



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

**VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR NO NORDESTE DO BRASIL COM
BASE EM DADOS OBSERVADOS E DO NCEP/NCAR**

ROBERTA ARAÚJO E SILVA

CAMPINA GRANDE - PB

Agosto de 2008

ROBERTA ARAÚJO E SILVA

**VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR NO NORDESTE DO BRASIL COM
BASE EM DADOS OBSERVADOS E DO NCEP/NCAR**

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

Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escala

Subárea: Climatologia

Orientadores: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva

Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti

CAMPINA GRANDE - PB

Agosto de 2008

S586v Silva, Roberta Araujo e
Variabilidade da radiação solar no nordeste do Brasil
com base em dados observados e do NCEP/NCAR / Roberta
Araujo e Silva. - Campina Grande, 2008.
79 f. : il.

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

1. Global Dimming 2. Mann-Kendall 3. Dissertação I.
Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da, Dr. II. Cavalcanti,
Enilson Palmeira, Dr. III. Universidade Federal de Campina
Grande - Campina Grande (PB) IV. Título


CDU 551.521.31(043)


ROBERTA ARAÚJO E SILVA

VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR NO NORDESTE DO BRASIL COM BASE
EM DADOS OBSERVADOS E DO NCEP/NCAR

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 15/8/2008

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
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. MANOEL FRANCISCO GOMES FILHO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. INAIA FRANCISCO DE SOUSA
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Universidade Federal Rural de Pernambuco

A DEUS,

Dedico

A meus pais Ademir Sousa e Silva e Iraci Araújo e Silva, meus irmãos Fábio e Adamo, meus sobrinhos Inara, Leonardo e Felipe. Essa conquista também é de vocês!

Ofereço

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pelas provas e expiações concebidas que tanto contribuíram para o meu desenvolvimento moral, espiritual e profissional.

Ao Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva e Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti pelos ensinamentos e pela orientação de suma importância para a elaboração deste estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo.

A Embrapa Semi-árido, pelo fornecimento de dados para realização deste trabalho.

A meus pais, irmãos, sobrinhos e cunhada Luciana, pelo carinho, incentivo, confiança e cumplicidade em todos os momentos.

A meus queridos tios Camila e Gilberto, pelo apoio nos momentos difíceis da minha vida estudantil.

A meus amigos da pós-graduação e de dia-a-dia, Andréa Helena, David Nogueira, Ronaldo Menezes, Carla Martins, Maryfrance Diniz e Djane Fonseca, pelo diálogo, amizade e sugestões que contribuíram na realização deste trabalho.

Em especial a Família Menezes: Ronaldo, Ruth, Humberto e Tainá, pelos maravilhosos cafezinhos da tarde, pelos inúmeros momentos compartilhados de amor, carinho respeito e cumplicidade.

A Raquel, Nilton, Liêdja e Andréa, pessoas especiais que fazem parte da nossa vida através de pequenos gestos de amizade e ajuda.

A todas aquelas pessoas que passam por nossa vida que deixam ensinamentos, e que colaboraram de forma indireta para realização deste trabalho.

Obrigada!

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
RESUMO.....	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Origem da radiação solar.....	16
2.2 Saldo de radiação em ondas curtas.....	18
2.2.1 Radiação solar global.....	18
2.2.2 Radiação solar difusa.....	19
2.2.3 Radiação solar refletida.....	20
2.3 Saldo de radiação de ondas longas.....	20
2.3.1 Radiação terrestre.....	21
2.3.2 Radiação atmosférica.....	21
2.4 Saldo de radiação solar.....	22
2.5 Partículas de aerossol e a radiação solar.....	22
2.5.1 Gases atmosféricos.....	23
2.5.2 Aerossóis.....	24
2.6 O papel das nuvens no balanço radiativo terrestre.....	25
2.7 Observações globais da radiação solar.....	26
2.8 Possíveis causas do “Global dimming”.....	28
2.8.1 Aerossóis.....	29

2.8.2	Nebulosidade.....	32
2.9	Conseqüências do “Global dimming”	33
2.10	Observações regionais de radiação solar.....	35
2.11	Climatologia do Nordeste do Brasil.....	37
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1	Área de estudo.....	39
3.2	Dados utilizados no estudo.....	40
3.2	Metodologia.....	42
3.3.1	Método para análise da tendência e significância estatística.....	42
3.3.1.1	Teste de Mann-Kendall.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	Análise dados estimados pela reanálise NCEP/NCAR.....	45
4.1.1	Primeira década (1948-1957).....	45
4.1.2	Segunda década (1958-1967).....	47
4.1.3	Terceira década (1968-1977).....	49
4.1.4	Quarta década (1978-1987).....	49
4.1.5	Quinta década (1988-1997).....	52
4.1.6	Sexta década (1998-2006).....	52
4.2	Análise climatológica anual dos dados estimados pela reanálise NCEP/NCAR.....	52
4.3	Tendências dos dados observados à superfície.....	59
5	CONCLUSÕES.....	62
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.	Mapa da América do Sul com a representação da região Nordeste do Brasil em destaque. Fonte: Silva (2004).....	42
Figura 3.2.	Distribuição espacial dos 90 pontos de grade, com resolução de 2,5° x 2,5° grau de latitude e longitude, sobre a região Nordeste do Brasil.....	43
Figura 3.3.	Localização das cidades de Petrolina-PE e Juazeiro – BA no Nordeste Brasileiro.	44
Figura 4.1.	Distribuição espacial da tendência temporal (A) e do nível de significância (D) do saldo de radiação (A), tendência temporal (B) e do nível de significância (E) da radiação de onda longa e tendência temporal (C) e do nível de significância (E) da radiação de onda curta no Nordeste do Brasil para o período de 1948-1957 (primeira década)....	48
Figura 4.2	Distribuição espacial da tendência temporal (A) e do nível de significância (D) do saldo de radiação (A), tendência temporal (B) e do nível de significância (E) da radiação de onda longa e tendência temporal (C) e do nível de significância (E) da radiação de onda curta no Nordeste do Brasil para o período de 1958-1967 (segunda década).....	40
Figura 4.3	Distribuição espacial da tendência temporal (A) e do nível de significância (D) do saldo de radiação (A), tendência temporal (B) e do nível de significância (E) da radiação de onda longa e tendência temporal (C) e do nível de significância (E) da radiação de onda curta no Nordeste do Brasil para o período de 1968-1977 (terceira década)....	42

Figura 4.4	Distribuição espacial da tendência temporal (A) e do nível de significância (D) do saldo de radiação (A), tendência temporal (B) e do nível de significância (E) da radiação de onda longa e tendência temporal (C) e do nível de significância (E) da radiação de onda curta no Nordeste do Brasil para o período de 1978-1987 (quarta década).....	43
Figura 4.5	Distribuição espacial da tendência temporal (A) e do nível de significância (D) do saldo de radiação (A), tendência temporal (B) e do nível de significância (E) da radiação de onda longa e tendência temporal (C) e do nível de significância (E) da radiação de onda curta no Nordeste do Brasil para o período de 1988-1997 (quinta década).....	45
Figura 4.6	Distribuição espacial da tendência temporal (A) e do nível de significância (D) do saldo de radiação (A), tendência temporal (B) e do nível de significância (E) da radiação de onda longa e tendência temporal (C) e do nível de significância (E) da radiação de onda curta no Nordeste do Brasil para o período de 1998-2006 (sexta década).....	46
Figura 4.7	Distribuição espacial das tendências de saldo de radiação (A), radiação de onda longa (B) e radiação de onda curta (C) e (D), (E) e (F) os respectivos p-nível de significância no Nordeste do Brasil para o período 1948-2006.....	48
Figura 4.8	Tendência temporal da radiação solar global (A), evaporação do tanque classe “A” (B) em Petrolina, PE e Juazeiro, BA, para o período de 1975 a 2006.....	53

RESUMO

Este trabalho teve como finalidade avaliar as tendências das séries temporais do saldo radiação, saldo de radiação de ondas curtas e longas, utilizando dados de reanálise do NCEP/NCAR referentes ao período de 1948 a 2006. Também foram utilizadas as séries temporais anuais dos dados observados à superfície de radiação solar global e evaporação do tanque classe “A” de duas localidades do semi-árido do Nordeste do Brasil. A variabilidade temporal dos dados de reanálise e observados à superfície foram analisados com base no teste não-paramétrico de Mann-kendall aos níveis de significância estatística de 1 e 5% de probabilidades. As séries temporais do saldo de radiação, saldos de radiação de ondas curtas e de radiação de ondas longas, com base nos dados de reanálise do NCEP/NCAR, exibiram reduções acentuadas no período de 1948 a 1987. No período entre 1988 e 2006 foi verificado um comportamento inverso, predominando tendências positivas dessas variáveis. Na análise por década, nesses dois períodos foram verificadas tendências estatisticamente significativas aos níveis de 1 e 5% de probabilidades. O período total de estudo (1948 a 2006) exibiu tendências negativas nas variáveis analisadas, que foram estatisticamente significativas aos níveis de 1 e 5% de probabilidades pelo teste de Mann-Kendall, principalmente nas partes oeste e leste do NEB. Os resultados também indicam que a radiação solar e evaporação do tanque classe “A”, das localidades de Petrolina, PE, e Juazeiro, BA, apresentam reduções acentuadas ao longo do período estudado. As tendências decrescentes nos dados observados à superfície, bem como nos dados de reanálise do NCEP/NCAR, sugerem a presença do fenômeno “Global dimming” sobre a região Nordeste do Brasil.

Palavras-Chave: Radiação Solar, Global dimming, Mann-Kendall.

ABSTRACT

The main objective this work was to assess the time-series trends of net shortwave radiation (R_{ns}), net longwave radiation (R_{nl}) and R_n from the NCEP/NCAR database. Also, it was used to measure annual time series of global solar radiation (R_s) and class A pan evaporation (E_{pan}) for two stations located in the semi-arid region of northeastern Brazil. Long-term variability of NCEP/NCAR Reanalysis and observed data at surface is assessed by Mann-Kendall test at $p < 0.01$ and $p < 0.05$ significance levels. The time-series in net radiation, net shortwave radiation and net longwave radiation, based on NCEP/NCAR Reanalysis, showed a reduction through the 1948-1987 period. It was observed inverse pattern from 1988 to 2006 with positive trend for these variables. On decadal analyze for both periods, it was observed statically significant trends at 1 and 5% probability level. The analyzed variables presented negative trends, which are statically significant at 1 and 5% probability level by Mann-Kendall test for the whole period of study, mainly on west and lest areas of northeastern region of Brazil. Results also indicate that both global solar radiation and class A pan evaporation at Petrolina, PE and Juazeiro, BA, had an accentuate decrease though study period. The decreasing trends in observed data at surface, as well as the NCEP/NCAR Reanalysis data suggest that the decrease in solar radiation in a large area, which can be attributed to the global dimming effect.

Key-words: solar global radiation, Global dimming, Mann-Kendall test.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento a cerca da radiação solar tem aplicabilidade em diversas áreas como engenharia, arquitetura, meteorologia, agricultura, hidrologia, e também como indicador da variabilidade climática (Lohmann et al., 2006). Em termos agrícolas, a radiação solar é responsável por processos fotobioquímicos dos vegetais, época de floração, frutificação e interfere na qualidade dos frutos e grãos (Lima, 2003); em termos de engenharia, na substituição dos combustíveis fósseis por fontes renováveis, tais como a energia solar (Martins et al., 2006); e, em termos hidrológicos, nas alterações nas taxas de energia que chegam à superfície terrestre, significando que menos água evaporada de lagos, rios e oceanos o que implica em menos energia para alimentar o ciclo hidrológico (Rosenberg, 1983). A radiação solar também desempenha grande papel na assimilação do carbono nos dosséis das plantas e, conseqüentemente, na produtividade dos ecossistemas (Roderick et al., 2001; Cohen et al., 2002; Farquhar e Roderick, 2003; Gu et al., 2003). Uma das primeiras pesquisas a cerca da variabilidade da radiação solar a nível global foi realizada no final da década de 80 por Ohmura e Lang (1989). Os resultados desse trabalho apontaram que a taxa de radiação solar incidente à superfície terrestre estaria declinando de uma maneira acentuada desde 1950. Inicialmente, por volta da década de 90 esses resultados foram desprezados pela comunidade científica, pois todo o Mundo estava discutindo o aquecimento global; então, como acreditar que a radiação solar incidente estaria decrescendo? Anos mais tarde, vários pesquisadores

começaram a investigar sobre o assunto em várias partes do globo, e encontram os mesmos resultados anteriormente anunciados, ou seja, que o nível de radiação solar incidente estaria sofrendo alterações, apresentando decréscimo de mais de 10% ao longo das três décadas anteriores. Essas taxas negativas incluíram estações na Antártica, Austrália, Israel, Irlanda, Alemanha, Estados Unidos, Índia, Hong Kong e na antiga União Soviética (Russak 1990; Liepert et al., 1994; Stanhill e Kalma., 1994; Zhitorchuk et al., 1994; Stanhill e Kalma, 1995; Abakumova et al., 1996; Liepert, 1996; Stanhill e Ianetz, 1996; Stanhill e Cohen, 1997). Esse decréscimo significativo da irradiância solar à superfície, ou seja, o declínio acentuado de radiação solar que chega à superfície terrestre, tanto pelos raios solares diretos como pela radiação difusa, foi denominado por Stanhill e Cohen (2001) de “Global dimming”.

As possíveis causas atribuídas às reduções na radiação solar, observadas nos últimos 50 anos, incluem o aumento da carga de aerossóis de caráter antropogênico em consequência da maior atividade industrial, as diminuições na transmissividade atmosférica associadas as erupções vulcânicas (Ramanathan et al., 2001; Gu et al., 2003; Power, 2003), maior frequência de nebulosidade (Liepert e Kukla, 1997), aumento de partículas e fuligens provenientes de queimadas, pois elas absorvem e refletem a radiação incidente que também agem como núcleos de condensação na formação de nuvens; reduzindo, desse modo a irradiação solar (Black et., 2006). A evaporação também tem merecido atenção nos últimos anos, visto que, assim como a radiação solar, essa variável tem apresentado declínio nas últimas décadas (Peterson et al., 1995; Chattopadhyay e Hulme, 1997; Cohen et al., 2002; Liu et al., 2004; Roderick e Farquhar, 2004; Silva, 2004).

Estudos mais recentes (Philipona et al., 2004; Pallé et al., 2004; Charlson et al., 2005; Pinker et al., 2005; Wild et al., 2005; Black et al., 2006) sugerem a ausência do “Dimming” a partir da década de 1990 em diversas partes do mundo (América do Norte, Europa ocidental, China); enquanto que sobre Índia, Austrália, Europa Central e Tailândia esse

fenômeno ainda predomina (Roderick e Farquhar, 2004; Nazarenko e Menon, 2005; Tebaraki et al., 2005; Wild et al., 2005). Segundo Wild et al. (2005) tal situação pode está relacionada a uma interação dos efeitos diretos e indiretos do aerossol que já não mascaram os efeitos do aumento dos gases do efeito estufa.

Ao longo dos últimos anos diversos pesquisadores têm investigado intensamente o fenômeno “Global dimming”, bem como suas causas e seus efeitos potenciais na atmosfera e na superfície da Terra. Porém, observa-se que essas pesquisas, e mais ainda a cerca da variabilidade temporal da radiação solar, concentra-se no Hemisfério Norte e/ou nas regiões de intensa atividade industrial. Neste, contexto, este trabalho pretende oferecer uma contribuição para um melhor conhecimento do “Global dimming” na região Nordeste do Brasil. Essa região apresenta pequena concentração industrial, sendo que 60% de sua área total é semi-árida com comprimento de dia solar médio de aproximadamente 12 horas e chega a registrar fluxos instantâneos de até 1200 Wm^{-2} , ou seja, dispõe de condições climáticas favoráveis à utilização da energia solar como fonte primária de energia a ser transformada em energia elétrica (Lima, 2003).

A importância da utilização da energia solar, como fonte de energia renovável, requer um maior conhecimento a cerca da sua variabilidade; porém, informações confiáveis sobre essa variável são raras. Martins et al. (2006) e Leal e Tiba (2006), ao investigarem a variabilidade energética do Brasil, em especial para a região Nordeste, enfrentaram muitas limitações em função da baixa densidade de estações radiométricas sobre essa região. Uma das ferramentas utilizadas com bastante frequência, a fim de suprimir a baixa densidade de estações actinografias sobre o Brasil, são os modelos baseados em dados de satélites (Ceballos e Bottino, 2002, 2004). Os dados de reanálise do NCEP/NCAR, que apresentam uma série temporal consistente de dados históricos da atmosfera, permitindo a obtenção da radiação

solar sobre regiões extensas e em locais isolados onde as estações actinografias não poderiam ser instaladas, e com uma boa variabilidade temporal (desde 1948 até o presente).

Assim, considerando a grande importância do presente tema aqui abordado, este trabalho teve como finalidade analisar possíveis tendências nas séries temporais de radiação solar do Nordeste do Brasil, utilizando dados NCEP/NCAR referentes ao período de 1948 a 2006 e observados à superfície no período de 1975 a 2006, para avaliar a presença do efeito “Global dimming” na região de estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia proveniente do Sol, denominada radiação solar, é o fator mais importante para o desenvolvimento dos processos físicos que influenciam as condições de tempo e clima. Assim, pode-se afirmar que todos os fenômenos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos que ocorrem no sistema Terra-atmosfera, tal como derretimento da neve, fotossíntese da planta, evapotranspiração, crescimento de colheita estão direta ou indiretamente relacionados com a quantidade de radiação solar incidente sobre a superfície. Essa energia, ao atravessar a atmosfera sofre várias interações com os diversos constituintes atmosféricos, tem parte refletida pelas nuvens, parte espalhada pelas moléculas e partículas do ar, parte absorvida pelo vapor d'água, dióxido de carbono, ozônio e compostos nitrosos e parte absorvida pela superfície da Terra. A seguir são apresentados alguns trabalhos relacionados com tema central desta dissertação, inicialmente com um breve histórico da radiação solar e em seguida são apresentadas as principais pesquisas relacionadas com o presente estudo.

2.1. Origem da radiação solar

O Sol é a estrela mais próxima da Terra, distante de cerca de 1500.000.000 km da Terra, e constitui a principal fonte de energia do planeta que impulsiona o ciclo de vida da Terra (Baldocchi, 2003). No interior do Sol, acontece a fusão termonuclear de átomos. de

hidrogênio para hélio. Nesse processo são emitidos fótons altamente energéticos, de forma que a transferência de energia da parte mais interna até a superfície é realizada por meio de radiação eletromagnética. Essa radiação é absorvida e ré-emitida por átomos e gases que constituem as camadas mais externas do Sol. Ao se aproximar da superfície os gases quentes, ao entrarem em contato com camadas mais frias, sofrem expansão e tendem a ascender. Os gases mais frios por sua vez sofrem movimentos descendentes. Essa zona é denominada zona de convecção e a transferência de energia ocorre parcialmente por convecção e parcialmente por radiação eletromagnética. Finalmente, acima da superfície, o transporte de energia é novamente realizado por meio de radiação eletromagnética. E é dessa forma que a Terra recebe energia do Sol (Yamasoe, 2006).

O Sol emite radiação eletromagnética em forma de discretos pacotes de fótons. Na atmosfera, o calor pode ser transferido mediante três processos: condução, convecção e radiação. Sendo que somente a radiação é o processo de transferência mais eficiente na atmosfera, visto que a atmosfera é um mau condutor de calor e a transferência de energia radiante não é dependente do contato entre a fonte e sumidouro, como é o caso do processo de transferência por condução e convecção (Baldocchi, 2003). No processo de transferência por radiação, a energia se desloca seguindo um curso ondulatório, a uma velocidade de 300.000 km por segundo (Mota, 1975). A velocidade da luz é proporcional ao produto do comprimento de onda da radiação (λ) e da frequência com que ela oscila (ν), $c = \lambda\nu$.

Radiação solar é a energia recebida pela terra, na forma de ondas eletromagnéticas, proveniente do sol. Consiste em uma fonte primária de energia disponível no globo terrestre, e responsável por todos os processos atmosféricos (Tubelis e Nascimento, 1992). A radiação proveniente do Sol tem a maior parte de sua energia contida em comprimentos de onda entre 0,1 e 4 μm , correspondendo às bandas do ultravioleta, do visível e do infravermelho próximo (Brutsaert, 1982).

2.2. Saldo de radiação em ondas curtas

A radiação de onda curta tem seu comprimento de onda na faixa compreendida entre 0,3 a 4,0 μm . A maior parte da radiação que chega a superfície terrestre é denominada de radiação direta, quando a atmosfera não oferece obstáculo à passagem da radiação. Segundo Tubelis e Nascimento (1992), ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação solar é afetada por processos seletivos de reflexão, difusão e absorção. No entanto, uma parte desta radiação consegue atingir diretamente a superfície (radiação solar direta), enquanto que outra atinge, somando-se a anterior, a mesma superfície após sofrer o processo de difusão (radiação solar difusa ou do céu). Esses dois fluxos de energia, que chegam ao mesmo tempo e juntos, representam o total de radiação solar que atinge a superfície terrestre denominada de radiação solar global (R_g).

2.2.1. Radiação solar global

A radiação solar global que alcança a superfície é constituída pela radiação solar difusa e direta (Correia, 2000). Ela é influenciada por alguns fatores tais como elevação solar, condições de profundidade ótica e grau de nebulosidade (Alves, 1981). Na presença de nebulosidade, a radiação solar global pode aumentar ou diminuir, pois a nebulosidade e a elevação solar são os fatores de primeira ordem na determinação da variação da irradiação solar à superfície (Kondratyev, 1969). Parte da radiação global é refletida pela superfície da terra, na forma de ondas curtas, o que depende das características da cobertura dessa superfície como: diferentes vegetações, tipos de solo; sendo 5% para o caso da água e próximo a 25% para maioria dos cultivos (Doorenbos & Pruitt, 1997). Nesse particular, Feitosa et al. (1998), considerando dados de radiação acima da Floresta Amazônica em Ji-

Paraná no período de 1992 a 1996, encontraram valores de radiação solar global diária no topo de uma cobertura vegetal na ordem de $197,9 \text{ Wm}^{-2}$, durante o período chuvoso onde a nebulosidade foi maior; enquanto que para o período seco, logo com menor frequência de nebulosidade, os valores médios diários encontrados foram da ordem de $211,8 \text{ Wm}^{-2}$.

Analisando a variação da radiação global à superfície, Ohmura (2006) observou que a radiação global diminuiu num ritmo médio de $0,7 \text{ Wm}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ entre 1960 e 1990, e nos anos seguintes apresentaram aumento médio de $0,7 \text{ Wm}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Esse autor ressalta que todas as estações da região polar, que estão longe de fontes de aerossol, também mostram esse padrão de mudança.

2.2.2. Radiação solar difusa

A radiação solar difusa consiste na energia recebida do Sol após ter sua direção alterada através da reflexão e espalhamento pela atmosfera (Salann e Higarzy, 1978). Para Moura (2001) a radiação difusa é a porção da radiação solar que alcança a superfície da Terra após sofrer o espalhamento provocado pelas moléculas e partículas suspensas na atmosfera (moléculas de gases, partículas de aerossol e nuvens).

A radiação solar difusa é função da latitude local, ângulo de elevação solar, índice de turbidez atmosférica, quantidade d'água presente na atmosfera e nebulosidade, que contribuem para a quantidade da radiação solar difusa à superfície terrestre (Villa Nova e Salati, 1997). Ela também constitui uma fonte de calor da maior importância para a superfície da Terra, especialmente em altas latitudes, nos meses de inverno quando a radiação solar direta fica bastante reduzida. Além disso, uma parte da radiação difusa também é responsável pela realização da fotossíntese. A radiação solar difusa é essencialmente dependente da quantidade e forma das nuvens (Lima, 2003). Sem e Tan (2001) observaram que a radiação

solar difusa, em um dia completamente nublado, representa de 10 a 29% da irradiação solar global, podendo chegar a 100% em um dia completamente encoberto. Para Duchon e O'Malley (1999) a radiação solar difusa à superfície terrestre, em um dia de céu limpo, é aproximadamente 15% da irradiação solar global. Kondratyev (1969) estudou a dependência da irradiação solar difusa com relação ao grau de nebulosidade e elevação solar, e mostrou que, no caso de céu nublado bem como ausência de nuvens, a irradiação solar difusa aumenta com o decréscimo da elevação solar, sendo esse aumento mais pronunciado quanto maior grau de nebulosidade.

2.2.3. Radiação solar refletida

Aproximadamente 30% da energia solar é refletida de volta para o espaço (Fleagler Businger, 1980). A radiação solar refletida depende do coeficiente de reflexão, também chamado de refletância ou albedo da superfície (Correia, 2000). A reflexão ocorre na interface entre dois meios diferentes quando parte da radiação que atinge interface é enviada de volta. Nessa interface, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (lei da reflexão). A fração da radiação incidente, que é refletida por uma superfície, é denominada albedo (Peixoto, 1981; Garg, 1982).

2.3. Saldo de radiação de ondas longas

A radiação de onda longa ou terrestre consiste da radiação emitida pela superfície terrestre. Parte da radiação emitida pela atmosfera e nuvens, na faixa do infravermelho, é denominada radiação atmosférica (Moura, 2001). A emissão de energia radiante, tanto pela superfície como pela atmosfera, situa-se na faixa do infravermelho, pois suas temperaturas são mais baixas. Galvão e Fisch (2000) definiram a radiação de onda longa como o fluxo radiante de energia, resultante da emissão dos gases atmosféricos e de superfícies líquidas e

sólidas da Terra. Todos os materiais sobre a Terra possuem uma temperatura mais baixa que a do Sol, tal que a radiação que eles emitem tem comprimentos de ondas maiores que a da radiação solar global. A maior parte da radiação emitida pela Terra e pela atmosfera está contida no intervalo de 4 a 100 μ m e por isso recebe a denominação de radiação de ondas longas. A diferença entre a radiação de ondas longas que chega a superfície, proveniente da atmosfera, e aquela por ela emitida para a atmosfera, constitui o saldo de radiação infravermelha, ou saldo de radiação de ondas longas.

2.3.1. Radiação terrestre

A radiação terrestre consiste da energia emitida pela superfície terrestre. Somente uma pequena fração da energia infravermelha total emitida pela superfície terrestre, escapa para o espaço. O restante da radiação emitida pela superfície é absorvido pela atmosfera. Em dias nublados, ao passar pela atmosfera, a radiação emitida pela superfície, tem grande parte da sua energia absorvida pelos gases atmosféricos (especialmente pelo vapor d'água e dióxido de carbono), o que aprisiona essa energia entre a superfície e as nuvens, não permitindo que ela se perca para fora do sistema Terra-atmosfera. Essa propriedade, de aprisionamento de energia, é denominada de efeito estufa.

2.3.2. Radiação atmosférica

A emissão de energia radiante infravermelha pela atmosfera depende da concentração dos constituintes radiativamente ativos (água, nas fases sólida, líquida e gasosa, o dióxido de carbono e o ozônio), também é influenciada presença de gases e aerossóis na atmosfera. É evidente, que sendo a concentração dos dois praticamente inalteráveis, as variações mais acentuadas na emissão e absorção atmosféricas são causadas por mudanças na umidade específica do ar e na distribuição de gotículas de água e de cristais de gelo em suspensão

(nuvens, nevoeiros e névoa úmida). Eventualmente, a presença anormal de poeira pode causar mudança acentuada no comportamento radiativo da atmosfera (Moura, 2001).

2.4. Saldo de radiação solar

O saldo de radiação solar representa a quantidade de energia radiante que é absorvida pela superfície terrestre, resultante da soma dos balanços de radiação de ondas curtas e ondas longas (Tubelis e Nascimento, 1992). Ometto (1981) define o saldo de radiação solar como sendo a radiação disponível ao meio após todas as trocas radiativas efetuadas, ou seja, a contabilização entre a radiação solar incidente com a radiação solar emitida.

O saldo de energia disponível à superfície tem como principal componente o balanço de radiação; que, por sua vez, pode ser obtido a partir do saldo de radiação de onda curta ou solar somado ao saldo de radiação de onda longa ou terrestre. O saldo de radiação, resultante do balanço de radiação de ondas longas e curtas, impulsiona alguns processos físicos e é utilizado para aquecer a superfície e o ar acima dela ou para fornecer energia para evaporar a água do solo e da vegetação (Bastable et al., 1993), e no metabolismo das plantas e animais (Andrade et al., 2007).

2.5. Partículas de aerossol e a radiação solar

A radiação solar, ao penetrar na atmosfera, sofre uma série de processos que a modificam. Uma considerável porção da radiação incidente é refletida pelas nuvens e difusamente espalhada pela atmosfera. Outras perdas ocorrem devido à absorção de radiação pelos gases do efeito estufa, ozônio, vapor d'água e dióxido de carbono. Apenas uma parte

dela atinge diretamente a superfície da Terra, enquanto que o restante representa a contribuição difusa e térmica da atmosfera (Oke, 1987).

2.5.1. Gases atmosféricos

A atmosfera é composta por um grupo de gases com concentração praticamente constante e um grupo de gases com concentração variável. Praticamente 99% da atmosfera seca é constituída por N_2 e O_2 . Os gases traço (ou gases do efeito estufa), tais como o vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozônio (O_3) e os clorofluorcarbonos (CFCs) são gases importantes para os processos radiativos na atmosfera. A atmosfera também contém partículas sólidas e líquidas, que constituem os chamados aerossóis atmosféricos, gotas d'água e cristais de gelo, os quais apresentam concentrações variáveis tanto no espaço quanto no tempo (Yamasoe, 2006).

As concentrações dos gases na atmosfera estão sujeitas às alterações químicas e fotoquímicas (Goody e Yung, 1989). O vapor d'água é o gás mais importante na atmosfera do ponto de vista de sua interação com a radiação solar e terrestre (Stephens, 1994). Na troposfera, o vapor de água é especialmente importante devido ao seu papel na formação das nuvens e precipitação e por transportar quantidades significativas de energia na forma de calor latente. A maior parte da absorção da radiação solar que ocorre nos comprimentos de onda infravermelhos deve-se ao vapor d'água (Brien, 1963), desempenhando o papel de um agente termo-regulador da atmosfera ao absorver a radiação solar infravermelha (Vianello e Alves, 1991). O segundo gás em importância para o efeito estufa é o dióxido de carbono devido à sua elevada concentração na atmosfera, seguido pelo ozônio troposférico (O_3), metano (CH_4), halocarbonetos (cloro-fluor-carbonos, CFC's) e óxido nitroso (N_2O) (Wang et al., 1995). O dióxido de carbono é transparente aos comprimentos de ondas curtas da radiação; entretanto,

frente às radiações de ondas longas, ou infravermelhas, a radiação solar é absorvida por estes compostos e ré-emitida, retornando parte dessa energia para o solo. Assim, quanto maior a concentração desses gases na atmosfera menor a quantidade de radiação emitida para o espaço (Yamasoe, 2006). O Nitrogênio e o Oxigênio são os constituintes mais abundantes da atmosfera, mas praticamente não absorvem radiação solar incidente. Sua absorção se resume apenas aos comprimentos de onda inferiores a 0,2 μm (Yamasoe, 1999). A maior parte da absorção da radiação solar em comprimentos de onda infravermelhos deve-se ao vapor d'água e ocorre na troposfera, onde a maior parte do vapor d'água está localizada. Porém, a absorção apresenta grande variabilidade devido à distribuição do vapor d'água tanto no espaço como no tempo (Brien, 1963).

2.5.2. Aerossóis

Segundo Hinds (1982), aerossol é todo conjunto de partículas sólidas ou líquidas em suspensão num meio gasoso. O termo aerossol inclui tanto as partículas quanto o gás no qual elas estão imersas, o ar no caso da atmosfera. A partícula de aerossol também é comumente referida como material particulado em suspensão na atmosfera. O aerossol pode ter origem natural (por exemplo; poeira do solo suspensa pela ação do vento) ou antrópica (por exemplo, produtos de combustão de veículos, emissões industriais) (Yamasoe, 2006).

Partículas de aerossóis em suspensão na atmosfera influenciam fortemente o balanço radiativo da atmosfera e o clima, a química da atmosfera e a visibilidade, desde a escala local até as escalas regional e global (Artaxo et al., 2006). Os aerossóis atmosféricos podem influenciar o balanço de radiação de dois modos: direto e indiretamente. O efeito direto ocorre a partir do espalhamento ou de absorção de radiação solar pelas partículas. Com o espalhamento, parte da radiação é refletida de volta ao espaço, o que significa uma redução na

quantidade de radiação disponível no sistema. O efeito indireto ocorre devido ao fato das partículas de aerossol atuar como núcleos de condensação de nuvens (NCN), podendo, e dessa forma, alterar as propriedades físicas e ópticas das nuvens, tais como distribuição do tamanho das gotas e albedo (Kaufman e Nakajima, 1993; Twomey, 1977; Kaufman e Fraser, 1997).

Na presença de aerossóis espera-se uma diminuição da radiação solar que chega a superfície, visto que a radiação solar pode sofrer influências diretas e indiretas da presença de aerossóis (Liepert e Lukla, 1997). Os vulcões também são fontes esporádicas relativamente importantes de aerossóis. As erupções vulcânicas podem lançar, diretamente na estratosfera terrestre, uma grande quantidade de gases e material particulado, como o dióxido de enxofre (SO₂), que, combinado com a umidade existente na estratosfera, formam aerossóis que aumentam o albedo planetário, reduzindo a radiação solar incidente na superfície e energia disponível (saldo de radiação) para os processos de superfície terrestre (Molion et al., 2001). Em períodos longos de intensa atividade vulcânica, os aerossóis presentes na estratosfera reduzem a absorção de radiação pelo sistema Terra-atmosfera, com reduções maiores nas áreas de maior concentração, o que diminui também a temperatura global (Borba et al., 2002).

2.6. O papel das nuvens no balanço radiativo terrestre

As nuvens, que cobrem em média de 40 a 60% da superfície da Terra, desempenham um papel fundamental no balanço de energia do planeta, absorvendo e refletindo radiação de onda longa (infravermelha); elas também influenciam na radiação de onda curta que penetra na atmosfera (Echer et al., 2001). As propriedades radiativas de uma nuvem dependem primariamente de suas dimensões físicas, sua altura na atmosfera e de suas características microfísicas, tais como distribuição de tamanho das gotas e dos cristais de gelo, morfologia dos cristais de gelo, quantidade de água líquida, índice de refração da água pura e do gelo (Liou, 1992; Heymsfield, 1993). As nuvens também refletem e transmitem a radiação térmica

no infravermelho emitida pela superfície e pela atmosfera e, ao mesmo tempo, emitem radiação infravermelha de acordo com a estrutura de temperatura dentro delas (Liou, 1992).

O albedo planetário é cerca de 30%; dos quais 50% são devidos às nuvens, ou seja, o planeta sem nuvens teria um albedo médio de mais 15%, então o albedo elevaria para 30% na ausência de nuvens. Quando o céu está limpo, a radiação direta corresponde de 60 a 87% da radiação global (Lestrade et al., 1990). Nessa linha de estudo, Liou (1976) calculou os processos de absorção, reflexão e transmissão da radiação solar em uma atmosfera com nuvens mediante modelos de transferência radiativa. Os resultados obtidos indicaram que nuvens nimbostratus e cumulonimbus refletem 80-90% e absorvem 10-20% da radiação solar incidente sobre elas. A reflexão e a absorção dos cumulus de bom tempo, de espessura igual a 0,45 km, variam de 68-85% e de 4-9%, respectivamente. Uma nuvem stratus fina, de espessura de 0,1 km, reflete cerca de 45-72% e absorve cerca de 1-6% do fluxo solar incidente no topo. Já, uma nuvem altostratus de espessura de 0,6 km tem reflexão variando entre 55-77% e absorção de 30-40%.

2.7. Observações globais de radiação solar

Um dos primeiros indícios de que a radiação solar, que chega à superfície terrestre, estaria diminuindo datam desde meados do século XX e foram relatados por Ohmura e Lang (1989). Anos mais tarde, Stanhill e Moreshet (1992), ao analisarem o comportamento da radiação solar de 45 estações radiométricas de todo o Globo, nos anos 1958, 1965, 1975 e 1985, verificaram uma diminuição estatisticamente significativa de 5,3% na taxa de radiação solar global, com declínios mais acentuados entre as latitudes de 45°N e 30°N. Posteriormente, foram notificadas reduções regionais na seção oriental da antiga União Soviética (Russak, 1990; Zhitorchuk et al., 1994; Abakumova et al., 1996), Antártica (Stanhill

e Cohen, 1997), Austrália (Stanhill et al., 1994), Israel (Stanhill e Ianetz, 1996), Alemanha (Liepert, 1994; Liepert, 1996) e em Hong Kong (Stanhill e Kalma, 1995).

Gilgen et al. (1998) mapearam uma queda significativa de 2% da radiação solar sobre as regiões da África, Europa e América do Norte, com base nos dados da GEBA (Global Energy Balance Archive), o que corresponde a $3,4 \text{ Wm}^{-2}$ por década e equivalente a uma diminuição de $9,0 \text{ Wm}^{-2}$ na radiação de onda longa absorvida à superfície ao longo do período de 1960 a 1990. Em uma análise a partir de observações do BSRN (Baseline Surface Radiation Network) Ohmura et al. (1998) observaram um aumento a nível mundial da radiação de onda longa incidente, de acordo com as estimativas obtidas a partir do GCM (Global Climate Model).

No início da década de 90, Gerald Stanhill e Shabtai Cohen, membros da Organização Agrícola de Israel, com o objetivo de estabelecerem o sistema de irrigação mais adequado para esse país, analisaram 30 anos (1950 a 1980) de informações de luz solar incidentes sobre essa região. Eles verificaram que havia uma redução muito acentuada na quantidade de luz solar sobre Israel; tal fenômeno, que descreve o comportamento decrescente da radiação solar, foi denominado por esses dois autores de “Global dimming”. Stanhill e Cohen (2001) concluíram que, em média, para o período de 27 anos (1958-1985), a superfície de todo o globo estava sofrendo uma redução na taxa de radiação solar que atinge a superfície terrestre de $0,51 \pm 0,05 \text{ Wm}^{-2}$ por ano, equivalente a uma redução de 2,7% por década.

Vários estudos verificaram a atuação do “Global dimming” entre 1950 e 1990, dentre os quais se destaca o trabalho de Liepert (2002), com a observação que a radiação solar que chega a superfície em algumas localidades dos Estados Unidos, entre 1961 e 1990, sofreu redução de quase 20 Wm^{-2} ao longo dos trinta anos analisados. Comportamento semelhante foi observado sobre as regiões da China e Índia (Kaiser e Qian, 2002; Liu et al., 2004; Che et al., 2005; Ramanathan et al., 2001; Qian, 2006; Porcha et al., 2007). Os recentes relatórios

sobre “Global dimming” citam que esse fenômeno estaria cessando, como fica evidente nas análises de radiação solar das últimas duas décadas. Philipona et al. (2004) encontraram um aumento significativo nas taxas de radiação de onda longa descendente em várias estações dos Alpes Suíços, entre 1995 e 2002. Utilizando os dados do International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP), Pinker et al. (2005) relatou aumentos da radiação solar terrestre ao longo do globo. Black et al. (2006) observaram que a taxa de radiação solar sobre a Irlanda sofreu inversão a partir da década de 80. Essa descontinuidade no “Global dimming” também fica evidente nas análises feita a partir de dados de satélites, como observado por Pallé e Goode (2004) e Charlson et al. (2005), que observaram uma interrupção nas tendências negativas a partir de 1990. No entanto, na Europa Central, Índia, Austrália e Tailândia foram observadas uma continuidade no declínio da radiação solar desde década de 80 até a atualidade (Tebaraki et al., 2005; Wid et al., 2005; Roderick e Farquhar, 2004; Nazarenko e Menon, 2005).

2.8. Possíveis causas do “Global dimming”

Estudos têm mostrado que a radiação solar que atinge a superfície terrestre tem variado bastante nas últimas décadas (Meza e Varas, 2000; Liepert, 2002). Esse comportamento vem sendo justificado pelo aumento de partículas de aerossóis antropogênicos em escala global, ou ainda devido às variações na cobertura de nuvem. A presença de aerossóis vulcânicos também é citada como prováveis causa do decréscimo na taxa de radiação solar (Liepert e Kukla, 1997; Lohmann et al., 2006;).

2.8.1. Aerossóis

O aerossol é reconhecido há muito tempo por resultar em menos radiação solar na terra, tendo efeito direto de dispersar e absorver irradiância solar, ou indireto como os núcleos da condensação da nuvem (NCN), podendo mudar propriedades microfísicas e óticas da nuvem (o primeiro efeito indireto), e a cobertura de nuvem e a vida das nuvens (o segundo efeito indireto). Esse efeito poderá conduzir, assim, a uma menor incidência de irradiação solar sobre a superfície terrestre (Charlson et al., 1992; Ramanathan et al., 2001); logo, a variabilidade dos aerossóis pode ser responsável, pelo menos em parte, pelos declínios observados da radiação solar a superfície.

Stanhill et al. (1994), Liepert et al. (1997) e Liepert et al. (2002), em estudos sobre a radiação solar que chega à superfície terrestre, justificam o decréscimo dessa variável como consequência de um possível aumento de partículas de aerossóis na atmosfera das localidades estudadas. Li et al. (1995), Qian e Giorgi (2000), Xu (2001) e Menon et al. (2002) sugerem que as alterações climáticas que têm ocorrido na China nos últimos 50 anos, como o moderado resfriamento do Yangtze River, o aumento nas inundações no Sul da China e o aumento dos períodos de seca no Norte da China, estejam relacionados com o aumento de aerossóis no país. As observações empíricas do impacto dos aerossóis na temperatura da superfície terrestre revelaram um possível resfriamento da Terra (Karl et al., 1995; Stanhill e Kalma, 1995; Abakumova et al., 1996). Segundo Michalsky et al. (1994), ao analisarem o potencial de radiação solar, as erupções vulcânicas também têm sua parcela de contribuição na variação de radiação solar, com efeito direto na produtividade das plantas, que foi 30% menor em anos sem erupções vulcânicas.

Para Stanhill (1998), Stanhill e Cohen (2001) e Black (2006) as taxas decrescentes da radiação solar observadas sobre a Irlanda são respostas às variações nas propriedades óticas

da atmosfera e reduções nos poluentes, tais como partículas pretas e partículas de sulfato. Dependendo da sua composição química, os aerossóis podem espalhar luz solar, ou absorver luz solar levando a um possível aquecimento da atmosfera. Eles também têm a capacidade de afetar a constituição e duração da nuvem (Liepert, 2002). O aumento da carga de aerossóis, como o carbono orgânico, ao longo das últimas décadas pode ter conduzido a uma estabilização da atmosfera devido ao aumento da absorção da radiação solar dentro da atmosfera e redução da absorção do terreno (Ramanathan et al., 2001). Isso também pode contribuir para o aumento dos fluxos turbulentos e reduzir ainda mais a insolação na superfície, saldo de radiação e evaporação (Wild et al., 2004). Power (2003) justifica as tendências negativas do “Global dimming”, observadas nas duas últimas décadas em todo o globo, como resultado da diminuição na taxa de poluentes no ar.

Nazarenko e Menon (2005) observaram o comportamento da radiação solar incidente sobre a superfície em duas condições distintas com e sem presença de aerossóis, utilizando um modelo climático acoplado a um modelo dinâmico do oceano. Eles verificaram que, sem a presença de aerossóis, a radiação solar absorvida à superfície terrestre aumentou durante o período analisado (1960 a 2002). Além disso, que a inversão no “Global dimming”, relatadas a partir de 1990 em alguns locais, pode ser consequência da redução da emissão de aerossóis, visto que sem os efeitos dos aerossóis a radiação solar absorvida pela superfície terrestre aumenta.

Para Liang e Xia (2005) a causa principal para a diminuição da radiação solar é a variabilidade da carga de aerossóis na atmosfera. Streets et al. (2007), ao analisarem a consistência de estudos realizados sobre a China, verificaram grande variabilidade na concentração de aerossóis desde o início da sua industrialização (a partir de 1950) e diminuição a partir da década de 1990, que confirmam os estudos anteriores conduzidos por outros autores. Por outro lado, Silva et al. (2007) justificam que o decréscimo da radiação

solar seja uma consequência do aumento dos níveis do dióxido de carbono na atmosfera causada pela queima do carvão, óleo, madeira e outros poluentes, pois eles impedem que uma parte da energia solar seja refletida para o espaço. Já Mishchenko et al. (2007), através de dados de satélite, mostraram que parece estar havendo uma tendência decrescente na taxa de aerossol desde aproximadamente 1995.

Liepert e Kukla (1997) e Lohmann et al. (2006) apontaram as concentrações de aerossóis, provenientes das grandes erupções vulcânicas, como responsáveis em parte pelo decréscimo nas taxas de radiação solar observadas em suas pesquisas. Aerossóis vulcânicos possuem alta refletividade e podem persistir de 3 a 4 anos em suspensão na atmosfera, e podem viajar por milhares de quilômetros espalhando-se ao redor da Terra. Esses aerossóis aumentam o albedo planetário, reduzindo a radiação solar incidente na superfície e a energia disponível (saldo de radiação) (Molion et al., 2002; Sant'Anna Neto et al., 2001). Minnis et al. (1993) observaram que durante os primeiros meses após a erupção do Monte Pinatubo, julho de 1991, ocorreu um aumento de 2 a 3% no albedo planetário e reduções de mais de 10 W m^{-2} na radiação solar sobre a Amazônia. Molion et al. (2002) observaram a influência de aerossóis, provenientes da erupção vulcânica do Monte Pinatubo (1991), nos fluxos de radiação solar da Amazônia Oriental, constatando uma redução média de 60 W m^{-2} nos anos que os aerossóis atingiram sua concentração máxima entre 20°S e 20°N , em comparação com o período (1995/96) em que os aerossóis não estavam mais presentes. Ainda nessa linha de estudo, após a erupção do Monte Pinatubo, em 1991, foi observada uma diminuição de aproximadamente 27% sobre o feixe de radiação solar direta da Terra (Molineaux e Ineichen, 1996). Michalsky et al. (1994) ressalta que a produtividade das centrais de energia solar após a erupção foram 30% menores do que nos anos sem poluição vulcânica.

2.8.2. Nebulosidade

No que diz respeito à cobertura nuvem, Kaiser (1998) apurou, através de dados observados no período entre 1951-1994, uma tendência decrescente na China. Kaiser e Qian (2002) encontraram uma diminuição significativa da radiação solar, principalmente a leste da China, que foi atribuída a aumentos na carga de aerossol de caráter antropogénico. Em análise posterior, observando a duração de horas de brilho solar, Qian et al. (2006) observaram, também sobre a China, tendências decrescentes na cobertura de nuvem e na irradiação solar; no entanto, eles indicaram uma possível reversão e um ligeiro aumento na tendência na irradiação solar a partir de 1990.

Nesse particular, as alterações da cobertura de nuvens podem afetar muito mais o fluxo ascendente de radiação de onda longa do que o fluxo descendente de onda curta (Wild et al., 1998). Wang et al. (2002) ao estudarem o impacto da nebulosidade sobre a radiação de onda longa nos trópicos, entre 1985 e 1998, concluíram que a nebulosidade afeta negativamente as tendências de radiação solar. Hatzidimitriou et al. (2004), ao analisarem a climatologia das nuvens do ISCCP e perfis verticais de temperatura e umidade das reanálises NCEP/NCAR, sobre a região tropical (20°N e 20° S), observaram que houve um aumento de $1,9 \pm 0,2 \text{ W m}^{-2} \text{ década}^{-1}$, entre 1984-2000, seguido por uma aparente secagem da troposfera superior e uma diminuição da nebulosidade nos baixos níveis. Estudos de Chen et al. (2002) e de Wielicki et al. (2002) indicam que a radiação no topo da atmosfera ao longo do período 1979-2001, na região tropical, tem aumentado significativamente a radiação de onda longa, na ordem de $2,8 \text{ W m}^{-2} \text{ década}^{-1}$. A maior parte desse aumento ocorreu a partir de finais dos anos de 1980 a meados da década de 1990, estando relacionado com uma redução do total de nebulosidade (tal como determinado pela ISCCP) para o mesmo período ao longo dos trópicos.

Liang e Xia (2005) ao analisarem “Global dimming” na Antiga União Soviética, Estados Unidos e Austrália atribuíram esse comportamento ao aumento nebulosidade. A análise feita através de séries temporais de nebulosidade sugeriu que o aumento na quantidade de nuvem pode esclarecer, ao menos em parte, os declínios observados na radiação solar nessas regiões. Esse comportamento de decréscimo recebeu a atenção relevante devido à sua profunda influência na temperatura de superfície, na evaporação, no ciclo hidrológico e em muitos ecossistemas. Esses autores também observaram que a frequência de boa visibilidade na parte oriental sofreu uma queda significativa; e atribuíram esse comportamento como sendo um bom indicador do rápido transporte de aerossol nessa região. Já Lohmann et al. (2006) observou uma atenuação máxima 16% nas médias anuais de irradiância direta de todo o globo, atribuindo esses resultados a influência das erupções vulcânicas assim como a variabilidade da nebulosidade. Continuando nessa linha de pesquisa, Lima et al. (2007), ao estudarem a profundidade ótica da atmosfera em Alagoas (leste do NEB), no período de 1997 a 1999, observaram maior atenuação de radiação de onda curta (ROC) no período chuvoso da região, sendo que Maceió teve cerca de 60 a 80% de cobertura de nuvem. Ainda nesse estudo, eles observaram que as maiores concentrações de ROC foram verificadas no ano de 1999 (La Niña) com o máximo de precipitação de 10 mm por dia.

2.9. Conseqüências do “Global dimming”

As mais recentes provas da existência de uma inversão do "Global dimming" em alguns locais para além 1990 sugerem várias conseqüências sobre o clima, designadamente sobre o ciclo hidrológico, redução da temperatura a superfície (T) e precipitação (Nazarenko e Menon, 2005). Anteriormente a esses estudos, Monteith (1965) já citava que a radiação solar está estreitamente relacionada à eficiência do uso da água, evapotranspiração e a

produtividade da cultura. O conhecimento a cerca das mudanças nas taxas evaporativas é de grande importância para o planejamento dos recursos hídricos, controle da irrigação, produção agrícola e florestal, pois mudanças na taxas evaporativas podem levar a alteração em outros parâmetros climáticos. Roderick e Farquhar (2002) destacam que interação entre a evaporação e a radiação solar é de suma importância para se avaliar o impacto futuro das mudanças com relação à forçantes do efeito estufa e o balanço do carbono do ecossistema.

Stanhill e Cohen (2001) comentam que, no caso de culturas limitadas pela água, pequenas diminuições na radiação, se acompanhada, sobretudo da componente difusa da radiação, provocará impactos negativos na produtividade da cultura. Esses impactos negativos ocorrem devido à umidade, e são frequentes em latitudes tropicais, sobretudo nas regiões áridas e semi-áridas. Thomas (2000) encontrou evidências de que ocorreu um decréscimo de 0,21 % em média na evaporação potencial sobre a China, com base na análise de 60 estações, atribuindo esse resultado a ocorrência de uma redução difundida na radiação de onda curta.

Tendências da evaporação foram analisadas em muitas regiões que resultou em diferentes conclusões. As tendências do aumento da evaporação do tanque classe “A” foram documentadas em Israel (Cohen et al., 2002) e no nordeste do Brasil (Silva, 2004). Entretanto, tendências decrescentes de evaporação do tanque classe “A” foram relatadas por Peterson et al. (1995) nos Estados Unidos e na antiga União Soviética, Europa e na Sibéria, por Chattopadhyay e Hulme (1997) na Índia, em Liu et al. (2004) na China, em Roderick e Farquhar (2004) na Austrália e por Tebakari et al. (2005) na Tailândia. Uma longa série de dados potenciais da evaporação para Oxford, Reino Unido (Burt e Shahgedanova, 1998) indica um aumento na tendência. Entretanto, as diminuições na evapotranspiração potencial foram relatadas na Índia (Chattopadhyay e Hulme, 1997) e para Itália (Moonen et al., 2002). Há muitos fatores meteorológicos que podem resultar em um aumento ou em uma diminuição na evaporação (Burn e Hesch, 2007). Palle e Butler (2001) relataram uma tendência

decrecente nas horas de brilho solar e uma tendência de crescente na cobertura de nuvens em quatro locais da Irlanda. Loaiciga et al. (1996), e Roderick e Farquhar (2002) sugeriram que o aumento da cobertura de nuvens está causando menos irradiância solar resultando numa tendência decrescente na taxa de evaporação.

2.10. Observações regionais de radiação solar

No Brasil e América do Sul dados de radiação solar são muito limitados, em face da dificuldade de manutenção e processamento de dados das estações actinográficas. A maioria refere-se a médias climatológicas, fornecido através do número de horas de brilho solar, ou insolação, e não a energia incidente (Ceballos e Bottino, 2004; Leivas et al., 2007). Nota-se que entre os anos 1970-75 ocorreu um esforço considerável na instalação de actinógrafos Fuess na rede Climatológica do Instituto Nacional de Meteorologia (particularmente no Nordeste). Esses dados foram processados na Universidade Federal da Paraíba, utilizando cinco anos de actinogramas e heliogramas, para gerar um Atlas preliminar do Nordeste (Azevedo et al., 1981).

Na década de 1990 multiplicaram-se as estações automáticas e as plataformas coletoras de dados (PCDs) com retransmissão de dados via telefone e satélite, algumas delas com piranômetros (Caramori et al., 2002). Ceballos e Bottino (2002) citam exemplos do uso de satélites como retransmissores de dados solarimétricos, os da rede do IAPAR, Paraná e do Programa de Monitoramento do Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH, MCT). Os mesmo autores fazem referências às modernas redes automáticas, como outra ferramenta que permite monitorar a irradiação solar com frequência diária e alta definição temporal, mas sua multiplicação está limitada pelo seu custo elevado.

A Universidade Federal de Pernambuco, visando compilar os dados de radiação solar em nível nacional, gerou em meados de 2002 um Atlas Nacional Solarimétrico do Brasil, que teve por objetivo recuperar, qualificar, padronizar e disponibilizar as melhores informações sobre os recursos solares existentes no país. Tal Atlas foi apresentada em forma de cartas de isolinhas de radiação solar, insolação e em tabelas numéricas, bem como em forma de resumos analíticos de publicações sobre o tema no Brasil nos últimos quarenta anos (Tiba e Fredenreich, 2002).

Algumas universidades e órgãos governamentais operam radiômetros, que mesmo assim são insuficientes para a demanda de estudo nessa área. Uma ferramenta que vem sendo bastante utilizada para preencher esta lacuna é o sensoriamento remoto, que tem possibilitado a estimativa de parâmetros como radiação solar global, albedo da superfície, índices de vegetação, emissividade da superfície, temperatura da superfície e balanço de radiação (Leivas et al., 2007). As imagens de satélite em alta resolução também tem sido uma ferramenta bastante utilizada nos últimos anos para estimativa de radiação solar sobre regiões extensas e de difícil localização (Ceballos e Bottino, 2002 e 2004; Martins et al., 2004; Leivas et al., 2007).

Uma alternativa ainda pouco utilizada para estimar a radiação solar são os dados de reanálise do NCEP/NCAR, ao quais apresentam uma série temporal consistente para produzir estimativas do histórico da atmosfera. Isso consiste numa ferramenta que possibilita ter uma cobertura regular de todo o globo terrestre, o que seria impossível na prática com as estações de superfície, radiossondagens e aviões. Dessa forma, esses dados oferecem um potencial de medida de fluxos radiativos sobre grandes áreas, e sobre regiões em que não existe uma densa rede de estações, resultando numa alternativa para o monitoramento da radiação solar à superfície com uma boa variabilidade espacial e temporal (Lohman et al., 2006).

2.11. Climatologia do Nordeste do Brasil

Como no presente trabalho o objetivo geral é investigar o comportamento da radiação solar no Nordeste do Brasil, em especial a possível atuação do fenômeno “Global dimming” na região, é, portanto, importante descrever de forma simplificada os principais sistemas atmosféricos, responsáveis pela maior frequência de nebulosidade sobre a região Nordeste do Brasil (NEB).

A variabilidade interanual da distribuição de chuvas sobre o NEB, tanto na escala espacial quanto na temporal, está relacionada as mudanças nas configurações de circulação atmosférica de grande escala e com a interação oceano atmosfera no Pacífico e no Atlântico (Molion e Bernardo, 2002). Evidências observacionais, teóricas e resultados de modelos de circulação geral da atmosfera, indicam que as condições oceânicas e atmosféricas sobre a Bacia do Atlântico influem fortemente na variabilidade interanual do clima sobre as Américas (Hastenrath e Heller, 1977; Moura e Shukla, 1981; Hastenrath, 1984; Chu, 1984; Hastenrath, 1990; Nobre e Shukla, 1996). Na América do Sul, particularmente a região Nordeste do Brasil é fortemente influenciados pelas circulações atmosféricas e oceânicas do Atlântico vários estudos têm sido desenvolvidos nessa linha de pesquisa (Namias, 1972; Hastenrath e Heller, 1977; Markham e McLain, 1977; Moura e Shukla, 1981; Hastenrath, 1984; Hastenrath, 1990; Alves et al., 1993; Nobre, 1993; Rao et al., 1993; Nobre e Shukla, 1996).

Segundo Silva (2006), o NEB também sofre influência de modos de variabilidade de TSM no Pacífico que causam variações climáticas sobre a região, tal como o El Niño/Oscilação Sul (ENOS) (Kayano et al., 1988; Aceituno, 1988). Entretanto, esse não é o único modo de variabilidade de TSM no Pacífico, outro modo semelhante é a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (Zhang et al., 1997; Mantua et al., 1997; Zhang et al., 1998). Nesse particular, Mantua et al. (1997) descreveram a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)

como uma oscilação das temperaturas de sua superfície semelhante ao ENOS, com duas fases, quente (positiva) e fria (negativa), porém de longa duração, entre 20 e 30 anos cada fase. Eles notaram que durante a ODP (+) (1925-1946 e 1977-2000) houve uma maior ocorrência de El Niños, enquanto que na ODP (-) (1910-1924 e 1947-1976) observou-se um maior número de La Niñas apenas no período 1910-1924, e que a ODP (+) pode atuar de forma positivamente para a ocorrência de El Niños.

Os fenômenos ODP e ENSO podem ter efeito combinado na distribuição anômala de precipitação pluvial em algumas regiões, agindo “construtivamente” (com anomalias fortes e bem definidas) quando elas estão na mesma fase, e “destrutiva” (com anomalias fracas e más configuradas) quando elas estão em fases opostas (Gerhunov e Barnett, 1998). Já Silva (2006) sugere que durante a ODP (+) a ocorrência de El Niños seja maior e mais forte, enquanto que na ODP(-) espera uma maior ocorrência de La Niñas. Assim como El Niños que ocorrem na ODP (-), La Niñas ocorrem na ODP (+) e devem apresentar padrões anômalos e efeitos menos intensos. Outros sistemas atmosféricos de grande escala também são responsáveis pelos regimes de precipitação pluvial na região, tais como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) Strang (1972), a penetração de resquícios de frentes frias, vórtices ciclônicos de alta troposfera (Namias, 1972; Kousky, 1979; Kousky e Gan, 1981), sistemas de mesoescala do tipo complexos convectivos e linhas de instabilidade (Molion e Bernardo, 2002; Silva, 2006).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A região Nordeste do Brasil (NEB) está situada ao Sul do Equador, ocupando a posição norte-oriental do País, entre 1° e 18° 30' de latitude Sul e 34° 20' e 48° 30' de longitude Oeste. Ocupa uma área de 1.561.177,8 km², o que representa 18,3% do território brasileiro, tendo a Norte e a Leste do Oceano Atlântico (Figura 3.1). A região semi-árida corresponde aproximadamente 60% da sua área total (Silva, 2004). É a região do país mais subdividida politicamente, com nove estados: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe (Cavalcanti, 2001).

O NEB é conhecido pela predominância de características climáticas semi-áridas e por sua grande variabilidade temporal e espacial da precipitação, com grande impacto sócio-econômico sobre a região. A população que habita essa região sofre frequentemente as conseqüências da instabilidade climática da região, tal como a deficiência no suplemento de água que abastece a região e perdas agrícolas. Esta extensa área é habitada por mais de 30 milhões de pessoas e a economia é baseada essencialmente na agricultura de subsistência (Silva, 2004).

3.2. Dados utilizados no estudo

Para a realização deste trabalho foram utilizados dados mensais de saldo de radiação de onda curta (Rns), saldo de radiação de onda longa (Rnl) e saldo de radiação (Rn) da área correspondente ao Nordeste Brasileiro, para o período de 1948 a 2006, obtidas na base de dados do *National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), com resolução de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ latitude e longitude. O Projeto *Reanalysis* se constitui num sistema de assimilação de dados, que incluem módulos de controle de qualidade e análise objetiva e interpolação (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001). A Figura 3.2 exibe a distribuição espacial dos pontos de grandes da região Nordeste do Brasil utilizados neste estudo.

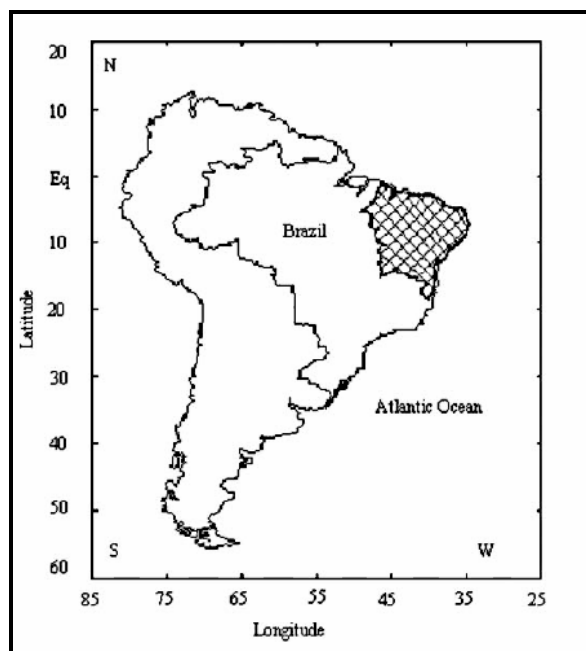


Figura 3.1. Mapa da América do Sul com a representação da região Nordeste do Brasil em destaque. *Fonte: Silva (2004).*

Também foram analisadas as séries temporais de radiação solar global (Rg) e evaporação do tanque classe “A” (Epan) de duas localidades do semi-árido da região de estudo: Juazeiro-BA (latitude 09°24'S e longitude 40°26'W) e Petrolina-PE (latitude 09°09'S e longitude 40°22'W), no período de 1975 a 2006 (Figura 3.3). Os dados dessas localidades foram obtidos no banco de dados meteorológicos da Embrapa Semi-Árido.

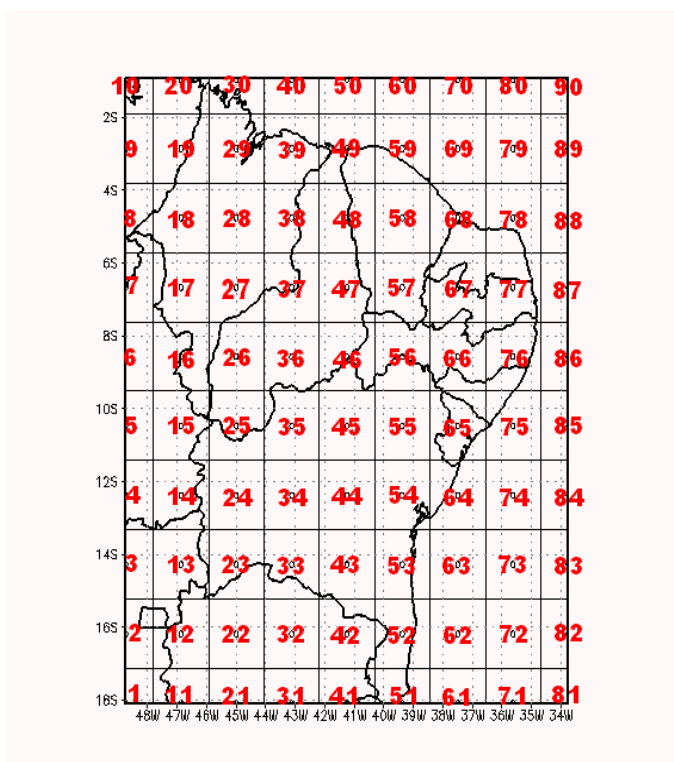


Figura 3.2. Distribuição espacial dos 90 pontos de grade, com resolução de 2,5° x 2,5° grau de latitude e longitude, sobre a região Nordeste do Brasil.

Neste estudo foram determinadas as tendências (por década e por ano) das séries temporais de saldo de radiação de onda curta (Rns), saldo de radiação de onda longa (Rnl) e de saldo de radiação (Rn), derivadas dos dados de reanálise do NCEP/NCAR. Esses dados foram obtidos no formato de arquivos binários, oriundos do website: www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.derived, posteriormente convertidos em arquivos txt, para serem utilizados em planilhas do Excel. Foram geradas médias anuais para cada ponto da grade dos 90 pontos sobre a região Nordeste do Brasil; em seguida, utilizando os

mesmos valores médios anuais, determinaram-se as tendências temporais e os níveis de significâncias estatísticas correspondentes para cada ponto de grade. As tendências foram determinadas inicialmente por década e posteriormente por ano. Para a espacialização das tendências e dos níveis de significâncias das séries temporais, foi utilizado o Sistema de Visualização e Grid Analysis and Display System (GrADS).



Figura 3.3. Localização das cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA no Nordeste Brasileiro.

3.3. Metodologia

3.3.1. Método para análise da tendência e significância estatística

3.3.1.1. Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall é um teste não-paramétrico (Mann, 1945), (Kendall, 1975), sugerido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para avaliação da tendência em

séries temporais de dados ambientais (Yu et al., 2002). Esse teste consiste basicamente da comparação de cada valor de uma série temporal com outros valores restantes sempre em ordem seqüencial (Silva et al., 2007). A estatística do teste é a seguinte:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j), \quad (3.1)$$

em que x_j são os dados estimados da seqüência de valores, n é o comprimento da série temporal e o sinal $(x_i - x_j)$ é igual a -1 para $(x_i - x_j) < 0$, 0 para $(x_i - x_j) = 0$, e 1 para $(x_i - x_j) > 0$. O teste de Mann-Kendall é um teste normalmente usado para avaliar tendência de séries temporais de dados ambientais com bastante eficiência (Modares e Silva, 2007). Kendall (1975) mostrou que S é normalmente distribuída com média $E(S)$ e variância $\text{Var}(S)$, para uma situação na qual pode haver valores iguais de x , são calculadas pelas equações:

$$E[S] = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{Var}[S] = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (3.3)$$

em que (t_p) é número de dados com valores iguais num certo grupo (p th) e q é o número de grupos contendo valores iguais na série de dados num certo grupo p . O segundo termo representa um ajuste para dados censurados.

Usando a equação (3.1), o valor positivo de S indica tendência positiva dos dados que crescem com o tempo; por outro lado, o valor negativo indica uma tendência decrescente. Sabendo-se que S é normalmente distribuída, que tem média zero e variância dadas pelas

equações 3.2 e 3.3, respectivamente, pode-se checar se a tendência positiva ou negativa é significativamente diferente de zero. Se S é significativamente diferente de zero, a hipótese nula H_0 pode ser rejeitada para certo nível de significância apontando para a existência de tendência; inversamente a hipótese alternativa (H_1) é aceita. O teste estatístico parametrizado (Z_{MK}) é computado pela seguinte equação:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

A presença de uma tendência estatisticamente significativa é avaliada usando o valor de Z . Essa estatística é usada para testar a hipótese nula, ou seja, que nenhuma tendência existe. Um valor positivo de Z_{MK} indica um aumento da tendência, quando negativa indica uma tendência decrescente. Para testar a tendência monotônica crescente ou decrescente no nível de significância de p , a hipótese nula é rejeitada se o valor absoluto de Z for maior que $Z_{1-p/2}$, utilizando-se a tabela da distribuição normal cumulativa padrão. Os níveis de significância de $p = 0,01$ e $0,05$ foram aplicados neste estudo. Uma estimativa não-paramétrica para o valor da inclinação da tendência é obtida de acordo com Hirsch et al.(1982):

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{(x_j - x_i)}{(j - i)} \right], \text{ para } i < j \quad (3.5)$$

em que x_j e x_i são os pontos dados medidos no tempo j e i , respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho foram divididos em duas seções: primeiro é apresentada as prováveis causas das tendências temporais (por década, por ano e para o período de 1948-2006) do saldo de radiação, saldo de radiação de ondas longas e ondas curtas sobre o NEB com base em dados de reanálise do NCEP/NACR; e, em seguida, são discutidas as tendências temporais obtidas através dos dados observados de radiação global e evaporação das localidades de Petrolina, PE, e Juazeiro, BA.

4.1. Análise dos dados estimados pela reanálise NCEP/NCAR

4.1.1. Primeira década (1948-1957)

As Figuras 4.1 A, B, C exibem a distribuição espacial das tendências das séries temporais do saldo de radiação, saldo de radiação de onda curta e saldo de radiação de onda longa, respectivamente. As variáveis analisadas apresentaram comportamento homogêneo sobre o NEB, onde as tendências variaram entre $-0,2$ e $+0,8 \text{ W m}^{-2}$, sendo predominantemente negativas somente no noroeste do NEB, mais precisamente sobre o Estado do Maranhão. Nas demais áreas da região, as tendências foram positivas especialmente no centro-leste da Bahia onde se encontra um núcleo com tendência positiva acima de $0,6 \text{ W m}^{-2}$.

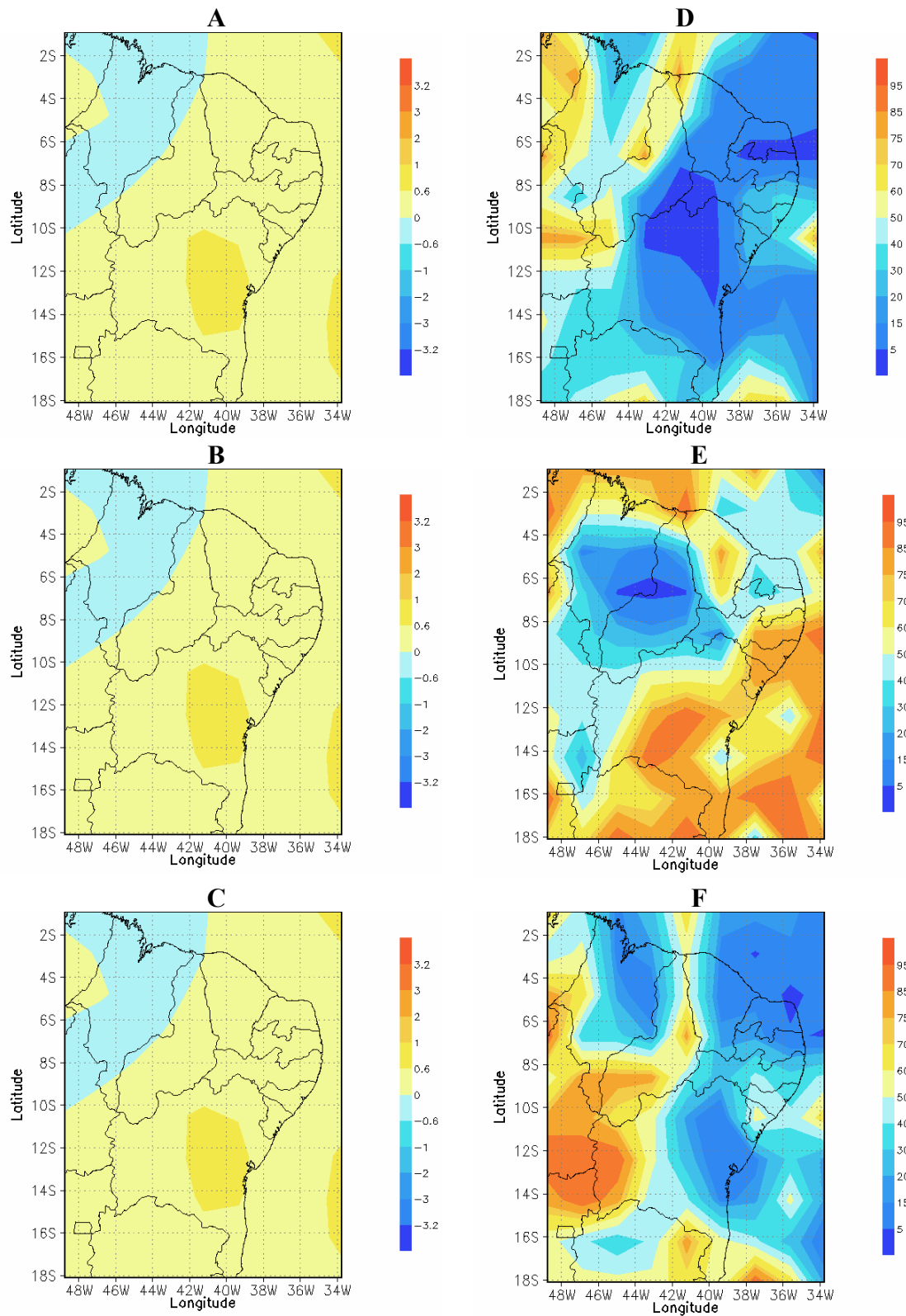


Figura 4.1. Distribuição espacial da tendência temporal do saldo de radiação (A), nível de significância do saldo de radiação (D), radiação de ondas longas (B), nível de significância de ondas longas (E), radiação de ondas curtas (C), nível de significância de ondas curtas (F) no Nordeste do Brasil para o período de 1948-1957 (primeira década).

No sentido de se avaliar o grau em que esses resultados são estatisticamente representativos, analisou-se a distribuição espacial do nível de significância das tendências (p-nível) da distribuição espacial para as três variáveis, conforme evidenciados nas Figuras 4.1 D, E, F. Ressalta-se que quanto maior o valor do p-nível, menos representativa é a significância estatística das tendências e vice-versa. Tendências positivas estatisticamente significativas do saldo de radiação aos níveis de 1 e 5% de probabilidades são observadas na parte do semi-árido e leste do NEB, no sul do Rio Grande do Norte, norte da Paraíba, oeste de Pernambuco e noroeste da Bahia (Figura 4.1 D); enquanto que a radiação de ondas longas apresentou uma estreita faixa de tendências significativas negativas, entre esses níveis de significância, a leste do Maranhão e na região central do Estado do Piauí (Figura 4.1 E); quanto à radiação de ondas curtas, observa-se um núcleo de tendência positivas, com significância estatística, localizado a nordeste do Estado do Rio Grande do Norte (Figura 4.1 F).

4.1.2. Segunda década (1958-1967)

Na segunda década (1958-1967) houve uma ampliação da faixa com tendência negativa e redução da faixa com tendência positiva, com relação à década anterior, com variação de $-0,6$ a $+0,5 \text{ W m}^{-2}$ por ano, conforme verificado nas Figuras 4.2 A, B e C. Nota-se uma área com núcleos de tendências negativas inferior a $-0,6 \text{ Wm}^{-2}$, sem significância estatística deslocada para o leste do NEB, englobando o centro dos Estados de Pernambuco, Alagoas, bem como todo o Estado de Sergipe e leste da Bahia. Nesse período para NEB, não foi observado áreas estatisticamente significativas aos níveis de probabilidade de 1 e 5% de probabilidades para as três variáveis analisadas (Figuras 4.2 D, E e F).

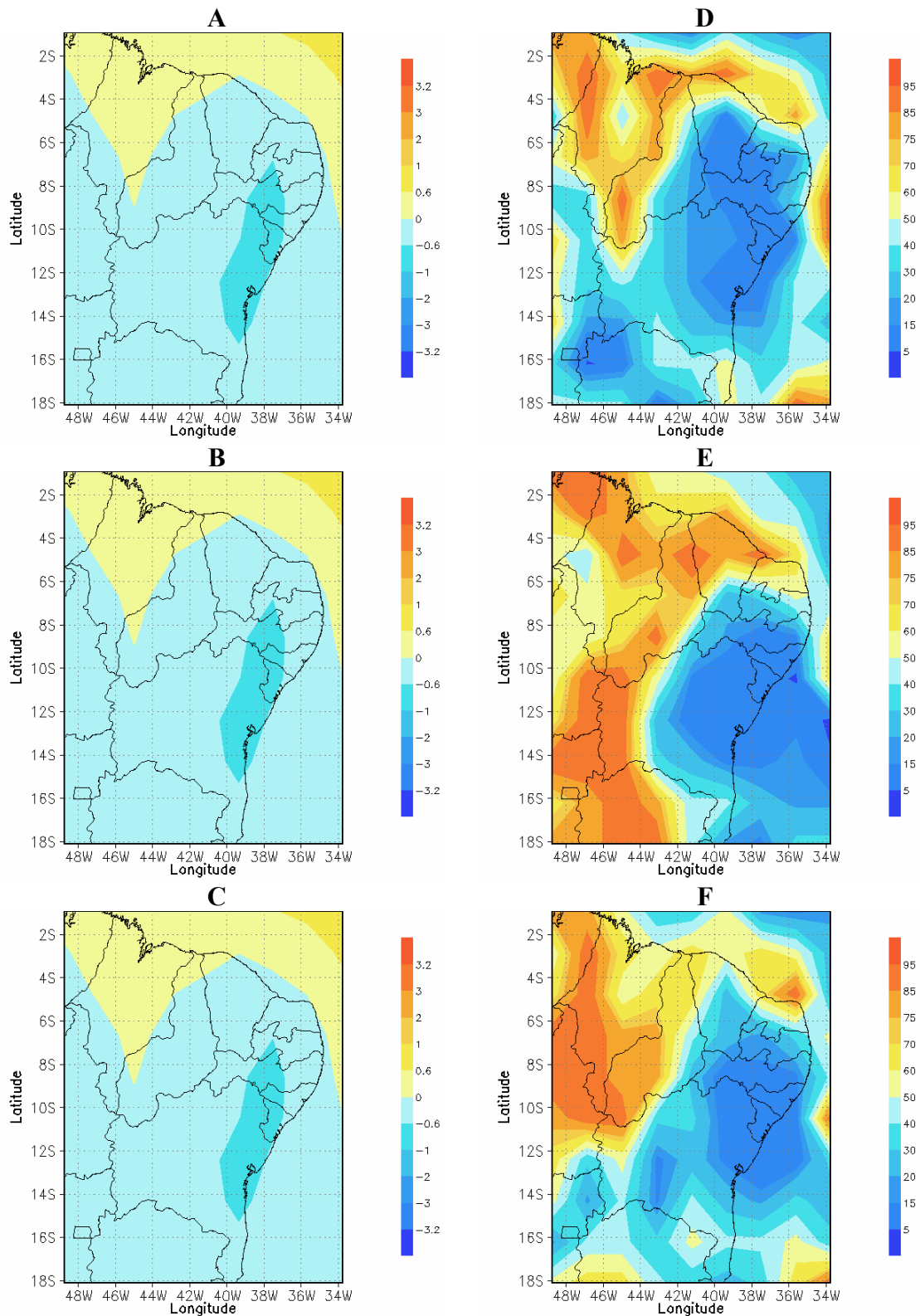


Figura 4.2. Distribuição espacial da tendência temporal do saldo de radiação (A), nível de significância do saldo de radiação (D), radiação de ondas longas (B), nível de significância de ondas longas (E), radiação de ondas curtas (C), nível de significância de ondas curtas (F) no Nordeste do Brasil para o período de 1958-1967 (segunda década).

4.1.3. Terceira década (1968-1977)

Nas Figuras 4.3 A, B e C observa-se que as variáveis analisadas foram predominantemente negativas sobre NEB, com exceção do saldo de radiação que apresentou uma faixa com tendência positiva cobrindo o nordeste da Bahia, oeste de Pernambuco e o sul do Ceará e todo o Estado de Sergipe. Os saldos de radiação de ondas longas e curtas foram espacialmente similares, apresentando variação no fluxo de energia entre 0 e $-3,5 \text{ Wm}^{-2}$ por ano; enquanto que na análise do saldo de radiação, que corresponde ao balanço de energia emitida e incidente sobre o NEB, a variação ficou entre $-1,6$ e $+0,2 \text{ Wm}^{-2}$ por ano. Os mais altos valores de tendência negativa ficaram concentrados no sudoeste do Estado do Maranhão, sul do Piauí e oeste da Bahia. Toda região em que ocorreram tendências negativas apresentaram significância estatística aos níveis de 1 e 5% de probabilidade para as três variáveis analisadas (Figuras 4.3 D, E e F).

4.1.4. Quarta década (1978-1987)

Nessa década (1978-1987), o saldo de radiação sobre o NEB variou entre $-1,2$ e $+0,2 \text{ Wm}^{-2}$, onde os maiores valores de tendências negativas, estatisticamente significativas estão localizados sobre todo o NEB, apresentando uma faixa de tendência positiva sobre a região central (Figura 4.4 A). Assim, tal como nas décadas anteriores, verificaram-se homogeneidades na distribuição de tendência do saldo de radiação de ondas longas e ondas curtas, apresentando variação de $-1,0$ a $+1,0 \text{ W m}^{-2}$ por ano (Figuras 4.4 B e C). As variáveis do saldo de radiação de ondas longas e curtas apresentam núcleos de tendências negativas no semi-árido nordestino. As Figuras 4.4 D, E e F exibem a espacialização do nível de significância dessas variáveis, onde é possível observar que os núcleos de tendências negativas são estatisticamente significativos aos níveis de 1 e 5% de probabilidade somente para o saldo de radiação.

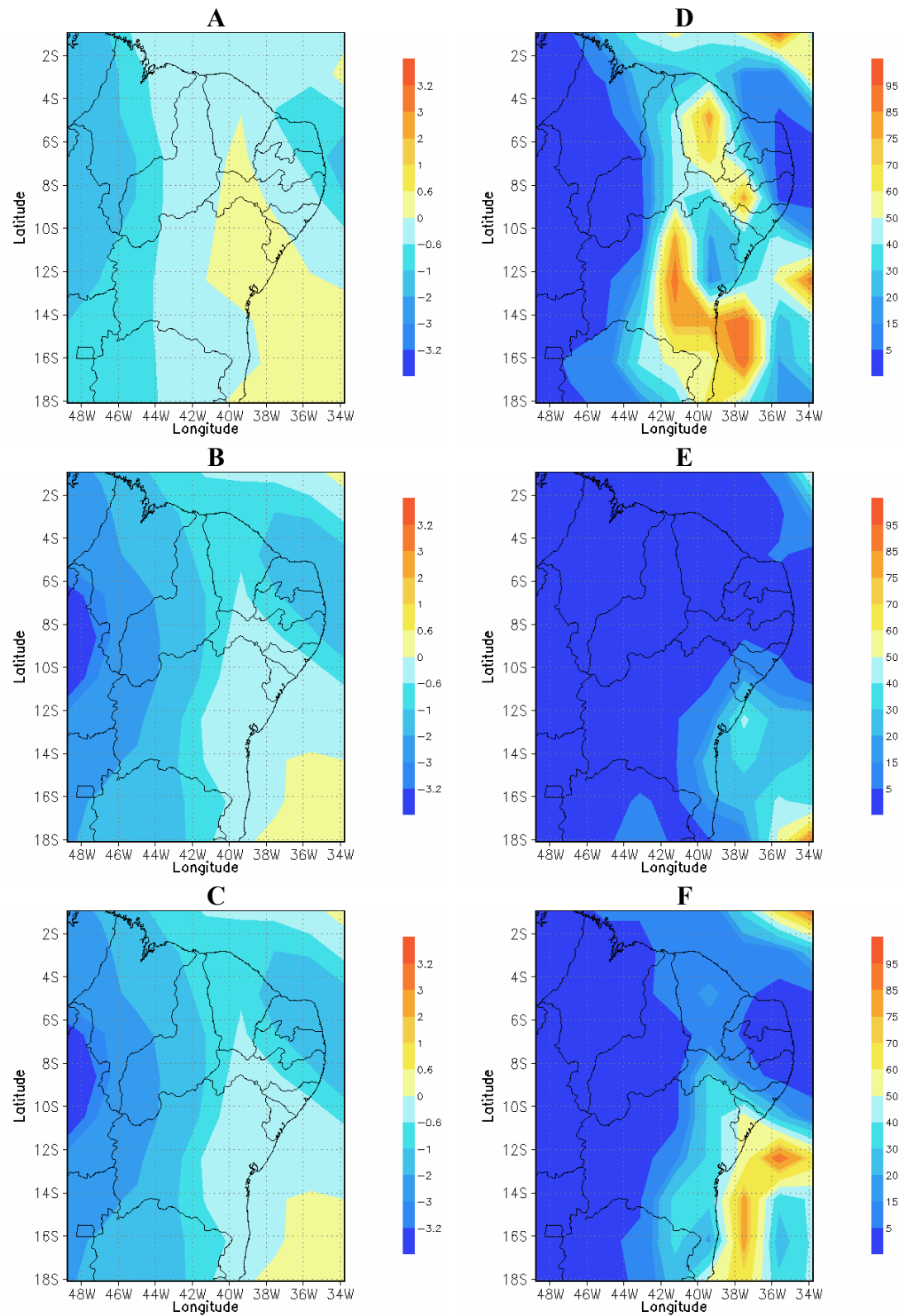


Figura 4.3. Distribuição espacial da tendência temporal do saldo de radiação (A), nível de significância do saldo de radiação (D), radiação de ondas longas (B), nível de significância de ondas longas (E), radiação de ondas curtas (C), nível de significância de ondas curtas (F) no Nordeste do Brasil para o período de 11968-1977 (terceira década).

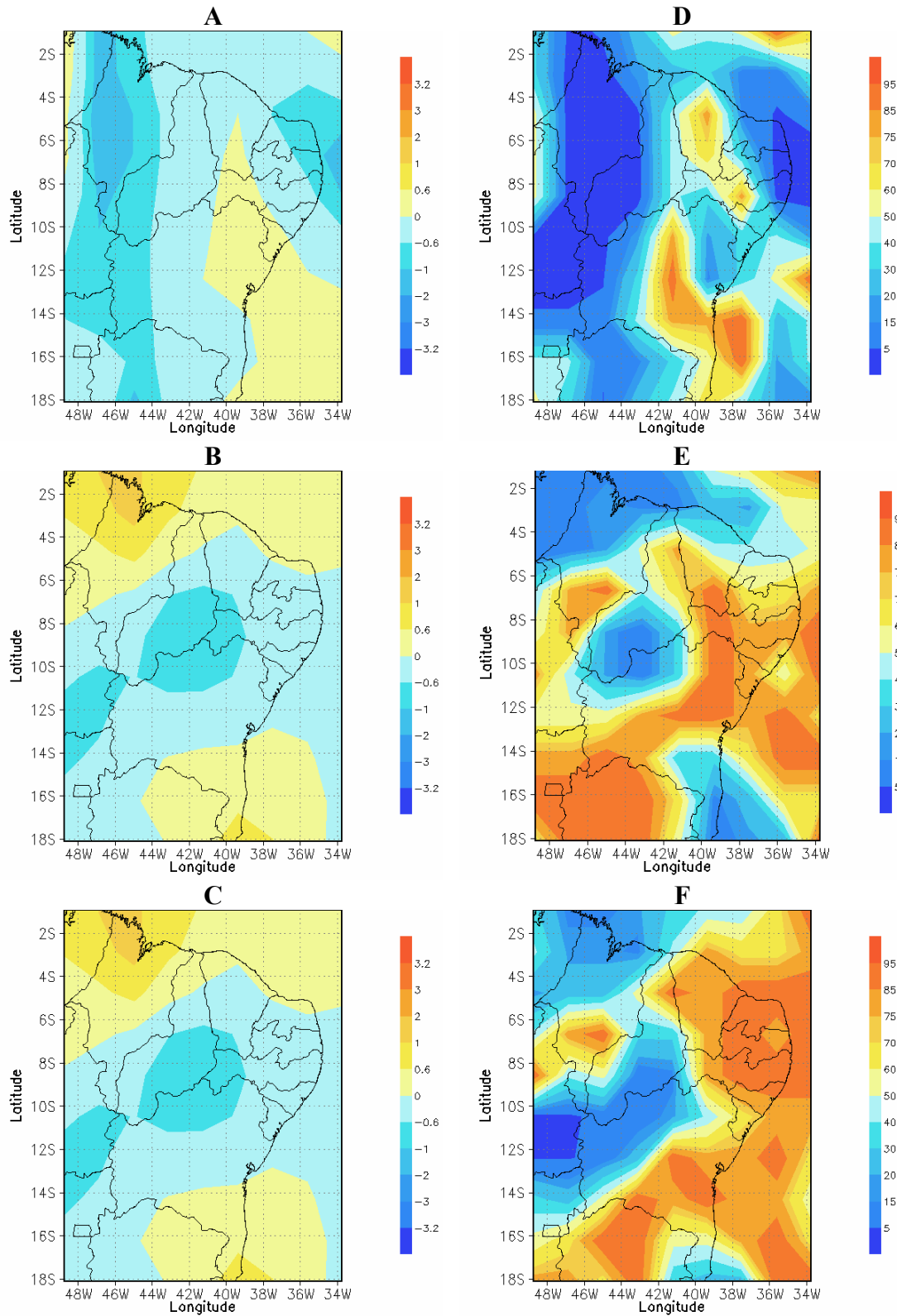


Figura 4.4. Distribuição espacial da tendência temporal do saldo de radiação (A), nível de significância do saldo de radiação (D), radiação de ondas longas (B), nível de significância de ondas longas (E), radiação de ondas curtas (C), nível de significância de ondas curtas (F) no Nordeste do Brasil para o período de 1978-1987 (quarta década).

4.1.5. Quinta década (1988-1997)

A década de 1988-1997 apresentou uma mudança na distribuição espacial das séries temporais do saldo de radiação, radiação de ondas longas e curtas (Figuras 4.5 A, B e C), predominando tendências positivas sobre quase toda região de estudo. Nota-se que o saldo de radiação apresentou um núcleo de tendências negativas, porém sem qualquer significância estatística (Figuras 4.5 A e D). Observa-se um núcleo de tendência positiva superior a $0,6 \text{ Wm}^{-2}$ para o saldo de radiação de onda longa, no sul dos Estados do Maranhão, Piauí e noroeste da Bahia (Figura 4.5 E), que é estatisticamente significativo ao nível de 5% de probabilidade.

4.1.6. Sexta década (1998-2006)

Assim como na década anterior, na década de 1998-2006 verificam-se homogeneidade nas tendências para as três variáveis analisadas, prevalecendo tendências positivas em todo o NEB (Figuras 4.6 A, B e C). Observa-se que os núcleos, com altos valores de tendências positivas, deslocaram-se para o noroeste da região de estudo. Toda a área noroeste do NEB apresentou significância estatística ao nível de 5% de probabilidade (Figuras 4.6 D, E e F). Também, verificaram-se tendências negativas a sudoeste do Estado da Bahia, nas três variáveis, porém esses valores não apresentam significância estatística pelo teste de Mann-Kendall.

4.2. Análise climatológica anual dos dados estimados pela reanálise NCEP/NCAR

As Figuras 4.7 A, B e C exibem a distribuição das tendências das séries temporais das variáveis analisadas e suas respectivas significâncias estatísticas (Figuras 4.7 D, E e F) para todo o período de estudo (1948-2006).

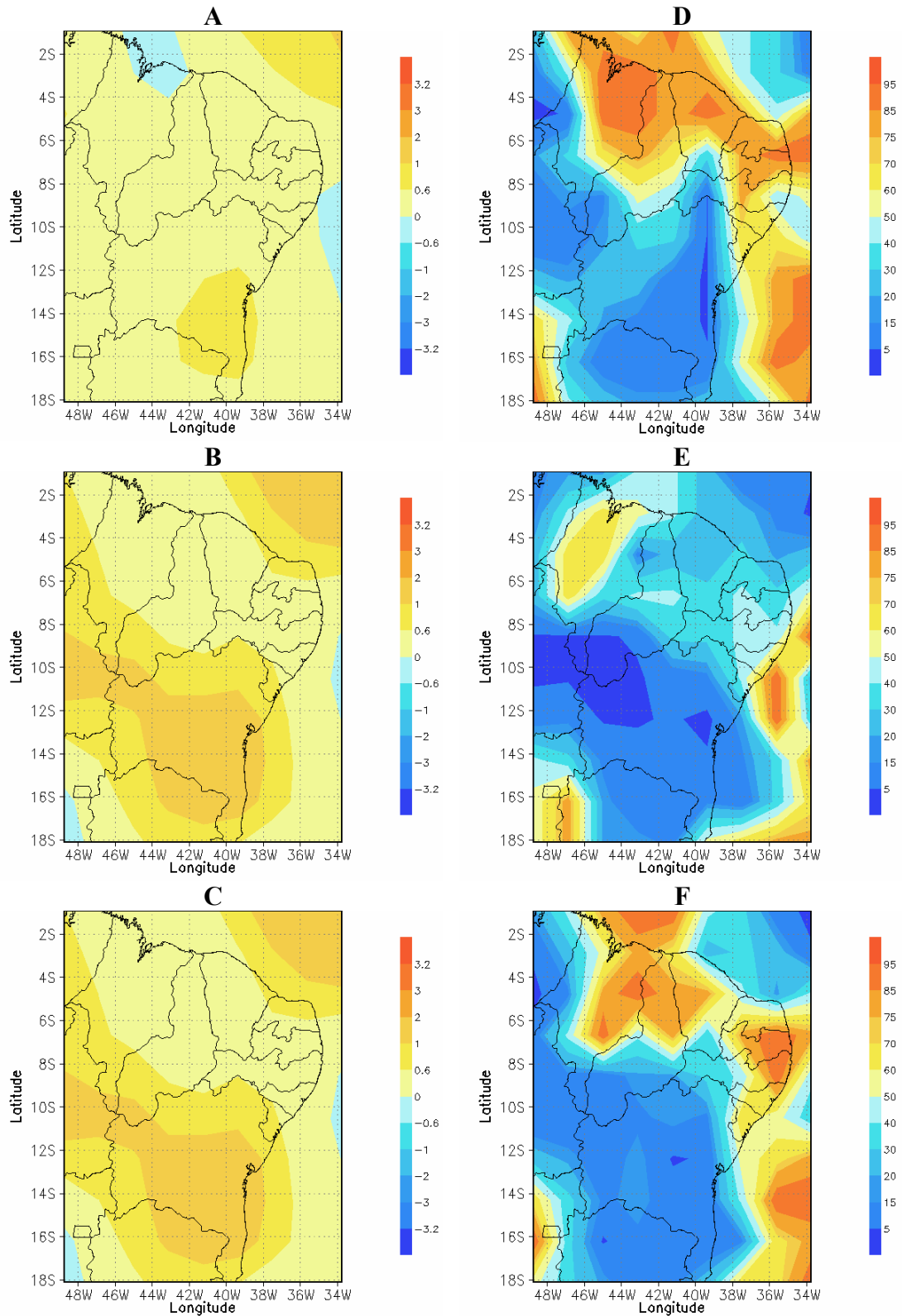


Figura 4.5. Distribuição espacial da tendência temporal do saldo de radiação (A), nível de significância do saldo de radiação (D), radiação de ondas longas (B), nível de significância de ondas longas (E), radiação de ondas curtas (C), nível de significância de ondas curtas (F) no Nordeste do Brasil para o período de 1988-1997 (quinta década).

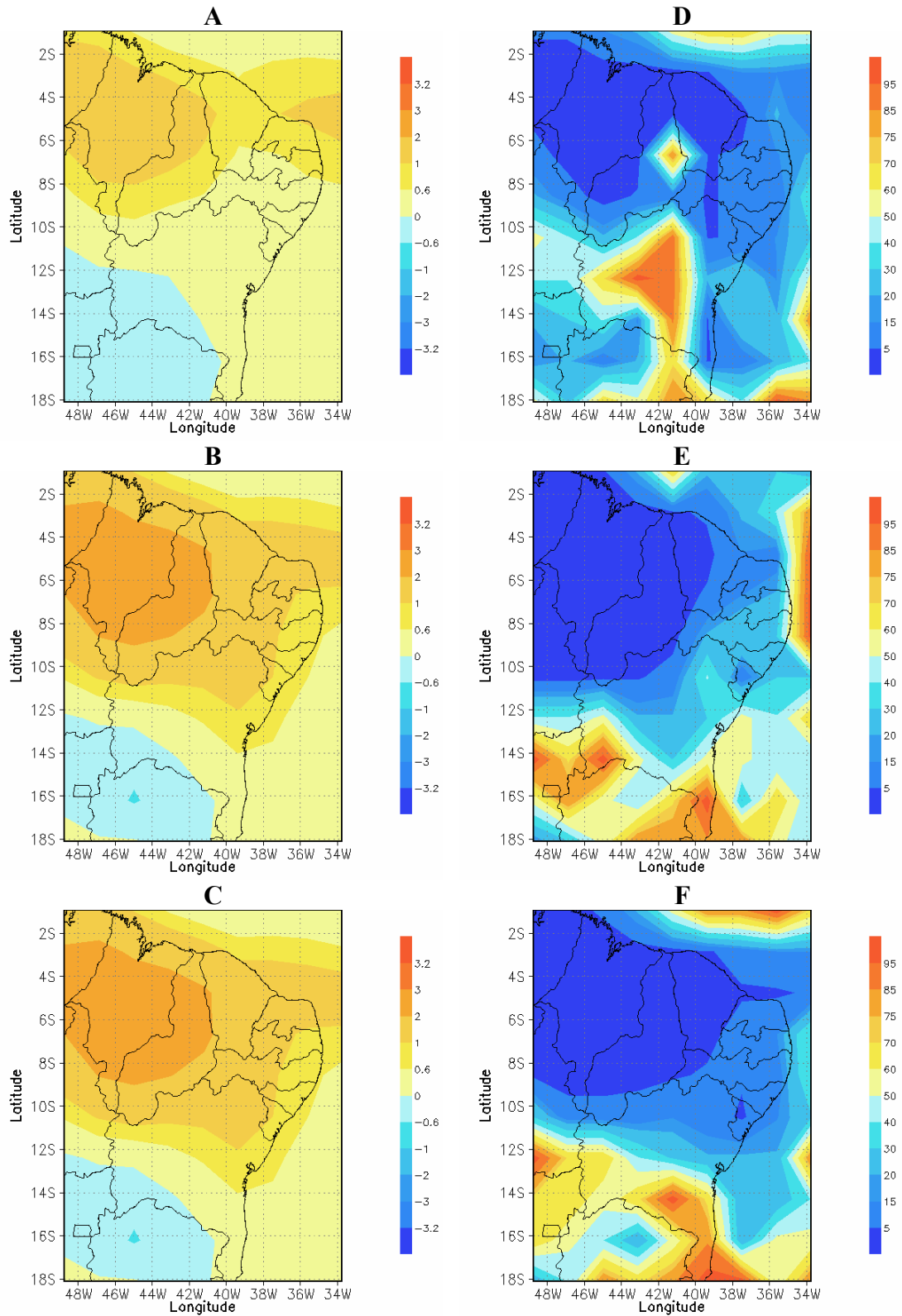


Figura 4.6. Distribuição espacial da tendência temporal do saldo de radiação (A), nível de significância do saldo de radiação (D), radiação de ondas longas (B), nível de significância de ondas longas (E), radiação de ondas curtas (C), nível de significância de ondas curtas (F) no Nordeste do Brasil para o período de 1998-2006 (sexta década).

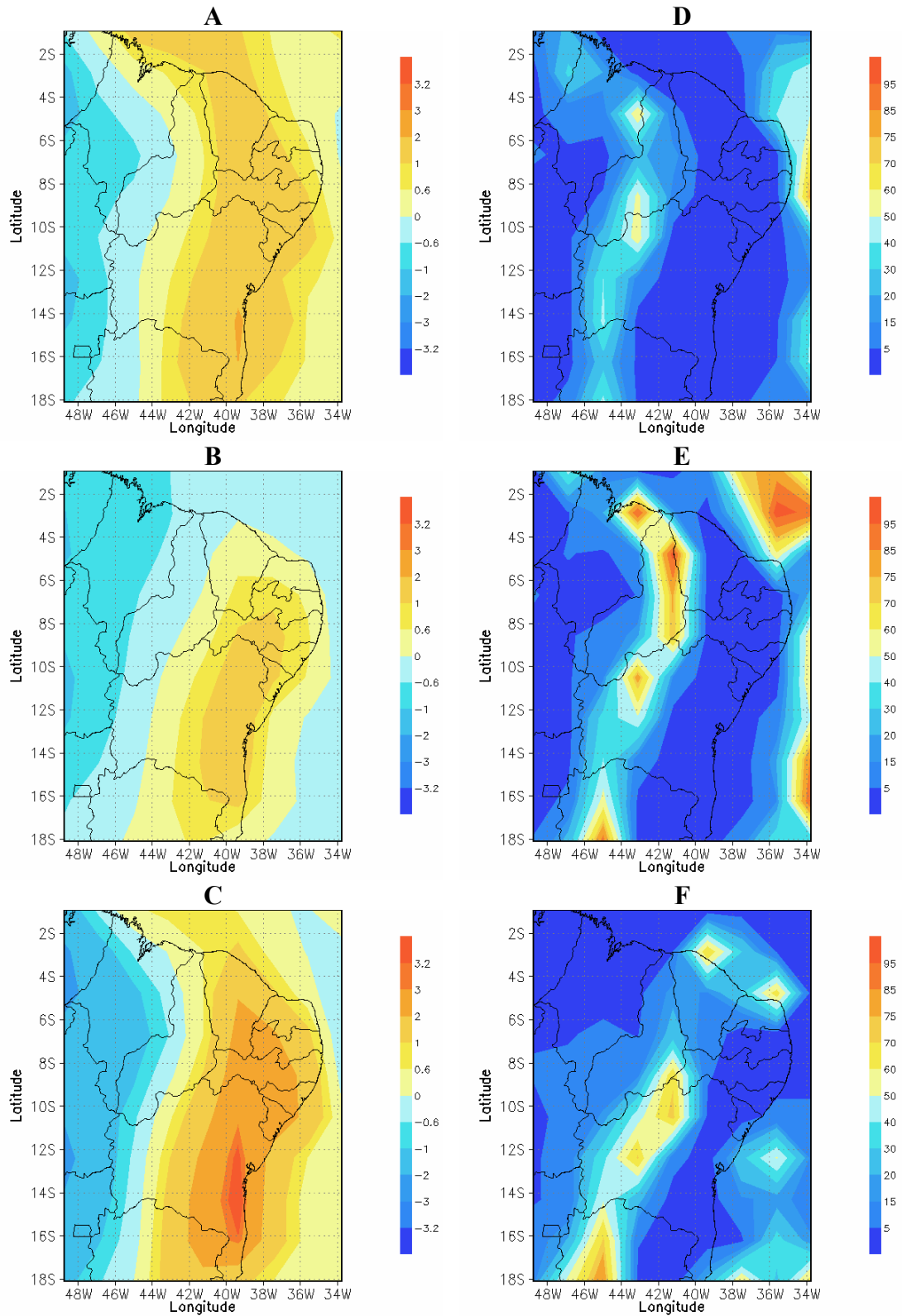


Figura 4.7. Distribuição espacial da tendência temporal do saldo de radiação (A), nível de significância do saldo de radiação (D), radiação de ondas longas (B), nível de significância de ondas longas (E), radiação de ondas curtas (C), nível de significância de ondas curtas (F) no Nordeste do Brasil para o período 1948-2006.

Observa-se que as tendências variaram por ano de -1.2 a $+1.8 \text{ Wm}^{-2}$ para o saldo de radiação, de -0.9 a $+1.2 \text{ Wm}^{-2}$ para ondas longas e de -2.0 a $+3.0 \text{ Wm}^{-2}$ para ondas curtas. Os maiores valores de tendência são encontradas para a radiação de onda curta, enquanto a radiação de onda longa e o saldo de radiação total apresentam uma pequena variação temporal. Observaram-se tendências negativas nas três variáveis analisadas localizadas a oeste do Nordeste do Brasil e tendências positivas no Leste da região (Figuras 4.7 A, B e C). Nota-se núcleos significativos de 1 a 5% de probabilidades a leste da região Nordeste para o saldo de radiação, radiação de ondas longas e ondas curtas (Figuras 4.7 D, E e F); enquanto a parte central não apresentou qualquer tendência estatisticamente significativas para as três variáveis analisadas.

Em estudos realizados por Ohmura e Lang (1989), Stanhil (1998), Kaiser (2000), Stanhill e Cohen (2001), Lieper (2002), Power (2003), Philipona et al., (2004), Wild et al., (2005), Pinker et al., (2005), Black et al. (2006) e Streets et al., (2007) foram observados decréscimos nas taxas de radiação solar até o final da década de 80, o chamado “Global dimming”, e uma cessão desse fenômeno a partir da década de 90. Observou-se comportamento semelhante sobre a região Nordeste do Brasil na série temporal de radiação solar, estimada através de dados de reanálise NCEP/NCAR, indicando a presença do efeito “Global dimming” na região.

Mudanças na cobertura de nuvens, concentração de aerossóis antropogênicos, albedo da superfície, concentração de vapor d’água e diminuição da transmissividade atmosférica, em resposta às erupções vulcânicas, têm sido descritos como as possíveis causas do “Global dimming” (Gu et al., 2003; Power, 2003; Ramanathan et al., 2001). Streets et al. (2007) especula que as tendências positivas das duas últimas décadas sejam influências da aplicação de novas tecnologias na geração de energia para indústrias, o que, conseqüentemente, contribui para uma diminuição da liberação de poluentes para a atmosfera.

Quanto à análise por ano, observa-se tendências decrescentes nas taxas de radiação solar no Oeste do Nordeste do Brasil, bem como na parte semi-árida da região. Por outro lado, notam-se tendências positivas no Leste da região de estudo. Sugere-se que o comportamento decrescente da radiação solar seja efeito de mudanças no albedo da superfície como resultado de modificações na cobertura do solo, aumento da taxa de aerossóis antropogênicos e ainda maior frequência de eventos que provocam nebulosidade sobre a região de estudo. Segundo Wild et al. (2004) as mudanças na cobertura de nuvem, quantidade de aerossol e suas interações são as causas mais prováveis para a redução na radiação solar absorvida, bem como o aumento na radiação de onda longa descendente e no saldo de radiação sobre a superfície terrestre. Nazarenko e Meon (2005), estudando as tendências da radiação solar do período de 1960 a 2002, em duas situações (com e sem aerossóis antropogênicos) verificaram que sem o efeito do aerossol é observada uma tendência crescente da radiação solar; enquanto que, com efeito, do aerossol, ela apresenta tendências decrescente. Liang e Xia (2005) comentam que a cobertura de nuvem pode contribuir, pelo menos em parte, para o declínio da radiação solar observada em algumas regiões do globo.

O presente estudo revela que quando a análise é por década ocorrem tendências negativas que predominaram até a quarta década. Nesse período, ocorreu a maior frequência de eventos La Niña de intensidade forte, totalizando nove eventos de acordo com informações do Climate Prediction Center. Nesse particular, segundo Molion e Bernardo (2002) a distribuição de chuvas sobre o NEB está intimamente relacionada às mudanças nas configurações da circulação atmosférica de grande escala e com a interação oceano-atmosfera no Pacífico e Atlântico que contribuem conseqüentemente para a presença de nebulosidade e vapor d'água na atmosfera. Os eventos de La Niña ou El Niño estão associados a chuvas acima ou abaixo do normal no Nordeste Brasileiro. Fedorova e Carvalho (2006), ao estudarem o comportamento da nebulosidade sobre a América do Sul em anos de El Niño, La Niña e

neutro, observaram que em ano de La Niña, nas regiões equatoriais, freqüentemente é observada nebulosidade em 2/3 da latitude ou em toda ela, enquanto que no ano de El Niño a freqüência de nebulosidade é menor. Sugere-se que esse comportamento particular das quatro primeiras décadas seja influência da maior freqüência de fenômenos atmosféricos que intensificam a nebulosidade sobre a região, visto que nuvens atuam como elemento absorvedor e espalhador da radiação solar. Assim como as erupções ocorridas em 1963, 1982 e 1991, respectivamente no Monte Agung na Indonésia, Chichón no México e Pinatubo, nas Filipinas, tenham uma parcela de contribuição nas tendências de radiação solar observadas sobre o NEB. Os trabalhos de Minnis et. (1993); Molion et al. (2002) e Sant'Anna Neto et al. (2001) reforçam o conceito que erupções vulcânicas podem reduzir os fluxos de radiação solar sobre a América do Sul e, conseqüentemente, o decréscimo da radiação solar incidente (ondas curtas) e saldo de radiação solar.

A predominância de tendências positivas de radiação solar, a partir da década de 90, pode ser justificada pela maior freqüência de eventos de El Niño, assim como a fase positiva (quente) da ODP. De acordo com informações do Climate Prediction Center, entre 1988 e 2006, ocorreram cinco eventos de El Niño de intensidade forte e apenas três eventos La Niña também de intensidade forte. De acordo com Christy e Spencer (2004) as temperaturas médias globais aumentam quando da ocorrência de El Niño e diminuem quando da ocorrência de La Niña, o que conseqüentemente pode provocar alteração do balanço radiativo da Terra. Segundo Cavalcanti (2001) o transporte de umidade para o interior do continente é feita através dos ventos alísios, que transportam ar úmido do Oceano Atlântico Tropicais para o interior da região Nordeste do Brasil. Assim, sugere-se que a maior freqüência de eventos El Niño pode ter influenciado no comportamento médio da radiação solar, diminuindo a quantidade de vapor d'água sobre o NEB, visto que menos vapor d'água na atmosfera torna mais transparente a radiação solar. Portanto, a maior quantidade de radiação solar de onda

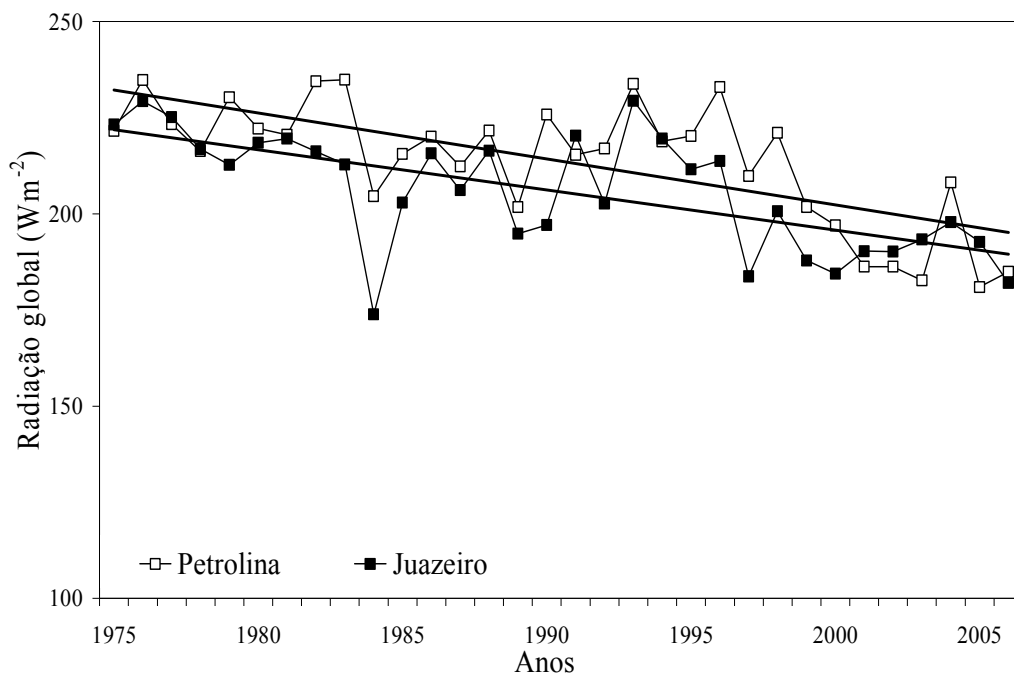
curta que chega à superfície provoca maior ganho de energia, com o aumento do saldo de radiação.

4.3. Tendências dos dados observados à superfície

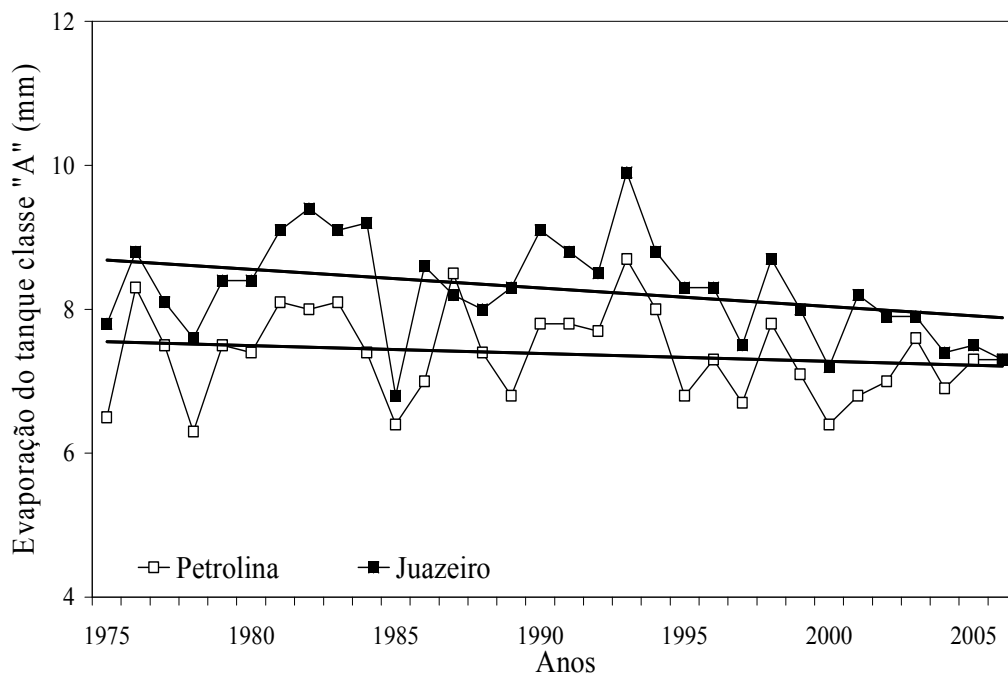
As Figuras 4.8 A e B exibem as tendências da radiação solar global e da evaporação do tanque classe “A” das localidades de Petrolina, PE e Juazeiro, BA para o período de 1975 a 2006. A radiação global e a evaporação de ambas as localidades apresentaram tendências negativas estatisticamente significativas ao nível de 5% de probabilidade; enquanto a evaporação do tanque classe “A” da localidade de Juazeiro apresentou tendência estatisticamente significativa ao nível de 1% de probabilidade (Figuras 4.8 A e B). As tendências de radiação solar global e da evaporação de Petrolina foram de $-1,19 \text{ Wm}^{-2}$ e $-0,01 \text{ mm}$, respectivamente, que corresponde a uma redução no período analisado de $36,89 \text{ Wm}^{-2}$ por ano na radiação global e de $0,31 \text{ mm}$ por ano na evaporação do tanque classe “A”.

Em Juazeiro, a tendência da radiação global foi de $-1,04 \text{ Wm}^{-2}$ por ano e evaporação de $-0,025 \text{ mm}$ por ano. No período estudado foi observada uma redução na radiação global de $33,28 \text{ Wm}^{-2}$ e de $0,96 \text{ mm}$ para evaporação do tanque classe “A”. Nota-se que Petrolina apresentou os maiores valores de radiação global e os menores valores de evaporação do tanque classe “A”, sendo esperado um comportamento inverso, haja vista que quanto maior a energia disponível maior é a taxa evaporativa de uma região. Sugere-se que tal situação esteja relacionada à resposta da alteração no albedo da superfície, com expansão do perímetro irrigado na região e a construção da barragem de Sobradinho, BA.

As análises dos dados observados à superfície também indicam presença do fenômeno “Global dimming” nos municípios de Petrolina, PE e Juazeiro, BA, em face da redução da radiação solar global e evaporação do tanque classe “A”.



(A)



(B)

Figura 4.8. Tendência temporal da radiação solar global (A), evaporação do tanque classe "A" (B) em Petrolina, PE e Juazeiro, BA, para o período de 1975 a 2006.

Farquhar e Roderick (2002) sugerem que há uma relação entre a diminuição na taxa evaporativa observada nos últimos 50 anos e o decréscimo da radiação solar. Cohen et al. (2002) observou decréscimos na taxa evaporativa de Bet Dagan – Israel, entre 1964-1998, e atribuiu esse decréscimo ao fenômeno “Global dimming”. Peterson et al. (1995) observaram que a taxa evaporativa dos Estados Unidos, Rússia e China sofreram alterações nos últimos 35 anos estudados. As tendências negativas de radiação solar global e evaporação do tanque classe “A” observadas no presente estudo permitem sugerir que elas são devidas às influências de alteração no albedo da superfície da região Nordeste do Brasil, assim como da presença de aerossóis antropogênicos provenientes de queimadas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho, através das análises dos dados de reanálises do NCEP/NCAR e, posteriormente, utilizando dados observados de duas localidades do semi-árido do Nordeste do Brasil, permitem concluir que existem reduções acentuadas no saldo de radiação, saldos de radiação de ondas longas e curtas sobre o Nordeste do Brasil que são estatisticamente significativos. No período de 1988 a 2006 foi verificado um comportamento inverso àquele das quatro décadas anteriores, com tendências positivas dessas variáveis espalhadas sobre toda a região do Nordeste do Brasil, porém, só na sexta década obteve-se tendências estatisticamente significativas nessa região. O período total de estudo (1948 a 2006) exibiu tendências negativas dessas variáveis estudadas estatisticamente significativas aos níveis de 1 e 5% de probabilidades, principalmente nas partes oeste e leste do NEB. As tendências negativas das variáveis analisadas, nas quatro primeiras décadas, podem ser atribuídas à maior frequência de eventos La Niña assim como a ODP (-), que influencia na maior frequência de nebulosidade sobre o NEB. Assim como a presença de aerossóis vulcânicos, proveniente de grandes erupções e alterações no albedo da superfície. As tendências negativas estatisticamente significativas, de dados observados de radiação solar global e evaporação do tanque classe “A” sobre a região Nordeste do Brasil, são associadas às alterações no albedo da superfície, assim como da presença de aerossóis antropogênicos provenientes de queimadas.

Finalmente, os dados observados da radiação solar global e de evaporação do tanque classe “A”, em Petrolina, PE, e Juazeiro, BA, bem como os dados de reanálise do NCEP/NCAR de toda a região de estudo, exibem tendências negativas estatisticamente significativas aos níveis de 1 e 5% de probabilidades, oferecendo evidências consistentes do efeito “Global dimming” no Nordeste do Brasil.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abakumova, G. M. Evaluation of long-term changes in radiation, cloudiness, and surface temperature on territory of the former Soviet Union. *Journal Climate*, v.9, n.6, p.1319-1327, 1996.
- Aceituno, P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface Climate. *Monthly Weather Review*, v.116, n.3, p.505-524, 1988.
- Alves, A. R. Irradiância solar global em superfície de diferentes inclinações e azimutes para Viçosa, MG. Viçosa: UFV, 1981. 92p. Dissertação de Mestrado.
- Alves, J. M. B.; Repelli, C. A.; Mello, N. G. A pré-estação chuvosa do setor norte do Nordeste Brasileiro e sua relação com a temperatura dos oceanos adjacentes. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.8, n.1, p.22-30, 1993.
- Andrade, R. G.; Sedyama, G. C.; Delgado, R. C.; Lima, E. P.; Menezes, S. M. C. Saldo de radiação e fluxo de calor no solo na região do município de Juiz de Fora, MG. In: I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico, 1, Taubaté, p.371-373, 2007.
- Artaxo, P; et al. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3, p.168-22, 2006.
- Azevedo, P. V.; Varejão-Silva, M. A.; Osório Vargas, G. A. Zoneamento do potencial de energia solar do Nordeste. Coleção Politécnica, Pub. Técnica n.2: Ed. da Universidade Federal da Paraíba, 1981. 80p.

- Baldocchi, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, v.9, p.479-492, 2003.
- Bastable, H. G.; Shuttleworth, W. J.; Dallarosa, R. L. G.; Fisch, G.; Nobre, C. A. Observations of climate, albedo and surface radiation over cleared and undisturbed Amazonian Forest. *International Journal of Climatology*, v.13, n.7, p.783-796, 1993.
- Black K.; Davis P.; Lynch P.; Jones M.; McGettigan M.; Osborne B. Long-term trends in solar irradiance in Ireland and their potential effects on gross primary productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.141, n.1, p.118-132, 2006.
- Borba, J. C. C.; Molion, L. C. B.; Querino, C. A. S.; Lima, E. A. Comparação dos Balanços de Radiação sobre duas Florestas Amazônicas. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12, 2002, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: SBMET, 2002, CD-Rom.
- Brien, J. O. Radiation belts. *Scientific American*, v.208, n.5, p.84-96, 1963.
- Brutsaert, W. H. Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications. Dordrecht: Kluwer Academic, 1982. 316p.
- Burn, D. H.; Hesch, N. M. Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology*, v. 336, n.1, p.61-73, 2007.
- Burt, T. P.; Shahgedanova, M. An historical record of evaporation losses since 1815 calculated using long-term observations from the Radcliffe Meteorological Station, Oxford, England. *Journal of Hydrology*, v.205, n.1-2, p.101-111, 1998.
- Caramori, P. H.; Oliveira D.; Brunini O.; Bergamaschi, H.; Braga, H. J. Diagnóstico da agrometeorologia operacional no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.10, n.2, p. 363-371, 2002.
- Cavalcanti, E. P. Teor e transporte de vapor d'água na atmosfera do Nordeste do Brasil. Campina Grande: UFPb, 2001. 155p. Tese de Doutorado.

- Ceballos, J. C.; Bottino, M. J. Modelo de estimativa de radiação solar por satélite no CPTEC: Versão GL 1.2. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12, 2002, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: SBMET, 2002, CD-Rom.
- Ceballos, J. C.; Bottino, M. J. Estimativa de radiação solar por satélite: Desempenho do modelo operacional GL1.2. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 13, 2004, Fortaleza. Anais... Fortaleza: SBMET, 2004, CD-Rom.
- Climate Prediction Center. Disponível via internet, pelo site:
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml,
acessado em maio de 2008.
- Charlson, R. J.; Schwartz, S. E.; Hales, J. M.; Cess, D.; Coakley, J. A.; Hansen, J. E. Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, v.255, p.423–430, 1992.
- Charlson, R. J.; Valero, F. P. J.; Seinfeld J. H. In search of balance. *Science*, v.308, p.806-807, 2005.
- Chattopadhyay, N. e Hulme, M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.87, n.1 p.55-73, 1997.
- Chen, J.; Carlson, B. E.; Del Genio, A. D. Evidence for strengthening of the tropical general circulation in the 1990s, *Science*, v.295, p.838-841, 2002.
- Che, H. Z.; Shi, G. Y.; Zhang, X. Y.; Arimoto, R.; Zhao, J. Q.; Xu, L.; Wang, B.; Chen, Z. H. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961-2000. *Geophysical Res. Letts.*, v. 32, L06803, 2005.
- Christy, J.; Spencer, R. MSU Globally Averaged Atmospheric Temperature, Global Warming Debate continues..., disponível em <http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/MSU/msusci.html>,
acessado em dezembro de 2007.

- Chu, P. S. Time and space variability of rainfall and surface circulation in the northeast Brazil - tropical Atlantic sector. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v.62, n.2, p.363-370, 1984.
- Cohen, S.; Ianetz A.; Stanhill, G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.111, n.2, p. 83-91, 2002.
- Correia, F. W. S. Estudo do balanço de radiação em área de policultivo na Amazônia. São José dos Campos: INPE, 2000. 137p. Dissertação de Mestrado.
- Doorenbos, J. e Pruitt, W. O. Necessidades hídricas das culturas. Tradução H. R. Gheyi, J. E. C. Metri, F. A. Damasceno. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997. 204p., il. Título original: Crop water requirements. (Estudos FAO; Irrigação e Drenagem, 24).
- Duchon, C. E. e O'Malley, M. S. Estimating cloud type from pyranometer observations. *Journal of applied Meteorology*, v.38, n.1, p.132-141, 1999.
- Echer, E.; Sousa M. P.; Schuch, N. J. The beer's law applied to the earth's atmosphere. *Revista Brasileira de Física*, São Paulo, v.23, n.3, p.276-283, 2001.
- Farquhar, G. D; Roderick, M. L. Pinatubo, diffuse light and the carbon cycle. *Atmospheric Science*, v.299, n.5615, p.1997-1998, 2003.
- Fedorova, N. e Carvalho, M. H. Processos sinóticos em anos de La Niña e de El Niño: nebulosidade convectiva nas regiões equatoriais e tropicais da América do Sul e oceanos adjacentes. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.1, p.1-14, 2006.
- Feitosa, J. R. P.; Costa, R. F.; Fisch, G.; Souza, S. S.; Nobre, C. A. Radiação solar global em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.6, n.1, p. 1-7, 1998.
- Fleagle, R. G. e Businger, J. A. An introduction to atmospheric physics. 2ed. New: Academic Press, 1980. 432p.

- Galvão, J. A.C. e Fisch, G. Balanço de radiação em área de pastagem na Amazônia. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.8, n.1, p.1-10, 2000.
- Garg, H. P. Tratise on solar energy. Fundamentals of solar energy. 1.ed. Chichester: John Wiley and Sons, 1982.587p.
- Gerhunov, A.; Barnett, T. P. Interdecadal modulation of ENSO Teleconnections. Bulletin of the American Meteorological Society, v.79, n.1, p.2715-2725, 1998.
- Gilgen, H.; Wild, M.; Ohmura, A. Means and trends of short wave irradiance at the surface estimated from Global Energy Balance Archive Data. J. Climate, v.11, n.1, p.2042-2061, 1998.
- Goody, R. M.; Yung, Y. L. Atmospheric Radiation-Theoretical Basis. 2.ed. Oxford University Press, New York, 1989. 431p.
- Gu, L.; Baldocchi, D. D.; Wofsy, S. C.; Munger, J. W.; Michalsky, J. J.; Urbanski, S. P.; Boden, T.A. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo Eruption: enhanced photosynthesis. Science, v.299, n.5615, p.2035-2038, 2003.
- Hartmann, H. T.; Kester, D. E.; Davies Jr., F. T. Plant propagation: principles and practices. 5.ed. New York: Prentice Hall, 1990.647p.
- Hastenrath, S.; Heller, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v.103, n.435, p.77-92, 1977.
- Hastenrath, S. Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic. Monthly Weather Review, v.112, n.6, p.1097-1107, 1984.
- Hastenrath, S. Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. Journal of Climate, v.3, n.8, p.893-904, 1990.
- Hatzidimitriou, D.; Vardavas, I.; Pavlakis, K. G.; Hatzianastassiou, N.; Matsoukas, C.; Drakakis, E. On the decadal increase in the tropical mean outgoing longwave radiation for the period 1984–2000. Atmos. Chem. Phys., v.4, n.1, p.1419-1425, 2004.

- Heymsfield, A. J. Microphysical structures of stratiform and cirrus clouds: Aerosols-Cloud-Climate Interactions. Editor: P.V. Hobbs. Academic Press, San Diego, California, 1993. p.97-121.
- Hinds, W. C. Aerosol Technology-Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. John Wiley & Sons, New York, 1982. p.379-395.
- Hirsch, R. M.; Slack, J. R.; Smith, R. A. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. *J. Water Resources Research*, v.18, n.1, p.107-121, 1982.
- Kaiser, D. P. Analysis of total cloud amount over China, 1951–1994. *Geophys. Res. Lett.*, v.25,n.19, p.3599-3602, 1998.
- Kaiser, D. P. Decreasing cloudiness over China: an updated analysis examining additional variables. *Geophys. Res. Lett.*, v.27, n.15, p.2193-2196, 2000.
- Kaiser, D. P.; Qian, Y. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954-1998: indication of increased haze pollution? *Geophys. Res. Lett.*, v.29, n.21, p.2042, 2002.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha S.; White G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewsky, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R.; Joseph, D. The NCEP–NCAR 40–Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.77, n.3, p.437–471, 1996.
- Karl, T. R.; Knight, R. W.; Kukla, G.; Gavin, J. Evidence for radiative effects of anthropogenic sulfate aerosols in the observed climate record. *Aerosol Forcing of Climate*, R. J. Charlson and J. Heitzenberg, Eds., J. Wiley and Sons, 1995. p.363-382.
- Kaufman, Y. J.; Nakajima, T. Effect of Amazon smoke on cloud microphysics and albedo - Analysis from satellite imagery. *J. Applied Meteor.*, v.32, n.4, p.729-744, 1993.
- Kaufman, Y. J.; Fraser, R. S. Confirmation of smoke particles effect on clouds and climate forcing. *Science*, v.277, p.1636-1639, 1997.

- Kayano, M. T.; Rao, V. B.; Moura, A. D. Tropical circulations and the associated rainfall anomalies during two constrating years. *Journal of Climatology*, v.8, n.5, p.477-488, 1988.
- Kendall, M. G. Rank correlation measures. Charles Griffin: London, U.K, 1975.p.220.
- Kistler, R.; Kalnay, E.; Collins W.; Saha.; White G.; Woollen J.; Chelliah M.; Ebisuzaki W.; Kanamitsu M.; Kousky V.; Dool, H.V.D.; Jenne, R.; Fiorino M. The NCEP–NCAR 50–Year Reanalysis: Monthly Means CD–ROM and Documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.82, n. 2,p. 247–267. 2001.
- Kondratyev K. Ya. Radiation in the atmospheric. New York, USA: Academic Press, 1969. 912p.
- Kousky, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*. AMS, Boston, USA. v.107, p.1140-1153, 1979.
- Kousky, V. E.; Gan, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical south Atlantic. *Tellus*, v33, p.539-551. 1981.
- Leal S. S. e Tiba C. Iluminância e irradiação solar global na região nordeste do Brasil. In: VI Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, 6, 2006, Campinas. Anais... Campinas: AGRENER, 2006. CD-Rom.
- Leivas, J.; Gusso, A.; Fontana, D. C.; Berlato, M. Estimativa do balanço de radiação na superfície a partir de imagens do satélite ASTER. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. Anais... Florianópolis: INPE, 2007, p.255-262.
- Lestrade, J. P. The effect of cloud layer plane albedo on global and diffuse isolation solar energy. *Elmsford, New York*, v.44, n.22, p.115-121, 1990.
- Li, X. W.; Zhou, X. J.; Li, W. L. The cooling of Sichuan province in recent 40 years and its probable mechanism. *Acta. Meteo. Sinica*, v.9, n.1, p.57-68, 1995.

- Liang, F.; Xia X. A. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961–2000. *Annales Geophysicae*, v.23, n.7, p.2425-2432, 2005.
- Liepert, G. G. Solar radiation in Germany – Observed trends and an assessment of their causes, Part 1. regional approach. *Atmos. Physics.*, v. 67, n.1, p.15-29, 1994.
- Liepert B. G. Regionale Klimadiagnose mittels Messungen der solar en Strahlung. German: University of Munich, 1996. 176 p. Ph.D. Dissertation.
- Liepert B. G.; Kukla, G. J. Decline in solar radiation with increased horizontal variability in Germany between 1964–1990. *J. Climate*, v.10, n.1, p.2391-2401, 1997.
- Liepert B. G. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n.10, p.1421, 2002.
- Liepert, B. G.; Tegen, I. Multi-decadal solar radiation trends in the United States and Germany and direct tropospheric aerosol forcing. *J. Geophys. Res.*, v.107, n.D12, 2002.
- Lima, E. A. Variabilidade interanual da profundidade óptica sobre Maceió – AL. Maceió: UFAL, 2003. 44p. Trabalho de Conclusão de Curso.
- Lima, E. A.; Molion L. C. B.; Gomes Filho, M. F.; Firmino J. L. N.; Da Silva A. O. Variabilidade interanual da profundidade óptica da atmosfera sobre Maceió, AL. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.5, p.509-514, 2007.
- Liou, K. N. On the Absorption, Reflection and Transmission of Solar Radiation in Cloudy Atmospheres. *J. Atmosphere Sciences*, v. 33, n.1, p. 798-804, 1976.
- Liou, K. N. Radiation and cloud processes in the atmosphere: Theory, observation and modeling. New York: Oxford, 1992. p.486.
- Liu, B.; Xu, M.; Henderson, M.; Gong, W. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955–2000. *J. Geophys. Res.*, v.109, D15102, 2004.
- Loaiciga, H. A.; Valdes, J. B.; Vogel, R.; Garvey, J.; Schwartz, H. Global warming and the hydrological cycle. *Journal of Hydrology*, v.174, n.1, p.83-127, 1996.

- Lohmann, S.; Schillings, C.; Mayer, B.; Meyer, R. Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data. *Solar Energy*. v.80, n.11, p.1390-1401, 2006.
- Mann, H. B. *Econometrica*. The econometric society, v.13, n.3, p.245-259, 1945.
- Markham, C. G.; McLain, D. R. Sea surface temperature related to rain in Ceara, northeastern Brazil. *Nature*, v.265, n.5592, p.320-323, 1977.
- Martins, F. R.; Pereira E. B.; Echer M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004.
- Martins, F R.; Pereira, E. B.; Silva S. de A. B.; Guarnieri, R. A. Variabilidade e tendências regionais dos recursos de energia solar no Brasil. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 14, 2006, Florianópolis. Anais... Florianópolis: SBMET, 2006. CD-Rom.
- Martins, F. R.; Pereira E. B.; Guarnieri R. A.; Silva S. A.B.; Yamashita C. S.; Chagas R. C. Mapeamento dos recursos de energia solar no Brasil utilizando modelo de transferência radiativa- Brasil SR. In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar, 1, 2007, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABENS, 2007.
- Matua, N. J.; Hare, S. R.; Zhang, Y.; Wallace, J. M.; Francis, R. C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.78, p.1069-1079, 1997.
- Menon, S.; Hansen, J. M.; Nazarenko, L.; Luo, Y. F. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, v.297, p.2250-223, 2002.
- Meza, F. e Varas, E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.100, n.2, p 231-241, 2000.
- Michalsky, J. J.; Perez, R.; Seals, R.; Ineichen, P. Degradation of solar concentrator performance in the aftermath of Mount Pinatubo. *Solar Energy*, v.52, n.2, p.205-213, 1994.

- Minis, P.; Harison, E. F.; Stowe, L. L.; Gibson, G. G. et al. Radiative climate forcing by Mount Pinatubo eruption. *Science*, v.259, p.1411 – 1415, 1993.
- Mishchenko, M. I.; Geogdzhayev, I. V.; Rossow, W. B.; Cairns, B.; Carlson, B. E.; Lacis, A.A.; Liu, L.; Travis, L. D. Longterm satellite record reveals likely aerosol trend. *Science*, n.315, p.1543, 2007.
- Modarres, R.; Silva, V. P. R. Trends analysis of rainfall record in arid and semi arid regions of Iran. *Journal of Arid Environments*, v.70, n.1, p.344-355, 2007.
- Molineaux, B.; Ineichen, P. Impact of Pinatubo aerosols on the seasonal trends of global, direct and diffuse irradiance in two northern mid-latitude sites. *Solar Energy*, v.58 n.1-3, p. 91-101, 1996.
- Molion, L. C. B.; Bernardo, S. O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.
- Molion, L. C. B.; Querino, C. A. S.; Menezes, D. C.; Lima, E. A.; Silva, H. O.; Borba, J. C. C. Possíveis efeitos de aerossóis vulcânicos no balanço radiativo da reserva biológica nacional do Jarú na Amazônia. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12, 2002, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. CD-Rom.
- Monteith, J. L. Evaporation and environment. In: Fogg, G.E. ed., *The State and Movement of Water in Living Organisms*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 205–234, 1965.
- Moonen, A. C.; Ercoli, L.; Mariotti, M.; Masoni, A. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.111, n.1, p.13-27, 2002.
- Mota F. S. *Meteorologia agrícola*. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1975. 376p.
- Moura, A. e Shukla, J. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: observations, theory and numerical Experiments with a General Circulation Model. *Journal of The Atmospheric Sciences*, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.

- Moura, R. G. Estudos das radiações solar e terrestre acima e dentro de uma floresta tropical úmida. São José dos Campos: INPE, 2001.146 p. Dissertação de Mestrado.
- Namias, J. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil. *Tellus*, v.24, n.4, p.336-342, 1972.
- Nazarenko, L.; Menon, S. Varying trends in surface energy fluxes and associated climate between 1960-2002 based on transient climate simulations. *J. Geophys. Res.*, v.32, n. 110, 2005.
- NCEP- National Centers for Environmental Prediction: Disponível via internet, pelo site: www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/nwprod/analysis, acessado em outubro de 2007.
- Nobre, P. On the genesis of anomalous SST and rainfall patterns over the tropical Atlantic basin. University of Maryland: University of Maryland at College Park, 1993. 151p. Tese de Doutorado.
- Nobre, P.; Shukla, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, v.9, n.19, p.2464- 2479, 1996.
- Ohmura, A.; Lang, H. Secular variation of global radiation in Europe. In Lenoble, J. and Geleyn, J.-F.(Eds.): *IRS'88: Current Problems in Atmospheric Radiation*, A. Deepak Publ., Hampton, VA, p.298-301, 1989.
- Ohmura, A.; Gilgen, H.; Wild, M. Global Energy Balance Archive GEBA, World Climate Program-Water Project A7, Report 1: Introduction, *Zuercher Geografische Schriften*, Verlag der Fachvereine Zuerich, n.34, 62 p, 1989.
- Ohmura, A.; et al. Baseline Surface Radiation Network (BSRN/ WCRP), a new precision radiometry for climate research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, v.79, n.1, p.2115- 2136, 1998.
- Ohmura, A. Observed Long-Term Variations of Solar Irradiance at the Earth's Surface. *Space Sciences Series of ISSI*, v.23, p.111-128,2006.
- Oke, T. R. *Boundary layer climates*. 2.ed. Routledge, 1987. 435p.

- Ometto, J. C. Bioclimatologia vegetal. 1.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425p.
- Palle, E.; Butler, C. J. Sunshine records from Ireland: Cloud factors and possible link to solar activity and cosmic rays. *International Journal of Climatology*, v.21, n.6, p.709-729, 2001.
- Pallé, E.; Goode, P. R.; Montanés-Rodríguez P.; Koonin S. E. Changes in Earth's reflectance over the past two decades. *Science*, v.304, n.5675, p.1299 - 1301, 2004.
- Peixoto, J. P.; Peixoto, J. P. A radiação solar e o ambiente. Lisboa. Comissão Nacional do Ambiente, 1981. 179p.
- Peterson, T. C.; Golubev, V. S.; Groisman, P. Y. Evaporation losing its strength. *Nature*, v. 377, n.6551, p.687-688, 1995.
- Philipona, R.; Durr, B.; Marty, C.; Ohmura, A.; Wild, M. Radiative forcing-measured at Earth's surface - corroborate the increasing greenhouse effect. *Geophys. Res. Lett.*, v.31, p.L03202, 2004.
- Pinker, R. T.; Zhang, B.; Dutton, E. G. Do satellites detect trends in surface solar radiation? *Science*, 308, n.5723, p.850-854, 2005.
- Porcha, W.; Chyleka, P.; Dubeya, M.; Massieb, S. Trends in aerosol optical depth for cities in India. *Atmospheric Environment*, v.41, p.7524-7532, 2007.
- Power, H. C. Trends in solar radiation over Germany and an assessment of the role of aerosols and sunshine duration. *Theor. Appl. Climatol.*, v.76, n. 1-2, p.47-63, 2003.
- Qian Y.; Giorgi, F. Regional climatic effects of anthropogenic aerosols? The case of SouthWestern China. *Geophys. Res. Lett.*, n.27, p.3521-3524, 2000.
- Qian, Y.; Leung, L.R.; Ghan, S.J.; Giorgi, F. Regional climate effects of aerosols over China: modeling and observation. *Tellus Series B, Chemical and Physical Meteorology*, v.55, n.4, p.914-934, 2003.
- Qian, Y.; Kaiser, D.P., Leung, L.R., Xu, M. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. *Geophys. Res. Lett.*, n.33, L01812, 2006.

- Ramanathan, V.; Crutzen, P. J.; Kiehl, J. T.; Rosenfeld, D. Aerosol climate and the hydrological cycle. *Science*, v.294, n.5549, p.2119–2124, 2001.
- Rao, V. B.; De Lima, M. C.; Franchito, S. H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern Northeast Brazil. *Journal of Climate*, v.6, n.9, p.1754-1763, 1993.
- Roderick, M. L.; Farquhar, G. D.; Berry, S. L.; Noble, I. R. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia*, v.129, n.1, p. 21–30, 2001.
- Roderick, M. L.; G. D. Farquhar. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, v.298. n. 5597, p.1410-1411, 2002.
- Roderick, M. L. e Farquhar, G. D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *Int. J. Climatol.*, v. 24, p.1077–1090, 2004.
- Rosenberg, N. J.; Blad, B. L.; Verma, S. B. *Microclimate: the biological environment*, 2.ed.: New York: John Wiley & Sons, 1983. 495p.
- Russak, V. Trends of solar radiation, cloudiness and atmospheric transparency during recent decades in Estonia. *Tellus*, v. 42B, p.206-210, 1990.
- Salan, A.; Higarzy, N. A. Solar data application to Egypt. In: *International Symposium Workshop on Solar Energy*, v.1, p.20–40, 1978.
- Sant’Anna Neto, J. L.; Yamabe, T. H.; Tommaselli, J. T. G. A influência da atividade vulcânica na variabilidade das temperaturas médias mensais do Estado de São Paulo. In: *IX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, 9, 2001, Recife. *Anais... Recife: UPE*, 2001.
- Sem, Z.; Tan, E. Simple models of solar radiation data for northwestern of Turkey. *Energy Conversion and management*, v.42, n.5, p.587-598, 2001.

- Silva, L. F. Precipitação do norte e nordeste brasileiro e padrões de temperatura da superfície e pressão ao nível do mar: relações com as fases do El Niño/oscilação sul e oscilação decadal do pacífico. São José dos Campos: INPE, 95p, 2006. Dissertação de Mestrado.
- Silva, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*.v. 58, p. 575-596, 2004.
- Silva, V. P. R.; Cavalcanti, E. P.; Braga, C. C.; Vieira, P.V. Evaluating trends in solar radiation based on data fields from the NCEP/NACR reanalysis and measurements, 7th EMS Annual Meeting / 8th ECAM. El Escorial (Madrid, Spain), October 2007.
- Stanhill, G. e Moreshet, S. Global radiation climate changes: The world network. *Climate Change*, v.21, n.1, p.57-75, 1992.
- Stanhill, G.; Kalma, J. D. Secular variation of global irradiance in Australia. *Australian Meteor. Mag.*, v.43, p.81-86, 1994.
- Stanhill, G.; Kalma, J.D. Solar dimming and urban heating in Hong Kong. *Int. J. Climatol.*, v.15, n. 1, p.933-941, 1995.
- Stanhill, G.; Ianetz, A. Long term trends in, and spatial variation of global irradiance in Israel, *Tellus*, v. 49B, n.1, p.112-122, 1996.
- Stanhill, G.; Cohen, S. Recent changes in solar irradiance in Antarctica. *J. Climate*. v. 10, n.8, p.2078-2086, 1997.
- Stanhill, G. Long term trends in, and spatial variation of, solar irradiances in Ireland. *Int. J. Climato.*, v.18, n.1, p.1015-1030, 1998.
- Stanhill, G.; Cohen, S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agric. For. Meteorol.*, v.107, n.1, p.255-278, 2001.
- Stephens, G. L. Remote sensing of the lower atmosphere. Oxford: Oxford University Press, 1994. cap.6, p.261-269.

- Strang, D. M. G. D. Análise climatológica das normais pluviométricas do Nordeste Brasileiro, Centro Técnico Aeroespacial, Relatório Técnico IAE-M-02/72, 1972. 70p.
- Streets, D. G.; Yu, C.; Wub, Y.; Chin, M.; Zhao, Z.; Hayasaka, T.; Shi G. Aerosol trends over China, 1980–2000. *Atmospheric Res. Lett.*, n.88, p.174-182, 2007.
- Tebakari, T.; Yoshitani, J.; Suvanpimol C. Time-space trend in pan-evaporation over Thailand. *J. Hydrol. Eng.*, v. 10, n.3, p.205-215, 2005.
- Tiba, C. e Freidenreich N. Atlas solarimétrico do Brasil. Editora Universitária da UFPE, Recife, 111 pp., 2002.
- Thomas, A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *Int. J. Climatol.*, v.20, p.381-396, 2000.
- Tubelis A.; Nascimento J. L. Meteorologia Descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras. 1.ed., São Paulo: Livraria Nobel, 1992. 374p.
- Twomey, S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.34, p.1149-1152, 1977.
- Vianello, R. L.; A. R. Alves. Meteorologia Básica e Aplicações. Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 449 p.
- Villa Nova, N. A.; Salati, E. Radiação solar no Brasil. Simpósio Anual da Academia de Ciências do Estado de São Paulo. São Paulo, SP, 1978. p.27-33.
- Zhang, Y.; Wallace, J. M.; Battist, D. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *Journal of Climate*, v.10, n.5, p.1004-1020, 1997.
- Zhang, Y.; Sheng, J.; Shabbar, A. Modes of interannual and interdecadal variability of Pacific SST. *Journal of Climate*, v.11, n.10, p.1556-2569, 1998.
- Zhitorchuk, Y. V.; Stadnyuk, V. V.; Shanina, I. N. Study of linear trends of temporal series of solar radiation. *Izvestiâ Akademii nauk SSSR.*, v.30, p.389-396, 1994.

- Wang, W. C.; Dudek, M. P.; Liang, X. Z. The greenhouse effect of trace gases. In: World Survey of Climatology, v.16, Future Climates of the World: A Modelling Perspective. Editor: A. Henderson-Sellers. Elsevier, Amsterdam, Holanda, p. 317-346, 1995.
- Wang, P. H.; Minnis, P.; Wielicki, B. A.; Wong, T.; Vann, L. B. Satellite observations of long-term changes in tropical cloud and outgoing longwave radiation from 1985 to 1998, Geophys. Res. Lett., v.29, n.10, p.1397, 2002.
- Wielicki, B. A.; Del Genio, A. D.; Wong, T.; Chen, J.; Carlson, B. A.; Allan, R. P.; Robertson, F.; Jacobowitz, H.; Slingo, A.; Randall, D. A.; Kiehl, J. T.; Soden, B. J.; Gordon, C. T.; Miller, A. J.; Yang, S.; Susskind, J. Changes in Tropical Clouds and Radiation, Response. Science, v.296, p.2095, 2002.
- Wild, M.; Ohmura, A.; Gilgen, H.; Roeckner, E.; Giorgetta, M.; Morcrette, J. J. The disposition of radiative energy in the global climate system: GCM versus observational estimates. Climate Dynamics, v.14, p.853-869, 1998.
- Wild, M.; Ohmura, A.; Gilgem, H.; Rosenfeld, H. On the consistency of trends in radiation and temperature records and implications for the global hydrological cycle. Geophysical Research Letters, v.31, L11201, 2004.
- Wild, M.; et al. From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. Science, v.308, n.5723, p.847-850, 2005.
- Xu, Q. Abrupt change of the midsummer climate in central east China by the influence of atmospheric pollution. Atmos. Environ., v.35, p.5029-5040, 2001.
- Yamasoe, M. A. Estudo de Propriedades Ópticas de Partículas de Aerossóis a partir de uma Rede de Radiômetros. São Paulo: USP, 1999. 233p. Tese de Doutorado.
- Yamasoe, M. A. Apostila da Disciplina Meteorologia Física II. São Paulo: USP/ IAG, 2006, 88p.

Yu, P. S.; Yang, T. C.; Wu, C. K. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. *Journal of Hydrology*, v.260, p.161-175, 2002.

