecendo-se a hora local:

$$\omega = \{(TST - 12) \times 15\} \quad (4.8)$$

A hora solar verdadeira - TST (*True Solar Time*) depende da hora local aparente LAT (*Local Apparent Time*):

$$TST = LAT + (4 \times (\text{longderef} - \text{long}) + \epsilon_t) / 60 \quad (4.9)$$

longderef é a longitude de referência em relação ao meridiano de *Greenwich* e *long* é a longitude local. A longitude de referência é um padrão adotado para classificar regiões e seus fusos horários. No Brasil é adotado o valor de -45° .

A diferença entre a hora solar média e a hora solar verdadeira é definida como sendo a Equação do Tempo e decorre do fato de que a velocidade da Terra em torno do Sol não é constante (translação numa órbita elíptica). Assim, a equação do tempo varia com o dia do ano:

$$\epsilon_t(\Gamma) = 229,18 (0,000075 + 0,001868 \cos(\Gamma) - 0,032077 \text{sen}(\Gamma) - 0,014615 \cos(2\Gamma) - 0,04089 \text{sen}(2\Gamma)) \quad (10)$$

Nessa equação, Γ , em radianos, é chamado de dia angular e é representado em função do dia juliano (d_n):

$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1)/365 \quad (11)$$

Segundo Porfírio (2011) na literatura internacional, a terminologia utilizada para quantificar a radiação solar não é uniforme. Assim para melhor compreensão dos termos utilizados neste trabalho, segue a definição de alguns conceitos:

- Irradiância Global Horizontal (GHR – *Global Horizontal Radiation*): é definida como o fluxo de radiante por unidade de área atingindo uma superfície expresso em W/m².
- Irradiação Global Horizontal (GHI – *Global Horizontal Irradiance*): é definida como a quantidade de irradiância que atinge uma superfície por unidade de área durante um período de tempo Δ , correspondendo à integral temporal da irradiância em Δ . É comum expressar a irradiação em kWh/m².

A relação das variáveis utilizadas nas análises estatísticas na fração diária do tempo é apresentada na Quadro 4.2.

Quadro 4.2: Descrição das variáveis utilizadas. O símbolo [*] significa que o dado é uma média diária, o símbolo [**] significa que o dado é o total diário.

Variável Meteorológica	Sigla	Estação de Medição
Irradiância Global Horizontal (W/m ²)	GHR*	Rede SONDA
Irradiação Global Horizontal (kWh/m ² dia)	GHI**	Rede SONDA
Temperatura máxima do ar (°C)	Tmx*	INMET
Umidade Específica (g/kg)	q*	Calculada
Velocidade do Vento a 10 metros (m/s)	V*	Rede SONDA/INMET
Frequência do Setor Leste	E*	Rede SONDA
Frequência do Setor Sudeste	SE*	Rede SONDA
Frequência do Setor Sul	S*	Rede SONDA
Frequência do Setor Sudoeste	SO*	Rede SONDA
Déficit de Pressão de Vapor (hPa)	DPV*	Calculada
Precipitação (mm)	Prec**	INMET
Insolação (horas)	I**	INMET
Evaporação de Piche (ml)	Evap**	INMET
Radiação de Onda Longa (W/m ²)	ROL*	NOAA

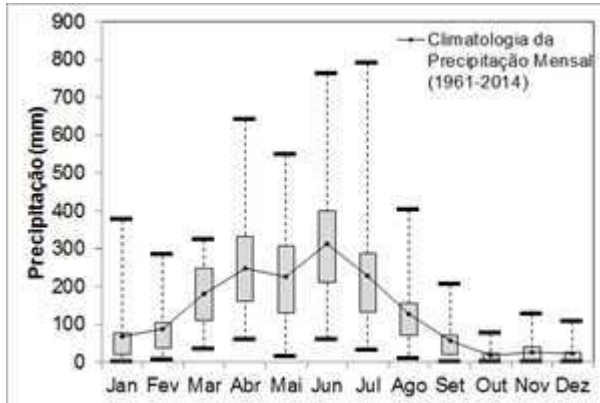
4.4 Seleção do Período de Análise

A energia solar é uma fonte inesgotável e pode ser usada na geração de eletricidade. No entanto, a maioria das energias renováveis tem a desvantagem de que seu desempenho é condicionado por variações no clima e tempo. Nesse contexto, entender o comportamento sazonal da radiação solar que chega à superfície na cidade de Natal e sua interação com outras variáveis meteorológicas motivaram a escolha dos meses de junho e novembro como representativos dos períodos chuvoso e seco, respectivamente. Comprovadamente, o efeito da sazonalidade tem impacto direto na tarifação da energia.

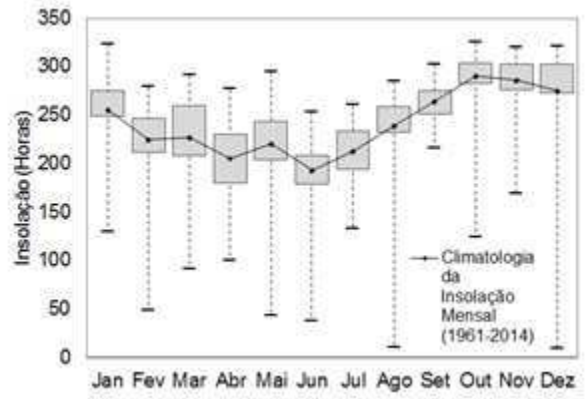
Em períodos de seca relacionada com estiagens prolongadas e níveis baixos dos reservatórios das hidrelétricas, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) estabeleceu a estrutura de tarifação horo-sazonal que é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, uma forma de incentivar o consumo nos horários e períodos do ano em que a energia for mais barata. As horas mais caras estão entre as 18 e 21 horas do dia, já para o ano são estabelecidos dois períodos: período seco, quando a incidência de chuva é menor sobre os reservatórios das usinas hidrelétricas, e período úmido quando é maior o volume de chuvas. A ANEEL considera que o período seco compreende os meses de maio a novembro e período chuvoso de dezembro a abril (ANEEL, 2005).

Na cidade do Natal, o mês de junho é um dos meses mais chuvosos, enquanto que o mês de novembro é um dos meses com maior índice de insolação (Figura 4.3a e 4.3b). As análises foram concentradas no período de 2010 a 2012, em função da disponibilidade dos heliogramas cedidos pelo INMET. Devido ao curto período de tempo (apenas 3 anos) e com o intuito de abranger diferentes condições atmosféricas extremas foram escolhidos meses com características distintas. Para facilitar a escolha foram utilizados gráficos *boxplot* conforme ilustração apresentada na Figura 4.3. É possível visualizar claramente os meses em que a precipitação esteve dentro da normalidade ou fora dela. Com base neste critério foram escolhidos os meses de junho de 2011 e novembro de 2011 com chuva acima da média (anômalos chuvosos) (Figura 4.3d) e os meses de junho de 2010 e novembro de 2012 com chuvas abaixo da média esperada para o mês (anômalos secos) (Figura 4.3c e 4.3e). Foi escolhido também o mês de junho de 2012 (dentro da normalidade) (Figura 4.3e) por fazer parte da estação chuvosa e para complementar as análises, dado que o mês de junho

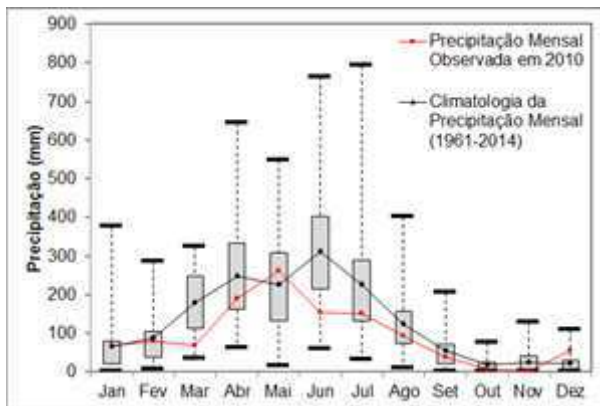
representa condições mais críticas sob o ponto de vista da geração de energia solar (mais precipitação, incidência maior de nebulosidade, menor porcentagem de radiação incidindo sobre a superfície).



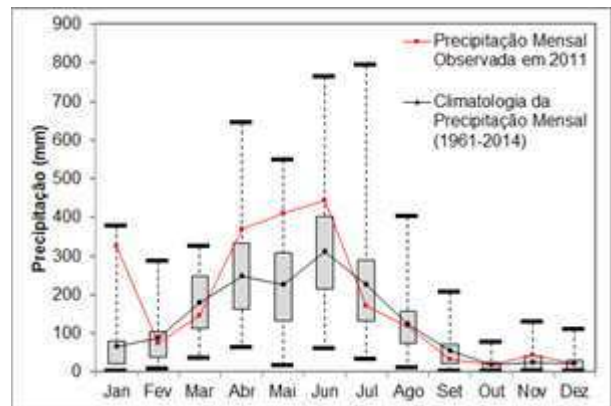
(a)



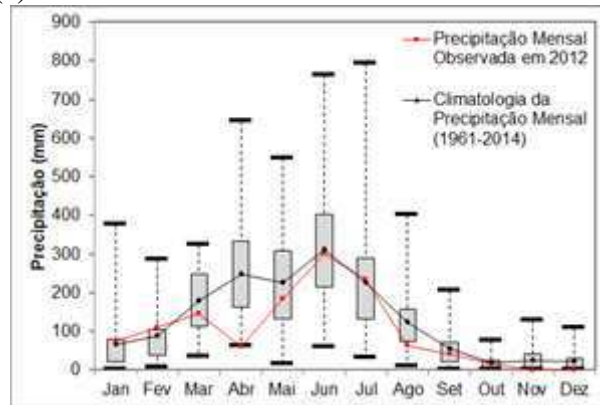
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3: Gráfico Boxplot: (a) climatologia da insolação mensal (1961-2014), (b) climatologia da precipitação mensal (1961-2014), climatologia da precipitação mensal (1961-2014) e precipitação mensal observada em (c) 2010, (d) 2011 e (e) 2012 para a cidade do Natal. O retângulo vermelho indica os meses escolhidos para a análise (Fonte dos dados: INMET).

4.5 Sistema de Processamento Digital de Heliogramas (SPDH): procedimentos

Inicialmente os heliogramas são classificados e separados para digitalização de acordo com o tipo. Os heliogramas classificados como do tipo 1 (Figura 4.4a), incluem as fitas curvas e curtas e são usados na estação do inverno; os do tipo 2 (Figura 4.4b), correspondem às fitas curvas e longas usadas na estação do verão e são usados nas estações do outono e primavera. Os heliogramas do tipo 3 (Figura 4.4c) correspondem às fitas retas e são usados nas estações do outono e primavera.

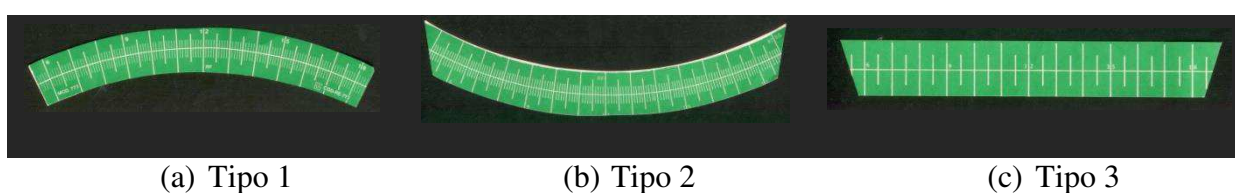


Figura 4.4: Heliogramas: (a) Tipo 1, para a estação do inverno; (b) Tipo 2, para a estação do verão e (c) Tipo 3, para as estações do outono e primavera.

O processo de leitura automatizada da insolação tem início com a digitalização dos heliogramas. O procedimento consiste na digitalização de 1 (um) heliograma por imagem, através do uso do *scanner* acoplado a uma impressora específica, com uma resolução de 96dpi. Em seguida, as imagens digitalizadas são armazenadas em pastas identificadas por um código constituído por um conjunto de letras e dígitos que indica claramente o nome da estação meteorológica de observação, mês e ano. Por exemplo, a sigla NAT062010 indica que as imagens digitalizadas correspondem aos dados de insolação provenientes da estação de Natal, obtidos em junho de 2010. Cada pasta contém o número de imagens referente ao número de dias de cada mês, e são nomeadas de forma sequenciada tais como, 01062010.jpg, 02062010.jpg, e assim sucessivamente.

Objetivando melhorar a visualização da área de interesse (área queimada do heliograma), foi utilizado na face interior do *scanner* um fundo na cor magenta. No sistema similar desenvolvido para curvas retas por Dal Pai (2008), mencionado anteriormente, foi utilizado um fundo na cor vermelha.

Uma imagem digital refere-se a uma função bidimensional de intensidade de luz $f(x,y)$, em que x e y são as coordenadas espaciais e o valor de $f(x,y)$ é proporcional ao brilho,

ou seja, ao nível de cinza da imagem naquele ponto (Gonzalez e Woods, 2000). Assim, uma imagem pode ser descrita como uma matriz onde cada índice de linha e de coluna representa um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz representa o nível de cinza naquele ponto (Huang, 1965). O posicionamento dos heliogramas com relação aos eixos x e y é ilustrado na Figura 4.5.

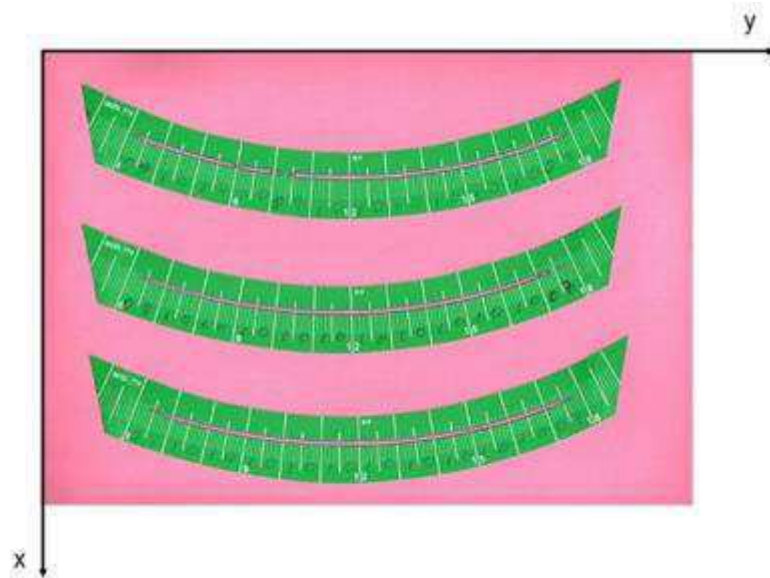


Figura 4.5: Convenção de eixos para representação de imagens digitais.

O modelo foi desenvolvido em linguagem de programação MATLAB. Sucintamente, o modelo realiza vários procedimentos de filtragem e tratamento da imagem e em seguida calcula o número de *pixels* de cor magenta que existe dentro do heliograma, essa informação é quantificada através de um histograma onde o eixo x representa o tamanho do heliograma e o eixo y o número de *pixels* de cor magenta em cada unidade do heliograma (Figura 4.6b). Posteriormente, o modelo binariza o histograma representando a existência de magenta como 1 e a ausência de magenta como 0 (Figura 4.6c).

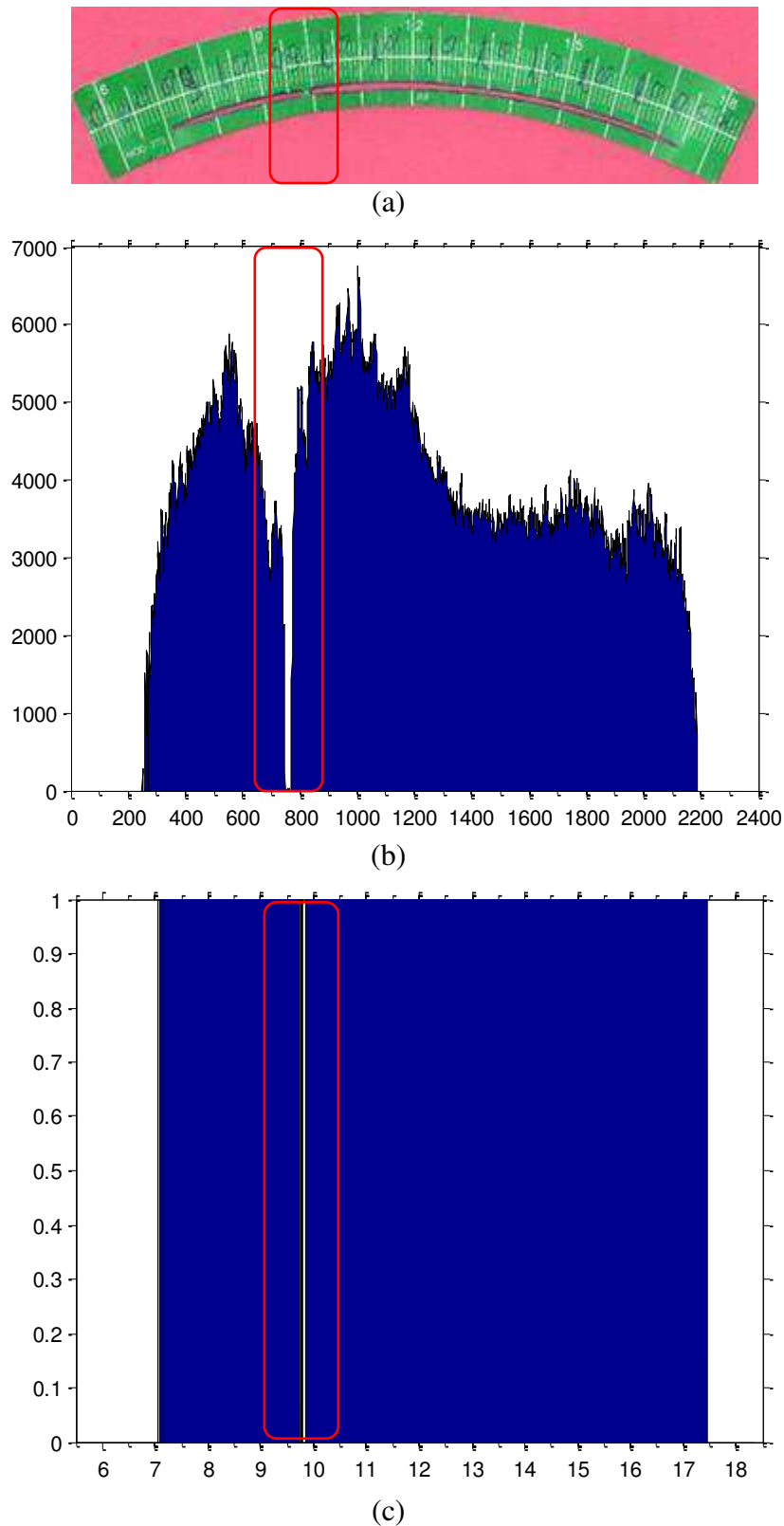


Figura 4.6: Síntese das etapas do processo de leitura automática de heliogramas dentro do SPDH: (a) imagem digitalizada do heliograma, (b) contagem dos pixels da cor magenta referentes à área queimada do heliograma e (c) binarização da informação. Os eixos dos gráficos representam a quantidade de pixels da imagem, sendo o comprimento do heliograma de 2400 pixels.

Erros instrumentais decorrentes do mau funcionamento do heliógrafo ou mesmo decorrentes de situações peculiares tais como mudanças ambientais na área da estação meteorológica podem não ser perceptíveis ao observador, caso não exista o conhecimento adequado sobre o padrão de comportamento da insolação ou a necessidade imediata do processamento e/ou tratamento dos dados observados. Neste sentido, o novo conjunto de dados obtido com o uso do SPDH apresenta vantagens evidentes quando se trata de verificação ou detecção de erros sistemáticos.

Um exemplo claro desta vantagem é facilmente perceptível no exemplo descrito a seguir, resultante da comparação entre as áreas queimadas nos heliogramas obtidos na estação meteorológica de Apodi-RN apresentados na Figura 4.7, para os dias 28, 29 e 30 de setembro de 2011.

Neste caso específico a leitura foi realizada normalmente e o registro dos dados foi feito sem a percepção de que a interrupção no processo da queima do papel entre aproximadamente 13:30 e 14:00 horas se repete de forma sistemática. A interrupção ocorre em todos os casos analisados. É possível concluir que essa é uma situação típica em que existe algum obstáculo causando sombreamento no instrumento. Erros dessa natureza podem ter reflexos substanciais nas estimativas da insolação.

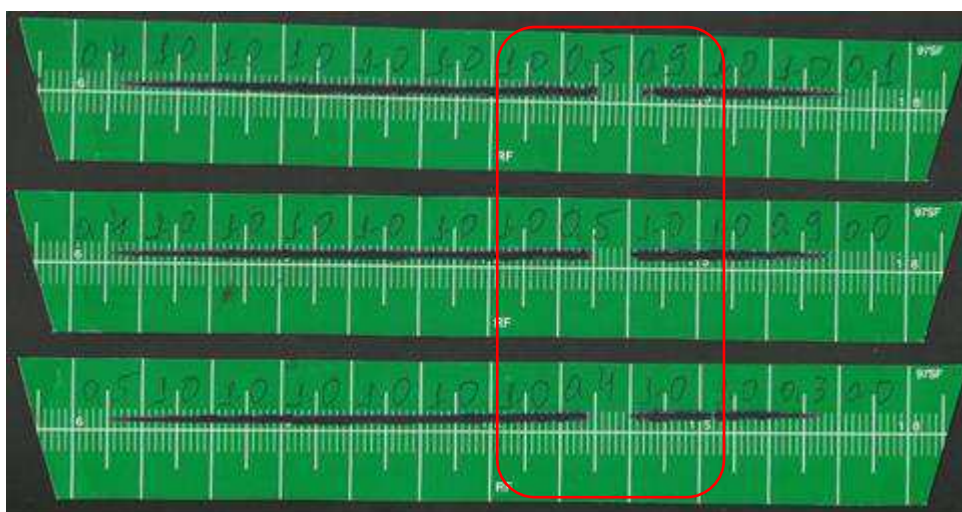


Figura 4.7: Possível sombreamento sobre o heliógrafo nas medições dos dias 28 a 30 de setembro de 2011, na cidade de Apodi-RN.

Nesse aspecto a metodologia proposta pode ser bastante útil como uma ferramenta capaz de padronizar a leitura dos heliogramas tornando os dados mais precisos e, dessa forma, contribuir com o melhoramento das informações geralmente necessárias em planejamentos e implantações de sistemas de energia solar.

A eficiência do modelo foi avaliada com base nos valores dos erros médios e desvios médios quadráticos (DMQ) (Wilks, 2006) calculados pelas equações 12 e 13, respectivamente:

$$\text{Erro Médio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (C - O) \quad (4.12)$$

$$\text{DMQ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (C - O)^2} \quad (4.13)$$

em que N é o número de dias, C é o valor calculado pelo modelo e O é o valor observado.

Além do erro médio e desvios quadráticos também foram determinados coeficientes de correlação de Pearson. O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 (zero) significa que não há relação linear, o valor 1 indica uma relação linear perfeita e o valor -1 também indica uma relação linear perfeita, mas inversa. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis.

O coeficiente de correlação de Pearson é normalmente representado pela letra "r" e a sua fórmula de cálculo é:

$$r = \frac{\sum(C_i - \bar{C})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum(C_i - \bar{C})^2 \sum(O_i - \bar{O})^2}} \quad (4.14)$$

em que C é o valor calculado e O o valor observado.

Para aferir a eficácia do coeficiente de correlação e garantir que as variáveis envolvidas estejam correlacionadas, aplicou-se o teste estatístico t de Student para o nível de significância de 0,01 (Wilks, 2006).

4.6 Técnicas de Análise Multivariada

A disponibilidade da radiação solar (energia total incidente na superfície) depende das condições climáticas e atmosféricas. Portanto, para avaliar o potencial de aproveitamento energético de uma região específica é necessário determinar padrões atmosféricos dominantes associados ao grau de correlação entre a insolação e demais variáveis atmosféricas.

As técnicas de análise de interdependência avaliam relações entre as variáveis (análise de agrupamento, fatorial e componentes principais) e análises de dependência são feitas para avaliar a dependência de uma ou mais variáveis em relação às outras (correlação canônica, análise discriminante).

Neste trabalho foram aplicadas as técnicas de análise fatorial por componentes principais, análise de agrupamento e análise discriminante a matriz de dados diários.

A Análise Fatorial em Componentes Principais (AF) permite identificar fatores não diretamente observáveis, a partir da correlação entre conjuntos de variáveis mensuráveis (Corrar *et al.*, 2007). Na AF, a coleta de informações é dada pela matriz de dados (Pandzic, 1988). Para n observações, existem m variáveis, assim as matrizes de dados normalizadas do conjunto de dados são apresentadas como $m \times n$, e denominada de Z , a partir da qual são obtidas as matrizes de correlação R definidas como:

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{n} - \mathbf{1}} (\mathbf{Z})(\mathbf{Z})^t \quad (4.15)$$

em que $(\mathbf{Z})^t$ é a matriz transposta de Z .

R é diagonalizável por uma matriz A , de mudança de base, denominada de autovetores, por ser simétrica positiva de dimensão $(k \times k)$. A matriz diagonal D cujos elementos diagonais são os autovalores (λ) de R , é expressa por:

$$\mathbf{D} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{A} \quad (4.16)$$

Pela ortogonalidade dos autovetores, a inversa de $A(A^{-1})$ é igual a sua transposta (A^t). Logo, os fatores F_1, F_2, \dots, F_n são obtidas por combinações lineares entre a transposta dos autovetores (A^t) e a matriz de observações (F), ou seja:

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}^t \mathbf{X} \quad (4.17)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} \mathbf{F} \quad (4.18)$$

Cada linha de X corresponde a um fator que forma as séries temporais associadas aos autovalores. Os valores de F do n -ésimo dia podem ser calculados por:

$$X_i = a_{j1}F_1 + a_{j2}F_2 + \dots + a_{jk}F_k + a_{np}F_p \quad (4.19)$$

A solução desta equação é única. Esta solução considera a variação total presente no conjunto das variáveis iniciais, onde o X_1 explica o máximo possível da variância dos dados iniciais, enquanto o X_2 explica o máximo possível da variância ainda não explicada e assim por diante, até o último X_m que contribui com a menor parcela de explicação da variância total dos dados iniciais.

No caso deste estudo, cada fator tem uma porção da variância total dos dados e são ordenadas por ordem decrescente dos autovalores mais significativos de a_1 em A , dada por:

$$F_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \quad (4.20)$$

onde F_i é o fator comum, a_{ij} é o coeficiente do escore fatorial, $(a_{ij} X_j)$ é o escore fatorial e X_j é a variável original envolvida no estudo.

A variância total do sistema (V) é definida como a soma das variâncias das variáveis observadas, assim V é dada por:

$$V = \text{traço } S = \sum_{i=1}^p S_{ii} = \sum_{i=1}^p \lambda_i \quad (4.21)$$

em que S é a variância das variáveis observadas e λ_i são os autovalores. O traço da matriz pode ser entendido também como o somatório da diagonal principal da matriz de correlação.

A variância explicada por cada fator é:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} .100 (\%)$$

(4.22)

O número escolhido de fatores é baseado no critério de truncamento de Kaiser, que considera como mais significativos os autovalores cujos valores sejam maiores do que 1 (Garayalde *et al.*, 1986).

Em geral, a primeira solução obtida com a aplicação da AF não fornece fatores que tenham a interpretação física mais adequada. Para aumentar o poder explicativo dos fatores na análise, foi aplicado-se o procedimento de rotação de fatores através do método VARIMAX (Manly, 2008). O principal objetivo da utilização de fatores rotacionados é facilitar a interpretação dos fatores pois minimiza a ocorrência de uma variável possuir altas cargas fatoriais (correlações) para diferentes fatores permitindo que cada variável seja facilmente identificada com um único fator (Bezerra, 2007).

Foram aplicados testes de significância aos dados, o de esfericidade de *BARTLETT*, que indica se existe relação suficiente entre as variáveis para aplicação da ACP, a análise é válida se os valores do teste forem menores que 0,05. O teste de *KAISER-MEYER-OLKIN* (KMO) que mede o grau de correlação parcial entre as variáveis. Valores do teste próximos de 1 indicam que maiores são as correlações entre as variáveis. Um grau de explicação menor que 0,5 significa que os fatores encontrados na AF não conseguem descrever satisfatoriamente as variações dos dados originais.

A segunda técnica abordada é a Análise de Agrupamentos (AA) e esta técnica envolve basicamente duas etapas. A primeira, parte da estimativa de dissimilaridade entre os indivíduos enquanto que a segunda tem como princípio a determinação de uma técnica de formação de grupos (Albuquerque, 2005). A similaridade é uma medida de correspondência, ou semelhança entre indivíduos a serem agrupados, e pode ser calculada de várias maneiras, os três métodos mais utilizados na Análise de Agrupamentos são as medidas de distância, medidas de correlação e medidas de associação, o usuário faz a escolha de acordo com a sua preferência ou conveniência (Bussab *et al.*, 1990; Corrar *et al.*, 2007).

Em uma AA existem duas premissas importantes, a de que a medida de similaridade ou dissimilaridade na qual o processo de agrupamento se baseia é uma medida válida de similaridade ou dissimilaridade entre os indivíduos. E a de que existe uma justificativa teórica

para estruturar os indivíduos em grupos. Assim como em outras técnicas multivariadas, teoria e lógica orientam e fundamentam a análise de agrupamento (Aaker *et al.*, 2001).

A análise de agrupamento foi realizada utilizando o método de classificação hierárquica de Ward, cuja medida de similaridade usada foi da distância euclidiana quadrática, recomendada para os métodos de agrupamento centroide e de Ward (Everitt, 1993; Wilks, 2006). A distância euclidiana quadrática é obtida pela equação (21):

$$d_{ij}^2 = \sum_{v=1}^p (x_{iv} - x_{jv})^2 \quad (4.23)$$

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;

O critério de agrupamento que será utilizado no trabalho é o proposto por Ward (1963). Segundo Reis (1997), o método de Ward, o qual utiliza como critério a inércia entre grupos, que é medida através da soma dos quadrados dos desvios das observações individuais relativamente às medias dos grupos em que são classificadas. A função objetivo é definida como:

$$W = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})' (x_j - \bar{x}) \quad (4.24)$$

em que 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, que mostra em cada etapa o esquema de aglomeração e a distância entre os grupos (Fávero *et al.*, 2009).

Com o intuito de confirmar os agrupamentos previamente estabelecidos pela AA, é utilizada a técnica de Análise Discriminante (AD). Caso exista algum elemento que não pertença ao grupo, esta análise é capaz de identificá-lo (Hubert, 1994). Os objetivos principais da técnica são: (i) identificar as variáveis que melhor discriminam dois ou mais grupos; (ii)

utilizar estas variáveis para desenvolver funções discriminantes que representam as diferenças entre os grupos; (iii) fazer uso das funções discriminantes para o desenvolvimento de regras de classificação de futuras observações nos grupos (Fávero *et al.*, 2009).

Foi aplicado o teste M de Box (*Box's M*), que permite avaliar a homogeneidade das matrizes de covariância, em cada um dos grupos, para cada uma das variáveis de estudo. Se ao realizar o teste, seu p-valor (sig.) for maior que o nível de significância (0,05) então a igualdade das matrizes encontra sustentação, se for menor a suposição é violada. Assim, o propósito é não rejeitar a hipótese que as matrizes são homogêneas. Logo serão testadas as hipóteses:

H_0 = matrizes são homogêneas

H_1 = matrizes não são homogêneas

Os autovalores representam o percentual de variância explicada em termos de diferenças entre os grupos e é uma medida relativa de quão diferentes os grupos são na função discriminante, ou seja, quanto mais afastados de 1 forem os autovalores, maiores serão as variações entre os grupos explicados pela função discriminante (Pestana e Gageiro, 2003).

O teste seguinte é o de Lambda de Wilks, que segundo Maroco (2003) serve para testar a significância das funções discriminantes e testa as seguintes hipóteses:

H_0 = média populacional dos dois grupos são iguais

H_1 = média populacional dos dois grupos são diferentes.

O objetivo do teste é não aceitar H_0 pois as médias devem ser significativamente diferentes para melhor discriminar os grupos. O lambda de Wilks, que varia de 0 a 1, permite a avaliação da existência de diferenças de médias entre os grupos para cada variável, e valores elevados deste teste indicam a ausência de diferenças entre os grupos.

Após a seleção das variáveis discriminantes para a formação dos grupos, são identificadas as funções discriminantes. A análise discriminante assemelha-se à análise de regressão em termos de objetivos e características, dessa forma sua função geral pode ser definida como:

$$\mathbf{Z}_n = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (4.25)$$

em que:

Z = variável dependente;

α = intercepto (constante);

X_i = variáveis explicativas;

β_i = coeficientes discriminantes para cada variável explicativa.

Enquanto a função discriminante é utilizada como um meio de facilitar a interpretação dos parâmetros das variáveis explicativas, a função linear discriminante de Fisher é utilizada para classificar as observações nos grupos, nesse tipo de função, os valores das variáveis explicativas de uma observação são inseridos nas funções de classificação e calculado para cada grupo, para aquela observação. Assim, dadas p variáveis e g grupos, é possível estabelecer $m = (g - 1; p)$ funções discriminantes que são combinações lineares das p variáveis, de modo que a função de Fisher é dada por:

$$\mathbf{Z}_n = W_1X_1 + W_2X_2 + \dots + W_nX_n \quad (4.26)$$

onde W_i é o vetor de pesos das variáveis para as funções discriminantes e são estimados de modo que a variabilidade dos escores da função discriminante seja máxima entre os grupos (Maroco, 2007). Vale salientar que a função discriminante é utilizada como um meio de facilitar a interpretação dos parâmetros das variáveis explicativas, a função linear de Fisher é utilizada para classificar as observações nos grupos (Fávero *et al.*, 2009).

4.7 Modos de Análise

Uma das possibilidades da associação entre as técnicas multivariadas é expandir a habilidade explanatória da eficiência estatística. Com esse objetivo foram consideradas as três técnicas, análise fatorial, de agrupamento e discriminante, mencionada anteriormente e será estudada a associação entre elas, de forma a obter uma ferramenta mais poderosa na abordagem das questões tratadas no presente estudo.

No primeiro momento foram preservados os dados originais onde todas as variáveis foram consideradas, numa forma mais simples e direta para lidar com os dados, por meio da técnica de AF. Esse procedimento tem como objetivo identificar fatores que expliquem a parte mais significativa da variância dos dados e as respectivas cargas fatoriais.

O segundo passo foi associar a AF com a técnica de AA. Aplicou-se a técnica de AA aos escores fatoriais resultantes da AF, com o objetivo de identificar os grupos homogêneos de variáveis. Em seguida, foi empregada a técnica de AD sobre os grupos formados pela AA. A AD determina as variáveis que discriminam os grupos, valida a técnica da AA e permite confirmar os resultados da AF.

Neste trabalho foi aplicada a análise fatorial por componentes principais no modo P conforme descrito em Yarnal (1992), fundamentalmente para reduzir a dimensão das variáveis e auxiliar na compreensão da estrutura dos dados. A redução ocorre no processo de extração dos fatores comuns e independentes.

Na literatura existem pelo menos seis modos operacionais da AF definidos como: O, P, Q, R, S, e T. A escolha do modo apropriado depende do objetivo do estudo, da disponibilidade de dados e dos parâmetros escolhidos como variáveis, indivíduos ou entidades fixas.

Nas pesquisas em meteorologia e climatologia os modos S e T são mais frequentemente utilizados. Isso ocorre principalmente pela vantagem na determinação de padrões dominantes de circulações atmosféricas (modo T), consideradas informações de extrema importância, independente do tópico abordado bem como pela opção da análise das séries temporais em pontos no espaço (modo S). Uma descrição mais detalhada desses modos pode ser encontrada em Compagnucci e Salles (1997) e em Escobar (2004). No entanto, nos estudos de poluição atmosférica é bastante comum optar pela aplicação no modo P pela necessidade de se trabalhar muitas vezes com poluentes emitidos por uma fonte pontual fixa. Essencialmente, o modo P consiste na utilização de diferentes variáveis associadas com um processo determinado em locais específicos. Esse método vem sendo cada vez mais utilizado em estudos ambientais, agora que muitos pesquisadores estão reconhecendo a utilidade de analisar conjuntos de dados, coletados num local específico (Englehart e Douglas, 2009; Bower *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2005).

5 RESULTADOS

5.1 Análise Multivariada: Estudos de Caso

5.1.1 Junho de 2010: Anômalo Negativo

Segundo o Boletim Climanálise (2010) o mês de junho de 2010 foi diferenciado pelo aumento da convergência de umidade associado à formação de distúrbios no escoamento de leste, o que resultou em chuvas intensas no litoral da Região Nordeste. Contudo, os maiores registros de precipitação estiveram concentrados entre os Estados de Pernambuco e Alagoas. No Estado do Rio Grande do Norte assim como no Estado da Paraíba e na maior parte da Bahia, registrou-se chuvas abaixo da média histórica. Seis episódios de aglomerados convectivos associados à propagação de Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) estiveram bem caracterizados, contudo apenas o quarto episódio ocorrido entre os dias 15 e 17, houve registro de elevados índices de precipitação sobre o litoral do Rio Grande do Norte. Nesse período especificamente, a presença de um cavado na média e alta troposfera, sobre o oceano, bem como a atuação conjunta da Zona de Convergência Intertropical intensificaram os aglomerados de nuvens que se formaram adjacentes à costa leste do Nordeste. Com relação as temperaturas máximas, segundo o Boletim Climanálise (2010) o mês de junho foi marcado por temperaturas máximas mais elevadas, com anomalia positiva de cerca de 2°C na região de Natal-RN.

Na cidade de Natal, em junho de 2010 foram registrados 155,2 mm de precipitação, quando o esperado para o período é de 313,8 mm. Com chuvas abaixo da média climatológica o mês de junho de 2010 foi considerado anômalo negativo (seco). Os valores máximo e mínimo registrados na estação, assim como o valor médio climatológico e o valor registrado no mês de junho de 2010 podem ser observados através do gráfico *boxplot* na Figura 5.1a. Comportamento inverso é verificado para a insolação que durante o mês de junho de 2010 registrou 229,4 horas de brilho do Sol quando o esperado para o período é de 192,7 horas (Figura 5.1b).

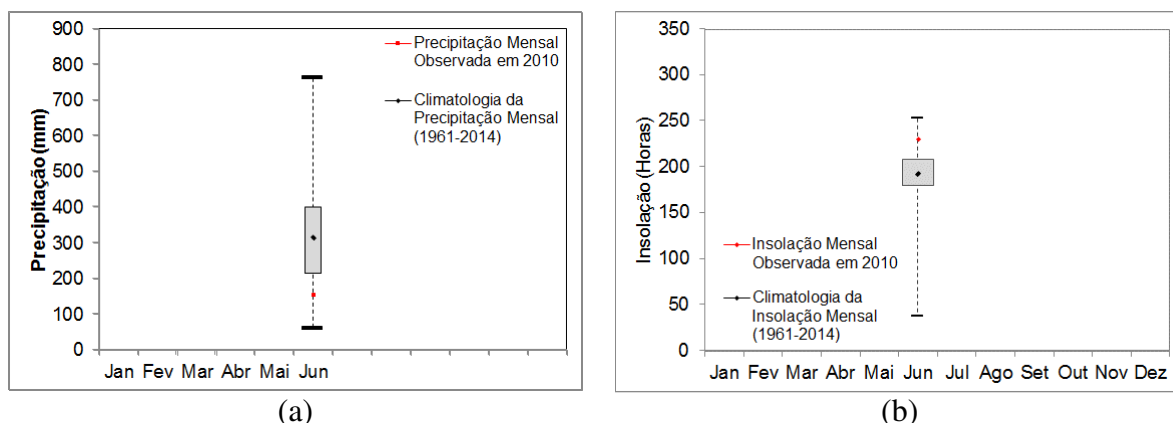


Figura 5.1: Boxplot (a) da climatologia de precipitação mensal e (b) da climatologia de insolação mensal para a cidade de Natal-RN referente ao período de 1961 a 2014. O ponto em vermelho representa os valores mensais de precipitação e insolação observados em junho de 2010 (Fonte dos dados: INMET).

5.1.1.1 Análise Fatorial

Os resultados da aplicação da AF foram validados com base nos testes KMO e de Esfericidade de *Bartlett*. Autovalores e porcentagens de variância acumulada podem ser observados na Tabela 5.1. Em junho de 2010 três fatores explicaram 77,1% da variância total dos dados.

Tabela 5.1: Autovalores e porcentagens de variância.

Junho 2010			
Fator	Autovalor	Percentual de variância	Percentual cumulativo de variância
1	5,158	39,5	39,5
2	3,512	19,8	59,3
3	1,350	17,7	77,1

O primeiro fator é responsável por 39,5% da variabilidade dos dados e é composto pelas variáveis Irradiação Global Horizontal (GHI), Insolação (I), Temperatura máxima (Tmx), Radiação de Onda Longa (ROL), Déficit de Pressão de Vapor (DPV), frequência do setor Sudeste (SE) e frequência do setor Sul (S) (Figura 5.2). Observam-se cargas positivas altas em praticamente todas as variáveis, apenas no caso da variável S (frequência do setor Sul) a correlação é negativa.

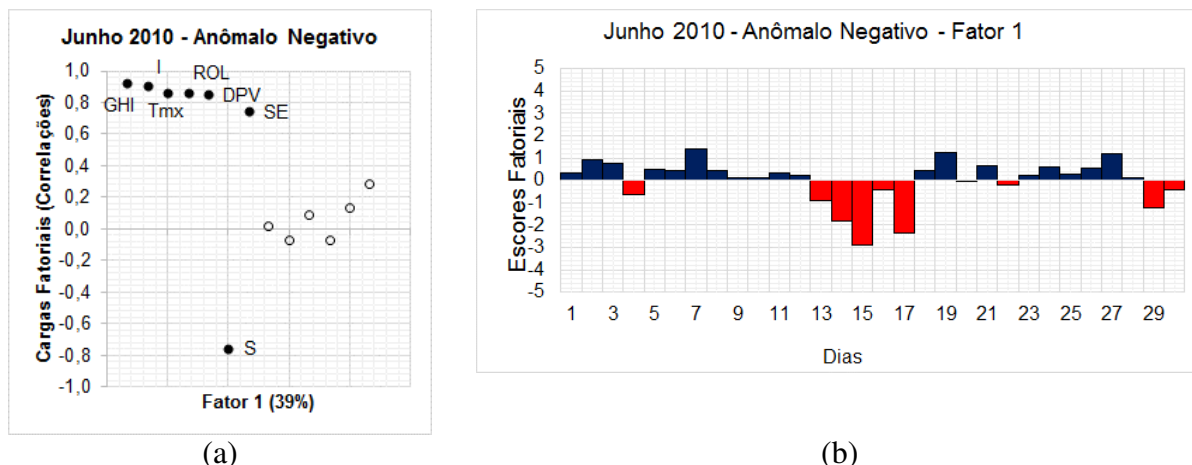


Figura 5.2: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao primeiro fator (a) e escores fatoriais referentes ao primeiro fator (b).

A série temporal associada ao primeiro fator apresenta um padrão com contribuições significativas e valores negativos (escores maiores que -2) nos dias 15 e 17 de junho de 2010. Valores também significativos de escores negativos foram registrados nos dias 4, 13, 14 e 29 (Figura 5.2b). Este resultado indica que nesses dias ocorreu diminuição significativa da GHI, I, Tmx, ROL, DPV e da frequência do setor Sudeste. No dia 15 foi registrado apenas 1803 W/m²/dia (Figura 5.3b) e 1 hora apenas de insolação (Figura 5.3d). Houve uma diminuição na temperatura máxima de aproximadamente 2,6°C em relação ao dia anterior. O registro de 26,6°C para a temperatura máxima corresponde a cerca de 4°C abaixo da média mensal que foi de 30,3°C (Figura 5.3c). A queda acentuada nos valores destas variáveis pode ter relação com o aumento da nebulosidade observado na cidade de Natal-RN. Comportamento similar é observado nos dias 4, 17 e 29.

Segundo o Boletim Climanálise (2010), no decorrer do mês de junho de 2010, seis episódios de aglomerados convectivos associados à propagação dos DOLs estiveram bem caracterizados e atuaram na costa leste do Nordeste. Desse total três episódios atuaram sobre a cidade de Natal ocasionando grandes acumulados de precipitação, o normal é que haja uma frequência maior de episódios atuando sobre a cidade de Natal.

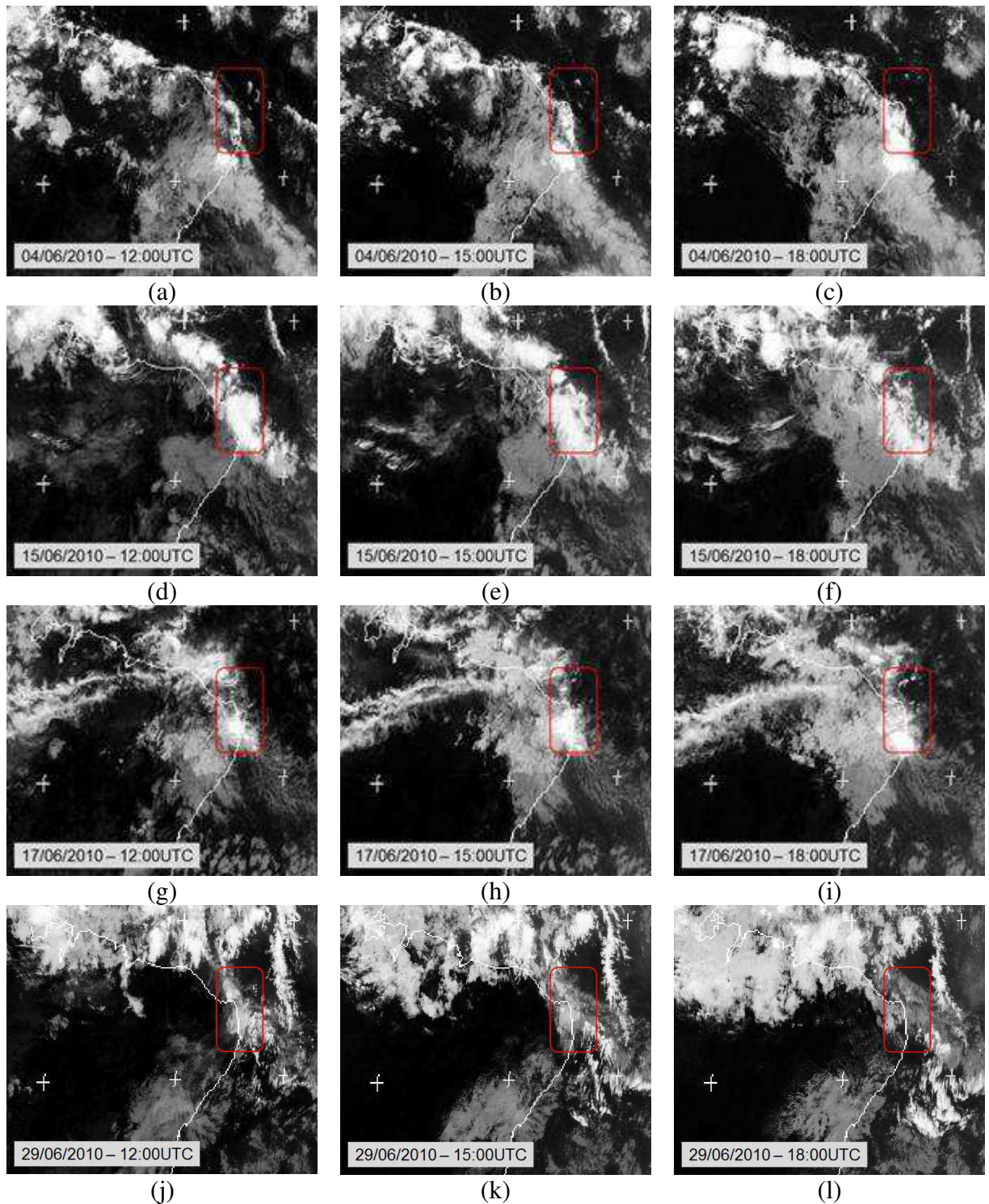


Figura 5.4: Imagens do satélite meteorológico GOES-12m na banda do infravermelho térmico para os dias: 04 de junho de 2010 às (a) 12:00 UTC, (b) 15:00 UTC e (c) 18:00 UTC; dia 15 às (d) 12:00 UTC, (e) 15:00 UTC e (f) 18:00 UTC; dia 17 às (g) 12:00 UTC, (h) 15:00 UTC e (i) 18:00 UTC; dia 29 às (j) 12:00 UTC; (k) 15:00 UTC e (l) 18:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é $HL = UTC - 3$ horas. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://www.sat.dundee.ac.uk>).

O grupo de variáveis retidos no primeiro fator está associado com processos de transferência de energia solar. Correlações positivas superiores a 0,8 entre as variáveis DPV e ROL relacionadas com o teor de umidade na atmosfera indicam que o processo de transferência de energia é modulado pela nebulosidade. Em outras palavras, o percentual de nuvens representa um fator determinante na modulação da radiação solar que atravessa a atmosfera e desempenham um papel importante na transmitância atmosférica da radiação de ondas curtas e longas (Souza Echer *et al.*, 2006). A nebulosidade exerce influência no ciclo diurno da temperatura do ar, pois reflete a variação da radiação solar que chega à superfície da Terra ao longo do dia, ou seja, uma maior temperatura do ar é consequência do maior aquecimento da superfície, através do aquecimento radiativo. Em dias em que o céu permanece sem nuvens representa períodos com maior disponibilidade de energia solar para os processos biofísicos e também para o aproveitamento energético, enquanto os dias com maior nebulosidade representam períodos com menor disponibilidade de energia.

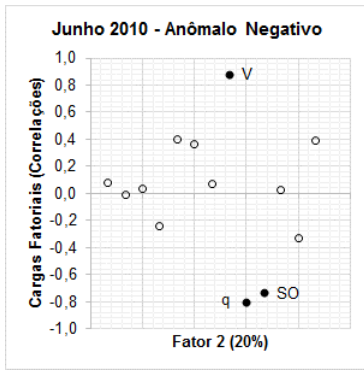
Essa energia afeta também o comportamento de outros parâmetros como o Déficit de Pressão de Vapor (DPV). O DPV representa uma maior ou menor concentração de vapor d'água na atmosfera (Rodrigues *et al.*, 2010). No mês de junho de 2010 o DPV apresentou uma maior variabilidade, com valores de 1 a 11 hPa. Nos dias em que a atmosfera está com grande teor de umidade esperam-se valores menores de DPV.

Segundo Espírito Santo (2009) as nuvens são extremamente eficientes na absorção da radiação de ondas longas, atuando no espectro de radiação na faixa de comprimento de onda referente à janela atmosférica de 8 a 12 μ m. Devido à relação entre a Radiação de Onda Longa e a nebulosidade, resultados de análises com ROL são frequentemente utilizados como indicadores de atividade convectiva intensa. Valores de ROL menores que 240 W/m² representam convecção profunda (Souza Filho *et al.*, 2006; Okoola, 1998).

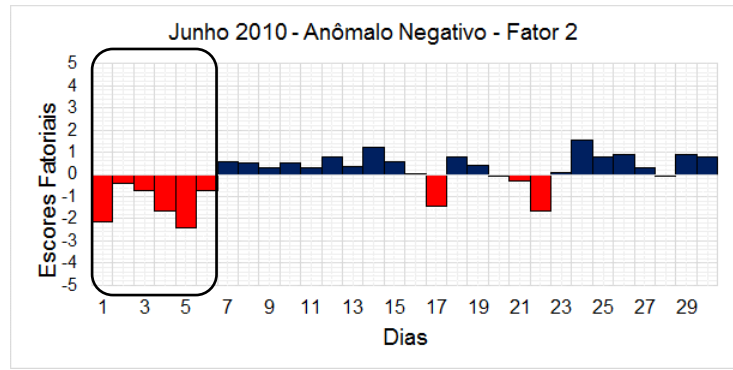
O desenvolvimento e organização da nebulosidade e consequentemente a atividade convectiva na região de Natal ao longo de todo o período diurno pode ser observada através das imagens de satélite do dia 15, apresentadas nas Figuras 5.4d, 5.4e e 4.4f. Durante o dia 15 o valor médio diário de ROL foi de 187,5W/m² (Figura 5.3f). Vale salientar que maior percentual de nebulosidade favorece processos de espalhamento e absorção da radiação incidente e interfere diretamente no aquecimento radiativo da superfície. Ometto (1991) verificou que os processos de espalhamento e absorção fazem com que apenas 51% da radiação incidente no topo da atmosfera cheguem à superfície.

Um controle importante é exercido pelo vento (circulação) sobre as condições ambientais e conseqüentemente na transferência de energia. No mês de junho de 2010 verificou-se maior predominância de ventos do setor Sul (S) equivalente a 47,66% dos casos analisados. A segunda maior frequência foi do setor Sudeste (SE) com 42,19% dos casos. Ventos do setor SE mostram uma contribuição positiva na maior parte do período, e forte associação com condições atmosféricas de pouca nebulosidade e maiores índices de radiação solar. No entanto, a frequência do setor Sul (S) nos dias 4, 15, 17 e 29, associadas com os escores negativos elevados indica mudança no padrão do escoamento médio e nas condições atmosféricas locais (Figura 5.3g e 5.3h). Esse resultado mostra que mudanças na direção do vento podem representar indicativos de variações importantes na nebulosidade e precipitação no período analisado possivelmente associados a presença de DOLs.

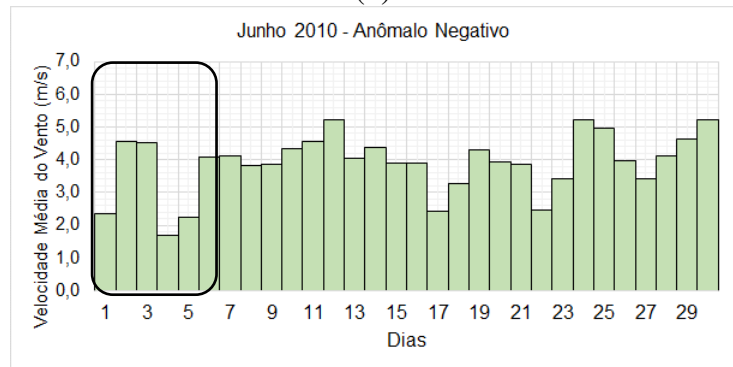
O segundo fator, que explica 19,8% da variância dos dados, agrupou as variáveis intensidade do vento (V) negativamente correlacionada com SO (frequência do setor Sudoeste) e a umidade específica (q) (Figura 5.5a). Os maiores valores de umidade específica foram registrados entre os dias 1 e 6, no dia 17 e no dia 22. Nesse período são observados também baixos valores da intensidade do vento. Menor intensidade de vento significa também maior variabilidade da direção do vento. Dessa forma, alta frequência do setor Sudoeste foi evidenciada no segundo fator, de forma bem menos expressiva quando comparados com as frequências dos setores Sudeste e Sul ilustradas nas Figura 5.5g e 5.5h.



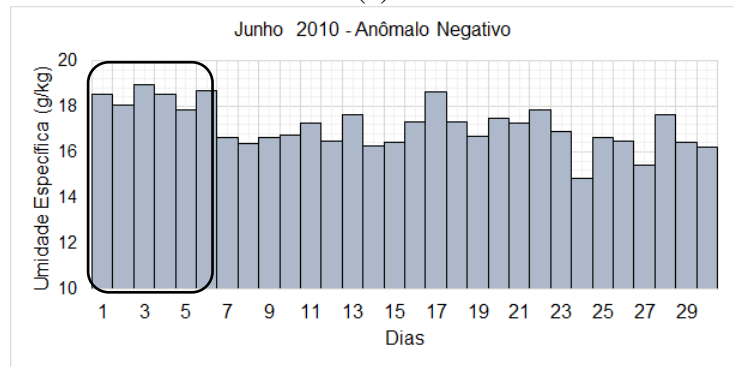
(a)



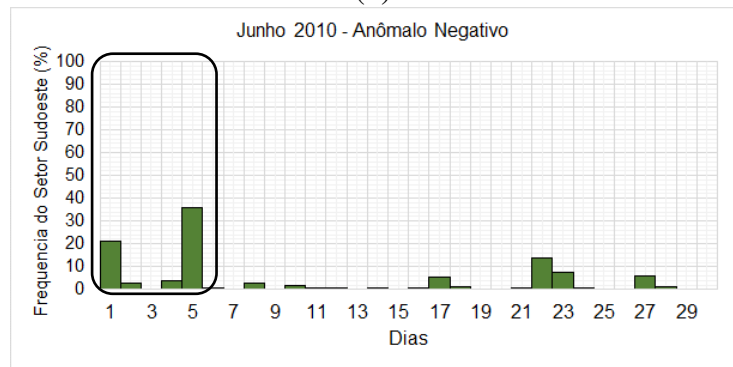
(b)



(c)



(d)



(e)

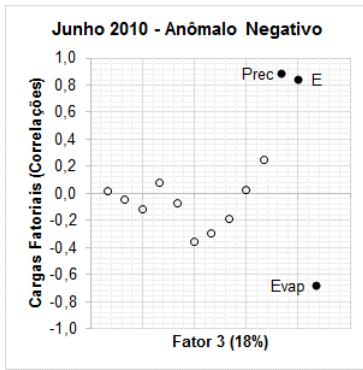
Figura 5.5: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao segundo fator (a), Escores Fatoriais referentes ao segundo fator (b), Velocidade Média do Vento em m/s (c), Umidade Específica em g/kg (d) e Frequência da direção do vento do setor Sudoeste em % (e) para o mês de junho de 2010. Os retângulos pretos indicam período com registro dos maiores escores negativos.

Na evolução temporal do F2 (segundo fator) apresentada na (Figura 5.5b), o dia 24 se destaca pela contribuição positiva, com escore maior que 1,5. Verifica-se que neste dia foi registrado o menor valor de umidade específica do mês (Figura 5.5d). Comportamento similar foi observado na estação meteorológica do Aeroporto Augusto Severo. Na mensagem METAR (Tabela 5.2) é possível observar valores de intensidade do vento da ordem de 14 kt (7,14 m/s). No mesmo horário tem-se registro de temperatura do ar igual a 30°C e da temperatura do ponto do orvalho igual a 20°C. A temperatura do ponto de orvalho é uma variável capaz de caracterizar a temperatura e a umidade do ar em superfície (Eltahir e Paul, 1996). Quanto maior o ponto de orvalho maior a concentração de vapor d'água na atmosfera. A diferença entre os valores da temperatura e da temperatura do ponto de orvalho pode estar relacionada com uma atmosfera seca (ar seco = umidade específica baixa). A Tabela 5.2 mostra ainda também, que é observado excelente visibilidade (código 9999) e nenhum registro de chuva.

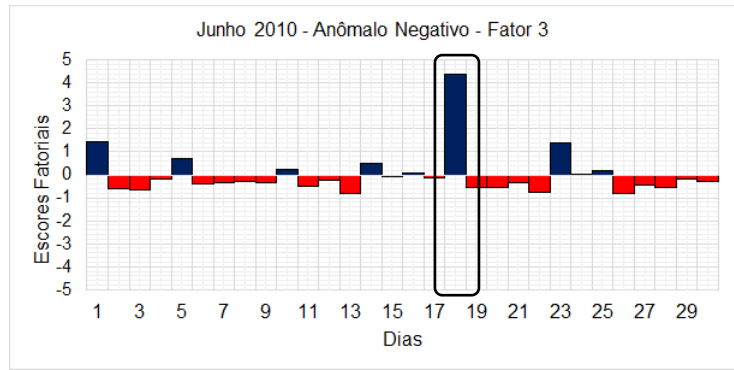
Tabela 5.2: Dados METAR coletados no Aeroporto Augusto Severo, localizado na cidade de Parnamirim, região metropolitana de Natal no dia 24 de junho de 2010.

Data	Hora	Condições Climáticas Registradas
24/06/2010	241500Z	130 14KT 9999 SCT027 30/20 Q1016=

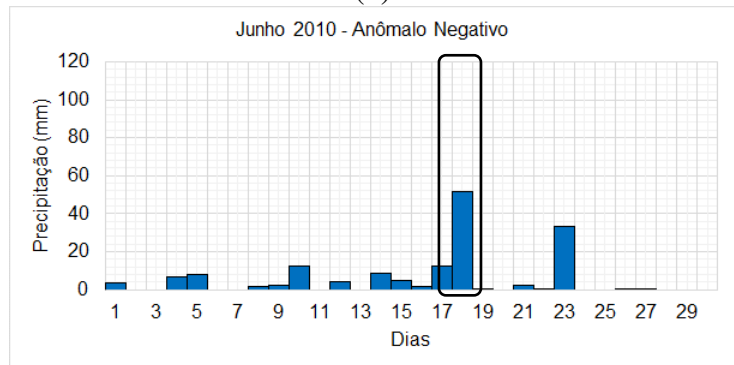
O terceiro fator que explica 17,7% da variância dos dados, agrupou as variáveis, Precipitação (Prec), frequência do vento do setor Leste (E), positivamente correlacionadas e a Evaporação (Evap) negativamente correlacionada (Figura 5.6a). A série temporal do terceiro fator evidencia contribuições positivas em alguns dias do período, sendo particularmente significativa, (escore superior a 4), no dia 18 (Figura 5.6b). Esse resultado indica forte correlação entre a precipitação registrada no dia 18 e a alta frequência (60%) de vento do setor leste (Figura 5.6c). Contudo esse padrão não se repetiu nos dados horários registrados na estação meteorológica do Aeroporto Augusto Severo.



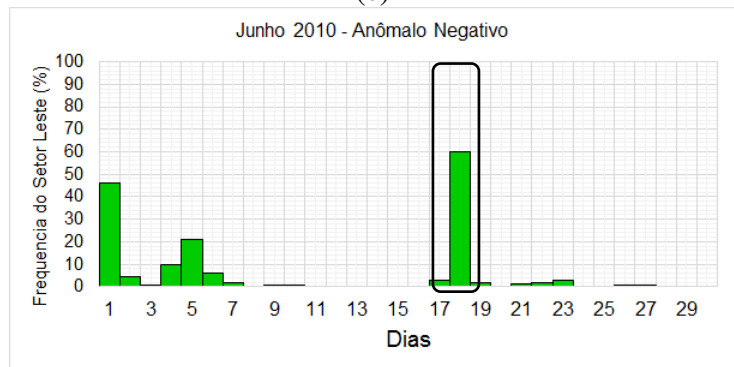
(a)



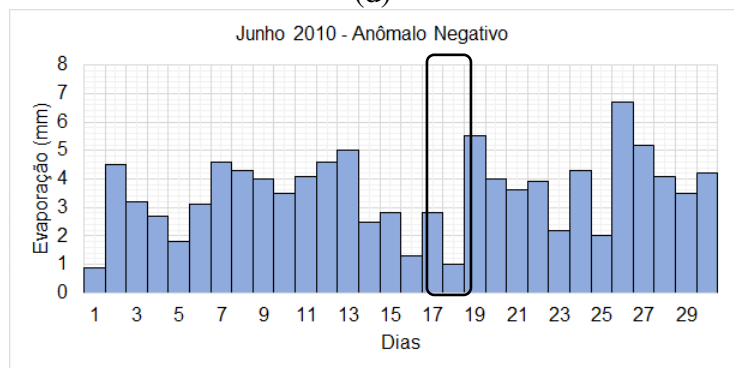
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.6: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao terceiro fator (a), escores fatoriais referentes ao terceiro fator (b), acumulado diário de precipitação em mm (c), frequência do setor leste em % (d) e evaporação em mm (e) para o mês de junho de 2010. O retângulo preto indica o período com registro do maior escore positivo.

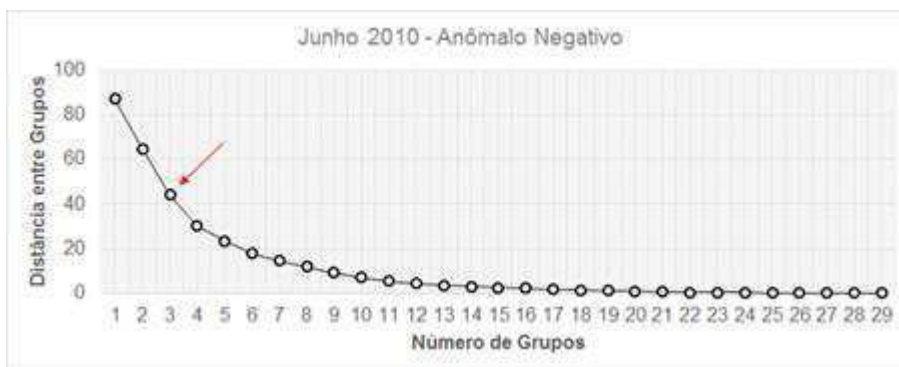
Informações contidas nas mensagens METAR do Aeroporto Augusto Severo permitiram verificar que praticamente não foram registradas ocorrências de chuva no dia 18. Praticamente todas as informações de chuva (RA – Chuva, -RA – Chuva leve, RADZ – Chuva/Chuvisco, -RADZ – Chuva/Chuvisco Leve, DZ – Chuvisco), codificadas no METAR foram registradas no dia anterior (17 de junho) como pode ser visto na Tabela 5.3. Uma explicação para a aparente incoerência é que o dado de chuva utilizado nas análises estatísticas corresponde ao total diário obtido na estação meteorológica de superfície de Natal cujo método de estimativa segue o padrão do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Assim, o valor da chuva registrado no dia 18 corresponde ao total de chuva acumulada desde as 12 UTC do dia 17 até as 12 UTC do dia 18.

Tabela 5.3: Dados horários METAR coletados no Aeroporto Augusto Severo, localizado na cidade de Parnamirim, região metropolitana de Natal para os dias 17 e 18 de junho de 2010. A cor amarela assinala condições de tempo significativo em horários entre horas inteiras. Os códigos relacionados à presença de chuva foram destacados.

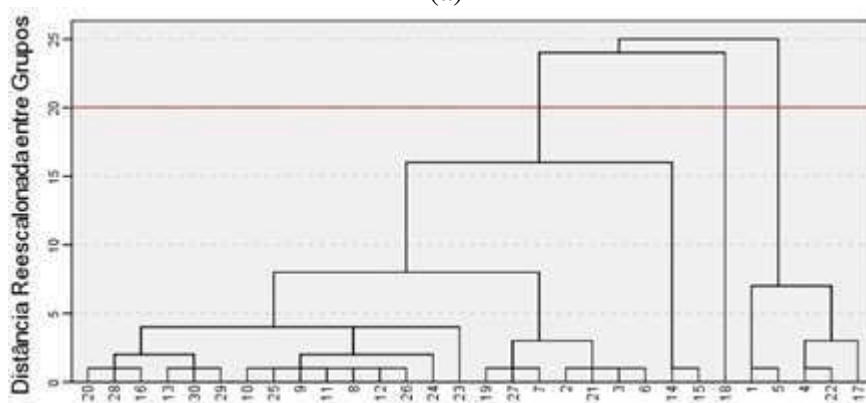
Data	Hora	Condições Climáticas Registradas
17/06/2010	170200Z	19008KT 7000 RA FEW008 SCT020 BKN070 24/23 Q1014=
17/06/2010	170300Z	18005KT 5000 RA SCT005 OVC070 24/23 Q1013=
17/06/2010	170930Z	19005KT 2500 RA BKN016 SCT020 BKN080 23/23 Q1012=
17/06/2010	170947Z	22006KT 6000 RA SCT016 SCT027 BKN080 23/23 Q1012=
17/06/2010	171040Z	19005KT 1500 RADZ BKN005 SCT016 BKN080 24/23 Q1013=
17/06/2010	171100Z	19008KT 3000 RADZ BKN010 SCT016 BKN080 24/23 Q1013=
17/06/2010	171112Z	18007KT 5000 -RA SCT010 SCT016 BKN080 24/23 Q1013=
17/06/2010	171134Z	19008KT 2000 -RADZ SCT005 SCT016 OVC080 24/23 Q1013=
17/06/2010	171234Z	19009KT 9999 SCT008 SCT023 BKN080 25/24 Q1013=
17/06/2010	171242Z	19008KT 4000 -DZ SCT008 SCT023 BKN080 25/24 Q1013=
17/06/2010	171322Z	18006KT 2000 RADZ BKN004 SCT023 OVC080 25/24 Q1013=
17/06/2010	171429Z	17009KT 1000 RADZ BKN006 SCT023 BKN080 25/24 Q1013=
17/06/2010	171500Z	16003KT 4500 -RADZ BKN006 OVC070 25/24 Q1012 RERA=
17/06/2010	171600Z	21007KT 3000 RADZ BKN006 SCT018 OVC070 25/25 Q1011=
17/06/2010	171700Z	13006KT 4000 -RA BKN006 SCT018 OVC070 25/25 Q1011 RERA=
17/06/2010	171800Z	15005KT 8000 -RA BKN009 SCT020 OVC070 25/25 Q1011=
17/06/2010	172000Z	16004KT 2500 RA BKN008 SCT020 FEW025TCU BKN070 25/25 Q1011=
17/06/2010	172100Z	08006KT 4500 -RA BKN008 SCT018 BKN070 24/23 Q1012 RERA=
17/06/2010	172300Z	21004KT 9000 -RA FEW008 BKN016 24/24 Q1012=
18/06/2010	180200Z	15007KT 1500 RA BKN005 SCT016 24/24 Q1013=
18/06/2010	180225Z	04003KT 9999 -RA SCT010 SCT016 24/24 Q1013 RERA=

5.1.1.2 Análise de Agrupamentos

Com o objetivo de identificar dias com características parecidas, ou seja, detectar grupos de dias homogêneos em função da similaridade das observações aplicou-se a técnica de Análise de Agrupamentos aos escores fatoriais, de forma a garantir que todas as premissas da técnica fossem atendidas. Os resultados podem ser observados na forma de dendrograma, em que no eixo das abscissas estão os dias e no eixo das ordenadas o nível de agregação (distância) entre os grupos. A determinação do número de grupos no dendrograma foi feita de maneira visual, utilizando-se a técnica de inércia entre saltos (Oliveira Silva, 2011). Através da curva de inércia têm-se uma análise subjetiva quanto ao número de grupos de dias homogêneos existentes (Figura 5.7).



(a)



(b)

Figura 5.7: Curva de inércia (a) e dendrograma (b) para junho 2010.

A análise permitiu separar três grupos homogêneos. Os dias pertencentes a cada grupo podem ser visualizados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamentos de Ward com medida de distância euclidiana quadrática e média dos valores formados por cada grupo.

Junho 2010 – Anômalo Negativo													
Grupo 1				Grupo 2				Grupo 3					
2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30				18				1, 4, 5, 17, 22					
Grupos	GHI (kWh/m ²)	V (m/s)	E (%)	SE (%)	S (%)	SO (%)	Tmx (°C)	Prec (mm)	I (horas)	Evap (mm)	ROL (W/m ²)	DPV (hPa)	q (g/kg)
1	5,5	4,1	0,8	46,0	52,1	1,0	30,5	3,0	8,3	3,9	268,2	7,8	16,9
2	5,7	3,7	59,9	23,7	0,3	1,2	30,4	51,5	8,1	1,0	283,5	8,0	17,3
3	4,4	2,7	16,4	27,6	35,7	16,1	29,7	6,3	6,3	2,4	272,7	5,3	18,3

Observa-se que os dias que compõem o Grupo 1 possuem em média os maiores valores de Insolação (I), Velocidade do vento (V) e Temperatura máxima (Tmx), o Grupo 2 é composto pelo dia 18 que em média apresentou valores médios e também indica o maior acumulado de precipitação, enquanto que o Grupo 3 possui a média dos menores índices registrados (Figura 5.8b e 5.8d). Outro resultado importante é que tanto a Irradiância Global Horizontal (GHI) quando o Déficit de Pressão de Vapor (DPV) apresentaram comportamento diferente. Levando-se em consideração a GHI e o DPV, o Grupo 1 é composto por dias que em média tiveram os valores médios, o Grupo 2 possui a média dos maiores índices e o Grupo 3 possui a média dos menores índices (Figura 5.8a e 5.8c). Portanto, com a técnica de AA não foi possível identificar com precisão qual dos conjuntos de variáveis seria responsável pela homogeneidade dos grupos, sendo eles definidos de acordo com suas intensidades. Nesse sentido a aplicação da Análise Discriminante tem o papel de complementar a análise e identificar a(s) variável(is) discriminante(s) dos grupos.

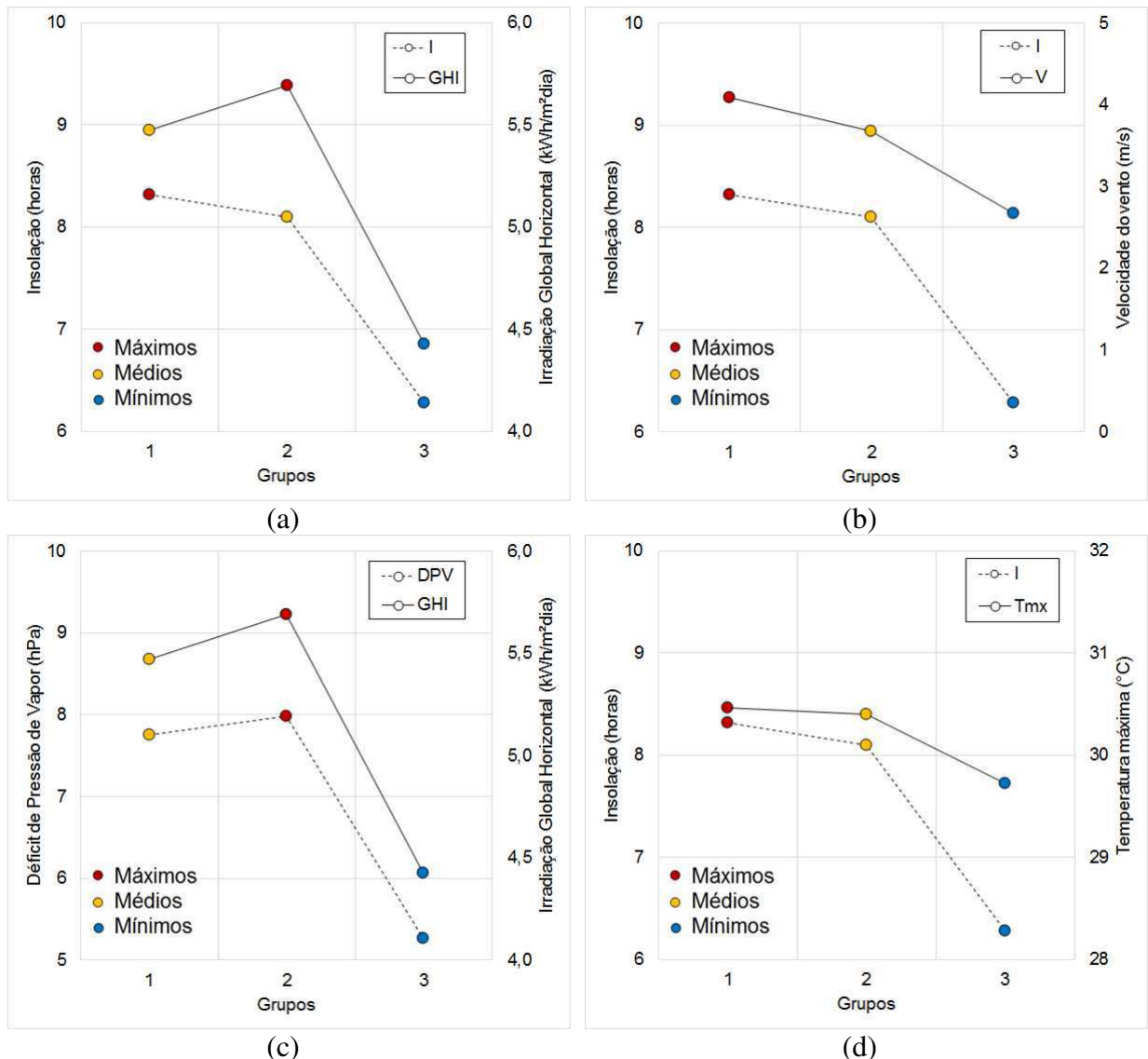


Figura 5.8: Valores médios dos grupos homogêneos formados na análise de agrupamento para o mês de junho de 2010: (a) Insolação (horas) e Irradiação Global Horizontal ($\text{kWh/m}^2\text{dia}$), (b) Insolação (Horas) e Velocidade do vento (m/s), (c) Déficit de Pressão do Vapor (hPa) e Irradiação Global Horizontal (W/m^2) e (d) Insolação (horas) e Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$).

5.1.1.3 Análise Discriminante

De forma a comprovar os grupos formados pela AA, aplicou-se a técnica de Análise Discriminante (AD), que é uma técnica robusta, pois além de testar os agrupamentos, avalia também a porcentagem de classificação correta de cada grupo e destaca quais as variáveis discriminadoras dos grupos.

Para aplicação da técnica, a variável dependente nesta análise foi definida como a classificação dos grupos obtidos pela AA: Grupo 1, Grupo 2 e Grupo 3. A análise discriminante foi utilizada para testar esses grupos.

Através do teste de igualdade das médias dos grupos foi possível identificar quais variáveis tem melhor poder de discriminação entre os grupos, em função do baixo valor da estatística de Wilks' Lambda (Fávero *et al.*, 2009) para cada mês estudado. Corrar *et al.* (2007) explicam que quanto menor a estatística da variável, melhor a discriminação dos grupos encontrados.

Na verificação da premissa da igualdade entre as matrizes de covariância foi aplicado o teste M de Box. Ele testa a hipótese nula de igualdade das matrizes de covariância através do nível de significância obtido, se o resultado do teste foi satisfatório, com valores de significância maiores que 0,05. Este teste tem como hipótese nula que não há diferença entre os grupos, ou seja, que há homogeneidade das matrizes de covariância para os grupos em análise (Fávero *et al.*, 2009).

Com base no teste de Lambda de Wilks, duas funções foram estatisticamente relevantes para separar os grupos ao nível de 99% de significância. Observa-se na Tabela 5.5 que a primeira função foi responsável por 62% da variância total e que a segunda função apresentou 38% de toda a variância.

Tabela 5.5: Autovalores das funções discriminantes e seus respectivos valores de porcentagem de variância acumulada e correlação canônica.

Junho 2010 – Anômalo Negativo				
Função	Autovalores	% de variância	% de variância acumulada	Correlação canônica
1	3,080	62,0	62,0	0,869
2	1,886	38,0	100,0	0,808

A AD gera dados relativos à função discriminante canônica obtida que servem para indicar a capacidade ou poder explicativo da mesma, em nível estatístico. As correlações canônicas associadas às funções discriminantes também estão definidas na Tabela 5.5 e correspondem à razão entre a variação entre os grupos e a variação total. Através da matriz de estrutura (Tabela 5.6) pode-se observar que as variáveis que discriminam os grupos são a intensidade do vento (V), precipitação (Prec) e déficit de pressão de vapor (DPV). A primeira função que possui maior variância teve maior contribuição da variável V com correlações de

0,777 enquanto que a segunda função a maior contribuição foi dada pela Prec com 0,943 de correlação (Tabela 5.6).

Tabela 5.6: Matriz de Estrutura

Junho 2010 – Anômalo Negativo		
Variável	Função 1 (62%)	Função 2 (38%)
V	0,777*	-0,484
DPV	0,305	-0,109
Prec	0,192	0,943*

* Correlações fortes

A análise de agrupamentos vista anteriormente indicou que as médias dos grupos encontrados estavam possivelmente relacionadas aos valores de intensidade da insolação (I) e da irradiância global horizontal (GHI). Através da AD verificou-se que as variáveis com maior poder discriminante (V, DPV e Prec) influenciam diretamente na homogeneidade dos grupos. Esse conjunto de variáveis está associado às alterações no padrão de nebulosidade observada no mês de junho de 2010. As mudanças podem estar associadas à atuação dos DOLs.

5.1.2 Junho de 2011: Anômalo Positivo

Segundo o Boletim Climanálise (2011) o mês de junho de 2011 foi marcado pela atuação conjunta de aglomerados convectivos associados aos DOLs. Na maioria dos episódios registrados, a organização convectiva em aglomerados também tem associação com influência de cavados na média e alta troposfera. A atuação conjunta desses fenômenos favoreceu a ocorrência de chuvas mais persistentes na faixa leste do Nordeste ao longo de todo o mês, principalmente entre o Rio Grande do Norte e Sergipe. Na cidade de Natal, o último episódio de DOL, no dia 29, ocasionou chuvas no leste do Rio Grande do Norte, onde os totais diários excederam 70 mm.

O total mensal de precipitação registrado na cidade de Natal foi de 445,4 mm, quando o esperado para o período é de 313,8 mm. Verifica-se, portanto, que o mês de junho de 2010 se enquadra como anômalo positivo (chuvoso), ou seja, com chuvas acima da média climatológica. Os valores máximo e mínimo registrados na estação, assim como o valor médio climatológico e o valor registrado no mês de junho de 2011 podem ser observados através do gráfico *boxplot* apresentado na Figura 5.9a. Comportamento inverso é verificado

para a insolação que durante o mês de junho de 2011 registrou 148,8 horas de brilho do Sol quando o esperado para o período é de 192,7 horas (Figura 5.9b).

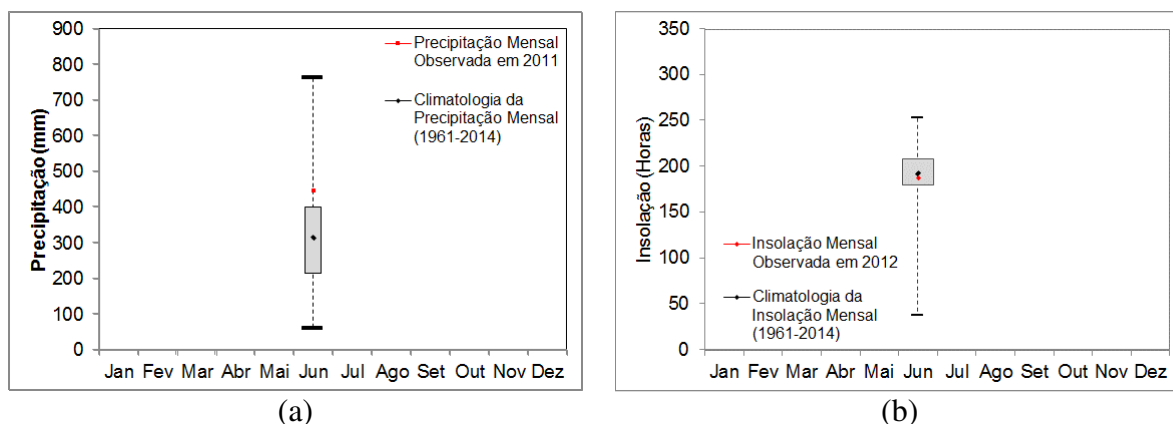


Figura 5.9: Boxplot (a) da climatologia de precipitação mensal e (b) da climatologia de insolação mensal para a cidade de Natal-RN referente ao período de 1961 a 2014. O ponto em vermelho representa os valores mensais de precipitação e insolação observados em junho de 2011 (Fonte dos dados: INMET).

5.1.2.1 Análise Fatorial

Na AF para junho de 2011 foram extraídos 4 fatores que juntos explicam 85,41% da variância dos dados (Tabela 5.7).

Tabela 5.7: Autovalores e porcentagens de variância.

Junho 2011			
Fator	Autovalor	Percentual de variância	Percentual cumulativo de variância
1	3,966	32,91	32,91
2	2,168	19,10	52,01
3	1,976	17,80	69,81
4	1,695	15,60	85,41

O primeiro fator agrupou as variáveis Irradiação Global Horizontal (GHI), Insolação (I), Radiação de Onda Longa (ROL), Temperatura máxima (Tmx) e Déficit de Pressão de Vapor (DPV), correlacionadas positivamente (Figura 5.10a). A série temporal associada ao primeiro fator apresenta contribuições negativas (escores menores que -1,5) nos dias 9, 19 e 29 de junho de 2011. Valores que se destacam também são observados nos dias 7, 8, 16 e 27 (Figura 5.10b). Esses resultados indicam que nesses dias houve diminuição da GHI, I, ROL, Tmx e DPV visíveis nas ilustrações apresentadas nas Figuras 5.10 (c-g).

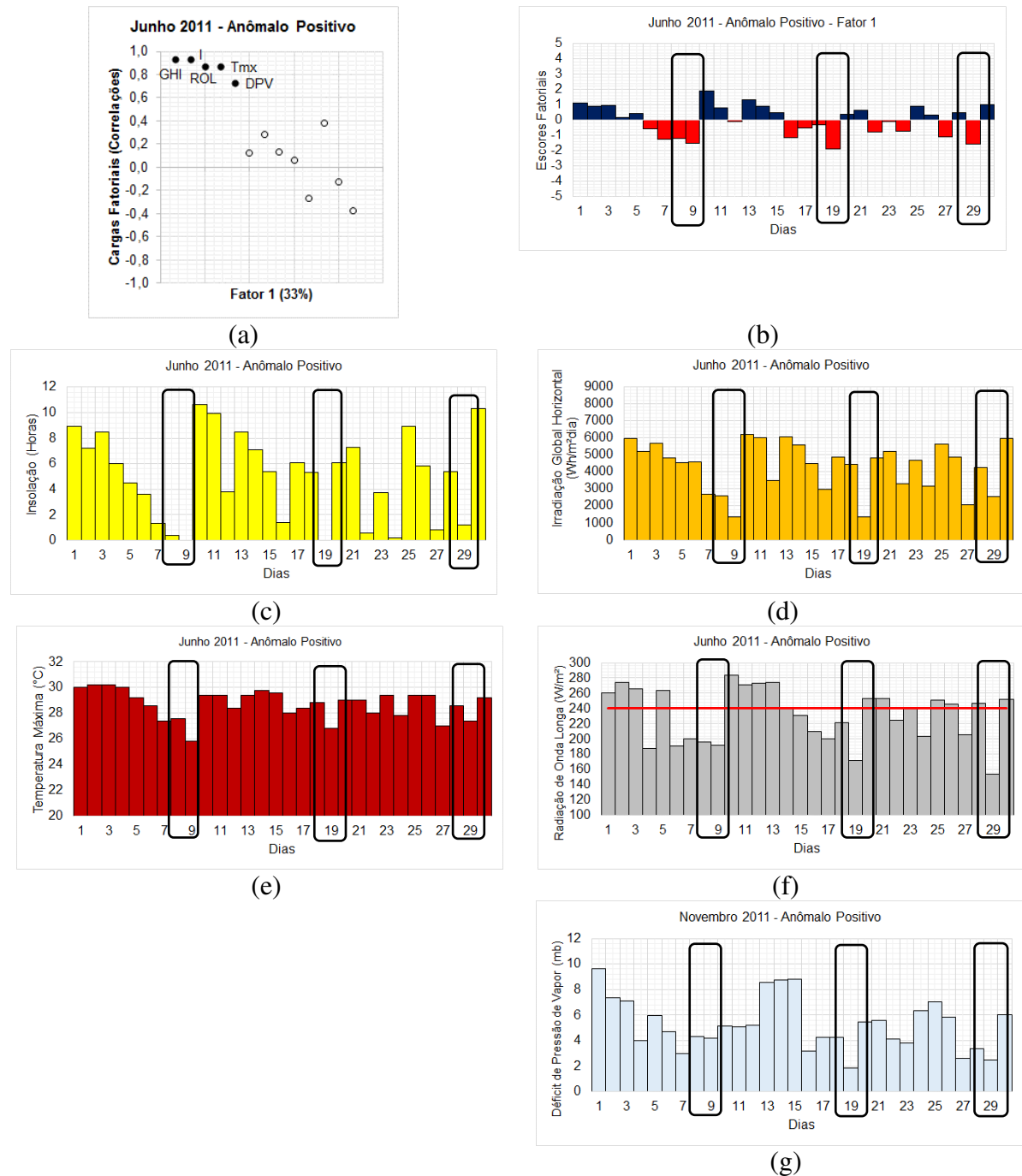


Figura 5.10: Cargas Fatoriais (correlações) referentes ao primeiro fator (a), Escores Fatoriais referentes ao primeiro fator (b), Insolação em horas (c), Irradiância Global Horizontal em W/m^2 (d), Temperatura máxima em $^{\circ}C$ (e), Radiação de Onda Longa em W/m^2 na qual a linha vermelha indica o limiar (f) e Déficit de Pressão de Vapor em hPa (g) para o mês de junho de 2011. Os retângulos pretos indicam os dias com os escores negativos de magnitude mais elevada.

Ao longo de todo o mês de junho de 2011 pode-se observar valores de ROL abaixo de $240 W/m^2$ (Figura 5.10f). Conforme mencionado anteriormente, valores de ROL abaixo desse limiar é um grande indicativo de forte atividade convectiva. Nos dias 9 e 19 foram registrados apenas 1375 e $1359 Wh/m^2$ dia de GHI, respectivamente (Figura 5.10b), e

nenhuma insolação (Figura 5.10c). Observa-se uma diminuição na temperatura máxima de cerca de 1,8 e 2°C, respectivamente, em relação ao dia anterior com o registro no dia 9 de 25,8°C, a menor temperatura máxima registrada no mês, e de 26,8°C no dia 19 (Figura 5.10e). A queda acentuada nos valores destas variáveis está relacionada ao aumento da nebulosidade na cidade de Natal-RN. Comportamento similar ocorreu também nos dias 27 e 29.

Atividade convectiva intensa pode ser observada nas imagens do satélite GOES 12 no canal do infravermelho térmico apresentadas na Figura 5.11. Pode-se observar a presença de nuvens convectivas profunda sobre região de Natal, nos dias 9, 19, 27 e 29, em vários horários do período diurno desses dias, indicando com isso a forte redução ou quase ausência de insolação no período. Segundo o Boletim Climanálise (2011) durante os dias 9 e 19 (Figuras 5.11a-c e 5.11d-f, respectivamente) foram caracterizadas Linhas de Instabilidade atuando na costa leste do Rio Grande do Norte. No dia 19 notou-se a presença de um cavado na média e alta troposfera, com eixo próximo à costa nordeste da Região Nordeste, contribuindo para o desenvolvimento da linha de Cumulonimbus até a costa do Rio Grande do Norte.

Semelhante ao caso analisado anteriormente, o primeiro fator do mês de junho de 2011 (anômalo positivo) está associado com o processo de transferência de energia. A alta correlação entre as variáveis, ROL e DPV com o F1 ressaltam a importância da quantidade e tipo de nuvens e processos radiativos.

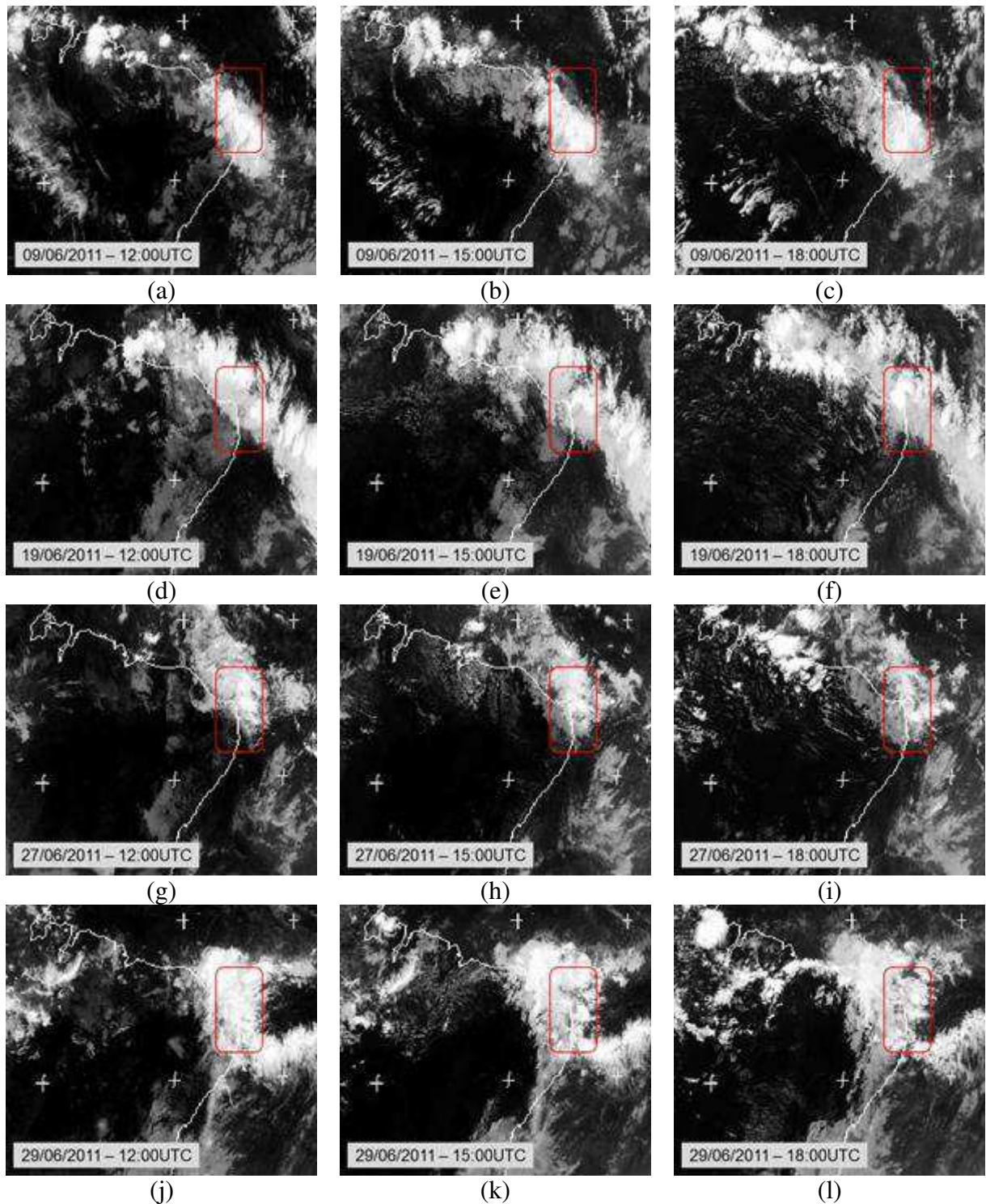


Figura 5.11: Imagens do satélite meteorológico GOES-12 na banda do infravermelho térmico para os dias: 09 de junho de 2011 às (a) 12:00 UTC, (b) 15:00 UTC e (c) 18:00 UTC; dia 19 às (d) 12:00 UTC, (e) 15:00 UTC e (f) 18:00 UTC; dia 27 às (g) 12:00 UTC, (h) 15:00 UTC e (i) 18:00 UTC; dia 29 às (j) 12:00 UTC; (k) 15:00 UTC e (l) 18:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é $HL=UTC-3$ horas. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://www.sat.dundee.ac.uk>).

O segundo fator (F2) explica 19,10% da variância total dos dados e apresenta correlação positiva com as variáveis, Evaporação (Evap) e Velocidade do Vento (V) e correlação negativa com a frequência do setor Leste (E) (Figura 5.12).

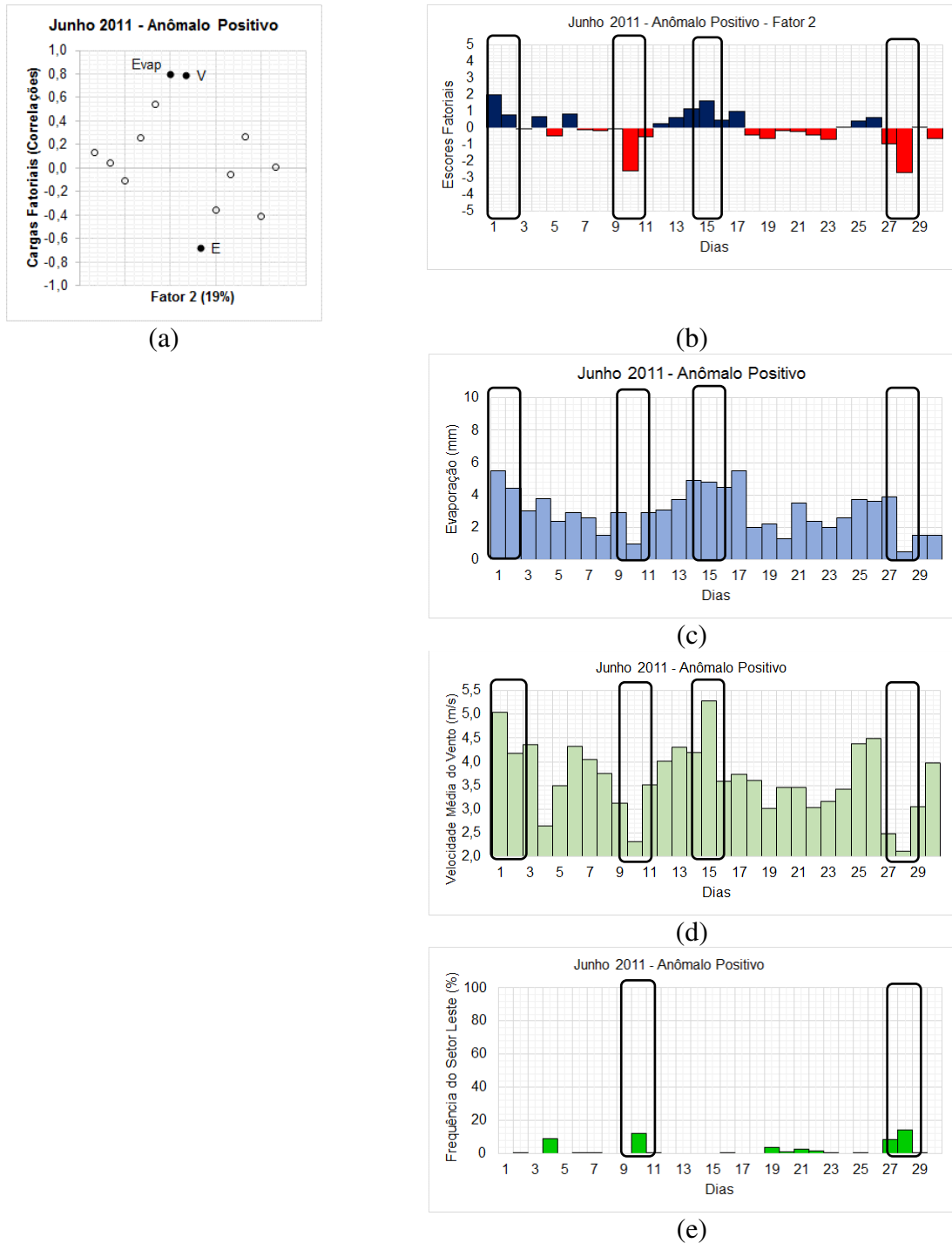


Figura 5.12: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao segundo fator (a), escores fatoriais referentes ao segundo fator (b), evaporação em mm (c), velocidade do vento em m/s (d) e frequência do setor leste em % (e) para o mês de junho de 2011. Os retângulos pretos indicam o período com escores de magnitude mais elevada.

A série temporal associada ao segundo fator apresentada na Figura 5.12b, mostra contribuições negativas (escores com magnitudes elevadas) nos dias 10 e 28. Nestes dias foram registradas as menores intensidades do vento e menores valores de evaporação. Contribuições positivas (escores com magnitudes elevadas) são observadas nos dias 1 e 15 e estão associadas às maiores intensidades do vento e elevadas taxas de evaporação. Frequência mais alta do setor Leste coincide com vento fraco.

Verifica-se que o segundo fator está diretamente relacionado à circulação local agindo diretamente sobre a evaporação, indicando uma maior capacidade evaporativa nos dias de vento mais intenso.

O terceiro fator, por sua vez, explica 17,8% da variância total dos dados e é composto pelas variáveis Precipitação (Prec) e frequência do setor Sudoeste (SO) correlacionada positivamente (Figura 5.13).

A série temporal associada ao terceiro fator apresenta contribuições positivas (escores acima de 1,5) nos dias 4 e 29 de junho de 2011 (Figura 5.13b). Esses dias correspondem aos maiores totais diários de precipitação (Figura 5.13c) e valores da velocidade do vento de intensidade menor, conforme ilustrado na Figura 5.13c.

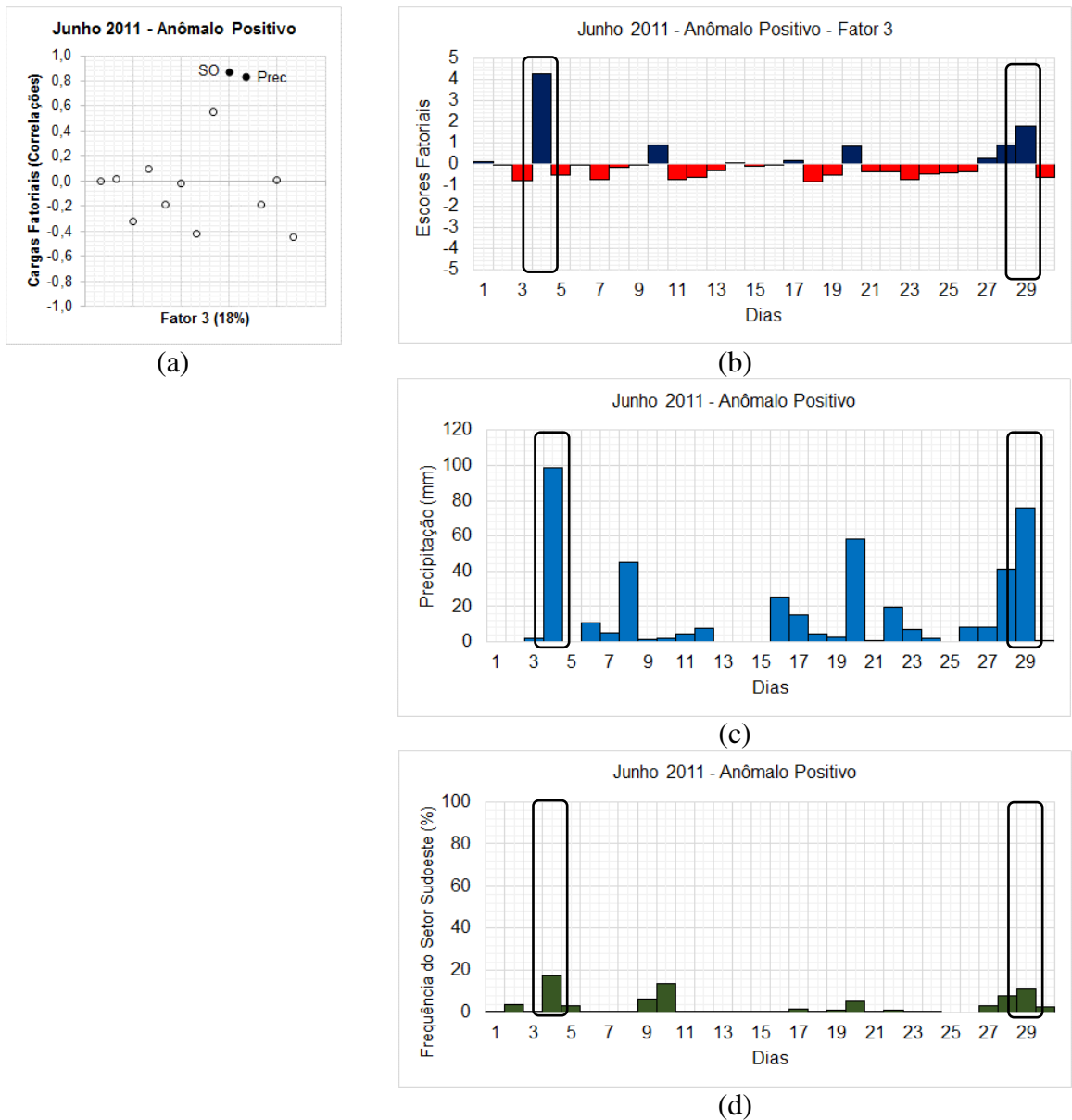
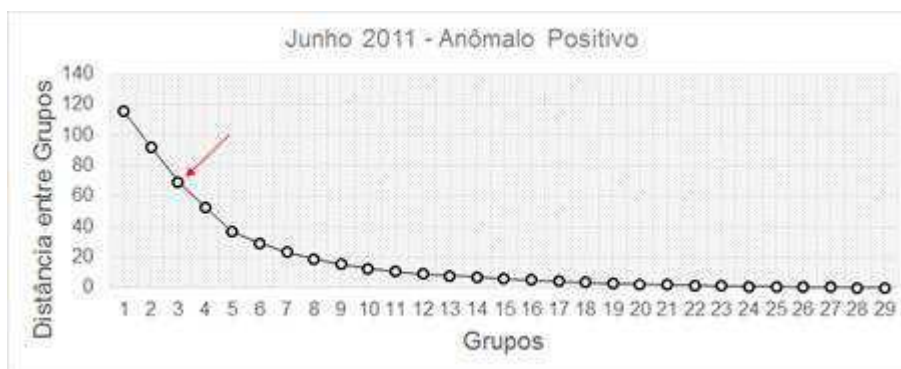


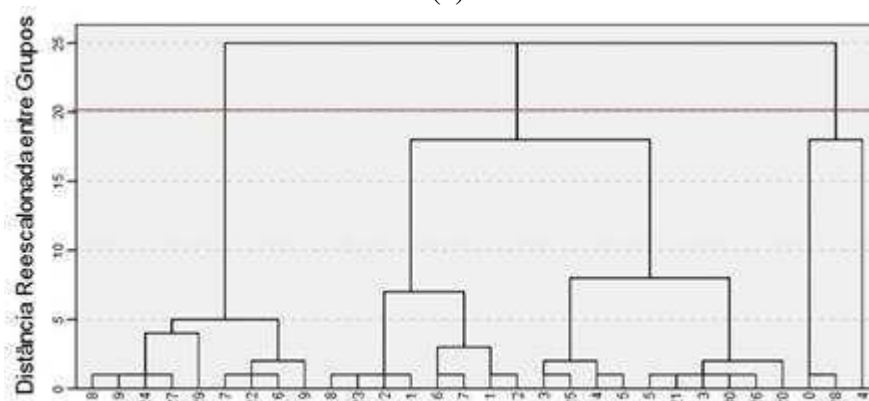
Figura 5.13: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao terceiro fator (a), escores fatoriais referentes ao terceiro fator (b), total diário de precipitação mm (c) e frequência do setor Sudoeste em % (d) para o mês de junho de 2011. Os retângulos pretos indicam o período com escores de magnitude mais elevada.

5.1.2.2 Análise de Agrupamentos

A aplicação da AA aos dados de junho de 2011 permitiu isolar três grupos de dias homogêneos, como pode ser observado na curva de inércia e dendrograma apresentados na Figura 5.14. Os dias que constituem cada grupo estão dispostos na Tabela 5.8.



(a)



(b)

Figura 5.14: Curva de inércia (a) e dendrograma (b) para junho 2011.

Tabela 5.8: Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamentos de Ward com medida de distância euclidiana quadrática e média dos valores formados por cada grupo.

Junho 2011 – Anômalo Positivo													
Grupo 1				Grupo 2					Grupo 3				
7, 8, 9, 16, 19, 22, 24, 27, 29				1, 2, 3, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 23, 25, 26, 30					4, 10, 28				
Grupos	GHI (kWh/m ²)	V (m/s)	E (%)	SE (%)	S (%)	SO (%)	Tmx (°C)	Prec (mm)	I (horas)	Evap (mm)	ROL (W/m ²)	DPV (hPa)	q (g/kg)
1	5,5	4,1	0,8	46,0	52,1	1,0	30,5	3,0	8,3	3,9	268,2	7,8	16,9
2	5,7	3,7	59,9	23,7	0,3	1,2	30,4	51,5	8,1	1,0	283,5	8,0	17,3
3	4,4	2,7	16,4	27,6	35,7	16,1	29,7	6,3	6,3	2,4	272,7	5,3	18,3

Observa-se que os dias que compõem o Grupo 1 têm, em média, os menores valores de Irradiação Global Horizontal (GHI), Radiação de Onda Longa (ROL) e frequência do setor Sudeste (SE); o Grupo 2 é, em média, composto pelos dias com valores médios enquanto que o Grupo 3 é formado, em média, por dias com os maiores valores registrados (Figura 5.15a, 5.15b e 5.15c). Outro resultado importante é que tanto a Insolação (I) quanto a Temperatura Máxima (Tmx) e a Umidade Específica (q) apresentaram comportamentos diferentes.

Levando-se em consideração a I, Tmx e q, o Grupo 1 é composto por dias que em média tiveram os valores mínimos, o Grupo 2 tem a média dos valores médios e o Grupo 3 possui a média dos menores índices (Figura 5.15c e 5.15d). Esse resultado indica que apenas com a aplicação da AA não é possível indicar com precisão as variáveis determinantes pela homogeneidade dos grupos, sendo eles definidos de acordo com suas intensidades. Nesse sentido a aplicação da Análise Discriminante tem o papel de complementar a análise e identificar a(s) variável(is) discriminante(s) dos grupos.

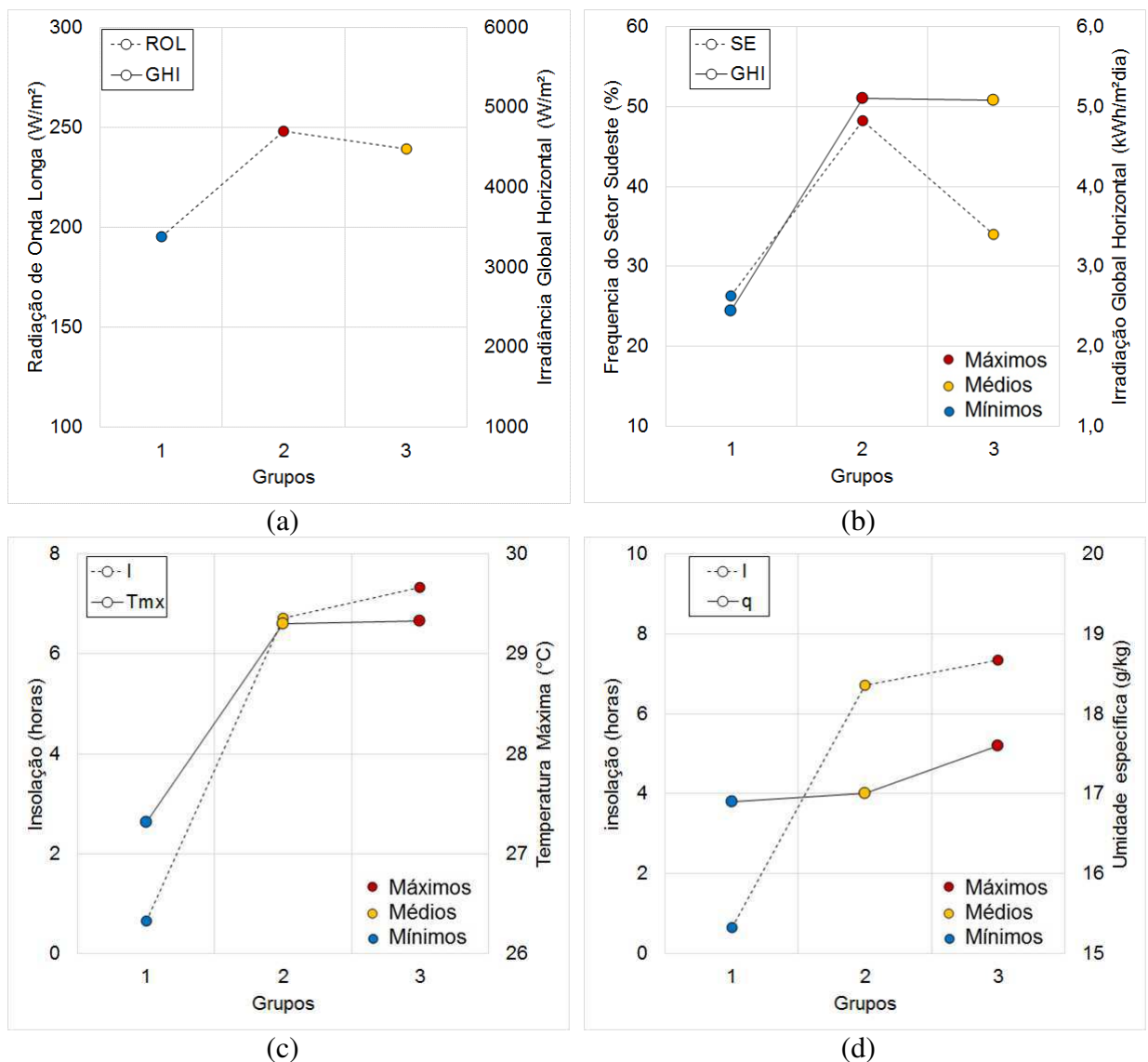


Figura 5.15: Valores médios dos grupos homogêneos formados na análise de agrupamento para o mês de junho de 2011: Irradiância Global Horizontal (kWh/m²/dia) e (a) Radiação de Onda Longa (W/m²) e (b) Frequência do Setor Sudeste (%); Insolação (Horas) e (c) Temperatura máxima (°C) e (d) Umidade específica (g/kg).

5.1.2.3 Análise Discriminante

Com a aplicação da Análise Discriminante (AD) verificou-se que de acordo com o teste de Lambda de Wilks, duas funções foram estatisticamente relevantes para separar os grupos ao nível de 99% de significância. Observa-se na Tabela 5.9 que a primeira função foi responsável por 74,5% da variância total e que a segunda apresentou 25,5% de toda a variância.

Tabela 5.9: Teste Lambda de Wilks.

Junho 2011 – Anômalo Positivo				
Função	Autovalores	% de variância	% de variância acumulada	Correlação canônica
1	3,067	74,5	74,4	0,868
2	1,049	25,5	100,0	0,715

As correlações canônicas associadas às funções discriminantes evidenciam que a primeira função contribui para demonstrar as diferenças entre os grupos, pois explica 74,4% da variância dos dados. Através da matriz de estrutura pode-se observar que as variáveis que efetivamente discriminam os grupos foram a Irradiação Global Horizontal (GHI) e a velocidade do vento (V). A maior contribuição foi dada GHI com correlações de 0,996 em seguida por V com 0,950 de correlação (Tabela 5.10). Esse resultado indica que os agrupamentos formados têm a homogeneidade discriminada basicamente pela variabilidade da GHI e eliminam a hipótese de que a insolação estaria discriminando os grupos homogêneos.

Tabela 5.10: Matriz de Estrutura

Junho 2011 – Anômalo Positivo		
Variável	Função 1 (74%)	Função 2 (26%)
GHI	0,996*	-0,084
V	0,311	0,950*

* Correlações fortes

5.1.3 Junho de 2012: Anômalo Normal

Segundo o Boletim Climanálise (2012) o mês de junho de 2012 foi marcado por totais de precipitação próximos da média climatológica. Foram observados quatro episódios

de aglomerados convectivos associados a distúrbios no escoamento de leste, o que resultou em chuvas intensas no leste do Nordeste, principalmente no litoral do Estado da Paraíba.

Na cidade de Natal, o acumulado de precipitação registrado durante o mês de junho de 2012 foi de 302,1 mm, quando o esperado para o período é de 313,8 mm. Verifica-se que o mês de junho de 2012 foi considerado dentro da normalidade, ou seja, com chuvas em torno da média climatológica. Os valores máximo e mínimo registrados na estação, assim como o valor médio climatológico e o valor registrado no mês de junho de 2012 podem ser observados através do gráfico *boxplot* ilustrados na Figura 5.16a. Comportamento similar é verificado para a insolação que durante o mês de junho de 2012 registrou 192 horas de brilho do Sol quando o esperado para o período é de 192,7 horas (Figura 5.16b).

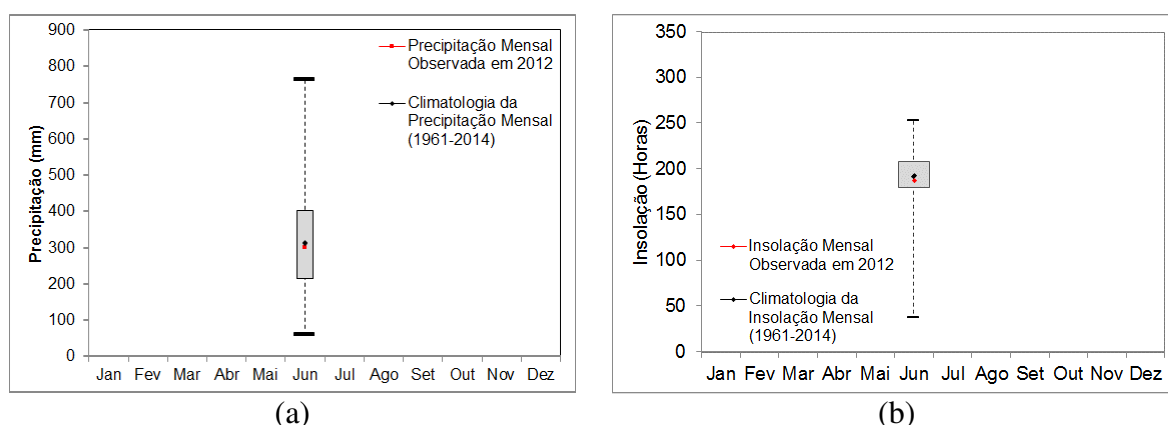


Figura 5.16: Boxplot (a) da climatologia de precipitação mensal e (b) da climatologia de insolação mensal para a cidade de Natal-RN referente ao período de 1961 a 2014. O ponto em vermelho representa os valores mensais de precipitação e insolação observados em junho de 2012 (Fonte dos dados: INMET).

5.1.3.1 Análise Fatorial

Os Autovalores e porcentagens de variância acumulada estão mostrados na Tabela 5.11. Em junho de 2012 quatro fatores explicaram 82,5% da variância total dos dados.

Tabela 5.11: Autovalores e porcentagens de variância.

Junho 2012			
Fator	Autovalor	Percentual de variância	Percentual cumulativo de variância
1	6,016	37,1	37,1
2	1,994	20,7	57,8
3	1,694	14,0	71,8
4	1,015	10,7	82,5

O primeiro fator é responsável por 37,1% da variabilidade dos dados e é composto pelas variáveis Irradiação Global Horizontal (GHI), Insolação (I), Temperatura Máxima (Tmx), Radiação de Onda Longa (ROL), Déficit de Pressão de Vapor (DPV) e Frequência do setor Sudeste (SE) (Figura 5.17a). Observam-se cargas positivas altas em praticamente todas as variáveis.

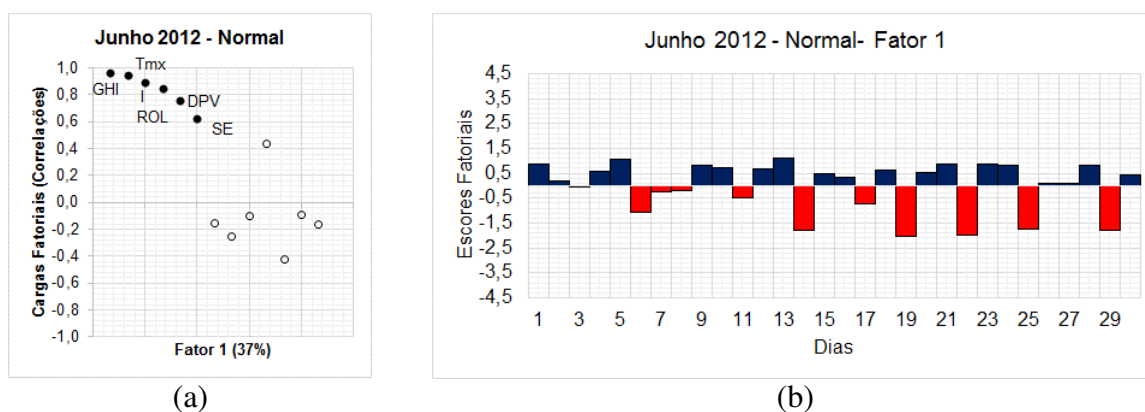


Figura 5.17: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao primeiro fator (a) e escores fatoriais referentes ao primeiro fator (b).

A série temporal associada ao primeiro fator apresenta contribuições negativas (escores negativos de magnitude elevada) nos dias 14, 19, 22, 25 e 29 de junho de 2012 (Figura 5.18b). Este resultado indica que nesses dias ocorreu diminuição com maior intensidade da GHI, I, Tmx, ROL, DPV e da Direção (Predominância) do Ventos do setor Sudeste (SE). No dia 22 foram registrados apenas 1352 W/m²dia (Figura 5.18b) e não houve registro de insolação (Figura 5.18c). Verificou-se a diminuição da temperatura máxima de cerca de 3°C em relação ao dia anterior. O registro de 26,2°C corresponde a 2°C abaixo da média de temperaturas máximas do mês que foi de 28,5°C (Figura 32d). A queda acentuada nos valores destas variáveis tem relação com o aumento da nebulosidade sobre a cidade de Natal-RN.

Segundo o Boletim Climanálise (2012), no decorrer do mês de junho de 2012, quatro episódios de aglomerados convectivos associados à propagação dos DOLs estiveram bem caracterizados e sobre a costa leste do Nordeste, contudo esses eventos tiveram maior intensidade sobre o estado da Paraíba. Dois desses episódios ocorreram sobre a cidade de Natal ocasionando valores elevados de precipitação. Este fato pode ser comprovado nas imagens do satélite GOES 12 no canal do infravermelho térmico apresentadas na Figura 5.19

que ilustra a formação de aglomerados convectivos sobre a região da cidade de Natal nos dias 14, 19, 22, 25 e 29 de junho.

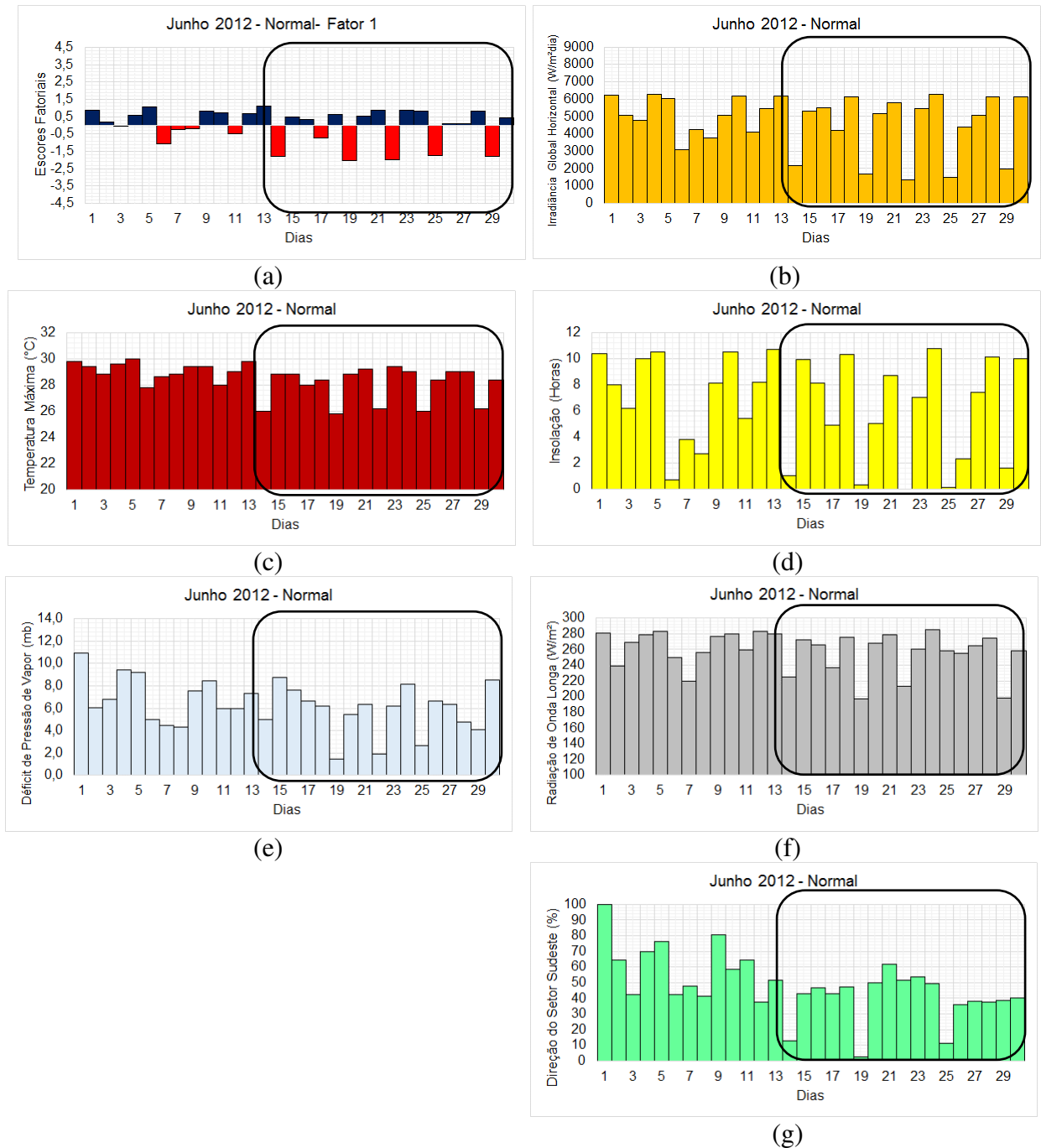


Figura 5.18: Escores Fatoriais referentes ao primeiro fator (a), Irradiação Global Horizontal em $Wh/m^2/dia$ (b), Insolação em horas (c), Temperatura máxima em $^{\circ}C$ (d), Déficit de Pressão de Vapor em hPa (e), Radiação de Onda Longa em W/m^2 (f), Frequência do setor Sudeste em % (g) para o mês de junho de 2012. Os retângulos pretos indicam período com escores negativos de magnitude mais elevada.

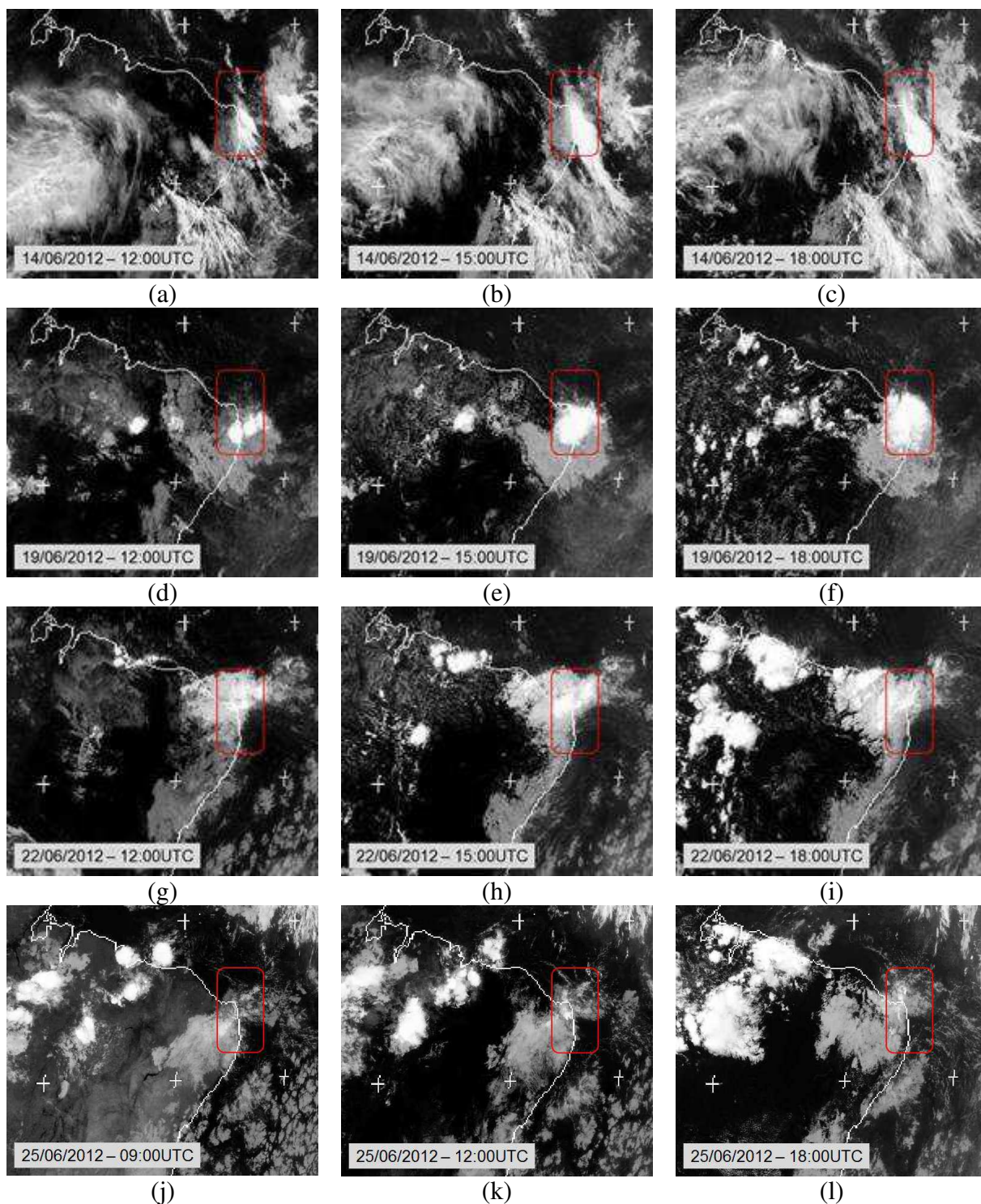
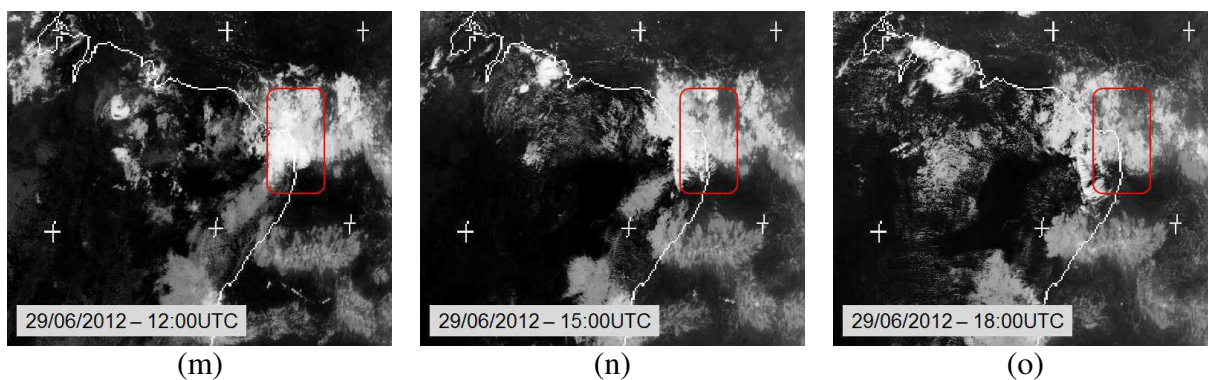


Figura 5.19: Imagens do satélite meteorológico GOES-12 na banda do infravermelho térmico para os dias: 14 de junho de 2012 às (a) 12:00 UTC, (b) 15:00 UTC e (c) 18:00 UTC; dia 19 às (d) 12:00 UTC, (e) 15:00 UTC e (f) 18:00 UTC; dia 22 às (g) 12:00 UTC, (h) 15:00 UTC e (i) 18:00 UTC; dia 25 às (j) 09:00 UTC; (k) 12:00 UTC e (l) 18:00 UTC; dia 29 às (m) 12:00 UTC; (n) 15:00 UTC e (o) 18:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é $HL=UTC-3$ horas. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://www.sat.dundee.ac.uk>).



(Continuação da Figura 5.19)

O segundo fator explica 20,7% da variância dos dados e apresenta altas correlações positivas com as variáveis intensidade do vento (V) e evaporação (Evap) e correlação negativa com a Frequência do setor Sudoeste (SO) e a precipitação (Prec) como pode ser visto na Figura 5.20a. Verifica-se que a variância explicada está relacionada a variabilidade do vento e com o teor de umidade na atmosfera. Nos dias 25 e 26 de junho de 2012 são registrados os maiores acumulados de precipitação sobre a cidade de Natal. Nesse período foi observado também uma menor intensidade do vento.

Observam-se predominantemente contribuições positivas (escores positivos) na primeira quinzena do mês e contribuições negativas na segunda quinzena. (Figura 5.20b). No entanto, observa-se nitidamente que a contribuição positiva de magnitude mais elevada está associada com o dia 1 de junho (escore acima de 1,5). O maior escore positivo e está relacionado ao registro da maior intensidade do vento observada durante o mês de junho, verifica-se também o maior valor observado de evaporação (Figura 5.20e e 5.20f).

Os escores mais negativos foram registrados nos dias 25 e 26, dias dos maiores totais de precipitação (Figura 5.20c). Observa-se também no dia 26 uma menor intensidade do vento e com Frequência do setor Sudeste (Figuras 5.20f e 5.20d respectivamente). Nesse mesmo período a evaporação também apresentou baixos valores (Figura 5.20e).

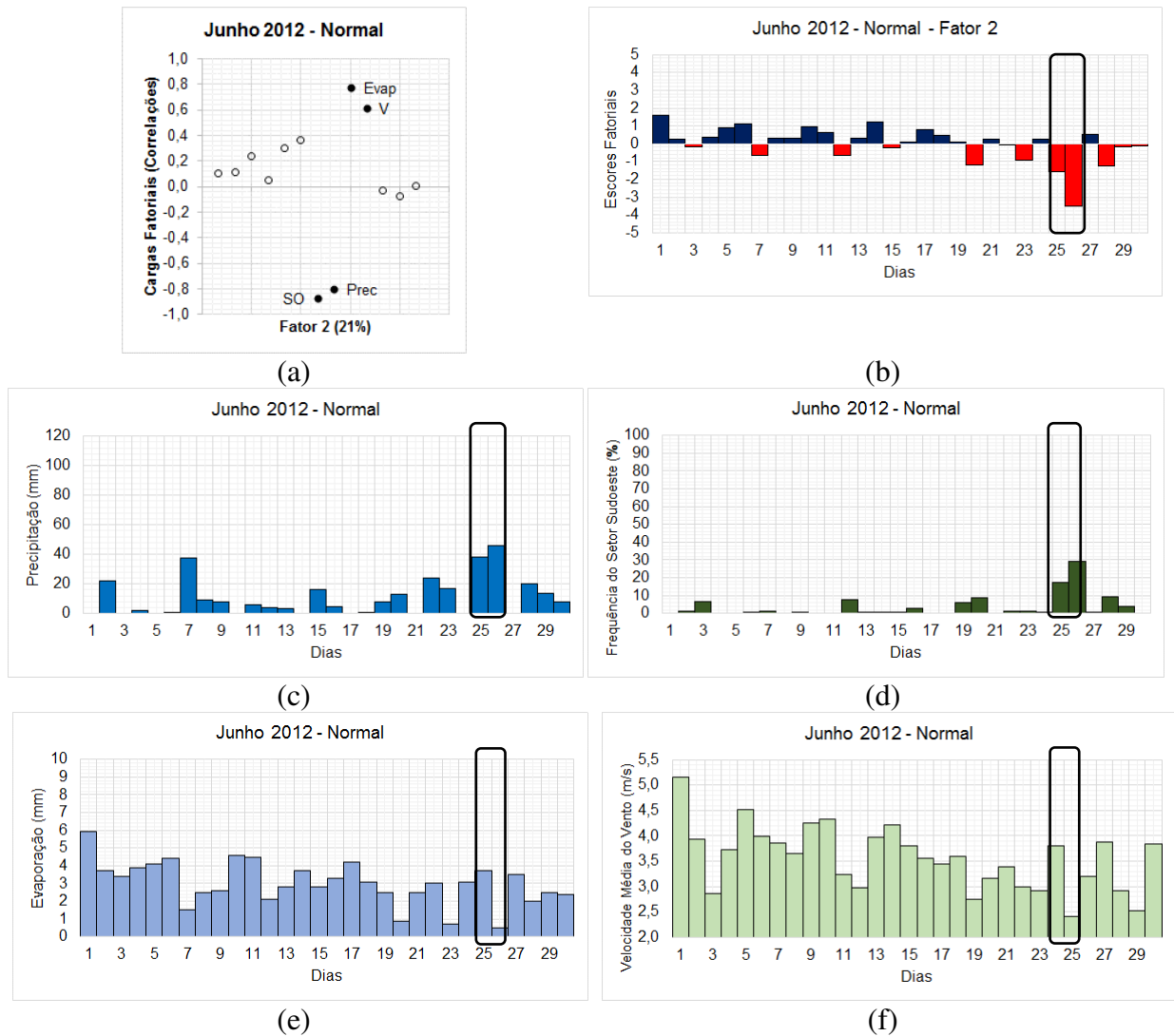


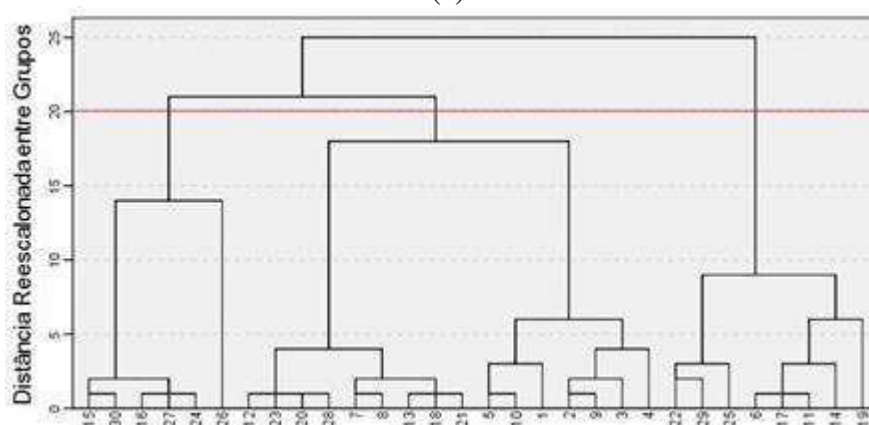
Figura 5.20: Cargas fatoriais (correlações) referente ao segundo fator (a), escores fatoriais referentes ao segundo fator (b), Precipitação em mm (c), Frequência do setor Sudoeste em % (d), Evaporação de piche em mm (e), Velocidade do vento em m/s (f) para o mês de junho de 2012. Os retângulos pretos indicam período com escores negativos de magnitude mais elevada.

5.1.3.2 Análise de Agrupamentos

Em junho de 2012 a análise permitiu separar três grupos homogêneos, conforme mostrados na curva de inércia e dendrograma (Figura 5.21). Os dias pertencentes a cada grupo podem ser visualizados na Tabela 5.12.



(a)



(b)

Figura 5.21: Curva de inércia (a) e dendrograma (b) para junho 2012.

Tabela 5.12: Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamentos de Ward com medida de distância euclidiana quadrática e média dos valores formados por cada grupo.

Junho 2012 – Normal													
Grupo 1				Grupo 2					Grupo 3				
15, 16, 24, 26 27, 30				1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 18, 20, 21, 23, 28					6, 11, 14, 17, 19, 22, 25, 29				
Grupos	GHI (kWh/m ²)	V (m/s)	E (%)	SE (%)	S (%)	SO (%)	Tmx (°C)	Prec (mm)	I (horas)	Evap (mm)	ROL (W/m ²)	DPV (hPa)	q (g/kg)
1	5,4	3,7	0,1	42,2	52,3	5,4	28,7	12,6	8,1	2,6	266,9	7,7	15,0
2	5,5	3,8	4,0	61,3	32,3	1,7	29,3	7,3	8,2	3,1	269,2	7,2	16,6
3	2,5	3,2	3,7	33,3	55,8	3,6	26,8	11,3	1,8	3,6	229,7	4,1	16,4

Os dias que compõem o Grupo 1 tem, em geral, valores médios de Irradiação Global Horizontal (GHI), Radiação de Onda Longa (ROL), Insolação (I), Velocidade do Vento (V) e Temperatura Máxima (Tmx); o Grupo 2 é composto pelos dias que, em média, representam os valores máximos enquanto que o Grupo 3 tem, em média, os menores valores (Figura 5.22a, 5.22b, 5.22c e 5.22d).

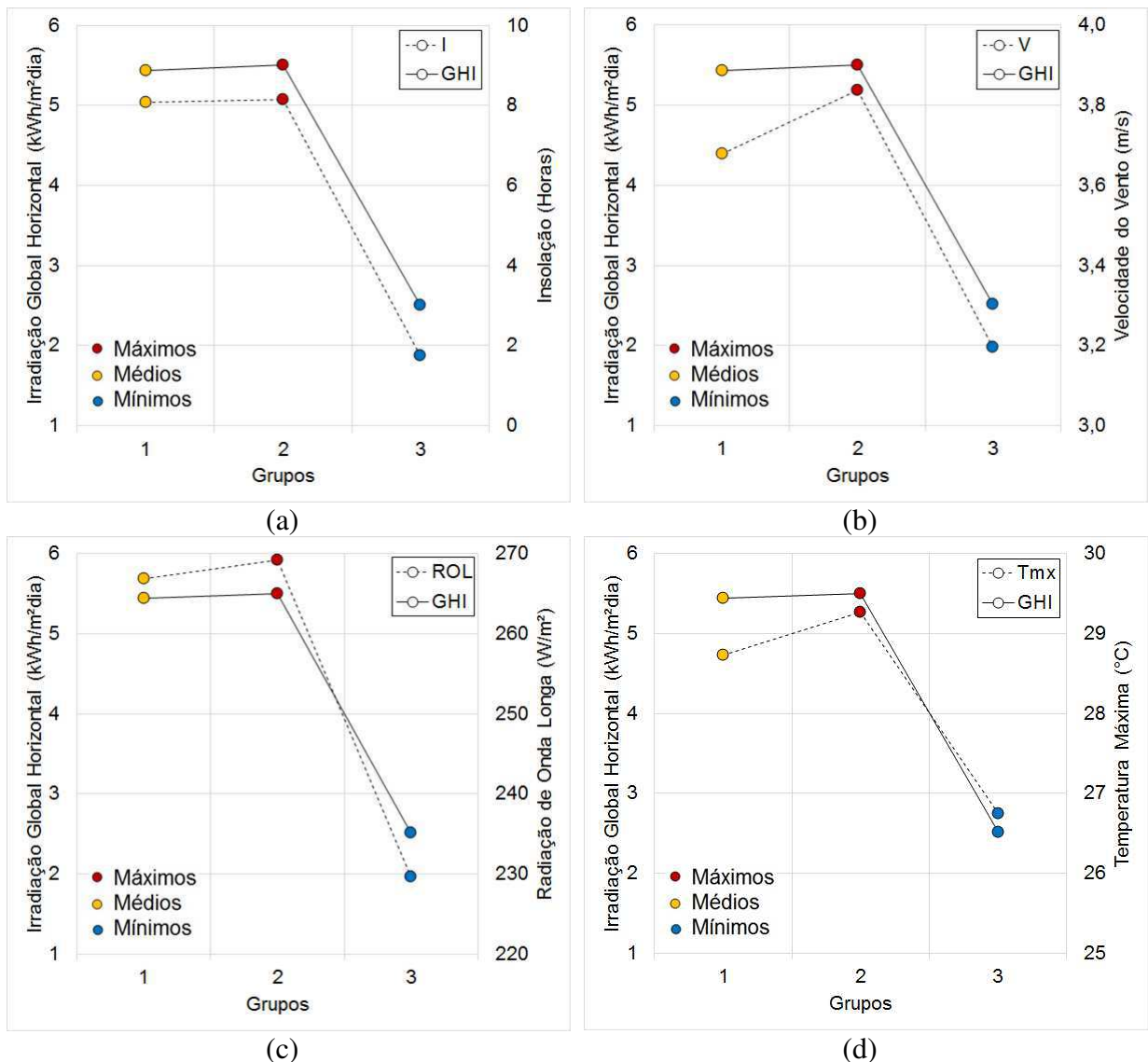


Figura 5.22: Valores médios dos grupos homogêneos formados na análise de agrupamento para o mês de junho de 2012: Irradiação Global Horizontal ($\text{kWh/m}^2/\text{dia}$) e (a) Insolação (Horas), (b) Velocidade do Vento (m/s), (c) Radiação de Onda Longa (W/m^2) e (d) Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$).

5.1.3.3 Análise Discriminante

Para verificar entre os grupos formados através da AA quais variáveis tem maior poder de discriminação entre os grupos, aplicou-se a técnica de Análise Discriminante (AD). De acordo com o teste de Lambda de Wilks, duas funções foram estatisticamente relevantes para separar os grupos ao nível de 99% de significância. A primeira função foi responsável

por 99,6% da variância total e a segunda função apresentou 0,04% de toda a variância (Tabela 5.14).

Tabela 5.13: Teste Lambda de Wilks.

Junho 2012 – Normal				
Função	Autovalores	% de variância	% de variância acumulada	Correlação canônica
1	3,676	99,6	99,6	0,887
2	0,015	0,4	100,0	0,123

As correlações canônicas associadas às funções discriminantes evidenciam que a primeira função contribui mais para demonstrar as diferenças entre os grupos, já que explica 99,6% da variância dos dados. Através da matriz de estrutura (Tabela 5.14) pode-se observar que as variáveis que discriminam os grupos foram a Irradiação Global Horizontal (GHI) e a Precipitação (Prec). Como a primeira função tem maior variância verifica-se que a homogeneidade dos grupos se deve a variabilidade ocorrida na GHI. A técnica de Análise Discriminante confirmou os agrupamentos formados previamente.

Tabela 5.14: Matriz de Estrutura

Junho 2012 – Normal		
Variável	Função 1 (99,6%)	Função 2 (0,4%)
GHI	0,827*	-0,563
Prec	-0,028	1,000*

* Correlações fortes

5.1.4 Novembro de 2011: Anômalo Positivo

O mês de novembro de 2011 foi marcado por chuvas acima da média climatológica para os meses de novembro, contudo vale salientar que o mês de novembro faz parte da estação seca e é esperada pouca quantidade de precipitação no período. Na cidade de Natal, o acumulado de precipitação registrado durante o mês foi de 44 mm, quando o esperado para o período é de 25,2 mm, verifica-se que o mês de novembro de 2012 foi considerado anômalo positivo (chuvoso), ou seja, com chuvas acima da média climatológica. Os valores máximo e mínimo registrados na estação, assim como o valor médio climatológico e o valor registrado no mês de novembro de 2011 podem ser observados através do gráfico *boxplot* na Figura 5.23a. Comportamento inverso é verificado para a insolação que durante o mês esteve próximo da média climatológica com 296,9 horas de brilho do Sol quando o esperado para o período é de 285,7 horas (Figura 5.23b).

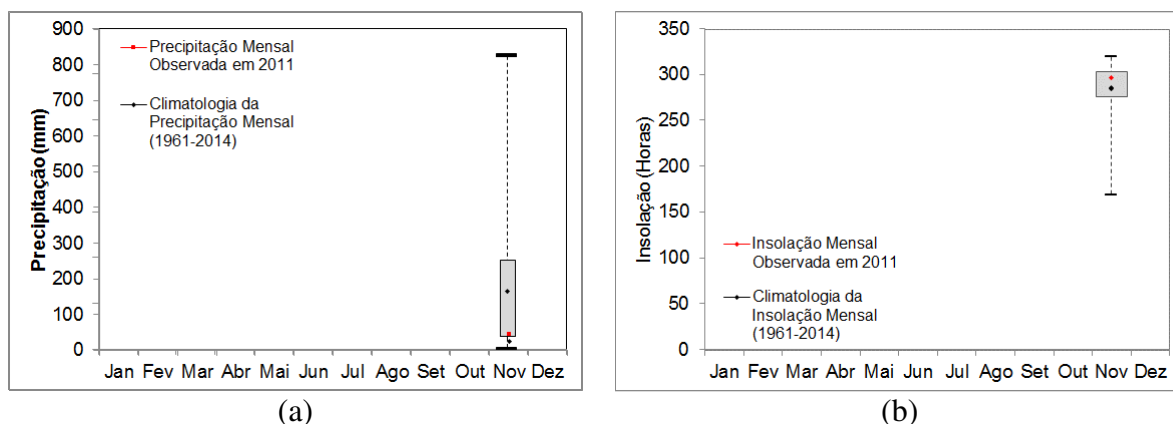


Figura 5.23: Boxplot (a) da climatologia de precipitação mensal e (b) da climatologia de insolação mensal para a cidade de Natal-RN referente ao período de 1961 a 2014. O ponto em vermelho representa os valores mensais de precipitação e insolação observados em novembro de 2011 (Fonte dos dados: INMET).

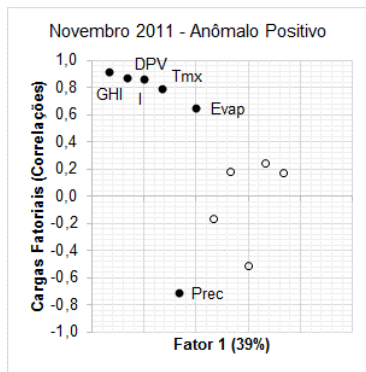
5.1.4.1 Análise Fatorial

Os Autovalores e porcentagens de variância acumulada estão descritos na Tabela 5.15. Em novembro de 2011 três fatores explicam 75,3% da variância total dos dados.

Tabela 5.15: Autovalores e porcentagens de variância acumulada.

Novembro 2011			
Fator	Autovalor	Percentual de variância	Percentual cumulativo de variância
1	4,396	39,3	39,3
2	2,694	23,6	62,9
3	1,189	12,3	75,3

O primeiro fator é responsável por 39,3% da variabilidade dos dados e é composto pelas variáveis Irradiação Global Horizontal (GHI), Insolação (I), Temperatura máxima (Tmx), Déficit de Pressão de Vapor (DPV) e Evaporação (Evap), correlacionadas positivamente e a Precipitação (Prec) com correlações negativas (Figura 5.14).



(a)



(b)

Figura 5.24: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao primeiro fator (a) e escores fatoriais referentes ao primeiro fator (b).

Através da série temporal associada ao primeiro fator observam-se contribuições negativas no período de 8 a 14 de novembro com escores negativos de magnitude mais elevada no dia 10. Valores mais baixos das variáveis GHI, I, Tmx, Evap e DPV são observados nos dias 9, 11, 12, 14 e 28 de novembro de 2011 (Figura 5.25b). Este resultado indica que nesses dias ocorreu diminuição com maior intensidade da GHI, I, Tmx, Evap e DPV e também registro de precipitação. No dia 10 foram registrados apenas 4125 W/m²/dia (Figura 5.25b) e apenas 2,4 horas de insolação (Figura 5.25d), houve uma diminuição da temperatura máxima de cerca de 1,5°C em relação ao dia anterior com o registro de 28,6°C cerca de 1,5°C abaixo da média de temperaturas máximas do mês que foi de 30,1°C (Figura 5.25d). A queda acentuada nos valores destas variáveis está diretamente relacionada ao aumento da nebulosidade sobre a cidade de Natal-RN.

Entre os dias 07 e 14 do mês de novembro de 2011 observa-se a atuação de aglomerados convectivos sobre a cidade de Natal, que podem ser comprovados nas imagens do satélite GOES 12 no canal do infravermelho térmico apresentadas na Figura 5.26 que ilustra a formação de aglomerados convectivos sobre a região da cidade de Natal nos dias 09 a 12.

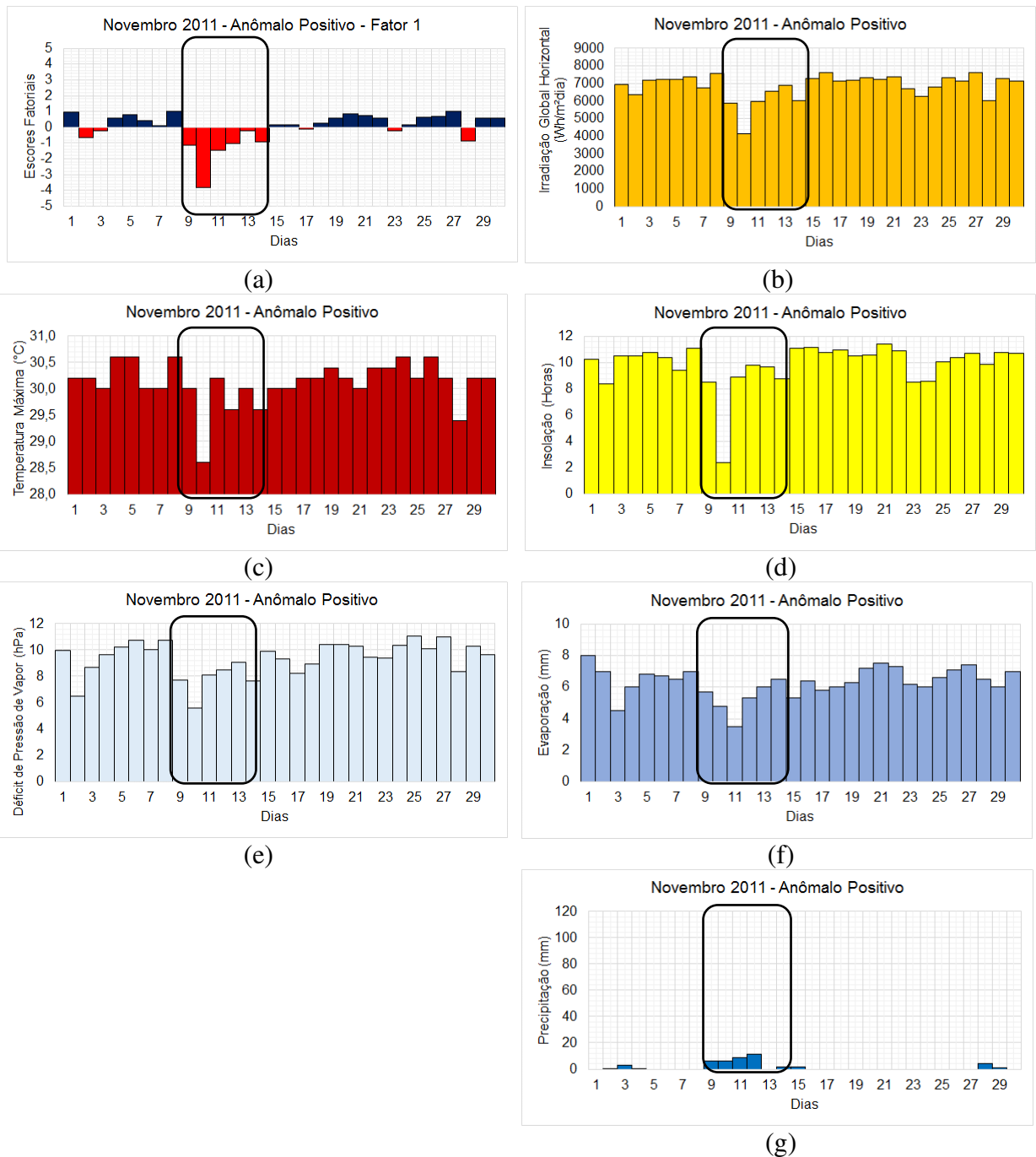


Figura 5.25: Escores Fatoriais referentes ao primeiro fator (a), Irradiação Global Horizontal em Wh/m²dia (b), Temperatura máxima em °C (c), Insolação em horas (d), Déficit de Pressão de Vapor em hPa (e), Evaporação em mm (f), Precipitação em mm (g) para o mês de novembro de 2011. Os retângulos pretos indicam o período com escores negativos de magnitude mais elevada.

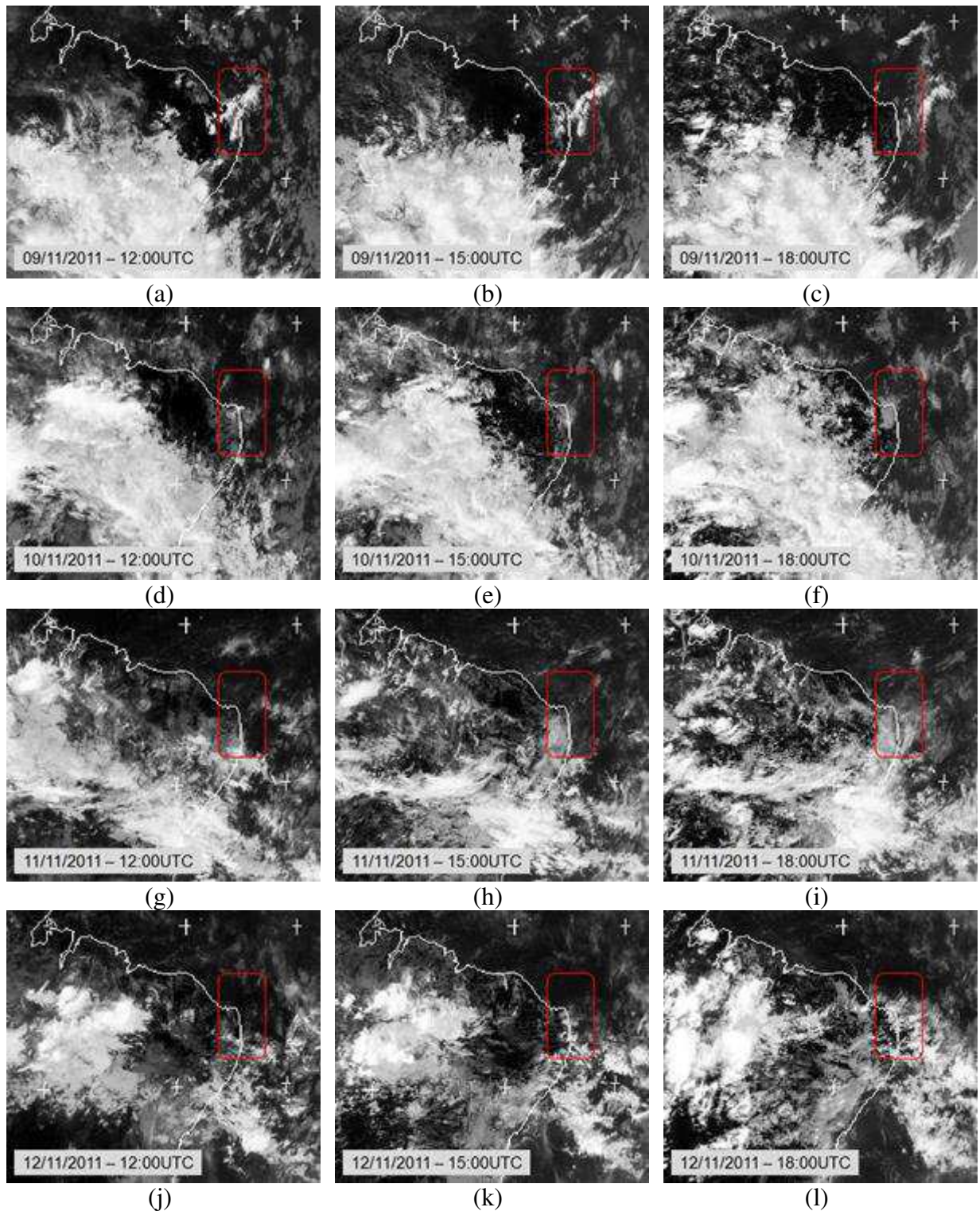


Figura 5.26: Imagens do satélite meteorológico GOES-12 na banda do infravermelho térmico para os dias: 09 de novembro de 2011 às (a) 12:00 UTC, (b) 15:00 UTC e (c) 18:00 UTC; dia 10 às (d) 12:00 UTC, (e) 15:00 UTC e (f) 18:00 UTC; dia 11 às (g) 12:00 UTC, (h) 15:00 UTC e (i) 18:00 UTC; dia 12 às (j) 12:00 UTC; (k) 15:00 UTC e (l) 18:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é $HL=UTC-3$ horas. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://www.sat.dundee.ac.uk>).

O segundo fator explica 23,6% da variância dos dados, e é positivamente correlacionado com a Frequência do setor sudeste (SE), e negativamente correlacionado com as variáveis, Frequência do setor leste (E) e umidade específica (q) (Figura 5.27a). A série temporal associada ao segundo fator apresenta escores negativos de magnitude elevada nos dias 1, 2 e 3 e nos dias 17 e 18. (Figura 5.27b). Este resultado indica que nesses dias ocorreu enfraquecimento da Frequência do setor Sudeste (SE) e aumento da Frequência do setor Leste (E). Nos períodos com indicação de escores negativos também foram registrados maiores índices de umidade específica, tendo sido registrado 18,2g/kg no dia 2 e 17,8g/kg no dia 17.

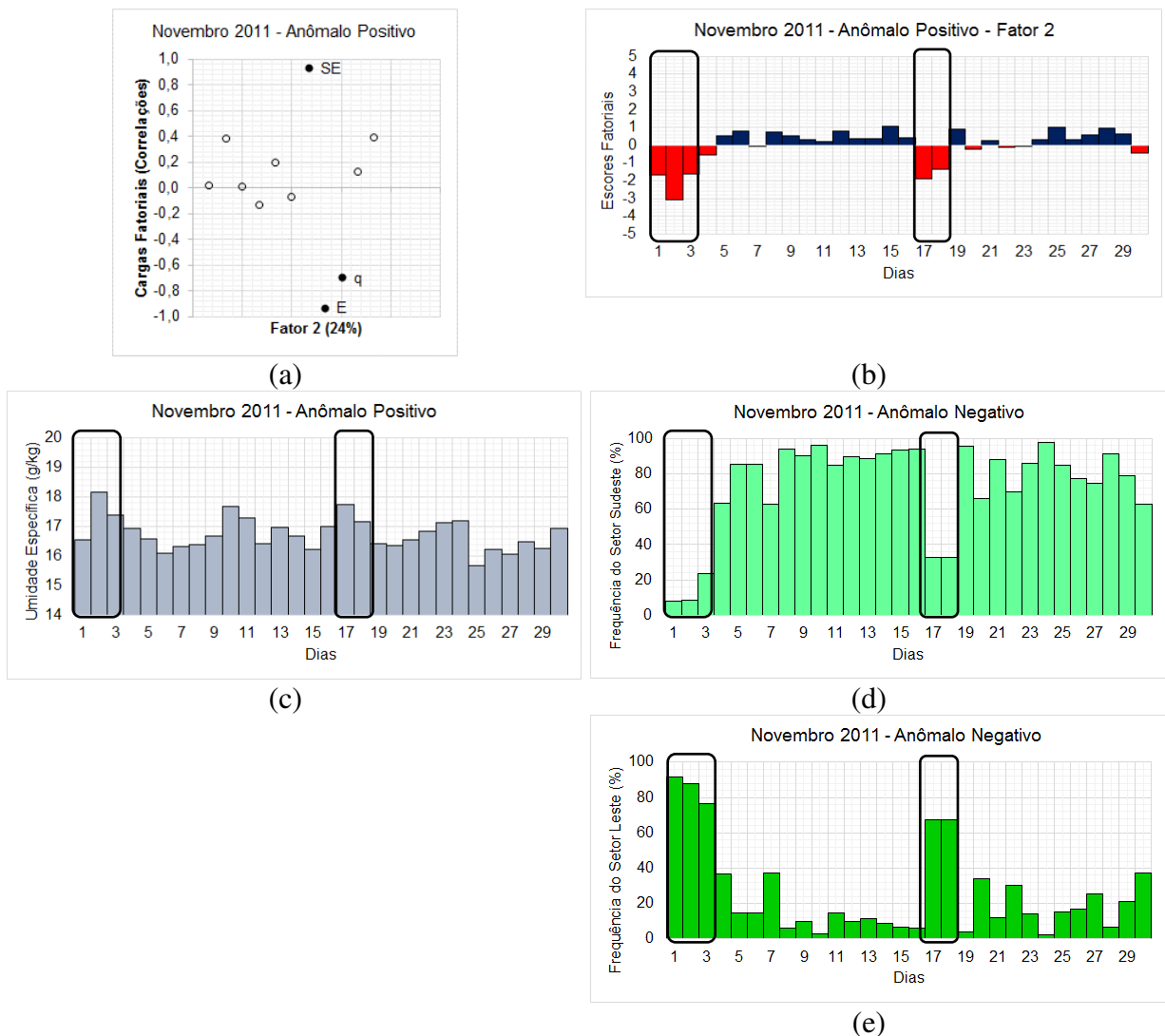


Figura 5.27: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao segundo fator (a), Escores Fatoriais referentes ao segundo fator (b), Umidade Específica em g/kg (c), Frequência do setor Sudeste em % (d) e Frequência do setor Leste em % (e). Os retângulos pretos indicam período com escores negativos de magnitude mais elevada.

O terceiro fator explica 12,3% da variância dos dados, e apresenta alta correlação positiva com a intensidade do vento (V) e alta correlação negativa com a radiação de onda longa (ROL) (Figura 5.2a). A série temporal associada ao terceiro fator apresenta escores positivos de magnitude elevada nos dias 12, 20 e 21 (Figura 5.2b). Os escores positivos estão relacionados aos dias com maiores intensidades do vento e menores índices de ROL no período.

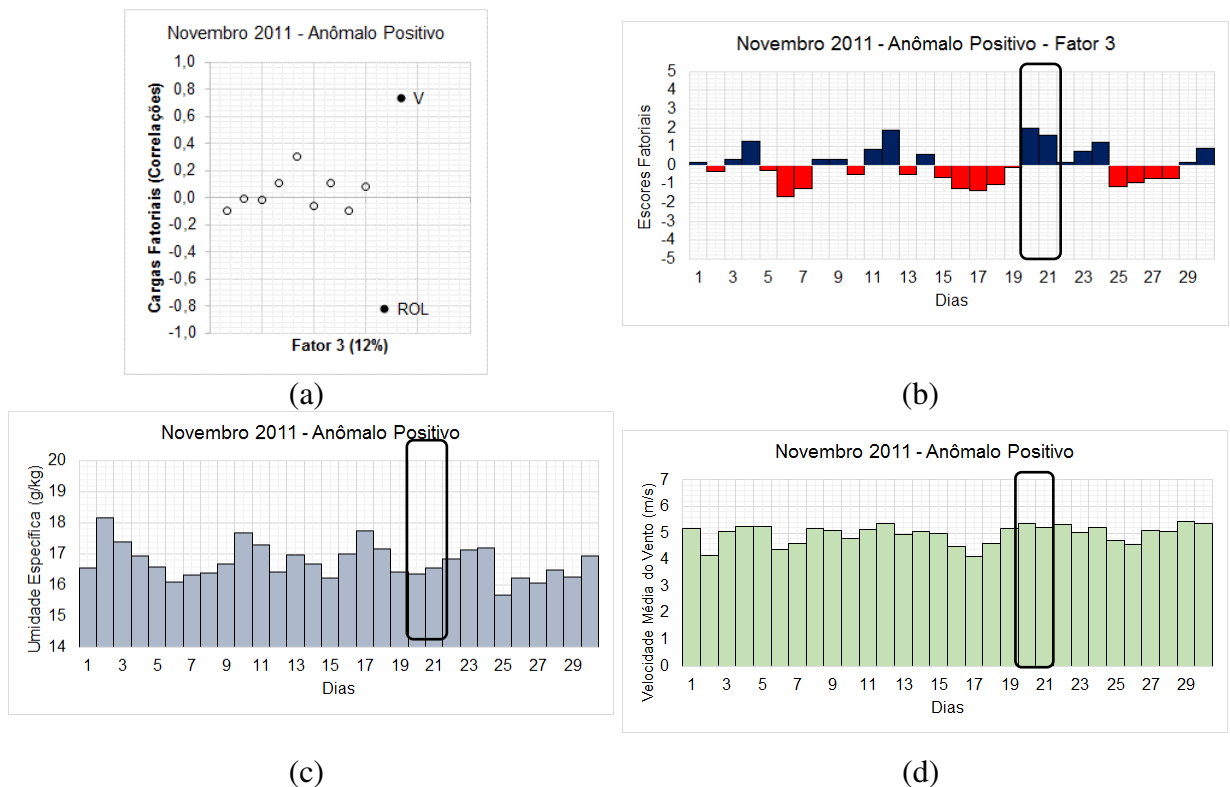


Figura 5.28: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao terceiro fator (a), Escores Fatoriais referentes ao terceiro fator (b), Radiação de Onda Longa em W/m^2 (c) e Velocidade do Vento em m/s (d). Os retângulos pretos indicam período com escores positivos de magnitude mais elevada.

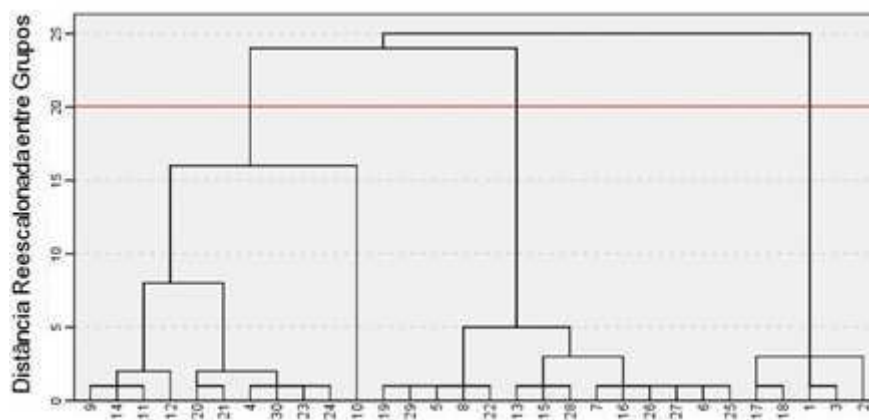
5.1.4.2 Análise de Agrupamentos

A técnica de Análise de Agrupamento foi aplicada aos escores fatoriais, de forma a garantir que todas as premissas da técnica fossem atendidas. O dendrograma apresentado na Figura 5.29b, mostra no eixo das abscissas os dias e no eixo das ordenadas o nível de agregação (distância) entre os grupos. A partir da curva de inércia obtida através de uma

análise subjetiva determinou-se o número de grupos de dias homogêneos existentes no mês em estudo (Figura 5.29a).



(a)



(b)

Figura 5.29: Curva de inércia (a) e dendrograma (b) para novembro 2011.

A análise permitiu separar três grupos homogêneos. Os dias pertencentes a cada grupo podem ser visualizados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16: Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamentos de Ward com medida de distância euclidiana quadrática e média dos valores formados por cada grupo.

Novembro 2011 – Anômalo Positivo											
Grupo 1				Grupo 2				Grupo 3			
9, 10, 11, 12, 14, 20, 21, 23, 24, 30				5, 6, 7, 8, 13, 15, 16, 19, 22, 25, 26, 27, 28, 29				1, 2, 3, 17, 18			
Grupos	GHI (kWh/m ²)	V (m/s)	E (%)	SE (%)	Tmx (°C)	Prec (mm)	I (horas)	Evap (mm)	ROL (W/m ²)	DPV (hPa)	q (g/kg)
1	6,4	5,2	16,6	83,2	30,0	3,1	9,0	6,0	259,2	8,8	16,9
2	7,2	4,9	15,5	84,0	30,2	0,5	10,5	6,6	280,0	10,0	16,4
3	7,0	4,6	78,0	21,2	30,2	0,7	10,2	6,3	274,7	8,4	17,4

Observa-se que os dias que compõem o Grupo 1 é, em média, formado por valores mínimos de Irradiação Global Horizontal (GHI), Insolação (I), Evaporação (Evap) e Temperatura Máxima (Tmx). O Grupo 2 é composto pelos dias que, em média, apresentaram valores máximos enquanto que o Grupo 3 possui, em média, os valores médios. Devido à natureza inversa da precipitação em relação à quantidade de radiação solar a precipitação evidenciou no Grupo 1 a média dos valores máximos, o Grupo 2 a média dos valores mínimos e do Grupo 3 os valores médios (Figura 5.30). Para identificar com precisão o conjunto de variáveis seria responsável pela homogeneidade dos grupos, optou-se pela aplicação da Análise Discriminante com o propósito de comprovar a análise e identificar a(s) variável(is) discriminante(s) dos grupos.

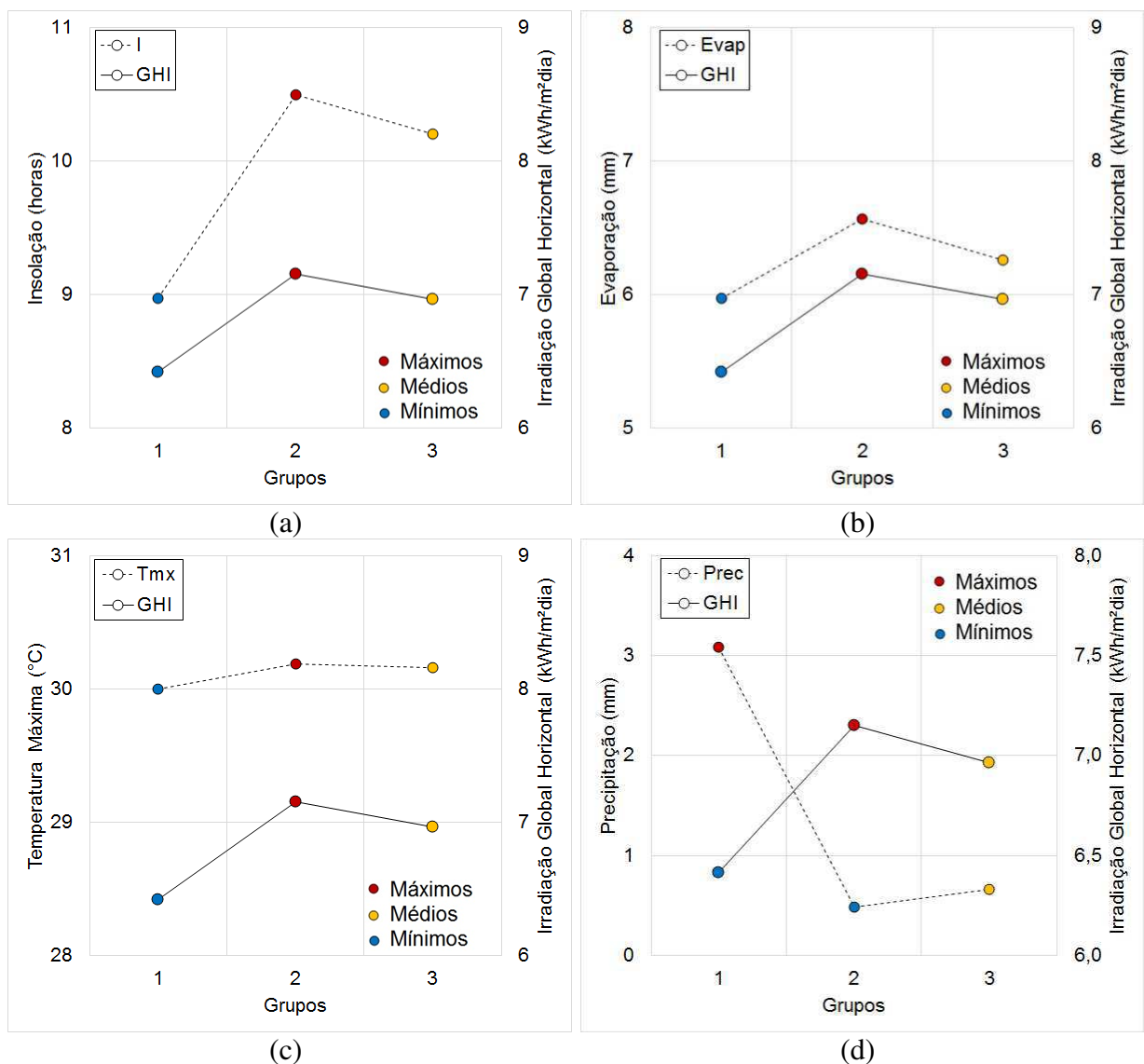


Figura 5.30: Valores médios dos grupos homogêneos formados na análise de agrupamento para o mês de novembro 2011: Irradiação Global Horizontal (kWh/m²/dia) e (a) Insolação (Horas), (b) Evaporação (mm), (c) Temperatura Máxima (°C) e (d) Precipitação (mm).

5.1.4.3 Análise Discriminante

De forma a verificar entre os grupos formados pela Análise de Agrupamentos quais variáveis possuem maior poder de discriminação entre os grupos, aplicou-se a técnica de Análise Discriminante. Duas funções foram estatisticamente relevantes para separar os grupos ao nível de 99% de significância. Observa-se na Tabela 5.17 que a primeira função foi responsável por 62,9% da variância total e que a segunda função apresentou 37,1% de toda a variância.

Tabela 5.17: Teste Lambda de Wilks.

Novembro 2011 – Anômalo Positivo				
Função	Autovalores	% de variância	% de variância acumulada	Correlação canônica
1	1,905	62,9	62,9	0,810
2	1,125	37,1	100,0	0,728

Através da matriz de estrutura pode-se observar quais variáveis que melhor discriminaram os grupos foram a evaporação (Evap), o Déficit de Pressão de Vapor (DPV) e a Radiação de Onda Longa (ROL). A primeira função que possui maior variância teve maior contribuição do DPV (0,657) e da Evap (0,597), enquanto que a segunda função a maior contribuição foi dada pela variável ROL com 0,956 de correlação (Tabela 5.18). Verifica-se que o grupo de variáveis discriminantes influenciaram a quantidade de radiação solar (GHI e insolação) que chegou à superfície.

Tabela 5.18: Matriz de Estrutura

Novembro 2011 – Anômalo Positivo		
Variável	Função 1 (63%)	Função 2 (37%)
DPV	0,657*	0,523
Evap	0,597*	0,192
ROL	-0,267	0,956*

* Correlações fortes

5.1.5 Novembro de 2012: Anômalo Negativo

Segundo o Boletim Climanálise (2012), o mês de novembro de 2012 foi marcado por praticamente ausência de precipitação. Na cidade de Natal, o acumulado de precipitação registrado durante o mês de novembro de 2012 foi de apenas 0,7mm, quando o esperado para o período é de 25,2 mm. O mês de novembro de 2012 foi considerado anômalo negativo (seco), ou seja, com chuvas abaixo da média climatológica. Os valores máximo e mínimo registrados na estação, assim como o valor médio climatológico e o valor registrado no mês de novembro de 2012 podem ser observados através do gráfico *boxplot* na Figura 5.31a. Comportamento inverso é verificado para a insolação que durante o mês esteve próximo do máximo registrado para o mês com 319,9 horas de brilho do Sol quando o esperado para o período é de 285,7 horas (Figura 5.31b). Verifica-se também que tanto a precipitação quanto a insolação atingiram valores extremos próximos dos valores mínimo e máximo respectivamente, já registrados na estação.

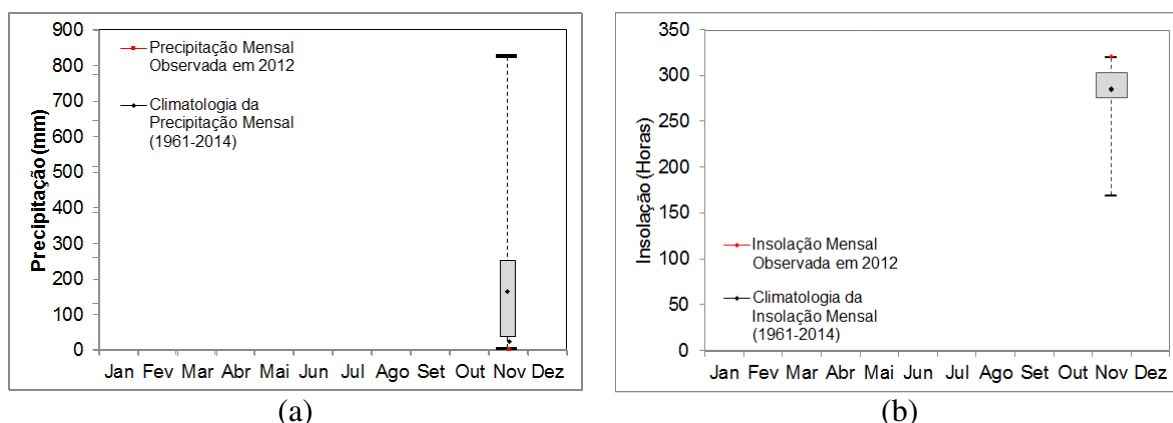


Figura 5.31: Boxplot (a) da climatologia de precipitação mensal e (b) da climatologia de insolação mensal para a cidade de Natal-RN referente ao período de 1961 a 2014. O ponto em vermelho representa os valores mensais de precipitação e insolação observados em novembro de 2012 (Fonte dos dados: INMET).

5.1.5.1 Análise Fatorial

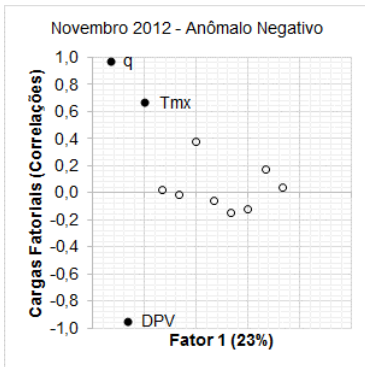
Os Autovalores e porcentagens de variância acumulada estão descritos na Tabela 5.19. Em novembro de 2011 quatro fatores explicaram 74,8% da variância total dos dados.

Tabela 5.19: Autovalores e porcentagens de variância.

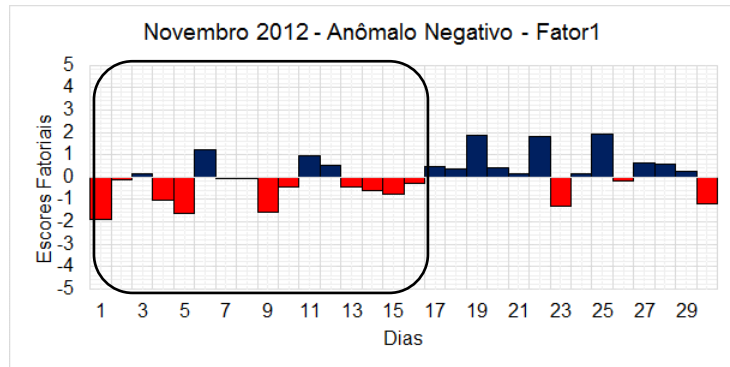
Novembro 2012			
Fator	Autovalor	Percentual de variância	Percentual cumulativo de variância
1	2,847	22,8	22,8
2	2,729	21,6	44,4
3	1,526	19,9	64,3
4	1,131	10,6	74,8

Diferentemente do padrão encontrado nos meses anteriores, em novembro de 2012 o primeiro fator responsável por 24,9% da variabilidade dos dados é composto pelas variáveis, Umidade Específica (q), Temperatura Máxima (Tmx) correlacionadas positivamente e pela variável, Déficit de Pressão de Vapor (DPV) correlacionada negativamente (Figura 5.32a).

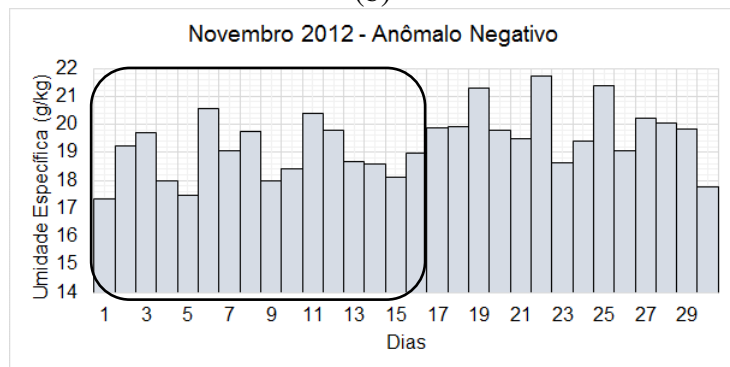
A série temporal associada ao primeiro fator, em geral, apresenta escores negativos de magnitude elevada na primeira quinzena do mês, especialmente nos dias 1, 4, 5 e 9 de novembro de 2012. Na segunda quinzena observa-se a predominância de escores positivos de magnitude elevada nos dias 19, 22 e 25 (Figura 5.32b). Este resultado indica que na primeira quinzena ocorreu diminuição da umidade específica e da temperatura máxima, o contrário aconteceu ao DPV (Figura 5.32c, 5.32d e 5.32e). No dia 1 foi registrado 17,3 g/kg de umidade e um alto DPV (7,24 hPa). O contrário é observado no dia 22, quando foi registrado apenas 1,54 hPa e 21,71 g/kg de umidade específica. A temperatura máxima teve os maiores registros no início do mês.



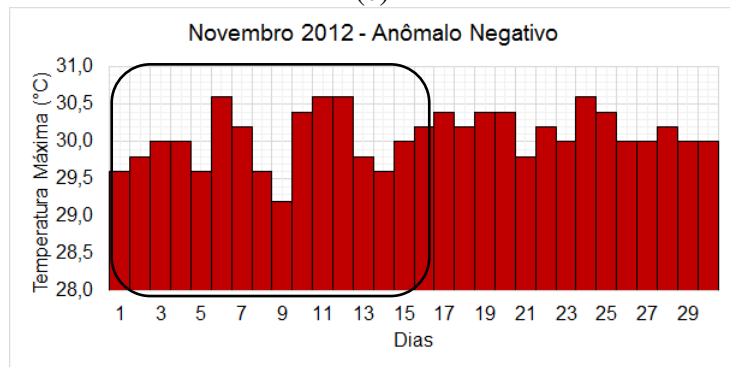
(a)



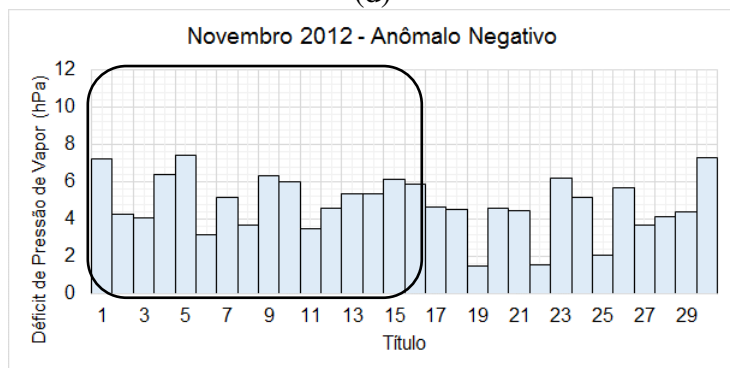
(b)



(c)



(d)

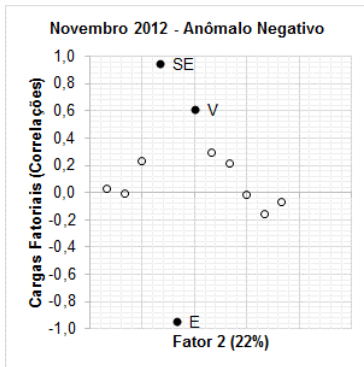


(e)

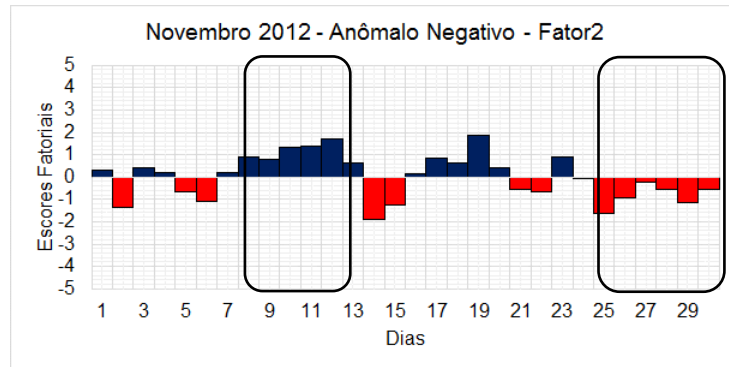
Figura 5.32: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao primeiro fator (a) e escores fatoriais referentes ao primeiro fator (b) Umidade Específica em g/kg (c), Temperatura máxima em °C (d) e Déficit de Pressão de Vapor em hPa (e) para o mês de novembro de 2012. Os retângulos pretos indicam o período com escores negativos de magnitude mais elevada.

O segundo fator explica 21,2% da variância dos dados, e é positivamente correlacionado com as variáveis, Frequência do setor Sudeste (SE) e intensidade do vento (V) e negativamente correlacionado com a Frequência do setor Leste (E) (Figura 5.33a). Através da série temporal associada ao segundo fator comprovou-se que os maiores valores da intensidade do vento estão correlacionados com a Frequência do setor Sudeste e os menores valores estão associados à Frequência do setor Leste. Este resultado é indica o domínio do escoamento padrão da região caracterizado por alísios intensos. Verificam-se escores negativos de magnitude elevada entre os dias 25 e 30 associados à Frequência do setor Leste. Entre os dias 9 e 12 observam-se escores positivos associados com a Frequência do setor Sudeste e ventos mais intensos (Figura 5.33b-e).

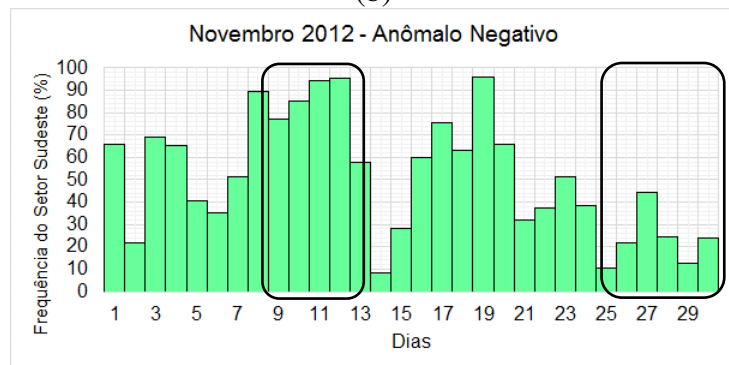
O terceiro fator, por sua vez, explica 19,9% da variância dos dados, e apresenta alta correlação positiva com as variáveis Irradiação Global Horizontal (GHI), Insolação (I) e correlação negativa com a variável Evaporação (Evap) (Figura 5.34a). A série temporal associada ao terceiro fator apresenta escores positivos superiores a 1,5 entre os dias 7 a 11 (Figura 5.34b). Os escores positivos estão relacionados aos dias com maiores valores de GHI e Insolação e também as maiores taxas de evaporação. Maior disponibilidade de energia implica em maior absorção de energia para a evaporação.



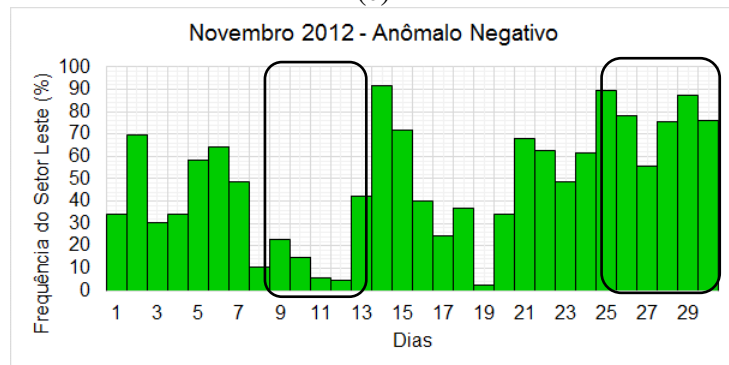
(a)



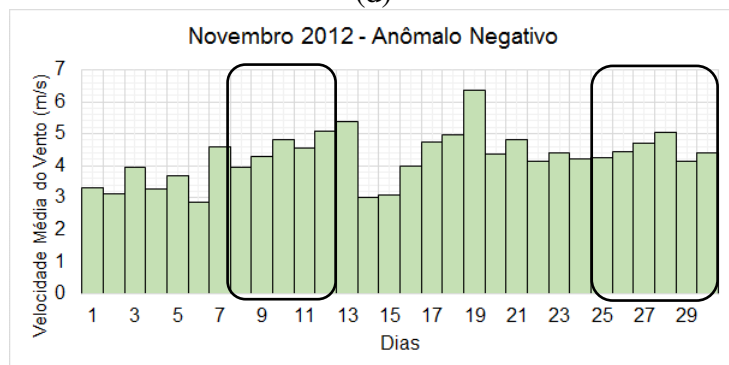
(b)



(c)

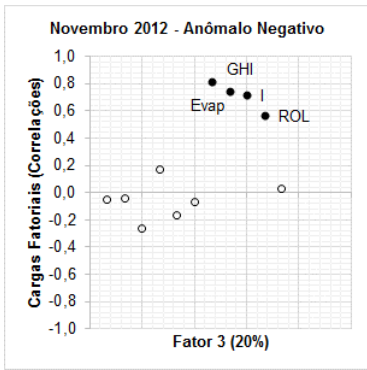


(d)

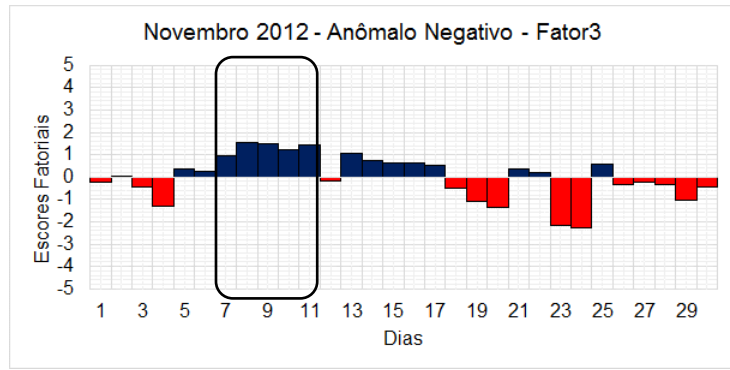


(e)

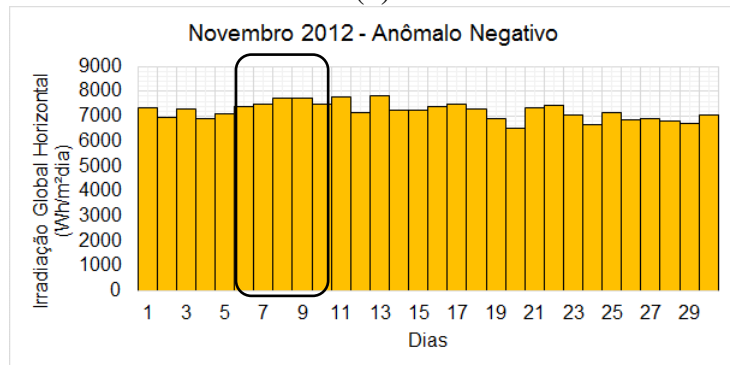
Figura 5.33: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao segundo fator (a), Escores Fatoriais referentes ao segundo fator (b), Umidade Específica em g/kg (c), Frequência do setor Sudeste em % (d) e Frequência do setor Leste em % (e). Os retângulos pretos indicam escores de magnitude mais elevada.



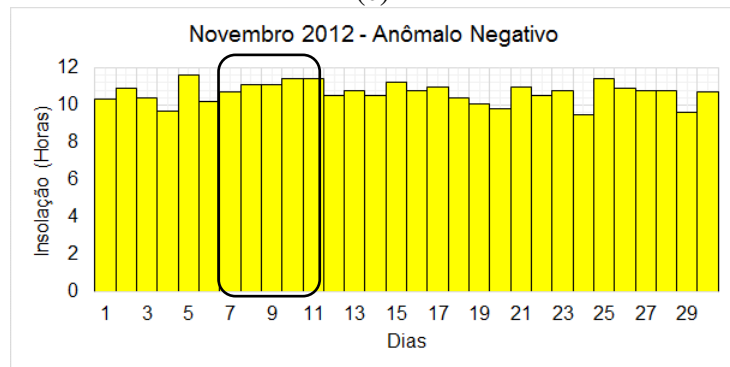
(a)



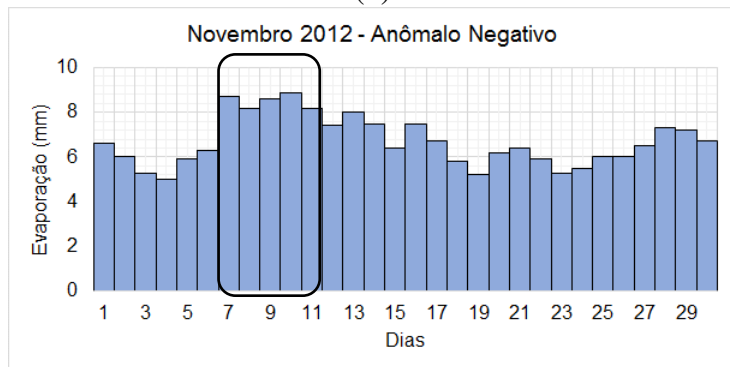
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.34: Cargas fatoriais (correlações) referentes ao terceiro fator (a), Escores Fatoriais referentes ao terceiro fator (b), Irradiação Global Horizontal em Wh/m²dia (c) e Insolação em horas (d) e Evaporação em mm. Os retângulos pretos indicam escores positivos de magnitude mais elevada.

5.1.5.2 Análise de Agrupamentos

Em novembro de 2012, o uso da técnica permitiu separar três grupos homogêneos, conforme mostrados na curva de inércia e dendrograma (Figura 5.35). Os dias pertencentes a cada grupo podem ser visualizados na Tabela 5.20.

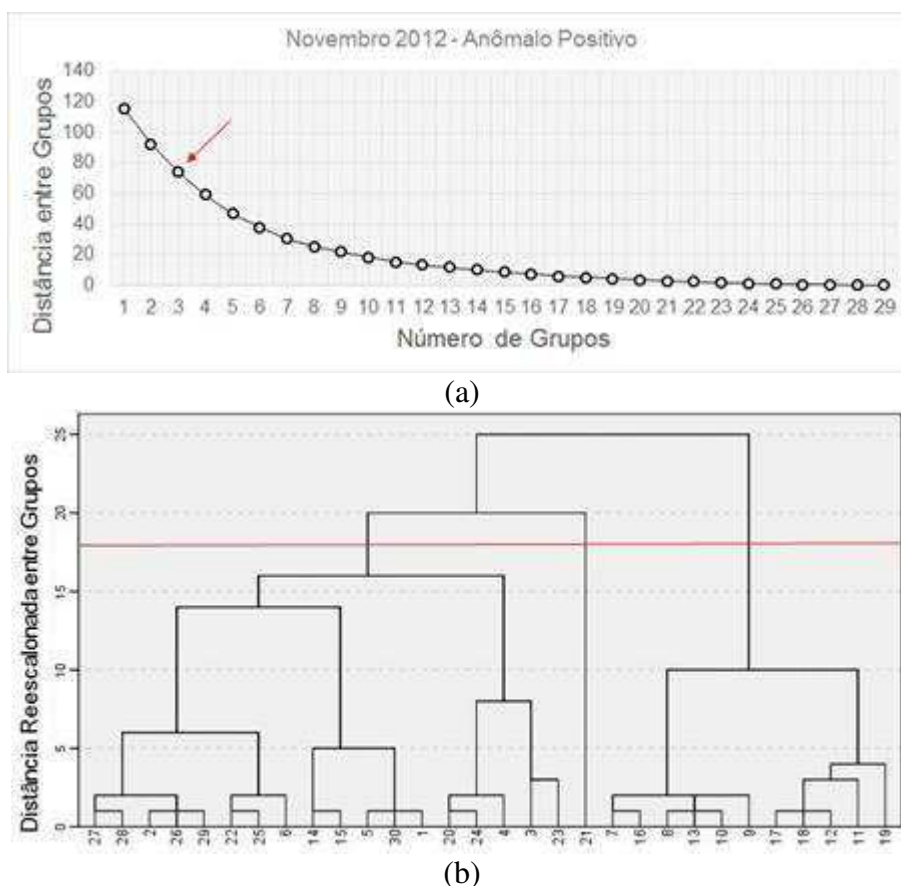


Figura 5.35: Curva de inércia (a) e dendrograma (b) para novembro 2012.

Tabela 5.20: Grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamentos de Ward com medida de distância euclidiana quadrática e média dos valores formados por cada grupo.

Novembro 2012 – Anômalo Negativo												
Grupo 1				Grupo 2				Grupo 3				
1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 15, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30				21				7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19				
Grupos	GHI (kWh/m ²)	V (m/s)	E (%)	SE (%)	Tmx (°C)	Prec (mm)	I (horas)	Evap (mm)	ROL (W/m ²)	DPV (hPa)	q (g/kg)	
1	7,0	3,9	62,4	36,9	30,1	0,0	10,5	6,2	277,1	4,9	19,3	
2	7,3	4,8	67,9	32,1	29,8	0,5	11,0	6,4	280,0	4,4	19,5	
3	7,5	4,8	23,0	76,8	30,1	0,0	10,8	7,6	281,1	4,7	19,5	

Observa-se que os dias que compõem o Grupo 1 apresenta, em média, os valores mínimos de Irradiação Global Horizontal (GHI), Insolação (I), Evaporação (Evap), Radiação de Onda Longa (ROL), Intensidade do Vento (V) e Umidade Específica (q) (Figura 5.36a). Para as variáveis GHI, ROL e Evap. O Grupo 2 é composto pelos dias que, em média, apresentaram valores médios, enquanto que o Grupo 3 possui a média dos valores máximos (Figuras 5.36a e 5.36b). Já para as variáveis V, I e q o Grupo 2 é formado pelos dias que em média apresentaram os valores máximos, enquanto que o Grupo 3 é formado pelos dias que possuem os valores médios (Figuras 5.36c e 5.36d).

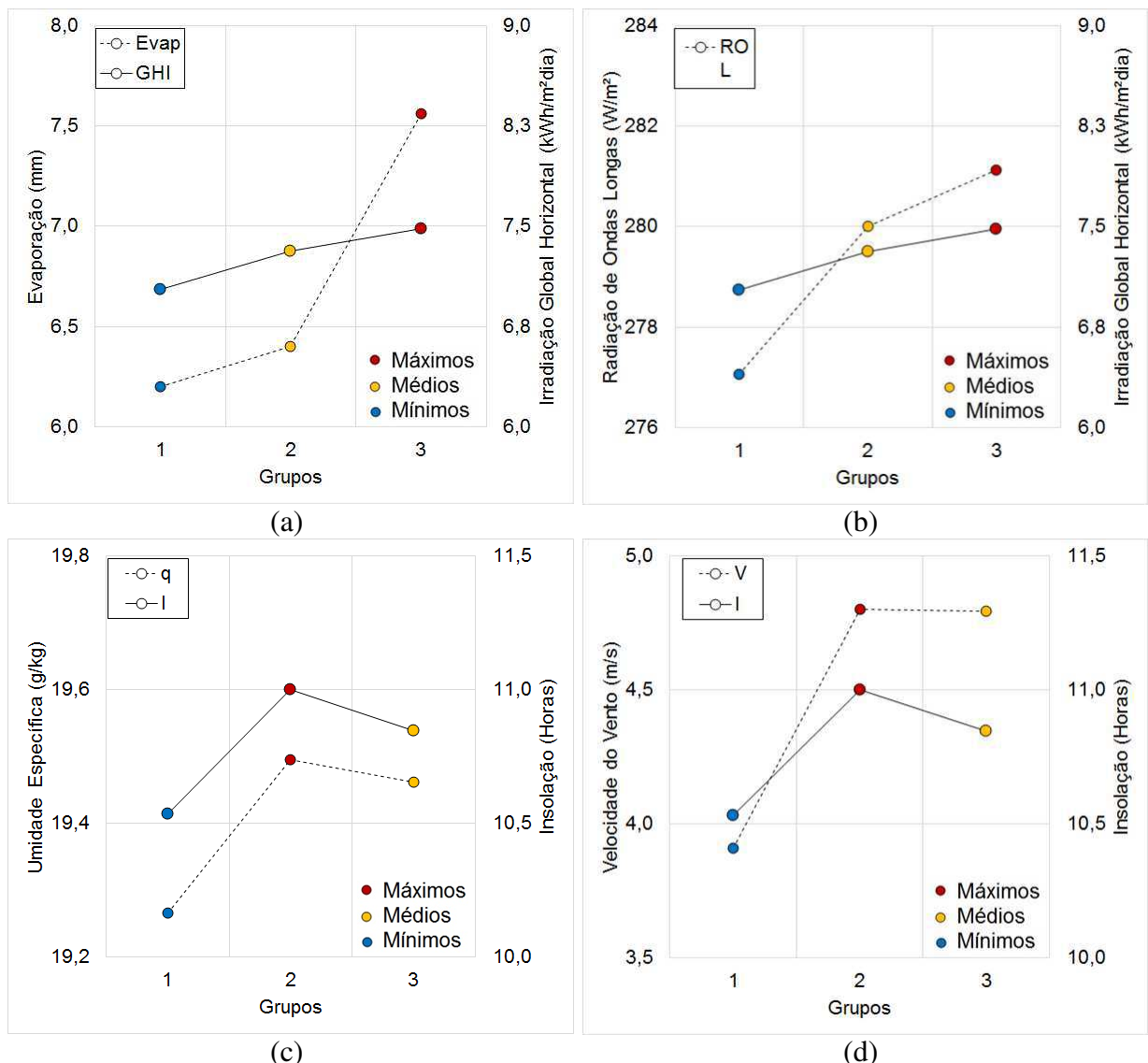


Figura 5.36: Valores médios dos grupos homogêneos formados na análise de agrupamento para o mês de novembro 2012: Irradiância Global Horizontal ($W/m^2/dia$) e (a) Evaporação (mm), (b) Radiação de Onda Longa (W/m^2); Insolação e (c) Umidade Específica (g/kg) e (d) Velocidade do Vento (m/s).

Com o intuito de identificar com precisão que conjunto de variáveis que seria responsável pela homogeneidade dos grupos, optou-se pela aplicação da Análise Discriminante que tem o papel de complementar a análise e identificar a(s) variável(is) discriminante(s) dos grupos.

5.1.5.3 Análise Discriminante

De forma a verificar entre os grupos formados pela Análise de Agrupamentos que variáveis possuem maior discriminação entre os grupos, aplicou-se a técnica de Análise Discriminante. De acordo com o teste de Lambda de Wilks, duas funções foram estatisticamente relevantes para separar os grupos ao nível de 99% de significância. Observa-se na Tabela 5.21 que a primeira função foi responsável por 83,3% da variância total e que a segunda função apresentou 16,7% de toda a variância.

Tabela 5.21: Teste Lambda de Wilks.

Novembro 2012 – Anômalo Positivo				
Função	Autovalores	% de variância	% de variância acumulada	Correlação canônica
1	8,604	83,3	83,3	0,947
2	1,724	16,7	100,0	0,796

As correlações canônicas associadas às funções discriminantes evidenciam que a primeira função contribui mais para demonstrar as diferenças entre os grupos, pois explica 83,3% da variância dos dados. Através da matriz de estrutura (Tabela 5.22) pode-se observar que as variáveis que discriminam os grupos foram a Precipitação (Prec), Frequência do setor Sudeste (SE) e Irradiação Global Horizontal (GHI). Como a primeira função apresenta maior variância verifica-se que a homogeneidade dos grupos se deve a variabilidade na Precipitação (Prec). A precipitação é a principal variável discriminante e que influenciou na quantidade de radiação solar que chegou à superfície durante o mês de novembro de 2012 complementam a discriminação dos grupos.

Tabela 5.22: Matriz de Estrutura

Novembro 2012 – Anômalo Negativo		
Variável	Função 1 (83%)	Função 2 (17%)
Prec	0,814*	0,564
SE	-1,93	0,708*
GHI	-0,073*	0,609*

* Correlações fortes

5.2 Sistema de Processamento Digital de Heliogramas (SPDH): Ajuste e Validação

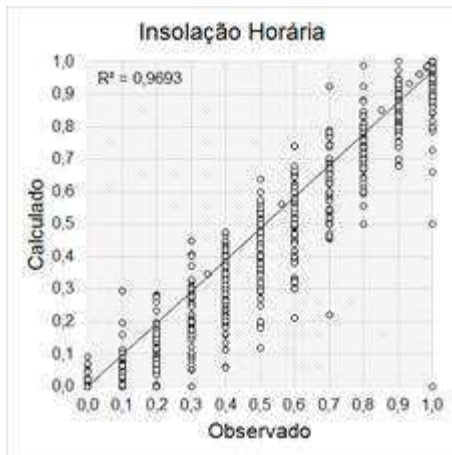
As análises estatísticas mostraram que, independentemente da sazonalidade, a região de estudo detém características ambientais adequadas que justificam investimentos no desenvolvimento de técnicas de aproveitamento da energia solar. Neste contexto, o uso do modelo SPDH permite explorar com maior precisão e resolução temporal as informações contidas nas fitas heliográficas obtidas na estação climatológica de Natal. Dados da insolação na partição horária possibilitam avaliar mudanças no padrão de variabilidade diurna da cobertura de nuvens e essa informação é fundamental na elaboração de projetos de energia solar.

No processo de ajuste e validação do Sistema de Processamento Digital de Heliogramas – SPDH foram utilizados heliogramas da estação climatológica do INMET referente aos meses de junho dos anos de 2010, 2011 e 2012 e aos meses de novembro dos anos de 2011 e 2012 totalizando 150 dias de medição. O modelo de regressão simples foi utilizado na avaliação.

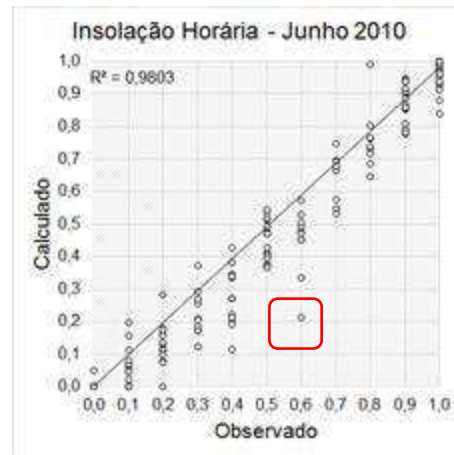
Diagramas de dispersão e coeficientes de determinação são apresentados na Figura 5.37. Observa-se claramente uma tendência em subestimar os valores, apesar de algumas situações indicarem superestimativas. Isso é confirmado pela maior concentração de pontos abaixo da linha de tendência.

No processamento dos dados e checagem das estimativas verificou-se que alguns dos valores com indício de subestimativa não estavam associados com ineficiência do modelo. Foi constatado que eles ocorreram em função de falhas no procedimento de leitura (observação) dos heliogramas. Um exemplo típico desse tipo de falha foi detectado nos dados coletados no dia 14 de junho de 2010 como pode ser visto na comparação entre as ilustrações apresentadas

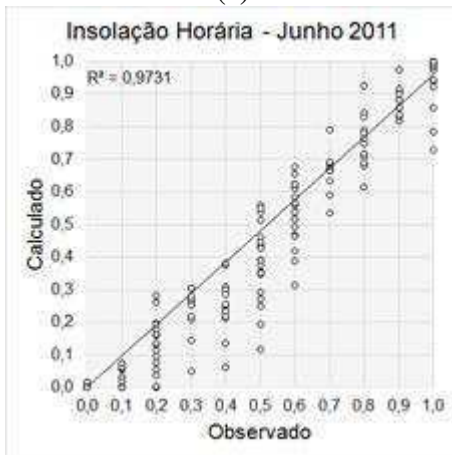
nas Figuras 5.37b e 5.37a. O valor subestimado pelo modelo da insolação no período entre 13 e 14 horas está destacado em vermelho nas Figuras 5.37b e 5.37e.



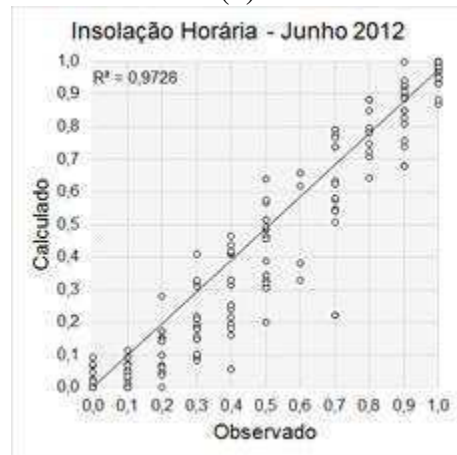
(a)



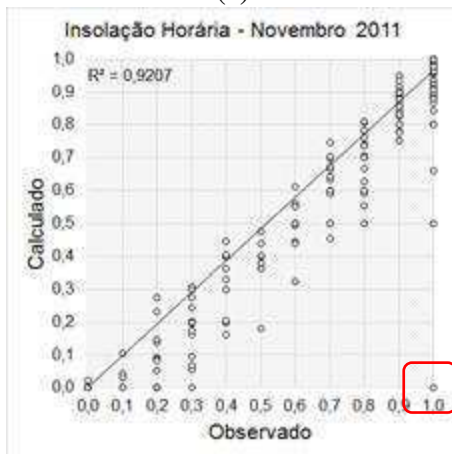
(b)



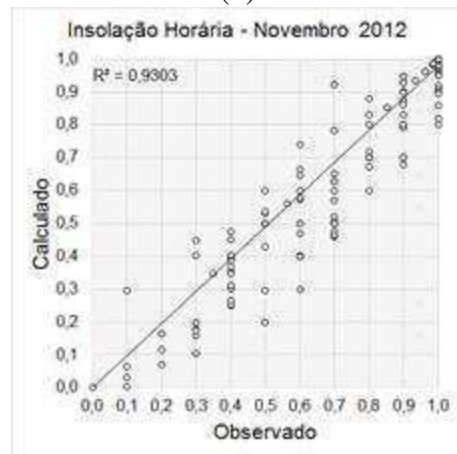
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.37: Insolação horária valores calculados versus observados: (a) para todo o período, (b) em junho 2010, (c) junho 2011, (d) junho 2012, (e) novembro 2011 e (f) em novembro de 2012. Os retângulos vermelhos indicam valores subestimados pelo modelo.

A anotação de 0,6 feita pelo observador diretamente no heliograma evidencia um dos tipos mais comuns de erro de leitura. Na Figura 5.38a é possível verificar que a área queimada no heliograma indicada pelo retângulo preto corresponde a um valor menor que o registrado (0,6). Outro exemplo peculiar foi constatado nos registros do dia 09 de novembro de 2011. Nessa situação verificou-se que não existe sinal de insolação (queima da fita heliográfica) no período entre 08 e 09 horas da manhã. Entretanto, foi registrado 1 hora de insolação (Figura 5.38b).

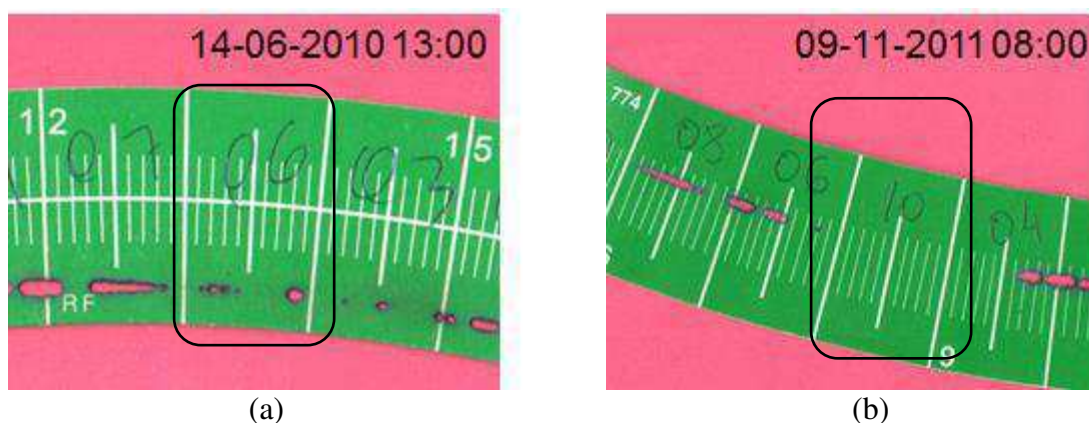
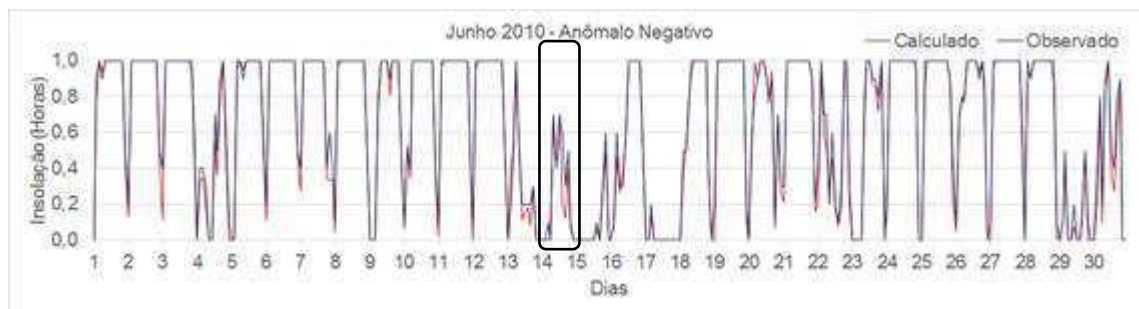


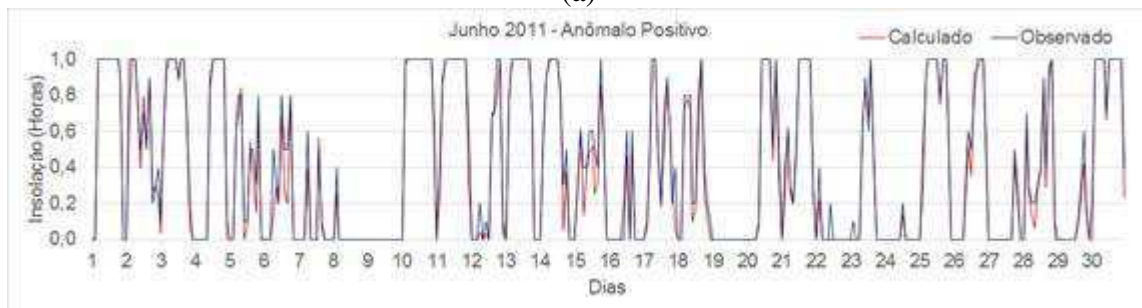
Figura 5.38: Casos de superestimativas na leitura dos heliogramas (registro de valores maiores do que o período de tempo com queima do heliograma). Os retângulos pretos indicam as áreas de queima e o registro feito pelo observador.

Uma das etapas importantes no processo de validação de um modelo é a quantificação entre os valores observados e calculados pelo modelo. Através desse processo podem ser calculados os erros inerentes, que nada mais são que a diferença entre os valores observados e os valores calculados (Tomás, 1997).

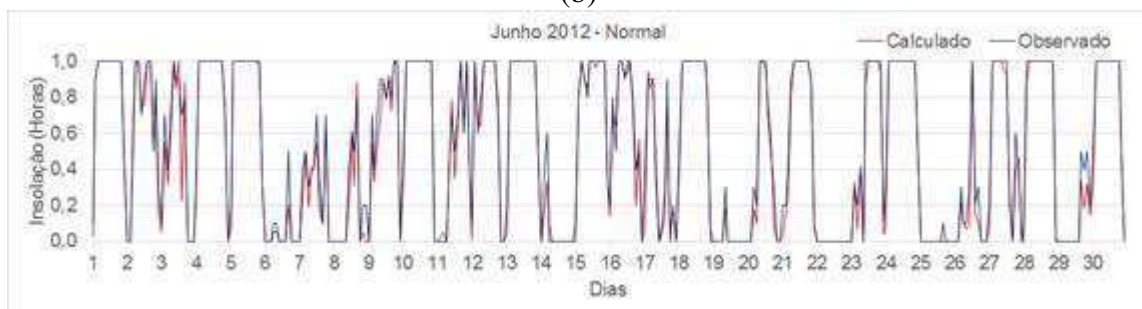
A comparação visual das séries temporais dos valores observados e calculados (Figura 5.39) mostra que a série de dados estimada pelo modelo (curva vermelha) é similar à série de dados observada (curva azul). De maneira geral, a evolução temporal das séries de dados calculados apresenta boa consistência com as séries de dados observados. As maiores discrepâncias entre os valores medidos e estimados são observadas nos extremos negativos e, particularmente em novembro de 2011, no dia 9 e no período de 17 a 20 (destacados com retângulos na cor preta). Esses horários correspondem aos horários típicos de menor incidência de irradiância direta, implicando numa queima mais suave do heliograma.



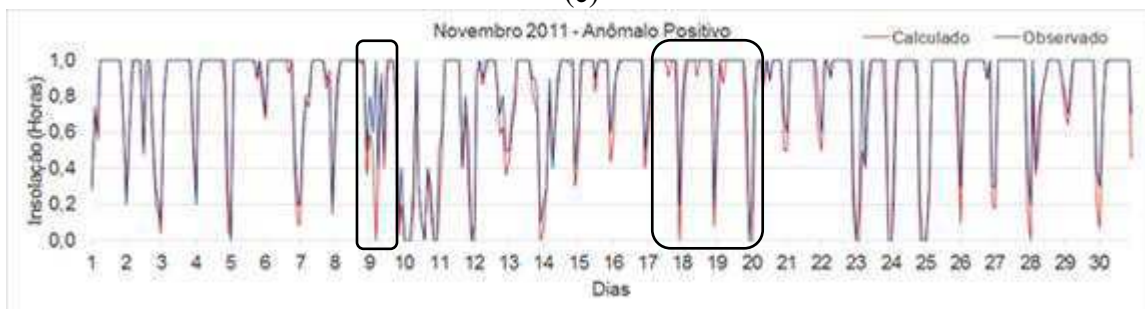
(a)



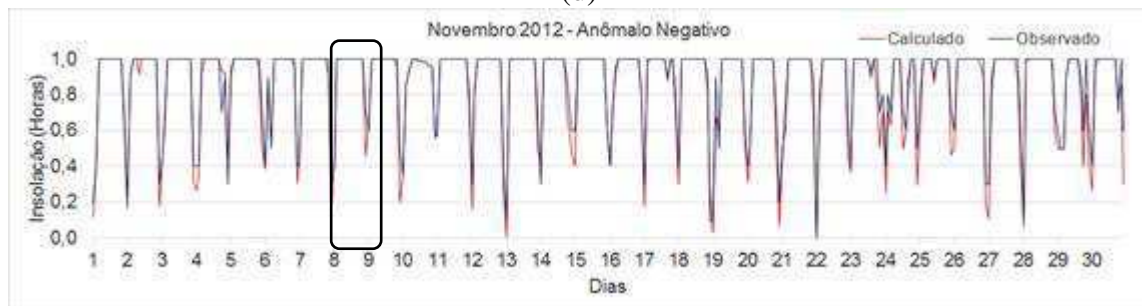
(b)



(c)



(d)



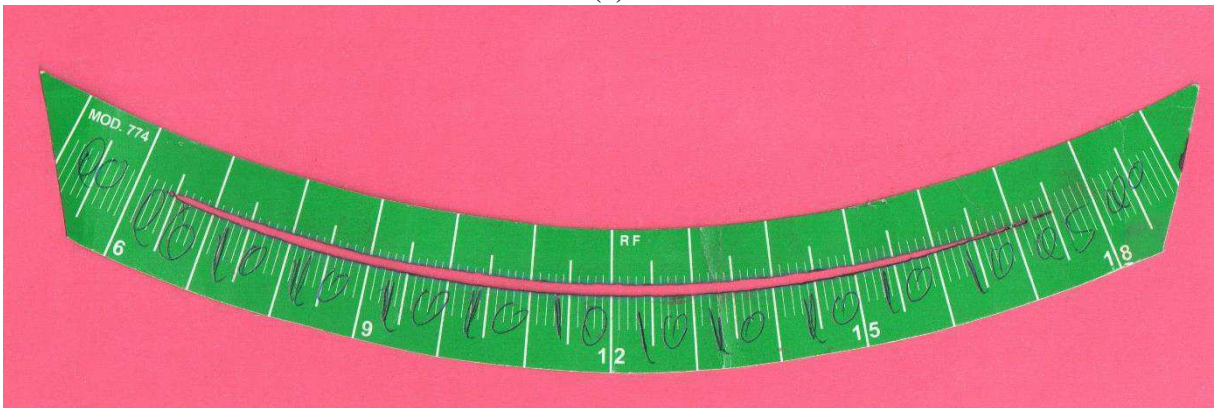
(e)

Figura 5.39: Evolução temporal da insolação horária calculada pelo SPDH (linha vermelha) e observada (linha azul) para: (a) junho 2010, (b) junho 2011, (c) junho 2012, (d) novembro 2011 e (e) novembro de 2012.

Um exemplo claro desse efeito pode ser observado no heliograma do dia 09 de novembro de 2012 (Figura 5.40). Os valores subestimados pelo modelo estão entre as 17 e 18 horas da tarde (Figura 5.40a) e correspondem a uma queima muito suave no heliograma original (Figura 540b).



(a)



(b)

Figura 5.40: Evolução temporal da insolação horária calculada pelo SPDH (linha vermelha) e observada (linha azul) (a) e imagem digital do heliograma original (b) para o dia 09 de novembro de 2012.

No período entre os dias 17 e 19 de novembro de 2011, verifica-se que o modelo subestimou, conforme área destacada na Figura 5.39d. Porém, ao observar as imagens digitais dos heliogramas percebe-se que eles não estavam queimados nos horários em que houve subestimativa por parte do modelo. Por outro lado, na contagem do observador havia registro de insolação (Figura 5.41).

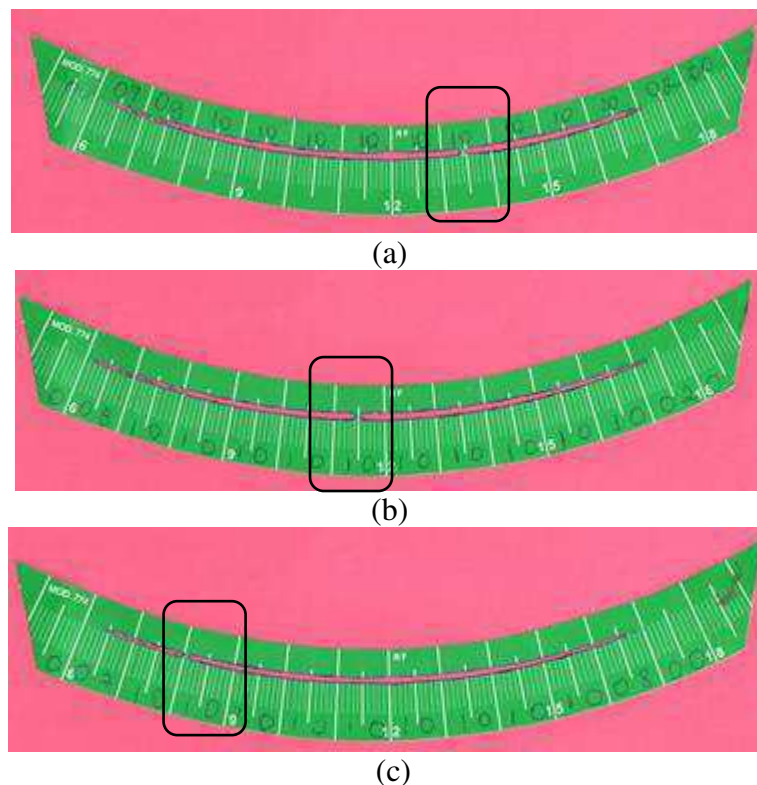


Figura 5.41: Imagem digital dos heliogramas referente aos dias (a) 17, (b) 18 e (c) 19 de novembro de 2011.

5.2.1 Indicadores de Avaliação

Além dos coeficientes de correlação e determinação foram calculados o erro médio e o desvio médio quadrático (DMQ). Os resultados são apresentados na Tabela 5.23. Os erros médios podem apresentar resultados negativos (subestimativa) ou positivos (superestimativa). Quanto mais próximo de zero, melhor é o resultado. Observa-se que, apesar de baixos, os valores dos erros predominantemente negativos indicam que, em média, o SPDH subestimou os valores.

Conforme mencionado anteriormente, uma das causas da diferença entre observações e estimativas é o efeito dos baixos valores de radiação solar no início da manhã no final da tarde. Esse impacto é mais claramente detectado através da comparação entre as séries com dados horários apresentada na Tabela 5.23, na qual os maiores erros são observados na faixa de horário das 06 às 07 horas (-0,060) e das 17 às 18 horas (0,071). Nesses horários os erros atingiram valores da ordem de -0,1.

Tabela 5.23: Valores dos erros e coeficientes de correlação entre os dados estimados pelo SPDH e os dados observados para todo período e para cada mês separadamente.

Mês	Erro	DMQ	r	Significância
Período Completo	-0,029	0,076	0,984*	0,000
Junho 2010	-0,024	0,061	0,990*	0,000
Junho 2011	-0,029	0,073	0,986*	0,000
Junho 2012	-0,026	0,075	0,986*	0,000
Novembro 2011	-0,041	0,098	0,960*	0,000
Novembro 2012	-0,022	0,069	0,964*	0,000

*99% de significância estatística.

Tabela 5.24: Valores dos erros e coeficientes de correlação entre os dados horários estimados pelo SPDH e os dados observados.

Hora	Erro	DMQ	r	Significância
06-07	-0,060	0,102	0,942*	0,000
07-08	-0,037	0,076	0,984*	0,000
08-09	-0,025	0,105	0,966*	0,000
09-10	-0,019	0,061	0,989*	0,000
10-11	-0,006	0,036	0,996*	0,000
11-12	-0,016	0,047	0,993*	0,000
12-13	-0,012	0,043	0,993*	0,000
13-14	-0,018	0,071	0,981*	0,000
14-15	-0,019	0,062	0,985*	0,000
15-16	-0,021	0,066	0,985*	0,000
16-17	-0,038	0,080	0,983*	0,000
17-18	-0,071	0,116	0,950*	0,000

*99% de significância estatística.

5.2.2 Insolação na partição horária como alternativa em estimativa da Irradiância Global Incidente

Dados obtidos de satélites geoestacionários amplamente utilizados na aplicação de modelos no cálculo da transferência radiativa na atmosfera possibilitam estimativas razoáveis da irradiação global incidente.

O SPDH surge como uma alternativa viável na geração de forma automatizada de um banco de dados de insolação com alta resolução temporal. A utilização de valores horários da insolação permite detectar com maior exatidão sua variabilidade no ciclo diurno. É possível também fazer associações entre o comportamento da insolação com outros elementos

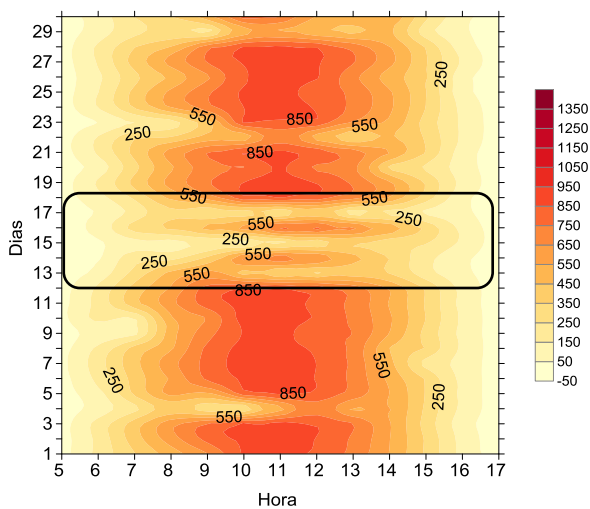
atmosféricos. A realização deste tipo de análise pode representar uma solução eficaz no dimensionamento dos principais sistemas de energia solar, seja na escolha da tecnologia a ser utilizada, seja no dimensionamento dessa tecnologia.

Diagramas ilustrando a evolução temporal (horária e diária) da Irradiância Global Horizontal (GHR), Insolação (I) e do Índice de Transmissividade (Kt) para junho de 2010 são apresentados na Figura 5.42. Ela indica uma forte relação entre aumento da nebulosidade e queda nos valores da insolação e da GHR (Figuras 5.42a e 5.42b).

No dia 16 os valores mais baixos de insolação foram registrados no período da manhã, entre 6 e 12 horas local (Figura 5.42b). Comportamento inverso é observado no período da tarde. A mudança no padrão de comportamento da insolação tem associação direta com o aumento da nebulosidade sobre a cidade de Natal como pode ser observado nas imagens de satélite apresentadas nas Figuras 5.43a e 5.43b. Com a redução da atividade convectiva profunda e nebulosidade na cidade de Natal no período da tarde (Figura 5.43c), mais precisamente entre 12 e 16 horas local os valores da insolação aumentam substancialmente como pode ser constatado na evolução horária. Esse comportamento é facilmente detectado nos diagramas através das áreas realçadas por tons de cor laranja mais intensos nas áreas destacadas pelo retângulo na Figura 57b. A média horária dos valores de insolação para o mês de junho de 2010 pode ser observada na Figura 5.42d.

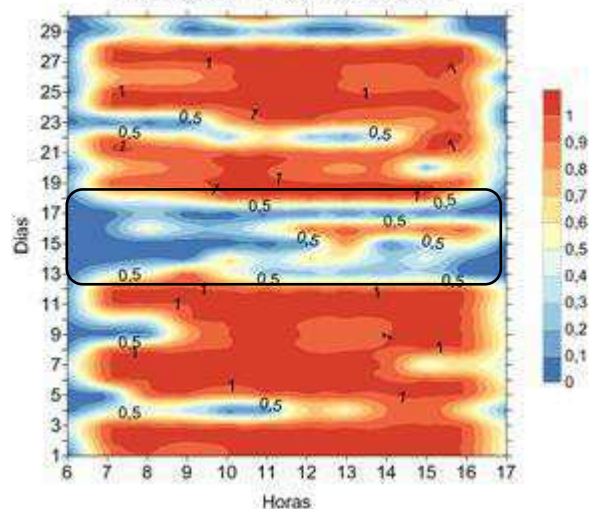
Os resultados indicam valores médios em torno de 0,7 horas de insolação na grande maioria dos casos, com exceção dos valores no intervalo das 06 às 07 horas, com média de 0,1 horas de insolação, e das 17 às 18, com um valor aproximado de 0,3 horas de insolação.

Irradiância Global Horizontal (W/m²) - Junho 2010



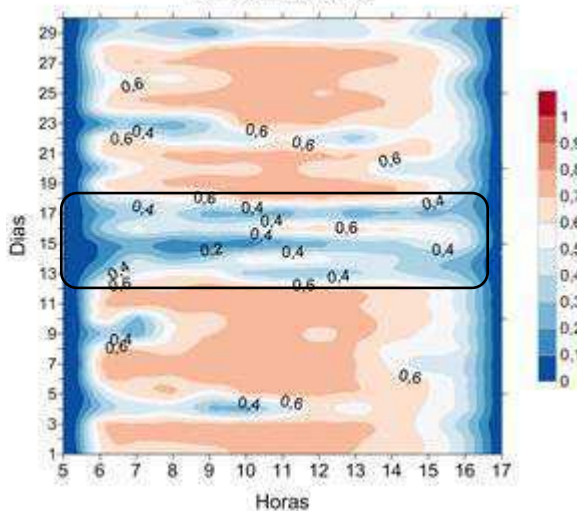
(a)

Insolação (Horas) - Junho 2010



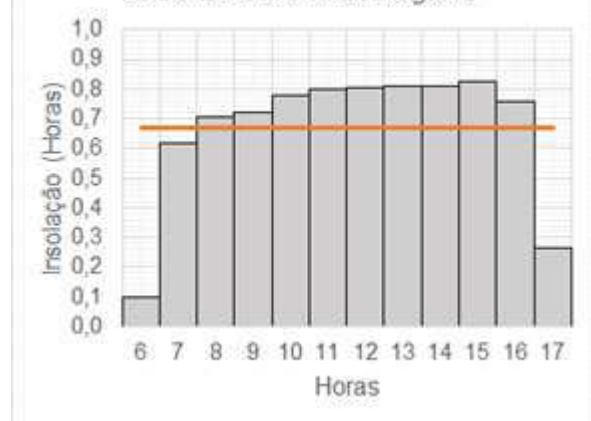
(b)

Kt - Junho 2010



(c)

Junho 2010 - Anômalo Negativo



(d)

Figura 5.42: Variabilidade horária ao longo do mês de junho de 2010 para (a) Irradiância Global Horizontal (W/m²), (b) da Insolação (Horas), do Índice de Transmissividade (Kt) (c) e Média horária mensal da insolação para o mês de junho de 2010. A linha laranja em (d) indica o valor médio mensal.

Esses resultados refletem claramente o grau de relação entre a insolação, nebulosidade e quantidade de irradiação solar que atinge a superfície. Constata-se, portanto, que a utilização de dados de Insolação em alta resolução temporal (horária) permite monitorar e estimar a influência de mecanismos atmosféricos locais no teor de umidade do ar e variação da nebulosidade. Essa informação é de suma importância para se investigar e compreender o montante, ou seja, a quantidade de radiação disponível em superfície para a geração de energia elétrica e, principalmente, em sistemas de energia solar com concentração ou em

sistemas de aproveitamento da energia solar térmico, já que utilizam a componente direta como principal fonte de geração e, portanto, são altamente dependentes da insolação.

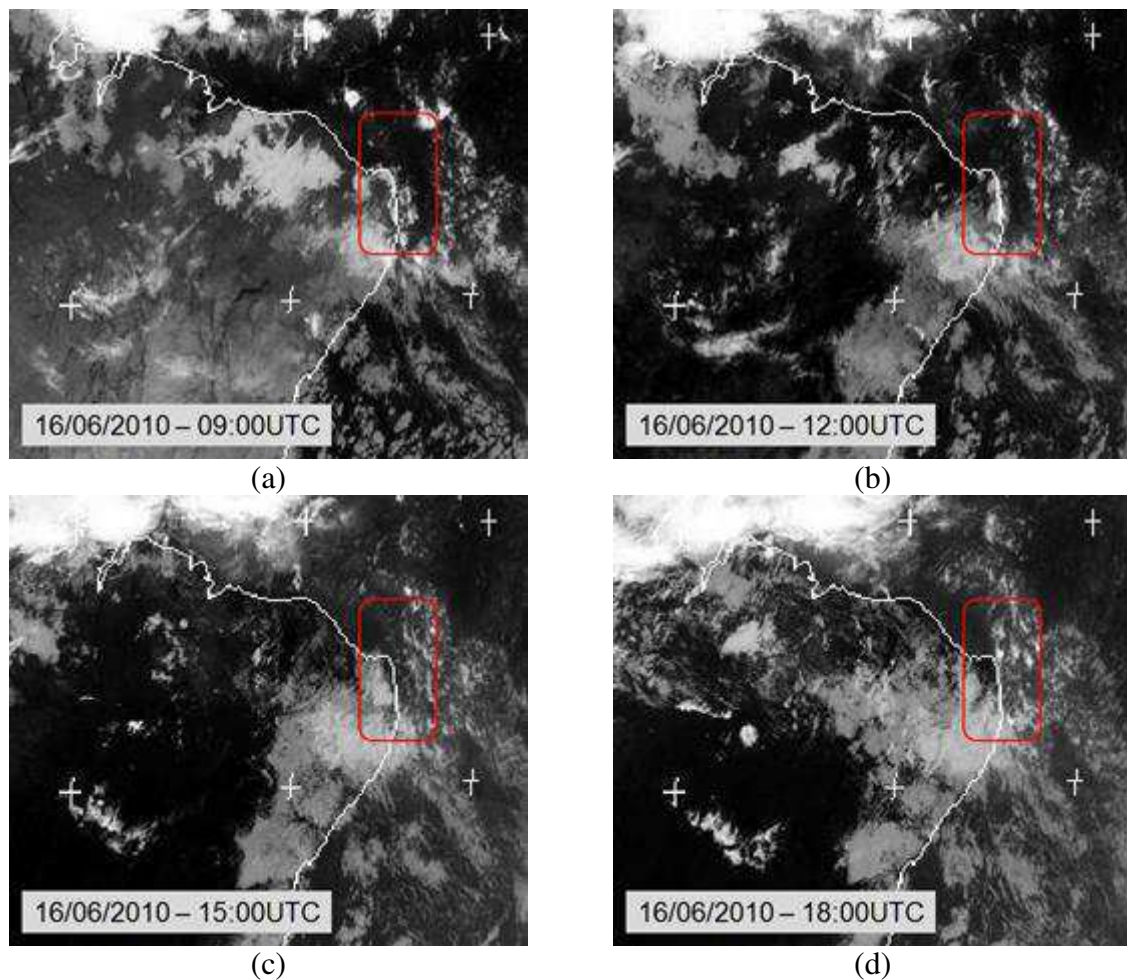


Figura 5.43: Imagens do satélite meteorológico GOES-E na banda do infravermelho térmico para o dia 16 de junho de 2010 às (a) 09:00 UTC, (b) 12:00 UTC, (c) 15:00 UTC e (d) 18:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é $HL=UTC-3$ horas. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://www.sat.dundee.ac.uk>).

A transmissividade radiativa também é fortemente influenciada pela quantidade de nuvens presentes na atmosfera. Menezes e Dantas (2002) mostraram que quando há presença de nuvens na atmosfera a refletividade é muito maior do que a refletividade da atmosfera sem nuvens, implicando em aumento ou redução da transmissividade radiativa. Através do Índice de transmissividade (Kt) pode-se verificar a condição com que a radiação solar, após a passagem pela atmosfera, alcança a superfície, isto é, se diretamente ou de forma difusa (Querino *et al.*, 2011).

Através da evolução diária da GHR, I e Kt (Figura 5.42) verifica-se que no mês de junho de 2010 (anômalo negativo), a maior parcela da GHR foi formada por DNI (parte direta). Neste caso há uma maior correlação da GHR com a insolação.

É importante ressaltar que o dado horário de insolação permite verificar de forma clara a presença de radiação direta na superfície e sua ausência (nebulosidade), dado não diretamente observado através do Kt. Essa informação é fundamental no planejamento e dimensionamento de sistemas de geração de energia ou mesmo sistemas de aproveitamento térmico, como é o caso dos aquecedores solares, amplamente utilizados na rede hoteleira e em construções populares de programas como o Minha Casa Minha Vida (<http://mcmv.caixa.gov.br/minha-casa-minha-vida-ja-levou-aquecimento-solar-a-mais-de-183-mil-familias/>). Neste caso a radiação solar que chega à superfície é convertida em energia térmica. Dessa forma, altos índices de insolação e temperatura favorecem a tecnologia.

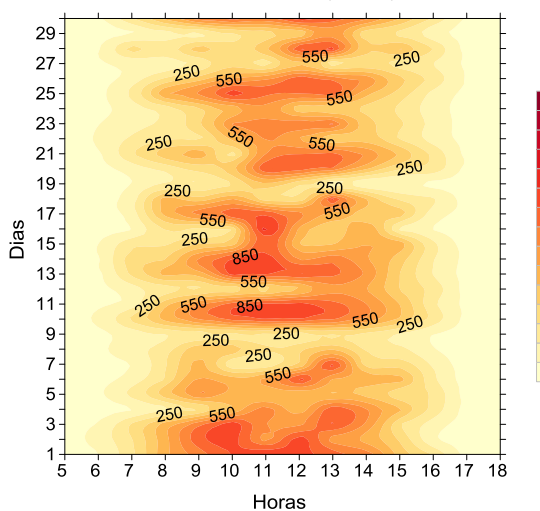
Ao contrário de junho de 2010 (anômalo negativo), em junho de 2011 (anômalo positivo) foram registrados índices menores de GHR e maior teor de umidade na atmosfera.

A evolução horária e diária da GHR, Insolação e Kt ao longo do mês de junho de 2011 são apresentadas na Figura 5.44. Verifica-se que durante todo o mês houve uma grande variabilidade na insolação horária associada ao padrão de nebulosidade na região de Natal. O padrão de variabilidade do índice de transmissividade (Kt) (Figura 5.44c) é bastante semelhante ao observado para GHR (Figura 5.44a).

Observa-se que a componente difusa contribui de forma mais significativa na GHR e, portanto, os valores do Kt estão associados com a parcela de radiação difusa que chega à superfície. Esse comportamento é bastante evidente no período de 7 a 9 onde se observa uma atenuação do Kt variando em conformidade com a GHR (Figura 5.44a e 5.44c). No mesmo período quase não há registro de insolação. Segundo o Boletim Climanálise (2011) durante esse período houve a atuação de DOL.

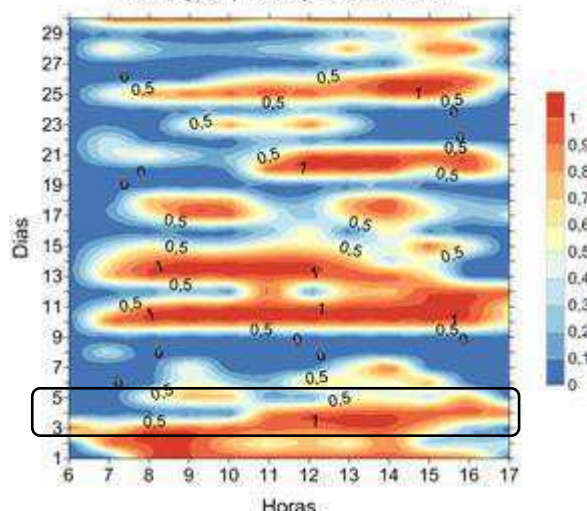
A mudança no padrão de variabilidade da insolação tem associação direta com o aumento/diminuição da nebulosidade sobre a cidade de Natal. Com a redução da nebulosidade (Figura 5.45c e 5.45d) no período da tarde, mais precisamente entre 11 e 17 horas local, os valores da Insolação aumentam substancialmente como pode ser constatado na evolução horária, comportamento facilmente detectado pela cor laranja mais intensa na área destacada pelo retângulo na Figura 5.44b.

Irradiância Global Horizontal (W/m²) - Junho 2011



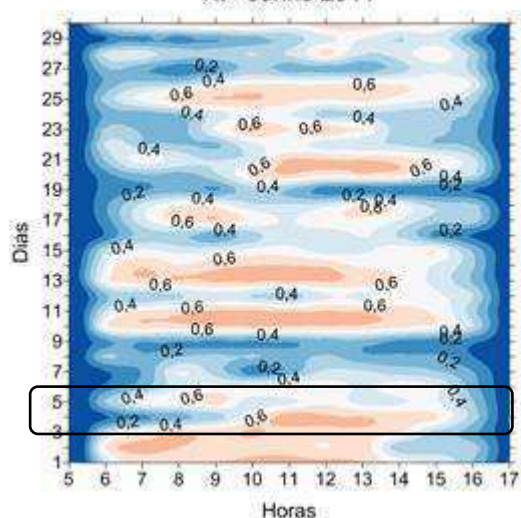
(a)

Insolação (Horas) - Junho 2011



(b)

Kt - Junho 2011



(c)

Junho 2011 - Anômalo Negativo



(d)

Figura 5.44: Variabilidade horária ao longo do mês de junho de 2011 para (a) Irradiância Global Horizontal (W/m²), (b) da Insolação (Horas), do Índice de Transmissividade (Kt) (c) e Média horária mensal da insolação para o mês de junho de 2011. A linha laranja em (d) indica o valor médio mensal.

A média horária dos valores de insolação para o mês de junho de 2011 pode ser observada na Figura 5.44d. A média horária de insolação é de aproximadamente 0,4 horas em cada intervalo horário e representa uma redução de 0,3 horas em relação ao mês de junho de 2010, seco.

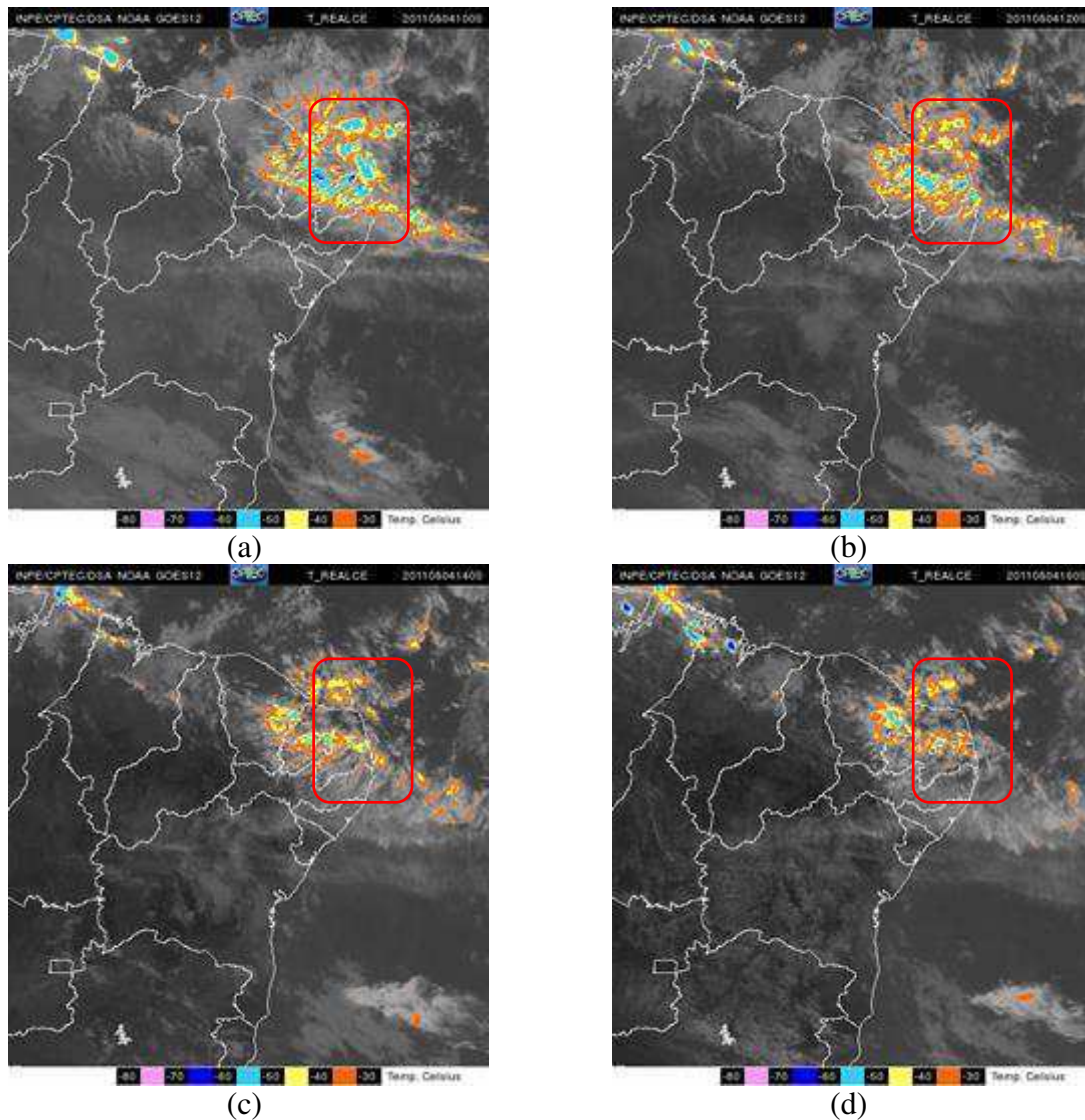


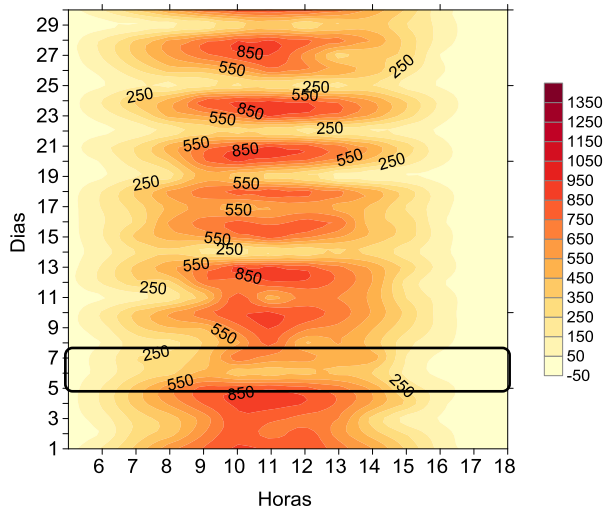
Figura 5.45: Imagens realçadas do satélite meteorológico GOES-12 na banda do infravermelho térmico para o dia 04 de junho de 2011 às (a) 10:00 UTC, (b) 12:00 UTC, (c) 14:00 UTC e (d) 16:00 UTC. O retângulo vermelho está aproximadamente centrado sobre a cidade de Natal-RN. Observe que a hora local (HL) é $HL=UTC-3$ horas. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>).

No mês de junho de 2012, classificado como normal, observa-se que houve uma alternância de dias com altos valores de insolação e dias com valores menores (Figura 5.46b). Essa variabilidade também é verificada na evolução temporal da GHR e do Índice Kt. Nos dias com maior cobertura de nuvens observa-se também variabilidade similar entre o Kt e a GHR, em função de uma maior parcela da radiação difusa.

A média horária mensal dos valores de insolação para o mês de junho de 2012 é apresentada na Figura 5.46d. Observa-se um valor médio de aproximadamente 0,5 horas de

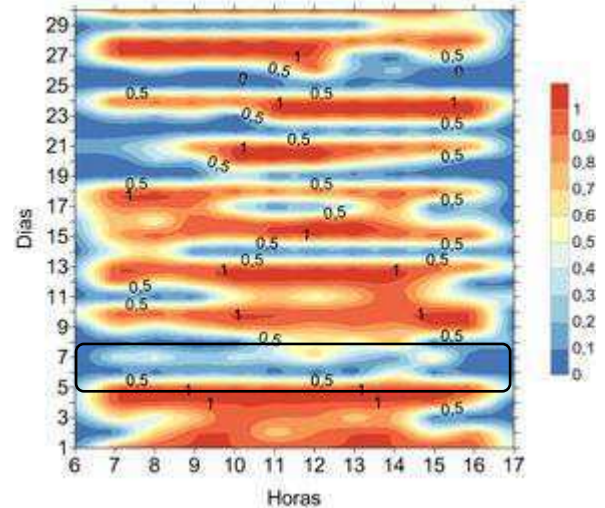
insolação. No intervalo das 06 às 07 horas e de 17 às 18 horas os valores são mais baixos, aproximadamente 0,1 horas de insolação.

Irradiância Global Horizontal (W/m²) - Junho 2012



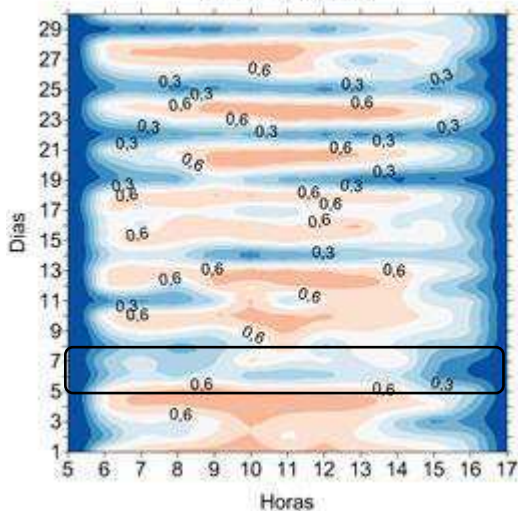
(a)

Insolação (Horas) - Junho 2012



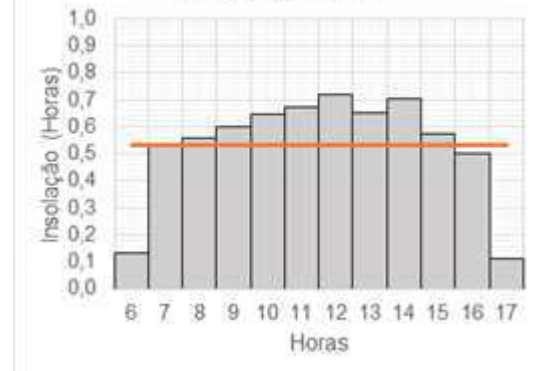
(b)

Kt - Junho 2012



(c)

Junho 2012 - Normal



(d)

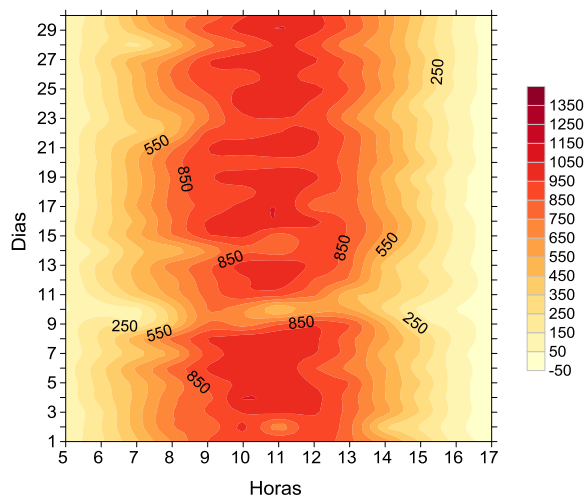
Figura 5.46: Variabilidade horária ao longo do mês de junho de 2012 para (a) Irradiância Global Horizontal (W/m²), (b) da Insolação (Horas), do Índice de Transmissividade (Kt) (c) e Média horária mensal da insolação para o mês de junho de 2012. A linha laranja em (d) indica o valor médio mensal.

Os meses de novembro apresentam altos valores de GHR e insolação em praticamente todos os dias do mês e durante todo o período diurno. O mês de novembro mostra o potencial elevado que a cidade de Natal tem para o aproveitamento da energia solar. A alta disponibilidade de recurso solar associado a uma média de temperaturas máximas menos elevadas se comparada a outras cidades (não mostrado) fazem de Natal uma cidade com farta disponibilidade de recurso solar e boas características para o seu aproveitamento.

No mês de novembro de 2011 (anômalo positivo), apenas no dia 10 observa-se uma menor incidência de GHR (Figura 5.47a) e menores valores de insolação (Figura 5.47b). Os baixos valores estão associados a nebulosidade sobre a cidade. No mês de novembro de 2012 observa-se altos índices de GHR e insolação ao longo de todo o mês (Figura 5.49a e 5.49b). Em ambos os meses também foi registrado altos valores do índice de transmissividade (Kt) indicando uma atmosfera límpida na maior parte do dia (Figuras 5.47c e 5.49c).

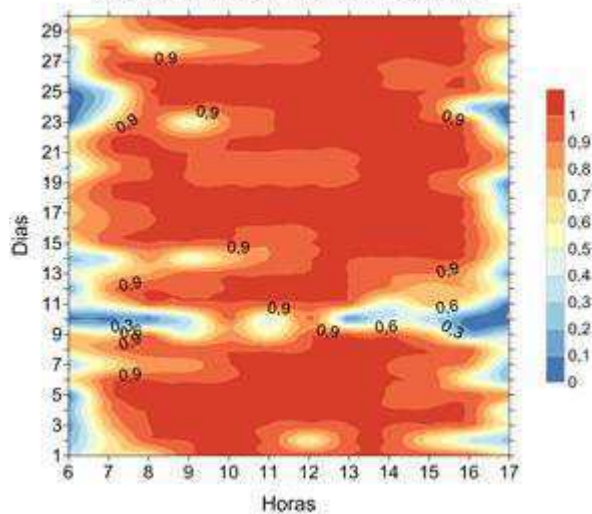
A média horária mensal dos valores de insolação para os meses de novembro foi de aproximadamente 0,8 horas de insolação, como pode ser observado nas Figuras 5.47d e 5.49d.

Irradiância Global Horizontal (W/m²) - Novembro 2011



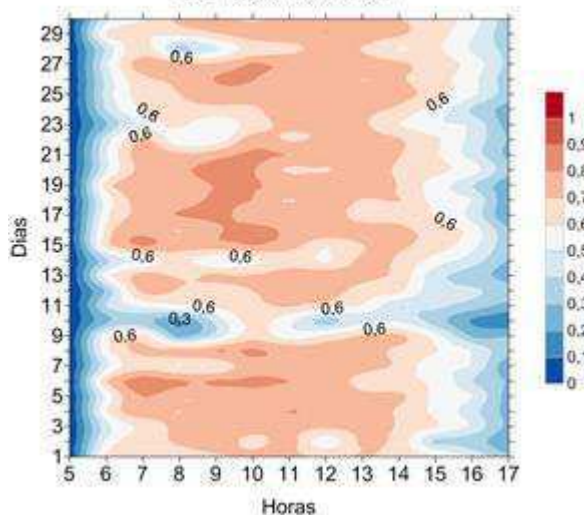
(a)

Insolação (Horas) - Novembro 2011

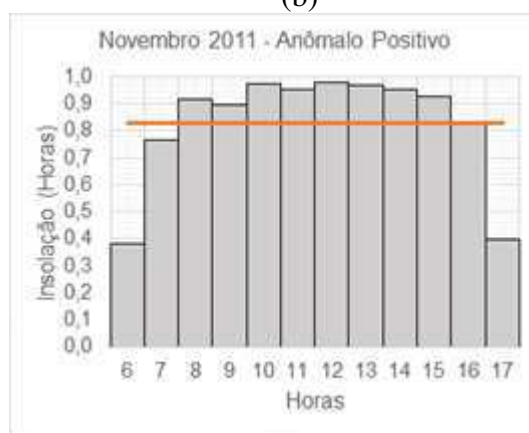


(b)

Kt - Novembro 2011



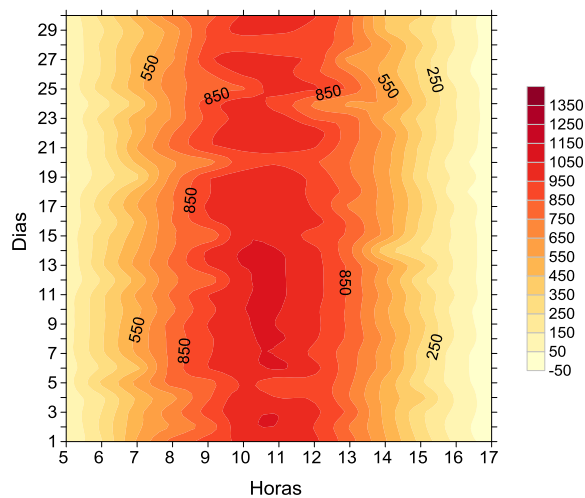
(c)



(d)

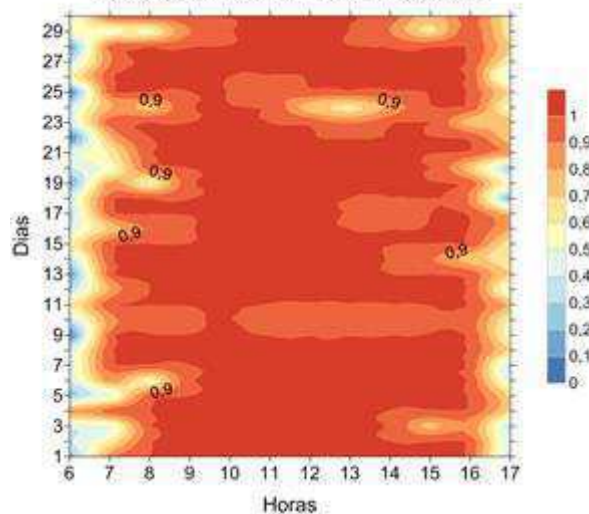
Figura 5.47: Variabilidade horária ao longo do mês de novembro de 2011 para (a) Irradiância Global Horizontal (W/m²), (b) da Insolação (Horas), do Índice de Transmissividade (Kt) (c) e Média horária mensal da insolação para o mês de novembro de 2011. A linha laranja em (d) indica o valor médio mensal.

Irradiância Global Horizontal (W/m²) - Novembro 2012



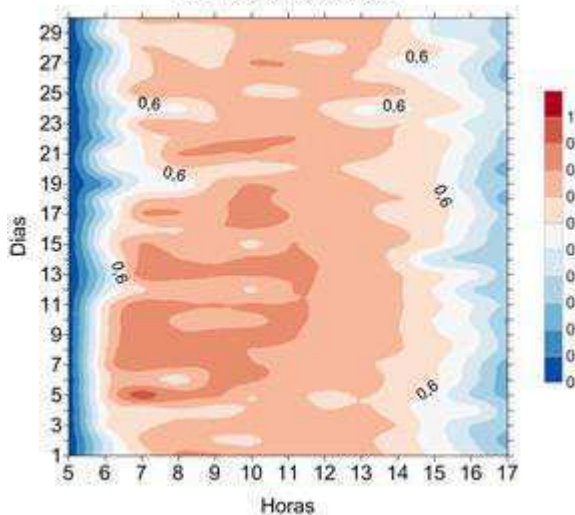
(a)

Insolação (Horas) - Novembro 2012



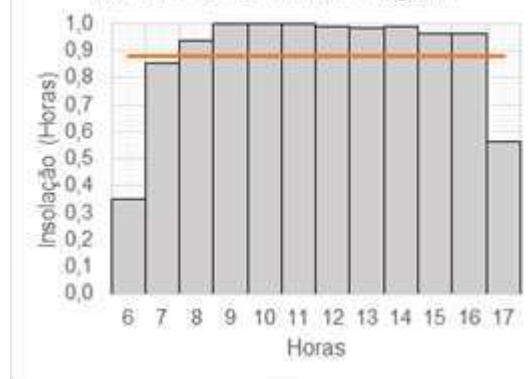
(b)

Kt - Novembro 2012



(c)

Novembro 2012 - Anômalo Negativo



(d)

Figura 5.48: Variabilidade horária ao longo do mês de novembro de 2012 para (a) Irradiância Global Horizontal (W/m²), (b) da Insolação (Horas), do Índice de Transmissividade (Kt) (c) e Média horária mensal da insolação para o mês de novembro de 2012. A linha laranja em (d) indica o valor médio mensal.

6 CONCLUSÕES

Os resultados da pesquisa permitiram concluir que:

A associação entre técnicas multivariadas permitiu expandir a habilidade explanatória das técnicas estatísticas tornando o conjunto de técnicas associadas uma ferramenta robusta, contribuindo para resultados mais precisos e confiáveis.

A aplicação da análise fatorial evidenciou que a maior parte da variabilidade captada no primeiro fator, de maior peso, está relacionada ao padrão de variabilidade diurno da nebulosidade atuante sobre a cidade de Natal, afetando diretamente a quantidade de radiação solar que chega à superfície e que nos meses de junho é devido principalmente a influência dos Distúrbios Ondulatórios de Leste.

A análise de agrupamentos permitiu identificar 3 grupos de dias homogêneos em cada mês baseados na quantidade de radiação solar que chega à superfície.

Com a aplicação da técnica da análise discriminante foi possível comprovar os agrupamentos formados com a análise de agrupamentos e verificar que variáveis tiveram o maior poder discriminante em cada grupo formado.

O padrão de nebulosidade e chuvas representa um fator determinante na modulação da radiação solar que atravessa a atmosfera e desempenha um papel importante disponibilidade de energia solar e a circulação atmosférica (intensidade e direção do vento) exerce um controle importante nas condições ambientais e conseqüentemente na transferência de umidade e energia.

O SPDH desenvolvido no CTGAS-ER (Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis) permitiu explorar com maior precisão as informações contidas nos heliogramas obtidos no período de 2010 a 2012, na estação climatológica de Natal (5,91°S, 35,2°W, 48,6m) pertencente ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Verificou-se na validação do modelo SPDH que os valores calculados pelo modelo estiveram bem correlacionados com os valores registrados nos heliogramas com erros médios calculados menores que 0,1. As menores correlações e maiores erros médios foram registrados nos intervalos de horário entre 06 e 07 horas (-0,060) e entre 17 e 18 horas (-0,071) possivelmente

relacionado a menor intensidade de radiação direta, implicando numa queima mais leve e superficial dos heliogramas nesses horários.

O uso simultâneo de dados horários de insolação, nebulosidade e quantidade de irradiação solar que atinge a superfície em períodos meteorológicos extremos indica que a disponibilidade da insolação na resolução temporal horária permite monitorar com maior precisão a influência de fenômenos atmosféricos atuantes na variação da nebulosidade sobre a cidade de Natal. A compreensão sobre mudanças no padrão de nebulosidade local é essencial na avaliação da disponibilidade da radiação para geração de energia elétrica por sistemas de energia solar.

Um dos resultados mais importantes que foi possível concluir é que independente do período analisado, os resultados indicam que existe grande potencial para aproveitamento de energia solar em Natal, dado que mesmo em períodos com atuação de fenômenos causadores de chuva, como é o caso dos DOLs, em muitos casos a chuva se concentra em poucos dias do mês e a períodos restritos dos dias, garantindo condições ambientais privilegiadas de aproveitamento da energia solar.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAKER, D. A.; KUMAR, V.; DAY, G. S. Pesquisa de marketing, São Paulo: **Atlas**, 745p., 2001.
- ALBUQUERQUE, M. A. **Estabilidade em Análise de Agrupamento**, Dissertação de Mestrado em Biometria, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife/PE, 2005.
- ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. **Energy Conversion Management**, v. 45, p. 1529-1535, 2004.
- AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia oriental utilizando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.4, 423 - 434, 2012.
- ANEEL, **Cadernos Temáticos ANELL** – Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica, Brasília-DF, 2005.
- ANGSTRÖN, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society** v. 50, p. 121-126, 1924.
- AZEVEDO, A. J.; MARQUES, C. V. **Insolação - Atlas do meio ambiente**. Lisboa, Portugal: Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais. Notícia explicativa, 1987.
- BARBOSA, T. F.; CORREIA, M. F. Sistemas convectivos intensos no semiárido brasileiro: o controle da grande escala. **Revista Brasileira de Meteorologia**, V. 20, p. 395-410, 2005.
- BELÚCIO, L. P.; SILVA, A. P. N; SOUZA, L. R.; MOURA, G. B. A; Radiação Solar Global Estimada a Partir da Insolação Para Macapá (AP). **Revista Brasileira de Meteorologia**. V.29, n.4, p. 494-504, 2014.
- BERRY, F. A.; BOLLAY, E.; BEERS, N. R. Handbook of Meteorology. New York: **McGraw-Hill Book**, 1068p,1945.
- BEZERRA, F. A. Análise Fatorial. In: CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M (Org.). **Análise Multivariada**. São Paulo, Atlas, 541p, 2007.

BLANCO, F. F.; SENTELHAS, P. C. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, p.295-300, 2002.

BOMVENTI, T. N.; WAINER, I. E. K. C.; TASCETTO, A. S. Relação entre a radiação de onda longa, precipitação e temperatura da superfície do mar no oceano atlântico tropical. **Revista Brasileira de Geofísica**. Vol 24, n° 4, São Paulo, 2006.

BOWER, D.; MCGREGOR, G. R.; HANNAH, D. M.; SHERIDAN, S. C. Development of a spatial synoptic classification scheme for western Europe. *International Journal of Climatology*. 27: 2017–2040. Published online 22 March 2007 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/joc.1501, 2007.

BRAGHIERE, R. K. **Avaliação dos Fluxos Turbulentos de CO₂, Calor Sensível e Latente em Função da Profundidade Óptica do Aerossol sobre o Arco de Deflorestamento da Amazônia Legal Brasileira**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. São Paulo, 142 p., 2013.

BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V.; HELDWEIN, A. B.; PRESTES, S.D.; HORN, J. F. C. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria - RS. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1563-1567, 2012.

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. 629-641, 2008.

BUSSAB, W. DE O; MIAZAKI, E. S; ANDRADE, D. Introdução à análise de agrupamentos. São Paulo: **Associação Brasileira de Estatística**, 105p., 1990.

CEBALLOS, J.C. e BRAGA, C, C. Missing data assessment in a solarimetric network. **International Journal of Climatology**, 15: 325 – 340, 1995.

CEBALLOS, J. C., et al. Desempenho de heliógrafos e actinógrafos na estimativa de insolação e fluxo direcional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 7(2), p. 563-581, 1992.

CHEN, R.; KANG, E.; JI, X.; YANG, J.; ZHANG, Z. Trends of the global radiation and sunshine hours in 1961 – 1998 and their relationships in China. **Energy Conversion and Management**, v.47, 2859-2866, 2006.

CHOU, S. C.; CHAGAS, D. J.; PAIVA NETO, A. C.; VENTURA, G. M.; LYRA, A.; PEREIRA, E. B. Regime Eólico de Quatro Estações no Nordeste. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. **Anais... XIV SBMet**, 1 CD-ROM, 2006.

CHOU, S. C. **Análise de Distúrbios Ondulatórios de Leste sobre o oceano Atlântico Equatorial Sul**. (INPE – 5222 – TDL / 437). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 153p., 1990.

COMPAGNUCCI, R. H.; SALLES, M. A. Surface Pressure Patterns During the Year Over Southern South America. **International Journal of Climatology**, vol 17, 635-653, 1997.

Companhia Energética de Minas Gerais. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

CORRAR, L. J. P.; FILHO, J.M.D. Análise Multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia. **Ed. Atlas**. São Paulo, 2007.

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

COULSON, K. L. Solar and Terrestrial Radiation – Methods and Measurements, New York, **Academic Press**, 322p. 1975.

COUTINHO, E. C.; FISCH, G. Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) na região do Centro de Lançamento de Alcântara – MA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.2, p. 193-203, 2007.

DAL PAI, A. Contagem de Horas de Brilho Solar para Estações Primavera e Outono por meio de Processamento de Imagens Digitais. **Tékhne e Lógos**, Botucatu, SP, v.1, n. 1, out. 2009.

ENGLEHART, P. J., DOUGLAS, A. V. Diagnosing warm-season rainfall variability in Mexico: A classification tree approach. **International Journal of Climatology** 30: 694–704, 2010.

ESCOBAR, G.; VARGAS, W.; BISCHOFF, S. Winds tides in the Río de la Plata estuary: Meteorological conditions, **International Journal of Climatology**., 24, 1159–1169. 2004.

ESPINOZA, E. S. **Distúrbios Ondulatórios de Leste no Atlântico Tropical**. 1996, 149f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.

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

EVERITT, B. S, LANDAU, S., LEESE, M. Cluster analysis. 4^o ed. London: **Arnold**. 207p., 2001.

EVERITT, B.S. Cluster analysis. 3ed. London: **Heinemann Educational Books**, 122p., 1993.

FARIAS, W. R. G.; CORREIA, M. F., Descargas atmosféricas e interrupções de energia elétrica na área da CHESF: Relação com variáveis atmosféricas em anos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Vol. 23, n.3, 270-281, 2008

FIORIN, D. V.; MARTINS, F. R.; SCHUCH, N. J.; PEREIRA, E. B. Aplicações de redes neurais e previsões de disponibilidade de recursos energéticos solares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, p. 1309, 2011.

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**. 28: 37–544, 2008.

GARAYALDE, E. J. G.; da SILVA, M. G. A.; TAVARES, A. de SÁ. Clasificação mesoclimática da região sul do Brasil pela análise de Componentes Principais. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA, 1., Brasília, 1986. **Anais...** Brasília, Sociedade Brasileira de Meteorologia, p.19- 124., 1986.

GHOSH, S.; SEN, P. K.; DE, U. K.; Classification of tunderstorm and non-thunderstorm days in Calcutta (India) on the basis of linear discriminant analysis. **Atmosfera**, p. 1-12, 2004.

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

- GREEN, M. C.; FLOCCHINI, R. G.; MYRUP, L. O. Use of temporal principal component analysis to determine seasonal periods. **Journal Applied Meteorology**, 32:986-995, 1993.
- GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, 25(4):537-554, 2011.
- HUBERT, C.J. Applied Discriminant Analysis, **Wiley**, New York, USA, 1994.
- IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Toronto: **Academic Press**, 389p, 1983.
- JIANG, N.; HAY, J. E.; FISCHER, G. N. Effects of meteorological conditions on concentrations of nitrogen oxides in Auckland. **Weather and Climate**, 24, 15-34, 2005.
- JUNIOR, W. J. S.; DIAS, P. L. S.; VENDRASCO, É. P. Análise da Dispersão do Modelo AVN com Relação às Ondas de Leste na Região do Atlântico Equatorial. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, **Anais...**, Florianópolis, 2006.
- KARUME, K.; BANDA, E. J. K. B.; MUBIRU, J.; MAJALIWA, M. Correlation between sunshine hours and climatic parameters at four locations in Uganda. **Tanzania Journal Science**. Vol 33, 2007.
- IKKIEHL, J. T.; TRENBERTH, K. E. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. **Bull. America Meteorological Society**, 78, 197-208, 1997.
- KRATZENBERG, M. G.; COLLE, S.; PEREIRA, E. B.; MANTELLI NETO, S. L.; BEYER, H. G.; ABREU, S. L. Rastreabilidade de radiômetros para medição da energia solar no Brasil. **Sociedade Brasileira de Metrologia**, Recife, Brasil, 2003.
- LIMA, F. J. L.; AMANAJÁS, J. C.; GUEDES, R. V. S.; SILVA, E. M. Análises de Componente Principal e de Agrupamento para estudo de ventos para a geração de energia eólica na região do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte, Brasil. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 188-201, 2010. (doi:10.4136/ambi-agua.147)
- MALHOTRA, N. K. Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada (3a ed.). Porto Alegre: **Bookman**, 2001.
- MANLY, B. J. F. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. 3.ed. Porto Alegre: **Bookman**, p.105-115, 2008.

- MAROCO, João. Análise estatística: com a utilização do SPSS. Lisboa: **Sílabo**, 2003.
- MAROCO, João. Análise estatística: com a utilização do SPSS. Lisboa: **Sílabo**, 3ª ed. 822p., 2007.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; SILVA, S. A. B. The influence of cloud cover index on the accuracy of solar irradiance models. **Journal of Meteorology and Atmospheric Physics**, 2007.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; SOUZA ECHER, M. P. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; YAMASHITA, C.; PEREIRA, S. V.; MANTELLI NETO, S. Base de dados climático-ambientais aplicados ao setor energético - Projeto SONDA. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, São José dos Campos, **Anais...**, Brasil. 2005.
- MELO, A. B. C. de. Previsibilidade da precipitação na Região Semi-Árida do Nordeste do Brasil, durante a estação chuvosa, em função do comportamento diário das chuvas na pré-estação. **Dissertação de Mestrado em Meteorologia**. Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA). Universidade Federal da Paraíba – UFPB, 1997.
- MENDOZA, B. Total solar irradiance and climate. **Advances in Space Research**. 35, 882-890, 2005.
- MENEZES, H. E. A.; DANTAS, R. T. Ajustes de funções para estimativa da irradiação difusa em Cajazeiras – PB. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12, **Anais...**, Foz do Iguaçu, 2020.
- MENEZES NETO, O. L.; COSTA, A. A.; RAMALHO, F. P.; Estimativa de Radiação Solar via Modelagem Atmosférica de Mesoescala Aplicada à Região Nordeste do Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, 339-345, 2009.
- MORA, C. Padrões Térmicos no Alto Vale do Zêzere. Condicionantes Topográficas e Meteorológicas. **Finisterra**, XLIV, 87, pp. 55-69, 2009.

MOSCATI, M. C. 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**, n. 27, p. 493-512, 2007.

MOTA, G. V. **Estudo observacional de distúrbios ondulatórios de leste no Nordeste brasileiro**. Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo, p. 92, 1997.

MUÑOZ-DIAZ, D.; RODRIGO, F.S. The North Atlantic oscillation and winter rainfall over the Siberian Peninsula as captured by cluster analysis. **Geophysical Research Abstracts**, v.5, p.865-885, 2003.

OKONKWO, G. N.; NWOKOYE, A. O. C. Relationship between global solar radiation and sunshine hour duration for Bida in Nigéria. **International Journal of Renewable and Sustainable Energy**, 3(2): 43-46, 2014.

OLIVERA SILVA, P. K.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; SILVA, A. B.; SANTOS, S. A. Detecção de padrões homogêneos de vento Parte 2: Análise de Agrupamento. **Ciência e Natura**, Ed. Suplementar, UFSM, 2011.

OLIVEIRA SILVA, P. K., SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; SILVA, A. B.; SANTOS, S. A. Detecção de Padrões Homogêneos de Vento. Parte 2: Análise de Agrupamento. **Revista Ciência e Natura, Edição Suplementar**, UFSM, 2011.

OKOOLA, R. E. Spatial evolutions of the active convective patterns across the Equatorial Eastern Africa region during northern hemisphere spring season using Outgoing Longwave Radiation records. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 66(1):51-63, 1998.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo, **Editora Agronômica Ceres**, 1981.

PANDZIC, K. Principal component analysis of precipitation in the Adriatic-Pannonian área of Yugoslavia. **Journal of Climatology**, v. 8, p. 357-370, 1988.

PEREIRA, M. A. F.; KOBIYAMA, M.; CASTRO, N. M. R. Análise de variâncias pluviométricas na Bacia Hidrográfica do Rio Taboão-RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.3, 409 - 419, 2014.

PEREZ R, SEALS R & ZELENKA A. Comparing Satellite Remote Sensing and Ground Network Measurements for the Production of Site/ Time Specific Irradiance Data. **Solar Energy**, 60(2): 89–96, 1997.

PORFÍRIO, A. C. S.; CEBALLOS, J. C.; SOUZA, J. L.; RODRIGUES, M. L. Uma análise da insolação diária estimada por heliógrafo, pireliômetro equivalente e satélite em Maceió, AL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17, **Anais...**, 2011.

PORFÍRIO, A. C. S. **Estimativa de irradiação solar direta normal mediante satélite: um estudo para o nordeste brasileiro**. Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – São José dos Campos: INPE, 2012.

PORFÍRIO, A. C. S.; CEBALLOS, J. C.; SOUZA, J. L.; RODRIGUES, M. L., Uma análise da insolação diária estimada por heliógrafo, pireliômetro equivalente e satélite em Maceió, AL. **Anais...**, In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 17. Guarapari, ES. Anais, Guarapari SBagro, 2011.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from water surface in relation to solar radiation. Trans. **Royal Society Science Australian**. 64: 114-118, 1940.

QUERINO, C.A.S.; MOURA, M.A.L.; QUERINO, J.K.A.S.; VON RADOW, C.; MARQUES FILHO, A.O. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (kt), externo e interno, em uma floresta de mangue em Alagoas – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.2, p.204 – 294, 2011.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, 185 - 204, 2010.

REIS, E. Estatística multivariada aplicada. Lisboa: **Silabo**, 343 p., 1997.

ROSARIO, N. E.; YAMASOE, M. A.; BRINDLEY, H. ; ECK, T. F.; SCHAFER, J. Downwelling solar irradiance in the biomass burning region of the southern Amazon: Dependence on aerosol intensive optical properties and role of water vapor, **Journal Geophysical Research**., 116, D18304, 2011.

SANTOS, S. A.; CORREIA, M. F.; SILVA ARAGÃO, M. R.; SANTOS, E. P. Análise das Trocas de Água, Energia e CO₂ em Área de Caatinga: Período Úmido. **Ciência e Natura**, Edição Especial, p. 147-150, 2011.

SANTOS, F. A. C. Alterações no Balanço Radiativo e Impactos Climáticos Decorrentes do Uso da Terra no Estado de São Paulo. **Dissertação de Mestrado**. Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2011.

SANTOS, R. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; FIOROVANTI, C. D.; LIMA, R. C.; VALÉRIO FILHO, W. V. V. Estimativa da radiação solar global diária em Ilha Solteira, São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32, 2003, Goiânia, GO. **Anais...** Goiânia: COMBEA, 2003.

SARTORIO, S.D. **Aplicações de técnicas de análise multivariada em experimentos agropecuários usando o software R**. Dissertação – ESALQ/USP, Piracicaba, 131 p., 2008.

SOUZA ECHER, M. P.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua visibilidade: Metodologias de aquisição. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 341-352, 2006.

SILVA, V. P. **Distúrbios Ondulatórios de Leste: Estudo de Casos que Afetaram a Costa Leste do NEB**, Dissertação de Mestrado em Meteorologia, PPGMET, Campina Grande, 2011.

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

STEFESON, B. M.; MELO, A.S.; FERREIRA, R. C.; SOBRINHO, J. E. Influência de Anomalias de Temperaturas da Superfície do Mar sobre Séries Climatológicas da Região Mossoroense no Estado do Rio Grande do Norte. **Anais...**, XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belo Horizonte, 2009.

SUEHRCKE, H.; BOWDEN, R. S.; HOLLANDS, K. G. T. Relationship between sunshine duration and solar radiation. **Solar Energy** 92, 160-171, 2013.

THOMAS, G. E.; STAMNES, K., Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean, **Cambridge University Press**, 1999.

TIBA, C., GROSS, H. FRADENRAICH, N.; LYRA, F. M. Atlas solarimétrico do Brasil – Banco de dados terrestre. Recife, Brasil. **Editora Universitária**, 2000.

TIBA, C.; AGUIAR, R. de; FRAIDENRAICH, N. Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. **Renewable Energy**, v.30, p.957-966, 2005.

TOMÁS, P. M. P. P., **Modelos de Previsão da erosão hídrica em solos agrícolas**. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1997.

UVO, C. B., A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na Região Norte do Nordeste Brasileiro. **Dissertação de Mestrado em Meteorologia**, INPE. São José dos Campos, SP. 1989.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e climatologia. **Versão digital**, 2006.

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.

WILKS, D. S., *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2d ed. International Geophysics Series, Vol. 91, **Academic Press**, 627 pp., 2006.

World Meteorological Organization (WMO). **Dependence on threshold solar irradiance of measured sunshine duration (K. Dehne)**. In: WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO III), 3., 1985, Geneva. Proceedings. Geneva: WMO, p. 263-271. Report No. 22, WMO/TD-No. 50. 1985.

WU, E. M.; KUO, S. A Study on the Use of a Statistical Analysis Model to Monitor Air Pollution Status in an Air Quality Total Quantity Control District. **Atmosphere**, 4, 349-364, 2013.

YAMASOE, M. A., **Apostila da Disciplina Meteorologia Física II** – Universidade de São Paulo, 2006.

YAMAZAKI, Y.; RAO, V.B. Tropical cloudiness over the South Atlantic Ocean. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, Tokyo, v.55, p.205-207, 1977.

YARNAL, B. Synoptic Climatology in Environmental Analysis, London: **Belhaven Press**, 1992.

YORUKOGLU, M.; CELIK, A. N. A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. **Energy Conversion and Management**, 47: 2441-2450, 2006.

ZÜGE, M.; CARVALHO NETO, A. Utilização de métodos estatísticos multivariados na avaliação do desempenho empresarial. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, Curitiba, n. 97, p. 101-112, set/dez. 1990.

8 PÁGINAS ELETRÔNICAS

CLIMANÁLISE, **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Volume 25, Número 05. Cachoeira Paulista/SP. INPE/CPTEC, 1986. Publicação Mensal. Junho/2010. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/pdf/pdf10/jun10.pdf>>. Acesso em: 22 de agosto de 2015, 14:00:00.

CLIMANÁLISE, **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Volume 26, Número 05. Cachoeira Paulista/SP. INPE/CPTEC, 1986. Publicação Mensal. Junho 2011. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/index0611.shtml.pdf>>. Acesso em: 22 de agosto de 2015, 14:05:00.

CLIMANÁLISE, **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Volume 27, Número 05. Cachoeira Paulista/SP. INPE/CPTEC, 1986. Publicação Mensal. Junho/2012. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/pdf/pdf12/jun12.pdf>>. Acesso em: 22 de agosto de 2015, 14:10:00.

CLIMANÁLISE, **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Volume 26, Número 05. Cachoeira Paulista/SP. INPE/CPTEC, 1986. Publicação Mensal. Novembro/2011. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/pdf/pdf11/nov11.pdf>>. Acesso em: 22 de agosto de 2015, 14:15:00.

CLIMANÁLISE, **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Volume 27, Número 05. Cachoeira Paulista/SP. INPE/CPTEC, 1986. Publicação Mensal. Novembro/2012. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/pdf/pdf12/nov12.pdf>>. Acesso em: 22 de agosto de 2015, 14:20:00.

[http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202014/Leil%C3%A3odeEnergiaDeReserva2014atraiinvestimentosdeR\\$7,1bi.aspx](http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202014/Leil%C3%A3odeEnergiaDeReserva2014atraiinvestimentosdeR$7,1bi.aspx). Acesso em: 30 de julho de 2015, 08:30:00

<http://www.fiern.org.br/index.php/energias-renovaveis-e-nao-renovaveis>. Acesso em: 30 de julho de 2015, 08:35:00