



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

**ESTUDO DE ALGUNS CENÁRIOS CLIMÁTICOS PARA O NORDESTE DO**  
**BRASIL**

**DAVID NOGUEIRA DOS SANTOS**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**Agosto de 2008**

DAVID NOGUEIRA DOS SANTOS

**ESTUDO DE ALGUNS CENÁRIOS CLIMÁTICOS PARA O NORDESTE DO  
BRASIL**

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

**Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva**

(Orientador)

**Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa**

(Orientador)

**CAMPINA GRANDE - PB**

**Agosto de 2008**

S237e Santos, David Nogueira dos  
Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do  
Brasil / David Nogueira dos Santos. - Campina Grande, 2008.  
84 f. : il.

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

1. Mann-Kendall 2. Nordeste do Brasil 3. Dissertação I.  
Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da, Dr. II. Sousa,  
Francisco de Assis Salviano de, Dr. III. Universidade  
Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 551.58(812/814)(043)

DAVID NOGUEIRA DOS SANTOS

ESTUDO DE ALGUNS CENÁRIOS CLIMÁTICOS PARA O NORDESTE DO BRASIL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 14/8/2008

BANCA EXAMINADORA

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

  
Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

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

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

## **DEDICATÓRIA**

A meus pais Américo Pinheiro dos Santos Neto e Denise do Socorro Nogueira dos Santos, a meus irmãos Danilson Nogueira dos Santos e Andressa Nogueira dos Santos, a minha esposa Suziane Sarmiento Marques dos Santos e ao meu filho Danilo Marques dos Santos, pelos incentivos em todos os momentos, pelo amor e lições de vida.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, sabedoria e seu infinito amor.

Ao Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva e Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa, pela orientação, compreensão e incentivos expressados na realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia e Unidade Acadêmica Ciências Atmosféricas pelo fornecimento de dados e apoio para realização deste trabalho.

A todos os professores do Curso de Mestrado em Meteorologia pela atenção e ensinamentos ministrados.

A secretária do Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Divanete Cruz, pela atenção, assistência e eficiência prestada durante o curso.

Aos colegas do Programa de Pós-graduação em Meteorologia, João Ataydes Junior, Leidiane Leão, Edmundo Wallace, Djane Fonseca, Maryfrance Diniz, Andreza Carla, Glayson Chagas, Vanessa Almeida, Jefferson Vilhena e Hallan Cerqueira pela amizade e contribuição na realização deste trabalho.

Em especial a Andréa Helena, Roberta Araújo e Ronaldo Menezes e família, pelo convívio e companheirismo durante todas as etapas de trabalho.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

	Pg.
AGRADECIMENTOS .....	V
LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE SIGLAS .....	XI
RESUMO .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
1. INTRODUÇÃO .....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
3. METERIAL E MÉTODOS .....	34
3.1 Localização geográfica e climatologia da região .....	34
3.2 Dados climatológicos .....	37
3.3 Procedimentos metodológicos .....	37
3.4 Classificação climática de W.C. Thornthwaite .....	38
3.4.1 Índice de Aridez ( <i>Ia</i> ) .....	39
3.4.2 Índice de Umidade ( <i>Iu</i> ) .....	39
3.4.3 Índice Hídrico ( <i>Ih</i> ) .....	39
3.5 Análises estatísticas para as temperaturas do ar .....	40
3.5.1 Teste de Mann-Kendall .....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	43
4.1 Temperatura Máxima ( <i>Tmax</i> ) .....	43
4.2 Temperatura Mínima ( <i>Tmin</i> ) .....	46
4.3 Temperatura Média ( <i>Tmed</i> ) .....	48
4.4 Evapotranspiração Potencial Máxima ( <i>ETPmax</i> ) .....	51

4.5	Evapotranspiração Potencial Mínima ( <i>ETPmin</i> ) .....	52
4.6	Evapotranspiração Potencial Média ( <i>ETPmed</i> ) .....	54
4.7	Índice de Aridez Máximo ( <i>Iamax</i> ) .....	56
4.8	Índice de Aridez Mínimo ( <i>Iamin</i> ) .....	58
4.9	Índice de Aridez Médio ( <i>Iamed</i> ) .....	60
4.10	Índice de Umidade Máximo ( <i>Iumax</i> ) .....	62
4.11	Índice de Umidade Mínimo ( <i>Iumin</i> ) .....	63
4.12	Índice de Umidade Médio ( <i>Iumed</i> ) .....	65
4.13	Índice Hídrico Máximo ( <i>Ihmax</i> ) .....	66
4.14	Índice Hídrico Mínimo ( <i>Ihmin</i> ) .....	68
4.15	Índice Hídrico Médio ( <i>Ihmed</i> ) .....	70
5.	CONCLUSÕES .....	73
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74
	ANEXO I. Relação das estações meteorológicas .....	82

## LISTA DE FIGURAS

	Pg.
Figura 1	Mapa da localização geográfica do Nordeste do Brasil ..... 36
Figura 2	Localização das estações do Inmet pelo Nordeste de Brasil ..... 38
Figura 3	Distribuição espacial da temperatura do ar média máxima anual no período de 1961 a 2007 (A), tendência temporal (B), nível de significância (C), cenário para o ano de 2050 (D) e cenário para o ano de 2100 (E) no Nordeste do Brasil..... 45
Figura 4	Distribuição espacial da temperatura do ar média mínima anual do período de 1961 a 2007 (A), tendência temporal (B), nível de significância (C), cenário para o ano de 2050 (D) e cenário para o ano de 2100 (E) no Nordeste do Brasil ..... 47
Figura 5	Distribuição espacial da temperatura do ar média anual do período de 1961 a 2007 (A), tendência temporal (B), nível de significância (C), cenário para o ano de 2050 (D) e cenário para o ano de 2100 (E) no Nordeste do Brasil ..... 49
Figura 6	Distribuição espacial da evapotranspiração potencial máxima anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil..... 52

Figura 7	Distribuição espacial da evapotranspiração potencial mínima anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	53
Figura 8	Distribuição espacial da evapotranspiração potencial média anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	55
Figura 9	Distribuição espacial do índice de aridez máximo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	57
Figura 10	Distribuição espacial do índice de aridez mínimo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	59
Figura 11	Distribuição espacial do índice de aridez médio anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	61
Figura 12	Distribuição espacial do índice de umidade máximo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	62
Figura 13	Distribuição espacial do índice de umidade mínimo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	64

Figura 14	Distribuição espacial do índice de umidade médio anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	66
Figura 15	Distribuição espacial do índice hídrico máximo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	67
Figura 16	Distribuição espacial do índice hídrico mínimo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	70
Figura 17	Distribuição espacial do índice hídrico médio anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil .....	71

## LISTA DE SIGLAS

<i>AR4</i>	<i>Fourth Assessment Report (Quarto Relatório de Avaliação)</i>
<i>CAD</i>	<i>Capacidade de água disponível</i>
<i>ENOS</i>	<i>El Niño – Oscilação Sul</i>
<i>ETP</i>	<i>Evapotranspiração Potencial</i>
<i>ETPmax</i>	<i>Evapotranspiração Potencial Máxima</i>
<i>ETPmed</i>	<i>Evapotranspiração Potencial Média</i>
<i>ETPmin</i>	<i>Evapotranspiração Potencial Mínima</i>
<i>GEE</i>	<i>Gases do Efeito Estufa</i>
<i>GISS</i>	<i>Goddard Institute for Space Studies</i>
<i>GrADS</i>	<i>Grid Analysis and Display System</i>
<i>HadCM</i>	<i>Hadley Center for Climate Prediction and Research</i>
<i>Ia</i>	<i>Índice de aridez</i>
<i>Iamax</i>	<i>Índice de aridez máximo</i>
<i>Iamed</i>	<i>Índice de aridez médio</i>
<i>Iamin</i>	<i>Índice de aridez mínimo</i>
<i>Ih</i>	<i>Índice hídrico</i>
<i>Ihmax</i>	<i>Índice hídrico máximo</i>
<i>Ihmed</i>	<i>Índice hídrico médio</i>
<i>Ihmin</i>	<i>Índice hídrico mínimo</i>
<i>INMET</i>	<i>Instituto Nacional de Meteorologia</i>
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernmental de Mudanças Climáticas)</i>

<i>Iu</i>	<i>Índice de umidade</i>
<i>Iumax</i>	<i>Índice de umidade máximo</i>
<i>Iumed</i>	<i>Índice de umidade médio</i>
<i>Iumin</i>	<i>Índice de umidade mínimo</i>
<i>NEB</i>	<i>Nordeste do Brasil</i>
<i>OL</i>	<i>Onda de Leste</i>
<i>OMM</i>	<i>Organização Meteorológica Mundial</i>
<i>PNUMA</i>	<i>Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente</i>
<i>SERS</i>	<i>Special Report Emission Scenarios (Relatório Especial Emissões de Cenários)</i>
<i>SNE</i>	<i>Sul do Nordeste</i>
<i>TAR</i>	<i>Third Assessment Report (Terceiro Relatório de Avaliação)</i>
<i>Tmax</i>	<i>Temperatura máxima</i>
<i>Tmed</i>	<i>Temperatura média</i>
<i>Tmin</i>	<i>Temperatura mínima</i>
<i>VCAN</i>	<i>Vórtice Ciclônico de Altos Níveis</i>
<i>W</i>	<i>Oeste</i>
<i>ZCAS</i>	<i>Zona de Convergência do Atlântico Sul</i>
<i>ZCIT</i>	<i>Zona de Convergência Intertropical</i>

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar as condições climáticas atuais da região Nordeste do Brasil e elaborar cenários climáticos para os anos de 2050 e 2100, com base em observações de superfície. Neste trabalho foram utilizadas as séries temporais da temperatura do ar (máxima, mínima e média), correspondentes ao período de 1961 a 2007, bem como as médias climatológicas de precipitação pluvial de 89 localidades no Nordeste do Brasil. O teste não-paramétrico de Mann-Kendall foi utilizado para avaliar o nível de significância das tendências das séries temporais da temperatura do ar e o “software” SEVAP para obtenção da evapotranspiração potencial anual e dos índices de aridez, umidade e hídrico. A distribuição espacial das variáveis analisadas foi realizada com base no GrADS (Grid Analysis and Display System). Os resultados obtidos indicam tendências crescentes, nas séries temporais de temperatura do ar, estatisticamente significativas pelo teste de Mann-Kendall, tanto para o período estudado como para os cenários de 2050 e 2100. As maiores taxas de aumentos das temperaturas máximas e médias anuais foram encontradas para o período atual de estudo e para o cenário do ano de 2050; e redução de seus valores entre os cenários de 2050 e 2100. Já a temperatura mínima anual apresentou a maior taxa de aumento no período compreendido entre os cenários de 2050 e 2100. Também foi verificado que as temperaturas mínimas apresentam maiores amplitudes e intensidade do que as temperaturas máximas. Foram encontradas tendências crescentes nas taxas de evapotranspiração potencial em todo Nordeste do Brasil, principalmente nas partes central, oeste e norte da região nos dois cenários analisados. Os índices de aridez e hídrico indicam aumentos e o índice de umidade redução nos dois cenários estudados em todo o Nordeste do Brasil, principalmente na parte semi-árida da região.

**Palavra chave:** Cenários climáticos, Mann-Kendall, Nordeste do Brasil.

## ABSTRACT

The main objective this study is to assess the current climate conditions in northeastern region of Brazil and to obtain same climatic scenery for 2050 and 2100 years, based on surface observations. It was used time series of air temperature (maximum, minimum and mean) to the 1961 and 2007 period, as well as climatological rainfall means of 88 stations in northeastern region of Brazil. The non-parametric test of Mann–Kendall was used to assess the statistical significance level of air temperature trend and also the software SEVAP was used to determine potential evapotranspiration, humidity index, aridity index and hydric index. The GrADS (Grid Analysis and Display System) was used to obtain the spatial distribution these variables on northeastern region of Brazil. Results showed an increasing trend in time series of air temperature statically significant by Mann-Kendall test for both studied period and the 2050 and 2100 sceneries. Both main and maximum air temperature has highest rate for studied period and for the 2050 scenery and a reduction between the 2050 and 2100 scenery. Minimum air temperature had higher amplitude and intensity than maximum air temperature. Increasing trends in potential evapotranspiration was observed in whole northeastern region of Brazil, mainly on central, west and north areas for two analyzed sceneries. The aridity and water indexes indicated an increased and the humidity index a reduction for two analyzed sceneries in northeastern region of Brazil, principally on the semi-arid area.

**Keywords:** Climate sceneries, Mann-Kendall, Northeast of Brazil.

## **1. INTRODUÇÃO**

Nas últimas décadas o interesse da comunidade científica pelo estudo da variabilidade e mudanças climáticas vem aumentando, principalmente devido às suas conseqüências para a humanidade e a biodiversidades dos sistemas naturais. Muitos estudos têm sido desenvolvidos em várias partes do mundo visando compreender melhor e mitigar os efeitos desse fenômeno (Arnell, 1999; Cunha, 2002; Silva, 2004; Modarres & Silva, 2007; Ma et al., 2008; Todisco e Vergni, 2008). No território brasileiro, em particular a região semi-árida, também vem sofrendo com fortes variabilidades climáticas conforme estudos recentes (Silva, 2004; Sousa Junior, 2006). Avanço do mar, secas severas e enchentes são alguns dos exemplos reais que podem ser atribuídas a mudanças no clima do mundo.

Investigações sobre variabilidade e mudança do clima consideram as variações de precipitação pluvial como um índice de detecção de mudanças climáticas por ter um registro observacional razoavelmente longo e de fácil estimativa. Outros estudos usam a temperatura média global da superfície para estabelecer o grau e o significado das mudanças do clima durante o último século. A razão disso é a esperança de que a temperatura média global responda à mudança nessa forçante radiativa associada com os

gases do efeito estufa (*GEE*) e aerossóis da atmosfera. As mudanças climáticas se refletem nas alterações das variáveis meteorológicas: precipitação pluvial, temperatura do ar, vento, radiação solar e umidade relativa do ar, ou seja, nas variáveis representativas do clima que ao longo do tempo gera modificação climática. A temperatura média global também é um indicador simples da variabilidade interna do clima em simulações com modelos e em observações. Também, geralmente é usada como o índice mais simples de variabilidade e de mudança do clima global (Braganza et al., 2003).

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*International Panel on Climate Change – IPCC*), na conclusão de seu terceiro relatório (IPCC, 2001), verificou que a temperatura média do ar aumentou em torno de  $0,6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  durante o Século XX. Com base em modelos globais, o IPCC sugere que a temperatura média global deverá aumentar ainda mais neste século, tomando como base o ano de 1990, entre  $1,4$  e  $5,8^{\circ}\text{C}$  até o ano de 2100, o que representa um aumento maior e mais rápido do que inicialmente projetado pelos modelos climatológicos (de  $1,0$  a  $3,5^{\circ}\text{C}$ ). Já as projeções de clima, liberadas pelo Quarto Relatório do IPCC (IPCC AR4), têm mostrado cenários de secas e eventos extremos de chuva em grandes áreas do nosso planeta. No Brasil, a região mais vulnerável, do ponto de vista ambiental, à mudança de clima, seria o interior do Nordeste do Brasil, conhecida como semi-árido, ou simplesmente o “sertão”. Reduções de chuva aparecem na maioria dos modelos globais do IPCC - AR4, assim como um aquecimento que entre  $3$  e  $4^{\circ}\text{C}$  para a segunda metade do século XXI. Isso pode acarretar em reduções em torno de  $15$  a  $20\%$  nas vazões do rio São Francisco (Marengo, 2008).

Considerando o cenário de aumento da temperatura do globo, outros impactos ambientais estão ocorrendo como consequência da mudança no clima tais como a

redução da cobertura de gelo nos pólos, o aumento do nível do mar devido ao degelo das geleiras, perda da biodiversidade, eventos extremos de secas e chuvas e mudanças no regime de precipitação pluvial em diferentes regiões do globo. Esses são alguns exemplos de desastres naturais que poderão ter impactos decorrentes das mudanças climáticas devido à grande vulnerabilidade associada aos sistemas naturais (IPCC, 2007). Várias projeções, com diferentes cenários e taxas de emissão de gases pela atividade humana que potencializa a ação do efeito-estufa, têm previsto um aquecimento global na superfície terrestre. Outras alterações previstas nessas simulações são o aumento da ocorrência de precipitações pluviais intensas originadas por processos convectivos, maior frequência de cheias e ocorrências de secas mais severas e prolongadas (Karl et al., 1996).

As alterações climáticas não determinam apenas modificações dos valores médios do escoamento, mas também dos seus valores extremos, provocando alterações dos regimes de cheias e secas. Em particular, podem ocorrer alterações da intensidade, duração e períodos de ocorrência das cheias e secas. Estudos evidenciam uma tendência geral para um acréscimo da precipitação pluvial na época úmida e um decréscimo na época seca. O regime de escoamento deverá, normalmente, seguir esta tendência geral; sendo assim, espera-se uma intensificação das cheias e secas em consequência das alterações climáticas. É de se esperar ainda que as inundações provocadas pelas cheias nas margens dos rios e nas regiões de baixas altitudes possam ser agravadas pelas alterações climáticas (Cunha, 2002). As discussões baseadas nas análises das observações climáticas, hidrológicas e oceânicas, além dos indicadores de clima (corais, amostra de gelo e árvores crônicas históricas) e das saídas de modelos ainda não distinguem ou separam os efeitos da variabilidade natural do clima e das consequências induzidas pela ação antrópica (Marengo e Soares, 2003).

Atualmente, no Brasil, diversos estudos sobre mudanças climáticas se juntam a essas pesquisas, uma vez que o clima do território brasileiro também vem experimentando mudanças climáticas (Back, 2001; Silva, 2004; Souza Junior, 2006; Santos, 2006). Secas severas e enchentes são alguns dos exemplos reais que servem de advertência para o futuro. Em particular, a região Nordeste do Brasil, que possui uma das maiores áreas do mundo e único país, com clima semi-árido, caracteriza-se por grande variabilidade interanual na precipitação pluvial e altas taxas de evaporação. Assim, grande parte do semi-árido, onde a agricultura não-irrigada já é uma atividade marginal, torna-se ainda mais inadequada para a prática da agricultura de subsistência.

Em muitos estudos hidro-meteorológicos, baseados em testes não-paramétricos, o teste de Mann-Kendall é comumente usado para detectar e avaliar a significância de tendências em séries temporais tais como, qualidade da água, temperatura do ar e a precipitação pluvial. O principal motivo para se usar o teste estatístico não-paramétrico, e não um teste paramétrico, é que o primeiro é mais apropriado para dados que não apresenta distribuição estatística normal; essa característica é encontrada freqüentemente nas séries temporais hidro-meteorológicas. Por essa razão, o teste de Mann-Kendall tem sido bastante utilizado para analisar tendência em séries temporais de variáveis meteorológicas e hidrológicas (Yue et al., 2002; Silva, 2004; Gadgil e Dhorde, 2005; Azis, 2006 e Modarres e Silva, 2007).

Geralmente, as mudanças climáticas locais são avaliadas por meio de análise de séries históricas das variáveis meteorológicas, como a temperatura do ar e a precipitação pluvial. De acordo com as tendências dessas variáveis ao longo do período estudado pode-se observar se ocorreu alguma mudança no clima. Sendo assim, para melhor definição, a OMM (*Organização Meteorológica Mundial*) criou um grupo de trabalho que elaborou vários índices para a detecção de mudanças climáticas. Ao todo foram

definidos 27 índices, sendo que alguns deles são aplicados para latitudes médias, outros para os trópicos e parte deles são válidos para qualquer local. Desses índices, 11 envolve a precipitação pluvial e 16 a temperatura do ar (Santos, 2006).

A região Nordeste do Brasil é uma das mais afetada pelas ações do homem. Os baixos índices pluviiais registrados no Nordeste, particularmente no semi-árido, têm prejudicado sensivelmente a economia local. Apesar de chover tanto quanto em muitas outras regiões do mundo, o semi-árido nordestino é periodicamente afetado pela ocorrência de secas, com perdas parciais ou totais na agropecuária, além de comprometer o abastecimento de água à população devido principalmente à irregularidade da estação chuvosa na região, com predominância de chuvas intensas e de curta duração (Silva, 1998). O clima semi-árido permanente é intensificado, provocando secas em alguns anos, pelas variações que ocorrem na circulação de grande escala e, possivelmente, por mecanismos externos ao sistema terra – atmosfera – oceano. É aceito, de maneira geral, que eventos El Niño - Oscilação Sul (ENOS) afeta o tempo e o clima globalmente, principalmente nos trópicos, onde as chuvas no Nordeste são igualmente afetadas pelo fenômeno. Nobre e Molion (1988) sugeriram que, na fase quente dos eventos ENSO (El Niño), o ramo ascendente da Circulação de Walker, usualmente sobre a Amazônia, seria deslocado para as águas anormalmente quentes do Pacífico Este ou Central, produzindo centros ciclônicos nos altos níveis sobre o norte/nordeste da América do Sul e uma forte subsidência sobre essa região e sobre o Atlântico tropical. Essa subsidência enfraquece a ZCIT no Atlântico e a convecção sobre o Nordeste, diminuindo as chuvas.

Nessa área extensa residem cerca de 50 milhões de habitantes, e a economia é baseada principalmente na produção de culturas de subsistência (atividade agrícola que se destina à geração de produtos para o consumo da própria família). Essa região é

extremamente vulnerável às variações climáticas onde a periodicidade da seca afeta especialmente a agricultura de subsistência (Pimenta et al., 1998). A degradação do solo é um problema mundial e tem várias implicações nas estruturas sociais e econômicas das populações que ocupam as áreas onde se verifica esse fenômeno. No Brasil ela está mais presente na região Nordeste, principalmente na região semi-árida, onde os impactos podem ser visualizados através da destruição da biodiversidade (flora e fauna), da diminuição da disponibilidade de recursos hídricos, através do assoreamento de rios e reservatórios e da perda física e química de solos (Lacerda & Lacerda, 2004). As previsões de mudanças climáticas para a região apresentada pelo IPCC são baseadas em modelos climáticos que são fortemente questionados e podem, de fato, apresentar resultados pouco confiáveis. Nesse particular, faz-se necessário analisar a possibilidade de mudança do clima da região com base em dados observados à superfície da Terra. Assim, considerando a importância das mudanças climáticas para o futuro da humanidade, o objetivo deste trabalho é o de avaliar as condições climáticas atuais da região Nordeste do Brasil e elaborar alguns cenários climáticos futuros com base em observações de superfície para essa região.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

As mudanças climáticas não são novidade no planeta Terra, nosso planeta vem sofrendo alterações em decorrência de fatores astronômicos, tais como variação da intensidade da energia emitida pelo Sol, oscilações do planeta em torno do Sol, erupções vulcânicas de grande magnitude e variações das concentrações da composição química da atmosfera. Tudo isso tem provocado variações no clima do planeta nos últimos séculos e décadas. Apesar dessas mudanças não terem sido tão drásticas como as que ocorreram em períodos anteriores, nem tão grandes como as que são esperadas para o século XXI, sabe-se com precisão quando começaram e quando terminaram. A partir deste dado, os cientistas sabem que o clima pode mudar abruptamente e que as mudanças podem ser grandes o bastante para provocar impactos regionais (Simon & DeFries, 1992).

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) criaram na década de 90 o Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC) com o objetivo de avaliar, com bases científicas, técnicas e socioeconômica relevante para atender os riscos introduzidos pelas variações do clima e os cenários de mudanças climáticas para o futuro.

A primeira avaliação científica do IPCC (1990) foi com relação aos aspectos científicos do sistema climático e as mudanças do clima, concluindo que o aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, desde o período pré-industrial havia alterado o balanço de energia Terra-atmosfera, provocando aquecimento global. O relatório de 1990 concluiu que: "O tamanho desse aquecimento é bastante coerente com as previsões dos modelos climáticos, mas também é da mesma magnitude que a variabilidade climática natural. Portanto, o aumento observado poderia ser devido, principalmente, a variabilidade natural; ou então essa variabilidade e outros fatores humanos poderiam ter compensado um aquecimento ainda maior devido ao efeito estufa induzido pelo homem".

A Segunda Avaliação do IPCC sobre a Ciência da Mudança do Clima (*Second IPCC Assessment of the Science of Climate Change*) em 1996 apresenta uma avaliação abrangente da vulnerabilidade dos sistemas socio-econômicos e naturais diante da mudança do clima assim como as possibilidades de adaptação a elas desde 1995, incluindo atualizações dos relatórios anteriores e fornecendo uma base para as negociações-chaves que levaram a adoção do Protocolo de Quioto em 1997. Nesse acordo se estabeleceu que os países industrializados deveriam reduzir suas emissões de gases em 5,2% abaixo dos níveis observados em 1990, entre 2008-2012 (primeiro período de compromisso) (IPCC, 2001b).

O Terceiro Relatório Científico (TAR) avaliou as opções que permitiriam limitar as emissões de GEE e mostra que "existe novas e fortes evidências que a maior parte do aquecimento observado durante os últimos 50 anos é atribuída às atividades humanas" (IPCC, 2001 a).

No Quarto Relatório (AR4), em 2007, com projeções do clima para o Brasil, no cenário climático pessimista, as temperaturas aumentariam de 2° a 4°C e as chuvas

reduziriam de 15 a 20% até o final do século XXI; apresentando uma tendência de extensão da deficiência hídrica por praticamente todo o ano para o Nordeste do Brasil; isto é, uma tendência a “aridização” da região semi-árida até final do século XXI. No cenário otimista, o aquecimento seria entre 1 a 3°C e as chuvas ficariam entre 10 e 15% menor do que no presente.

Apesar de haver um amplo consenso de que a temperatura global está aumentando (Marengo & Soares, 2003), existem muitos fatores meteorológicos que podem resultar em aumento ou redução da evaporação. Loaiciga et al. (1996) sugeriram que o aumento da nebulosidade está causando menos irradiação solar na superfície, resultando em tendência decrescente da evaporação. Esse decréscimo pode estar associado ao efeito conhecido como “global dimming”, que seria a diminuição da radiação solar em uma grande área (Silva et al., 2007).

Elagib (1997) estudou a variabilidade climática, representada pelos eventos quente e frio, seca e umidade em condição de alta temperatura e chuvas insuficientes. Ele observou que as chuvas e o excesso de perdas pela evapotranspiração são fenômenos importantes para definir os critérios de aridez em Barém. Esse estudo mostrou que esse país pode ser considerado como árido ou hiper-árido em face da alta variação das condições climáticas. O clima real de Barém constitui circunstâncias favoráveis para intensificar a aridez com significativos impactos ecológicos e econômicos. A degradação de uma região, pelo processo de desertificação, apresenta um grave problema ambiental para Barém. A maior parte do país está em risco de desertificação, porque secas periódica e persistente aridez é exacerbada pelo uso inadequado do solo e da água, além da degradação da vegetação.

Khaled e Rao (1998) estudaram o efeito da autocorrelação na variância do teste estatístico de Mann-Kendall e uma relação teórica foi derivada para calcular a variância

de dados autocorrelacionados. A precisão do teste modificado em termos do seu nível de significância empírica foi superior à do teste original de tendência de Mann-Kendall sem nenhuma perda de potência na análise das séries temporais de chuvas.

Arnell (1999) estudou a avaliação dos efeitos da mudança do clima em relação à escassez de recursos hídricos, sobre os efeitos do aumento da população do globo e da mudança econômica, baseado nas experiências da mudança do clima conduzidas pelo centro de Hadley (com simuladores de cenários climáticos HadCM2 e HadCM3) usando um modelo hidrológico de grande escala. A mudança climática tem potencial para impor pressões adicionais em algumas regiões. As pressões que incluem a mudança do clima (que reduz ou que aumenta a quantidade de água disponível) incluem também a degradação ambiental. No exemplo, a poluição reduz a quantidade de água disponível para uso. O crescimento populacional conduz ao aumento da demanda por água doméstica, industrial e por água para a agricultura irrigada.

Hulme et al. (1999) descreveram um conjunto de cenários de alterações climáticas globais que foram utilizados em uma série de estudos investigativos dos impactos das mudanças climáticas globais sobre vários sistemas ambientais e de recursos - ecossistemas, segurança alimentar, recursos hídricos, malária e inundações costeiras. Os cenários foram derivados de modelagem de experimentos feitos pelo Centro de Hadley (HadCM2) ao longo dos últimos quatro anos utilizando sucessivas versões do seu modelo climático global acoplado oceano-atmosfera e também foi utilizado o modelo HadCM3, mas apenas considerar os efeitos crescente de concentrações de gases de efeito estufa. Os cenários foram apresentados para os três períodos de tempo futuro de 30 anos em média, centrado em 2020, 2050 e 2080 anos - e são expressos em relação à média climática de 1961-1990. A climatologia global terrestre observada na resolução de 0,5 ° de latitude / longitude foi usada para descrever

as condições atuais. Outros cenários variáveis, como: a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>, a média global do aumento do nível do mar e pressupostos não-climáticos relativos à população e economia - também são fornecidos.

Siqueira et al. (2000), através da modelagem de dados, observou que é possível analisar cenários climáticos decorrentes do efeito estufa e suas implicações. Assim, foi estudado a avaliação dos cenários climáticos obtidos pelos modelos GISS e GISSt, desenvolvidos pelo Goddard Institute for Space Studies da NASA, simulando padrões atmosféricos decorrentes de concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera entre 330 e 550 ppm para toda a produção agrícola brasileira. Os cenários climáticos futuros implicam numa redução média de 31% na produção nacional de grãos do trigo, com maiores reflexos na região Centro-Sul. No caso do milho, os decréscimos médios correspondem a 16%, sendo mais expressivos para as regiões Nordeste e Norte. Para a soja são projetados acréscimos médios na produção de grãos em torno de 27%, como resultante de efeitos benéficos do aumento das concentrações de CO<sub>2</sub>. Considerando-se as áreas de cultivo atuais, os maiores reflexos na produção nacional de grãos (negativos para trigo/milho e positivos para soja), são projetados para as regiões Centro-Sul e Sul, sendo o Centro-Sul mais sensível aos cenários futuros, especialmente a partir de 530 e 555 ppm CO<sub>2</sub> (2050-2060). Para as demais regiões produtoras (Centro, Nordeste e Norte), os impactos são menos expressivos, em face de menor extensão da área cultivada.

Elagib e Mansell (2000) estudaram as temperaturas médias das séries temporais ao longo do período 1941-1996 para 13 estações em todo Sudão, onde foram examinados em bases sazonais e anuais para explorar as eventuais tendências das últimas décadas. Também analisou índices de anomalia padronizada (IAP), coeficientes de variação intrannual e coeficientes autocorrelação. E encontraram os seguintes resultados: a área localizada ao norte do país não revelou mudanças nas séries de

temperatura do ar; no restante do país, um ajuste linear temperatura anual estabelecido para a série indica tendências crescentes significativas, sincronizadas com as épocas úmidas e quentes na série de tempo; onde as tendências sazonais crescentes nas séries antigas sendo maior e mais significativo. Este aumento de tendências é estatisticamente significativa no norte e nas demais regiões centrais.

Apesar das incertezas sobre o aquecimento global descrito por Molion (2001), dentre outros pesquisadores, o autor tem demonstrado, com dados relativamente confiáveis, que nas últimas cinco décadas a atmosfera terrestre tem experimentado um processo de aquecimento além do normal. O que parece ser um aumento pequeno de temperatura pode causar efeitos bastante dramáticos. Alguns cientistas tentam ser mais realistas e provar que as flutuações no campo climático ocorrem naturalmente. Assim, períodos quentes e frios, períodos de enchentes e estiagens, grandes eventos climáticos como furacões e tempestades, ocorrem diariamente e a mídia noticia de forma sensacionalista em busca de audiência. A distorção dos fatos pela mídia enfoca-os de forma a persuadir os telespectadores que mudanças climáticas não fazem parte do cotidiano de muitos países (Simon & DeFries, 1992).

O relatório do IPCC em 2001 declara que as incertezas sobre os cenários de mudanças climáticas para os próximos 100 anos têm duas origens principais e bem distintas. Em primeiro lugar, há incerteza sobre os cenários futuros de emissões de gases de efeito estufa para este século. Dependendo do cenário de emissões desses gases até 2100, a temperatura global média à superfície pode subir de 1,5°C até 5,5°C, onde subjetivamente estima-se que o aumento da temperatura global média acima de 3°C já seria suficiente para causar impactos adversos em inúmeros setores econômicos. A outra fonte de incerteza diz respeito à efetividade de se usar modelos climáticos globais como a melhor ferramenta para estimar alterações climáticas resultantes do aquecimento

global (Nobre 2001). Uma medida dessa incerteza pode ser obtida ao calcular o aumento da temperatura média global simulada por diversos modelos climáticos globais para um mesmo cenário de emissões. Uma fonte relacionada à incerteza é a dificuldade que esses modelos têm para representar adequadamente as características do clima regional, que é onde há interesse de se avaliar impactos em setores econômicos, na sociedade e no meio ambiente.

Back (2001) também fez um estudo de análise estatística para identificar tendências anuais da temperatura do ar e da precipitação pluvial, com a utilização do teste de Mann-Kendall. Muitas tendências de aquecimento observadas nos registros meteorológicos expressam mais os efeitos urbanos locais do que o aquecimento global da atmosfera. O surgimento das chamadas ilhas de calor devido à urbanização produz o aquecimento da atmosfera que afeta os registros de temperatura, uma vez que as maiorias das estações meteorológicas se encontram próximas dos centros urbanos. Existem vários trabalhos mostrando que o impacto da urbanização pode superar o aquecimento global (Karaca, 1995; Silva, 1998; Sousa Júnior, 2006).

Silva (2004) fez um estudo para investigar a variabilidade climática no Nordeste do Brasil baseado nas séries temporais de temperaturas do ar (máximas, mínimas e médias), umidade relativa do ar, evaporação do tanque “classe A”, evapotranspiração de referência, índice de aridez e precipitação pluvial. O estudo mostrou que durante as estações seca e úmida, as temperaturas máximas e mínimas apresentaram tendência crescente, enquanto a umidade relativa e a precipitação pluvial apresentam tendências decrescentes. A curto ou a longo prazos, as flutuações nos padrões climáticos - variabilidade climática e as alterações climáticas - podem causar impactos sobre a produção agrícola, pondo fim ao rendimento de culturas e obrigar os agricultores a adaptarem novas práticas agrícolas em resposta às condições alteradas. Com base nesses

resultados, Olesen e Bindi (2004) identificaram os setores de regiões vulneráveis e descreveram o impacto das alterações climáticas sobre sistemas agrícolas europeus e, ainda, discutiram como a agricultura na Europa pode adaptar-se às alterações climáticas, e como isso pode influenciar a política agrícola europeia.

Tao et al. (2006) estudaram as tendências de temperatura, bem como os seus impactos sobre o desenvolvimento e produção de culturas em algumas localidades da China. Os padrões observados das alterações climáticas e seus impactos foram variados, tanto no espaço quanto no tempo. A sensibilidade das culturas em resposta ao aumento de temperatura do ar também é influenciado pelas mudanças do clima. O impacto de futuras alterações climáticas sobre a produção vegetal tem sido amplamente prevista pelos modelos, usando culturas e cenários de alterações climáticas, mas poucas provas dos impactos devido às alterações climáticas sobre a produção vegetal têm sido relatadas. O estudo demonstrou tendências significativas na fenologia de culturas que afetou a produção agrícola durante duas décadas.

Santos (2006) analisou as possíveis mudanças climáticas nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, no Nordeste brasileiro, utilizando índices de detecção de mudanças climáticas dependentes da precipitação pluvial. Ele verificou que as alterações nos regimes climáticos apontam para um caráter global, porém não pode ser afirmado categoricamente que essas tendências estão relacionadas à mudança global do clima, pois, para localidades isoladas, verificaram-se tendências negativas e positivas dependendo dos aspectos regionais. Além disso, os possíveis fatores regionais que podem ter modificado o clima da região foram o desmatamento e o mau uso dos ecossistemas e, em determinados casos, a soma dos dois.

Bakkenes et al. (2006) estudaram as conseqüências das alterações climáticas para biodiversidade na Europa constataram que, na ausência de uma atenuação mundial do clima é muito provável que uma percentagem significativa (média de 10%) das

espécies vegetais irá desaparecer de vários países europeus até 2100. Mesmo na Europa (todos os países analisados conjuntamente), 1% das espécies vegetais será extinta, pois o clima seria inadequado para elas.

Sousa Júnior (2006) avaliou o efeito da urbanização no clima da cidade de Campina Grande-PB utilizando dados mensais de temperatura do ar (máxima, mínima e média), precipitação pluviométrica, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, evaporação do Tanque Classe “A”, velocidade do vento, insolação e índice UNEP (P/ETp) para o período de 1963 a 2004. Para cada variável climática foram obtidas algumas estatísticas como: médias, desvio-padrão, coeficiente de variação (CV) e autocorrelação serial. Também foi usado o teste Mann-Kendall para avaliar as tendências das séries temporais para o período estudado. Em seus resultados as temperaturas do ar máxima, mínima e média apresentaram tendências crescentes, enquanto umidade relativa apresentou tendência decrescente, todas estatisticamente significantes ao nível de 1% pelo teste de Mann-Kendall. As séries de precipitação pluviométrica, evaporação e o índice UNEP não apresentaram tendências estatisticamente significantes. A variabilidade da precipitação pluviométrica intra-anual, expressa pelo CV, é muito alta e variou de 30 a 89% durante o período analisado. A variabilidade anual da precipitação pluviométrica é cerca de 30% da variabilidade intra-anual.

Aziz e Burn (2006) estudaram as tendências e a variabilidade no regime hidrológico para a bacia de rio de Mackenzie no norte do Canadá. Utilizaram o teste não-paramétrico de Mann-Kendall para detectar as tendências. Um total de 19 variáveis hidrológicas e 6 variáveis meteorológicas foram selecionadas para o estudo. A análise foi conduzida em dados hidrológicos de uma rede de 54 estações hidrométrica e os dados meteorológicos de uma rede de 10 estações. Os resultados indicaram que diversas

variáveis hidrológicas exibem um número maior de tendências significativas do que são esperados ocorrer por acaso. Notáveis eram as fortes tendências de aumentos sobre os fluxos do mês de inverno de dezembro a abril assim como no fluxo mínimo anual e as fracas tendências de diminuições no início do verão. Os resultados são esperados ajudar a gerência dos recursos hídricos e os formuladores da política em fazer melhores decisões de planejamento na bacia de rio de Mackenzie.

O clima é um dos fatores limitantes mais importantes para a produção agrícola, tais como o risco de geada durante o período de cultivo, precipitação pluvial baixa e irregular com elevados riscos de seca. Moonen et al. (2002) analisaram eventos extremos de chuvas e temperaturas do ar no período 1878-1999 na Itália e verificaram que os baixos valores têm conseqüências para a agricultura. As estimativas das alterações climáticas são muito pequenas para permitir que seja rejeitada a hipótese, com certa confiabilidade, de que esses valores poderiam ser apenas um reflexo da amostragem nas flutuações da variabilidade natural do clima. No entanto, não há dúvida quanto à realidade das alterações observadas, que pode ser grande o suficiente para ter alguma importância para a prática da agricultura. A importância das alterações climáticas para a agricultura depende de culturas específicas. Todisco e Vergni (2008) analisaram índices escolhidos com base na avaliação dos efeitos potenciais das alterações climáticas sobre a agricultura e requisitos de gerenciamento hídrico. As estações meteorológicas foram preliminarmente selecionadas levando em conta a duração e a integralidade dos dados e a cobertura espacial homogênea da região em estudo; bem como os parâmetros meteorológicos e agrometeorológicos em diferentes locais na região de Úmbria (Itália Central), para culturas específicas usadas para avaliar as tendências climáticas, impactos na agricultura e adaptação às alterações climáticas.

Komatsu et al. (2007) observaram que a mudança do clima ocorrerá gradualmente com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosférica. Estudos predizem que anos quentes e frios extremos são conseqüências das mudanças do clima em resposta à concentração do CO<sub>2</sub>. Os resultados desse estudo indicaram que as mudanças projetadas nos ecossistemas aquáticos com relação ao aquecimento global deverão ser significativas, principalmente, quanto ao aumento da temperatura da superfície das águas poderiam mudar o crescimento de algas e outros seres que vivem no ecossistema aquático.

Modarres e Silva (2007) investigaram a variabilidade das chuvas em zonas áridas e semi-áridas do Iran com base em dados de precipitação pluvial e no número de dias com chuva e no teste de Mann-Kendall para análise de tendência. Eles sugeriram a necessidade de uma investigação mais aprofundada sobre intervenções antropogênicas locais no meio ambiente, o que poderia ser uma das grandes causas das alterações climáticas nesse país.

A evaporação das superfícies líquidas é uma componente importante do ciclo hidrológico e influencia a disponibilidade de água, particularmente para o consumo humano e na agricultura irrigada. Alterações climáticas, resultantes do aquecimento global poderão ter um impacto crítico sobre a evaporação da água e, conseqüentemente, na disponibilidade dos recursos hídricos para o atendimento às demandas essenciais da sobrevivência dos seres vivos do planeta. A identificação de tendências na evaporação, em resposta à mudança das condições climáticas, poderia contribuir para quantificar os potenciais impactos das mudanças climáticas sobre a evaporação (Burn & Hesch, 2007).

Nobre et al. (2007), através do sexto relatório dos modelos climáticos globais do IPCC/AR4 e dos modelos regionais de mudança climática, apontam para o aumento da temperatura superficial de 2 a 4°C na América do Sul em cenários climáticos futuros.

Evidentemente, essas mudanças climáticas têm um impacto nos ecossistemas naturais e especificamente na distribuição de biomas, o que por vez têm impactos na biodiversidade, na agricultura, nos recursos hídricos. Como exemplo, o aumento de temperatura que induz a maior evapotranspiração (soma da evaporação da água à superfície com a transpiração das plantas), reduz a quantidade de água no solo, mesmo que as chuvas não diminuam significativamente. Esse fator pode desencadear a substituição dos biomas existentes hoje por outros mais adaptados a climas com menor disponibilidade hídrica para as plantas (por exemplo, savanas substituindo florestas, caatinga substituindo savanas, semideserto substituindo caatinga).

Os novos Cenários de Emissões do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (*RECE*) do IPCC (2007) realizado em Paris, através do Sumário para os Formuladores de Políticas (*Quarto Relatório de Avaliação do GTI do IPCC*) denominados: A1, A2, B1 e B2, são os seguintes: **A1** → O contexto e a família de cenários A1 descrevem um mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, com a população global atingindo um pico em meados do século e declinando em seguida e a rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. As principais questões subjacentes são a convergência entre as regiões, a capacitação e o aumento das interações culturais e sociais, com uma redução substancial das diferenças regionais na renda per capita. A família de cenários A1 se desdobra em três grupos que descrevem direções alternativas da mudança tecnológica no sistema energético. Os três grupos A1 distinguem-se por sua ênfase tecnológica: intensiva no uso de combustíveis fósseis (A1F1), fontes energéticas não-fósseis (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B) (em que o equilíbrio é definido como não se depender muito de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento apliquem-se a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final). **A2** → O contexto e a família de

cenários A2 descrevem um mundo muito heterogêneo. O tema subjacente é a auto-suficiência e a preservação das identidades locais. Os padrões de fertilidade entre as regiões convergem muito lentamente, o que acarreta um aumento crescente da população. O desenvolvimento econômico é orientado primeiramente para a região e o crescimento econômico per capita e a mudança tecnológica são mais fragmentados e mais lentos do que nos outros contextos. **B1** → O contexto e a família de cenários B1 descrevem um mundo convergente com a mesma população global, que atinge o pico em meados do século e declina em seguida, como no enredo A1, mas com uma mudança rápida nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e informação, com reduções da intensidade material e a introdução de tecnologias limpas e eficientes em relação ao uso dos recursos. A ênfase está nas soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, inclusive a melhoria da equidade, mas sem iniciativas adicionais relacionadas com o clima. **B2** → O contexto e família de cenários B2 descrevem um mundo em que a ênfase está nas soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. É um mundo em que a população global aumenta continuamente, a uma taxa inferior à do A2, com níveis intermediários de desenvolvimento econômico e mudança tecnológica menos rápida e mais diversa do que nos contextos B1 e A1. O cenário também está orientado para a proteção ambiental e a equidade social, mas seu foco são os níveis locais e regionais.

Lima (2008) estudou as mudanças climáticas na região Nordeste Setentrional do Brasil usando a análise estatística para detectar tendências dos totais anuais das temperaturas mínimas, máximas e médias, temperaturas mínimas e máximas absolutas, umidade relativa do ar; precipitação pluvial e evaporação medida no tanque “classe A”. Um dos principais resultados foram a detecção de que as temperaturas do ar, mínimas e médias anuais, e verificação de noites mais quentes.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Localização geográfica e climatologia da região**

O Nordeste do Brasil é uma das principais regiões do país em face da grande extensão territorial. Também é conhecido por possuir uma estação seca prolongada que causa sérios problemas sociais e econômicos (Hastenrath e Heller, 1977), por possuir diferentes regimes de precipitação e temperatura. Pode-se, assim, encontrar uma grande variedade de climas com distintas características regionais. O Nordeste brasileiro (Figura 1) situa-se aproximadamente entre as latitudes de 1° e 18°30' S e longitudes de 34°20' e 48°30' W, conta com nove estados da Federação e ocupa uma área superior a 1,5 milhões de Km<sup>2</sup>. O clima semi-árido corresponde a 60% de sua área total, com precipitação pluvial média anual inferior a 500 mm/ano em algumas localidades. Ocorre ainda o clima tropical, observado principalmente na costa leste da Região, onde apresenta total anual precipitado superior a 1500 mm (Kousky e Chu, 1978). A variabilidade interanual da distribuição de chuvas no NEB, tanto em escala espacial quanto temporal, está intimamente relacionada com 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).

Na parte norte dessa região, que abrange os Estados do Ceará e partes do Rio Grande do Norte, Piauí, Maranhão e oeste da Paraíba e de Pernambuco, o regime de chuvas pode ser caracterizado pelo posto pluviométrico de Quixeramobim, CE, (latitude de  $-5^{\circ} 10'S$  e longitude de  $-40^{\circ} 40'W$ ), onde as chuvas máximas ocorrem no mês de março. Os índices pluviométricos variam de 400 mm/ano (interior) a mais de 2000 mm/ano (litoral) e os quatros meses mais chuvosos estão entre fevereiro e maio. Entre os principais mecanismos físicos produtores de chuva na região está a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é uma banda de nuvens que circunda a faixa equatorial do globo terrestre, formada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos do hemisfério sul, onde a convergência dos ventos faz com que o ar, quente e úmido ascenda carregando umidade do oceano para os altos níveis da atmosfera formando as nuvens. Esse mecanismo destaca-se por ter influência direta na estação chuvosa no norte do NEB, chegando a sua posição extrema nos meses de março e abril, quando ocorre o máximo de precipitação para essa região, com níveis entre 1000 e 1200 mm/ano (Hastenrath e Lamb, 1977).

O sul do Nordeste (SNE) tem como principal mecanismo de precipitação os sistemas frontais estacionários alimentados pela umidade proveniente do Atlântico Sul, que definem a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os sistemas pré-frontais, convecção local e brisas marítimas e terrestres. Nessa região os índices pluviométricos variam de 600 mm/ano (interior) a mais de 3000 mm/ano no litoral, esse regime do SNE é semelhante ao regime da parte norte da região Sudeste do Brasil (Molion e Bernardo, 2002). O máximo no sul da região está associado à penetração de frentes frias vindas do sul que alcançam latitudes mais baixas nos meses de novembro a fevereiro (Alves e Kayano, 1991). Essa região tem como principal característica climática a alta variabilidade espacial e temporal da precipitação, determinada principalmente por padrões de grande

escala da circulação geral da atmosfera, associada às características locais de topografia (Nobre e Molion, 1988).

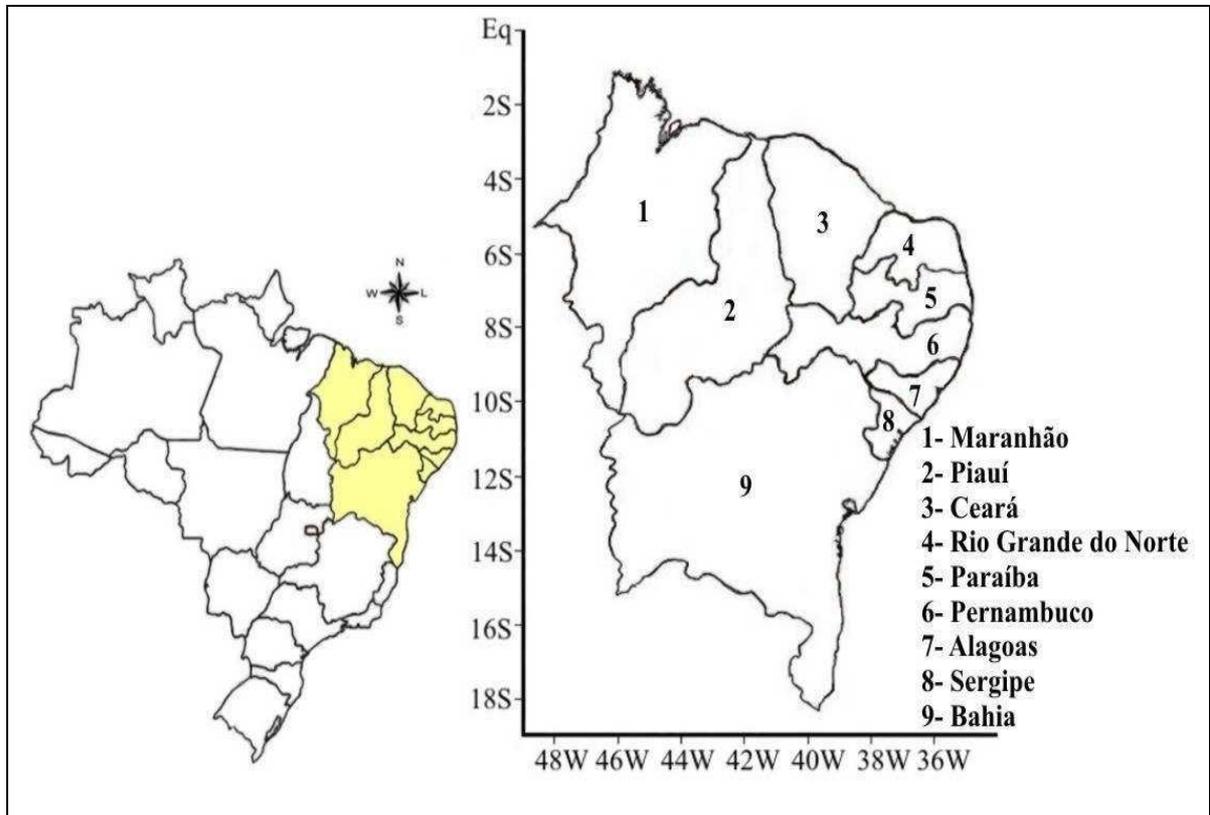


Figura 1. Mapa da localização geográfica do Nordeste do Brasil.

Yamazaki e Rao (1977), observando imagens de satélite, sugeriram a importância dos distúrbios de leste, também encontrado na literatura como Ondas de Leste (OL) que são frequentemente relacionados com a precipitação do leste do Nordeste do Brasil. Chan (1990) observou que essas ondas se propagam do Oceano Atlântico em direção ao continente, durante o outono e inverno (maio a agosto). Outro fator que favorece as chuvas no norte, nordeste e oeste da região é a presença dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), cuja circulação ciclônica fechada possui o centro mais frio que sua periferia. Segundo Gan (1982) esses vórtices são observados nos meses de setembro a abril, tendo maior frequência em janeiro.

### **3.2. Dados climatológicos**

Neste estudo foram utilizados dados observados à superfície de temperaturas do ar (máximas, mínimas e médias mensais), obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, no período compreendido entre 1961 e 2007. Também foram usados dados climatológicos de temperatura do ar e de precipitação pluvial cedidos pela Unidade Acadêmica Ciências Atmosféricas – UACA da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, no período de 1911 a 1990. A Figura 2 ilustra os nove Estados do Nordeste brasileiro e a distribuição espacial das 89 estações meteorológicas utilizadas no estudo. No Anexo I se encontram a relação das estações meteorológicas utilizadas neste estudo com seus respectivos números, códigos e coordenadas geográficas.

### **3.3. Procedimentos metodológicos**

Os dados foram submetidos a uma análise de consistência, sendo eliminados os postos pluviométricos cujas séries apresentavam menos de 30 anos de observações completas. O preenchimento de falhas das séries temporais de temperatura do ar INMET foi feito com base nos dados da UACA.

O programa computacional denominado Sistema de Estimativa de Evapotranspiração (SEVAP) apresentado por Silva et al. (2005) foi utilizado para se obter o balanço hídrico climatológico e a classificação climática Thornthwaite (1948) para cada estação analisada. Assim, foram determinados os índices de aridez (Ia), hídrico (Ih) e de umidade (Iu), bem como a evapotranspiração potencial anual (ETP), utilizando-se a capacidade de água disponível (CAD) padrão para todas as estações de 100 mm e usando a precipitação pluvial fixa em todos os cálculos dos índices. Posteriormente, foram elaborados mapas temáticos dessas variáveis, correspondentes aos cenários atuais e para os

anos de 2050 e 2100. Na elaboração dos mapas foi utilizado o GrADS (*Grid Analise and Display System*), utilizando o método de interpolação de Bares (1964).

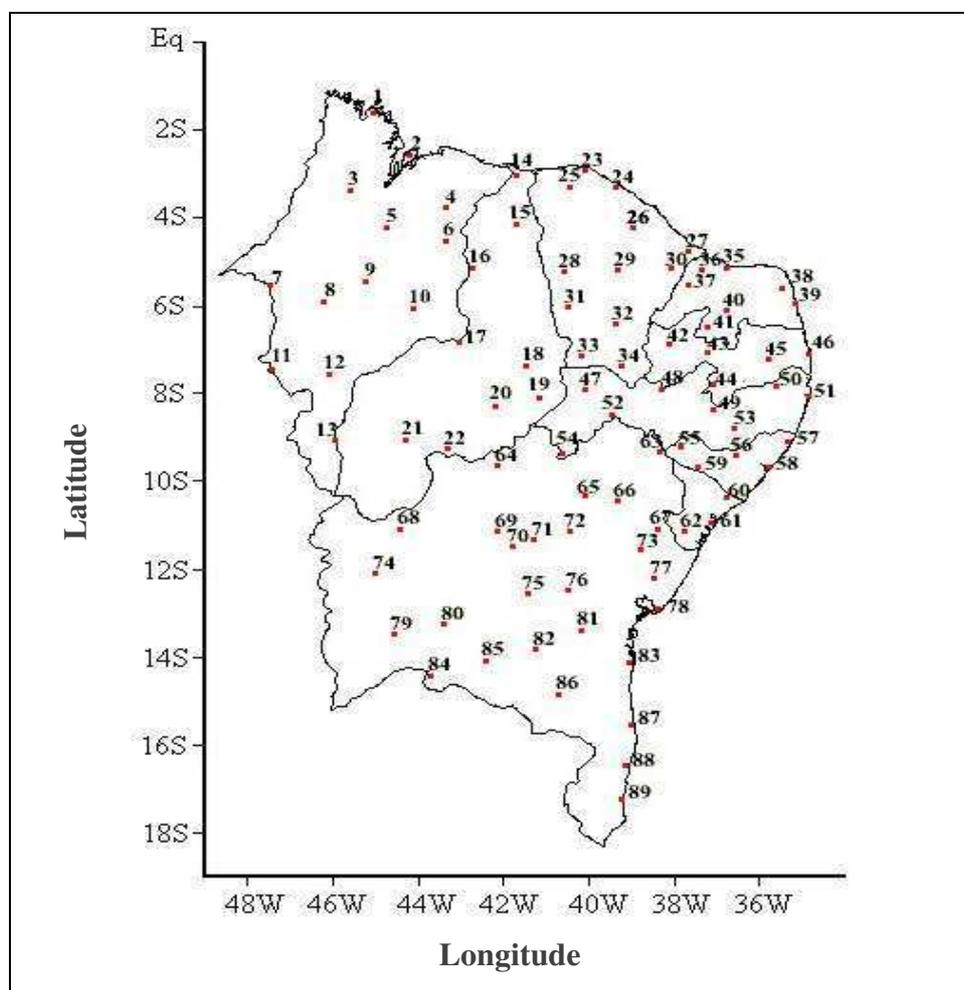


Figura 2. Localização das estações do Inmet pelo Nordeste de Brasil.

### 3.4. Classificação Climática de W.C. Thornthwaite

A classificação climática de Thornthwaite é baseada em índices essenciais para determinação do tipo de clima de uma região, assim como para estudo da adaptação de culturas à região – Zoneamento Climático. Onde podemos encontrar tais índices de acordo com as fórmulas a seguir (Ometto, 1981):

### 3.4.1. Índice de Aridez (*Ia*)

Vem a ser a deficiência hídrica (Def) expressa em porcentagem da evapotranspiração potencial (necessidade). O conceito de deficiência também é o mesmo usado no balanço hídrico.

$$Ia = 100 \frac{Def}{ETP} \quad (1)$$

Como podemos ver, o campo de variação do índice de aridez está entre zero e 100. É zero quando não existe déficit e 100 quando a deficiência iguala a evapotranspiração potencial.

### 3.4.2. Índice de Umidade (*Iu*)

Vem a ser o excesso de água (Exc) expresso em porcentagem da necessidade que é representada por sua vez pela evapotranspiração potencial.

$$Iu = 100 \frac{Exc}{ETP} \quad (2)$$

O conceito de Exc vem a ser aquele expresso pelo balanço hídrico. Pode-se notar também, que o campo de variação do índice de umidade estará entre zero e um valor qualquer positivo.

### 3.4.3. Índice Hídrico (*Ih*)

Como na maioria dos casos, temos durante o ano estações de excesso e falta d'água, exprime-se então o índice hídrico da seguinte maneira:

$$Ih = (Iu - 0,6Ia) \quad (3)$$

Como se pela expressão, no computo do índice hídrico o índice de aridez tem menor peso. Assim se procedem prevendo-se que um excesso de 6 mm é capaz de prover um déficit de 10 mm devido a redução da taxa de evapotranspiração.

### 3.5. Análises estatísticas para as temperaturas do ar

A análise de regressão linear será utilizada para verificar alterações climáticas por meio do teste de significância do coeficiente angular, considerando-se a equação da reta do tipo:

$$Y = aX + b \quad (4)$$

#### 3.5.1. Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall é um teste não-paramétrico (Mann, 1945; Kendall, 1975) onde consiste em comparar cada valor da série temporal com os valores restantes, sempre em ordem seqüencial. É contado o número de vezes que os termos restantes são maiores do que o valor analisado. A estatística S é obtida pela soma de todas as contagens, dado como se segue:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{ sinal}(x_i - x_j), \quad (5)$$

em que o Sinal  $(x_i - x_j)$  é obtido da seguinte forma:

$$Sinal = \begin{cases} 1 & \text{se } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

A estatística  $S$  tende para a normalidade quando  $n$  for grande, com média  $E(S)$  e variância  $Var(S)$  definidas como se segue:

$$E(S) = 0, \quad (7)$$

$$Var(S) = \frac{n(n+1)(2n+5) - \sum_{i=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (8)$$

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

O teste estatístico parametrizado ( $Z_{MK}$ ) é dado por:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

A presença de tendência estatisticamente significativa na série temporal é avaliada usando-se o valor de  $Z$ . Essa estatística é usada para testar a hipótese nula que nenhuma

tendência existe. O valor positivo de  $Z_{MK}$  indica uma tendência crescente. Para testar qualquer tendência constante, crescente ou decrescente para um nível significativo de  $p$ , é rejeitada a hipótese nula se o valor absoluto de  $Z$  é maior que  $Z_{1-p/2}$ , o qual é obtido na tabela da distribuição normal. Neste trabalho foram aplicados os níveis de significância de  $p = 0,01$  e  $0,05$ .

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos a partir da metodologia desenvolvida neste trabalho permitiram a geração de mapas de temperaturas do ar (máximas, mínimas e médias anuais), da evapotranspiração potencial e dos índices de aridez, de umidade e hídrico.

### **4.1. Temperatura máxima (*Tmax*)**

A Figura 3 exibe a distribuição espacial da temperatura do ar máxima anual no período de 1961 a 2007, tendência temporal, nível de significância, cenário para os anos de 2050 e de 2100 no Nordeste do Brasil. Através de análise de regressão linear foi possível verificar tendências crescentes de temperatura do ar máxima anual em quase todas as estações da região Nordeste do Brasil, para os cenários de 2050 e 2100 (Figura 3D e E). A Figura 3B mostra a distribuição espacial das tendências temporais da temperatura do ar (*Tmax*) em °C/ano, para o Nordeste do Brasil. As tendências de *Tmax*, pela espacialização exibida em tal figura, são estatisticamente significativas pelo teste de Mann-Kendall ao nível de 0,01 e 0,05 de probabilidade nas regiões norte e sul/sudeste do Maranhão, sudoeste do Piauí, oeste da Bahia e leste do Rio Grande do Norte, como evidenciadas na

Figura 3C. Com relação aos postos (estações), 38,2% são estatisticamente significativas ao nível de 1%. Por outro lado, também foram verificadas tendências decrescentes em algumas estações, porém não-significativas, localizadas na Bahia (Cipó, Jacobina, Lençóis e Remanso), Pernambuco (Petrolina) e no Ceará (Guaramiranga e Morada Nova). Tendência decrescente na estação de Morada Nova também foi encontrada por Lima (2008). As séries temporais de temperatura do ar máxima anual nas estações de Campos Sales, BA, e Apodi, RN, não apresentaram qualquer tendência (aumento ou redução), tendo, portanto, comportamento estacionário. De acordo com a distribuição da tendência da temperatura do ar no período de 1961 a 2007 (Figura 3A) e dos cenários para os anos de 2050 e 2100 (Figuras 3D e E), em grande parte do NEB, as temperaturas do ar máximas ficaram acima de 31°C, apenas o sul do Estado da Bahia não atingiu esse valor em nenhum dos cenários estudados. O modelo HadCM2, da Inglaterra, previu aumento na tendência de temperatura do ar entre 2 e 4°C para o Nordeste do Brasil na segunda metade do século XXI devido o aquecimento global (Azevedo, 1999). Por outro lado, Medeiros et al. (2005), estudando estimativas de temperaturas do ar para o NEB, verificaram altas temperaturas do ar nos Estados do Maranhão, Piauí e Noroeste de Bahia. O cenário para o ano de 2100 (Figura 3E) indica temperaturas do ar acima de 37°C nas áreas do sul do Maranhão e Piauí, com um aumento superior a 4°C com relação à temperatura máxima média. No caso da estação de Balsas, MA, poderá ocorrer aumentos da temperatura do ar de 0,048 a 0,050°C/ano para os cenários de 2050 e de 2100, respectivamente, quando comparada com a temperatura do ar do período atual. Dentre as capitais de cada Estado da região, a estação de São Luis, MA, destaca-se pelo fato de apresentar a mais acentuada tendência crescente na temperatura máxima média anual, com aumentos 1,8 e de 2,0°C para os cenários de 2050 e de 2100; enquanto para a estação de Natal, RN, os acréscimos seriam apenas de 0,6 a 1,3°C para os anos de 2050 e de 2100, respectivamente.

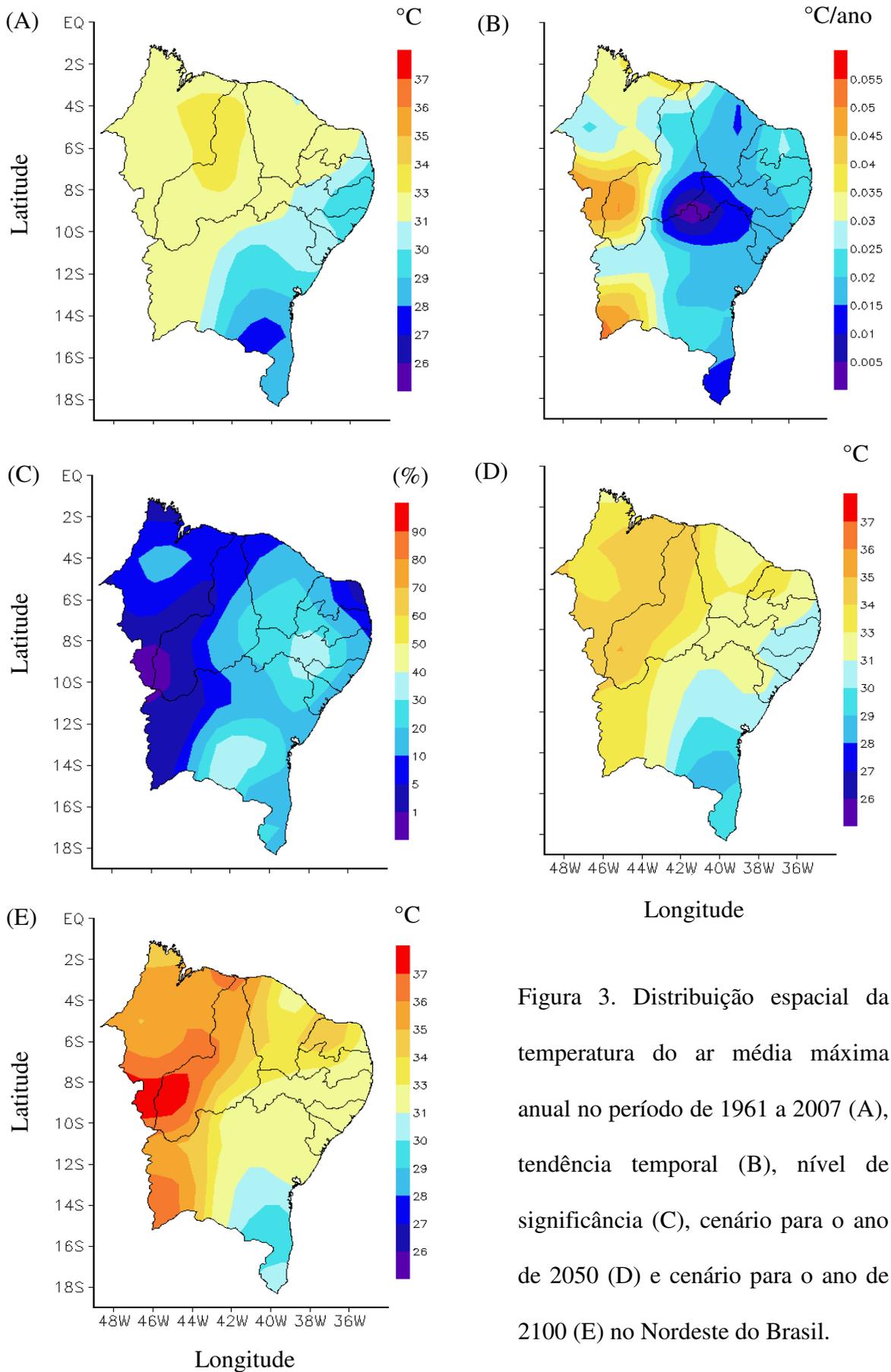


Figura 3. Distribuição espacial da temperatura do ar média máxima anual no período de 1961 a 2007 (A), tendência temporal (B), nível de significância (C), cenário para o ano de 2050 (D) e cenário para o ano de 2100 (E) no Nordeste do Brasil.

## 4.2. Temperatura mínima (*T<sub>min</sub>*)

A Figura 4 exibe a distribuição espacial da temperatura do ar mínima anual (*T<sub>min</sub>*) no período de 1961 a 2007, tendência temporal, nível de significância, cenário para os anos de 2050 e de 2100 no Nordeste do Brasil. Observam-se tendências de aumento de temperatura mínima do ar de um cenário para outro em praticamente toda região, embora tenham ocorrido tendências decrescentes em sete estações (Maceió, AL, Irecê, Itaberaba e Vitória da Conquista, BA, Morada Nova, CE, Arcoverde, PE e Bom Jesus de Piauí, PI); sendo as estações de Maceió, AL, e Bom Jesus do Piauí, PI, estatisticamente significativas ao nível de 1% e 5%, respectivamente. Na distribuição espacial entre 1961 e 2007 (Figura 4A) e os cenários para os anos de 2050 (Figura 4D) e de 2100 (Figura 4E) pode-se verificar que na parte sul da região Nordeste do Brasil são encontradas as menores temperaturas do ar, variando entre 20 e 22°C; enquanto que as maiores temperaturas mínimas do ar variam entre 26 e 27°C. Na Figura 4B é mostrada a distribuição espacial das tendências das temperaturas mínimas do ar. As tendências (Figura 4C) foram estatisticamente significativas pelo teste de Mann-Kendall ao nível de 1 e 5%, na faixa litorânea que compreende o Rio Grande do Norte até o norte de Alagoas; em praticamente todo o Estado do Maranhão, sudoeste de Pernambuco e em parte do nordeste e oeste do Estado da Bahia. Pode-se verificar que os valores da temperatura mínima média anual (Figura 4A) se encontram em torno de 18 a 22°C em grande parte da região do NEB. As maiores temperaturas mínimas são encontradas no extremo norte do Maranhão, esses resultados também foram encontrados por Medeiros et al. (2005). No cenário de 2050 (Figura 4D) verifica-se que na parte norte da região ocorre aumento de temperatura, em especial na estação de Zé Doca, MA, com um aumento de 2°C em relação à média mínima. É verificado também, dentre as capitais da região, o aumento da *T<sub>min</sub>*, o maior acréscimo

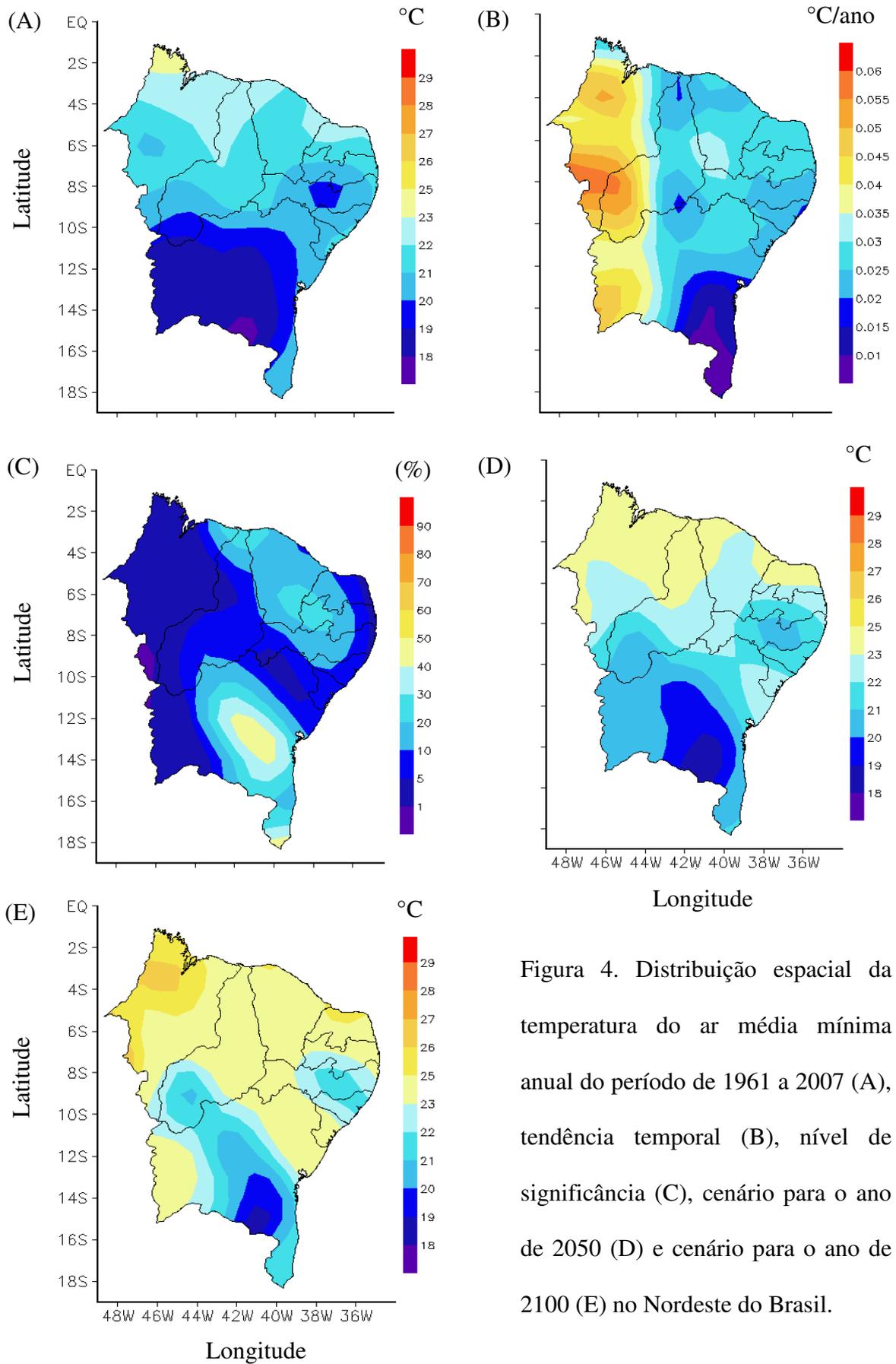


Figura 4. Distribuição espacial da temperatura do ar média mínima anual do período de 1961 a 2007 (A), tendência temporal (B), nível de significância (C), cenário para o ano de 2050 (D) e cenário para o ano de 2100 (E) no Nordeste do Brasil.

ocorreu na estação de João Pessoa, PB, com 2,1°C para a projeção de 2050 e de 2,3°C para a projeção de 2100. A estação de Teresina, PI, deverá manter a mesma temperatura do ar mínima até 2050 e um acréscimo de apenas 0,1°C para o ano de 2100. Pinto et al. (2001) encontraram tendências positivas da temperatura mínima que ultrapassam os 2,5°C/100 anos em Campinas, SP, e para Pelotas, RS, menos de 1°C/100 anos. Também merece destaque a cidade de Aracajú, SE, onde não houve variação para os cenários estudados. Na estação de Maceió, AL, haverá redução de temperatura (-2,1°C para 2050 e -2,3°C para 2100). Assim como em Lima (2008), foi observado, o caso específico da estação de Morada Nova, CE, tendência decrescente, da ordem de -0,005°C/ano. Analisando todas as estações com relação aos cenários analisados foi verificado aumento na diferença da *Tmin* maior entre os cenários de 2050 e 2100. Foi verificado, ainda que tendências nas temperaturas mínimas sejam mais intensas do que nas temperaturas máximas. Resultado semelhante foi obtido por Marengo & Valverde (2007) para a região sul do Brasil. Todisco e Vergni (2008) também verificaram o mesmo padrão para região central da Itália em estudo sobre mudanças climáticas

#### **4.3. Temperatura média (*Tmed*)**

Assim como ocorreu com as *Tmax* e as *Tmin*, a temperatura média anual apresentou tendências de aumento em quase todas as estações estudadas (Figura 5). Na Figura 5B se encontram a distribuição espacial das tendências para a temperatura do ar média no NEB. Conforme a distribuição na Figura 5C, as regiões sul de Alagoas, Sergipe, oeste e nordeste da Bahia, sul/sudoeste do Piauí e grande parte do Maranhão apresentam tendências estatisticamente significativas aos níveis de 1% e 5% de probabilidade. Dentre essas estações, apenas três apresentaram tendências de redução (Maceió, AL, Guaratinga e Itiruçu, BA), com significância estatística ao nível de 5% apenas para a estação de Maceió,

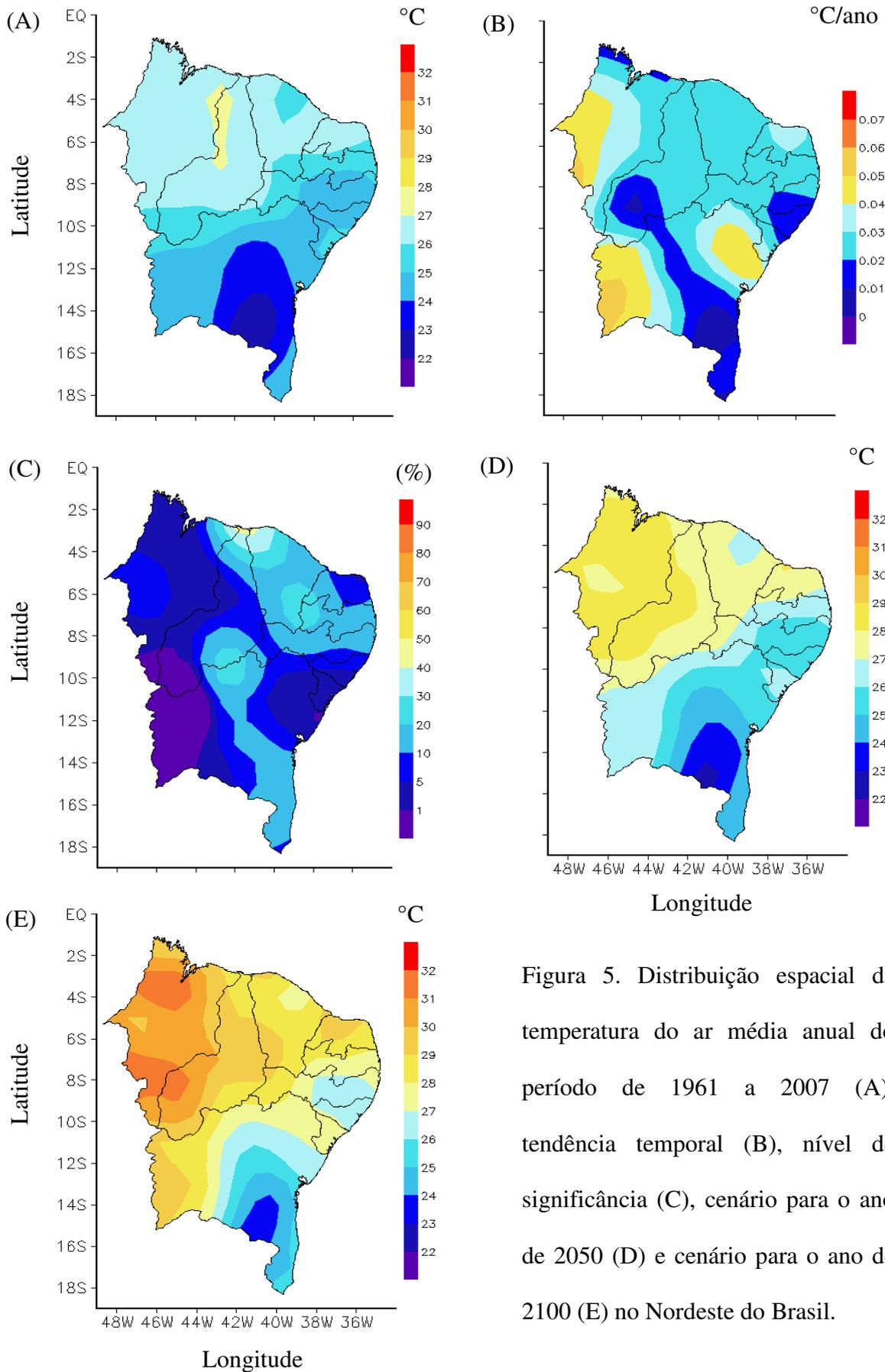


Figura 5. Distribuição espacial da temperatura do ar média anual do período de 1961 a 2007 (A), tendência temporal (B), nível de significância (C), cenário para o ano de 2050 (D) e cenário para o ano de 2100 (E) no Nordeste do Brasil.

em Alagoas, as demais tem níveis de 1% de probabilidade. Na distribuição de *Tmed* (Figura 5A) são encontradas temperaturas médias do ar variando entre 22 a 25°C. Porém, no cenário para 2050 (Figura 5D), encontram-se temperaturas médias do ar entre 27 e 28°C em grande parte dos Estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte; enquanto, na parte centro-sul do Nordeste do Brasil as temperaturas médias do ar variaram entre 22 e 26°C. Para o cenário de 2100 (Figura 5E) as *Tmed* variaram entre 27 a 31°C. Apenas na região sul do Nordeste do Brasil, onde é observado que, tanto nos mapas de distribuição espacial de temperatura média do ar, quanto nos mapas dos cenários de temperaturas máximas e mínimas, são encontrados os menores valores de temperaturas do ar. Analisando a *Tmed* nas capitais do Nordeste brasileiro, pode-se destacar a estação de Teresina, PI, com o menor acréscimo de temperatura média do ar, de 0,2°C/ano para 2050 (Figura 5B) e de 0,3°C/ano para o ano de 2100 (Figura 5C). A capital do Nordeste do Brasil que obteve a maior taxa de acréscimo de temperatura do ar foi São Luis, MA, com 1,5°C/ano para o cenário de 2050 (Figura 5B) e 1,7°C/ano para o cenário de 2100 (Figura 5C). Esse resultado implica no aumento de 3,2°C na temperatura do ar até o ano de 2100; logo, 0,2°C acima do valor previsto para o NEB pelo AR4 do IPCC (Marengo, 2007).

O balanço hídrico pode ser entendido como a contabilização dos ganhos e perdas de água em determinado volume de solo. Os ganhos são constituídos, basicamente, pela precipitação pluvial, enquanto as perdas ocorrem por evapotranspiração, percolação profunda e escoamentos superficiais. Assim, neste estudo foram determinados a evapotranspiração potencial (ETP), os índices de umidade (Iu), aridez (Ia) e hídrico (Ih) para os cenários de 2050 e 2100 no Nordeste brasileiro, dependentes da temperatura do ar (máxima, mínima e média) e precipitação pluvial (fixa).

#### 4.4. Evapotranspiração Potencial Máxima (*ETP<sub>max</sub>*)

Nas Figuras 6B e C observa-se aumento da *ETP<sub>max</sub>* nos dois cenários analisados (2050 e 2100) para o Nordeste do Brasil. Os maiores valores de *ETP<sub>max</sub>* ocorreram nos Estados do Maranhão e Piauí (Figura 6A), justamente onde ocorreram os maiores valores de temperatura máxima anual (Figura 3B e C). Isso era esperado porque a *ETP<sub>max</sub>* é função direta da temperatura do ar pelo método de Thornthwaite (1948). Na parte oeste do Estado do Piauí e em todo o Estado do Maranhão são observados valores em torno de 2050 mm para *ETP* máxima média no período analisado (Figura 6A); de aproximadamente 2150 mm/período para o cenário de 2050 (Figura 6B) e acima de 2200 mm/período para o cenário de 2100 (Figura 6C). Entre as estações (postos) que obtiveram as maiores taxas de aumento de *ETP<sub>max</sub>* foram Campina Grande, PB, com 204,7 mm e Vitoria da Conquista, BA, com 156,4 mm da situação atual até o cenário para 2050, Morro do Chapéu, BA, com 161,1 mm e Campina Grande, PB, com 124,4 mm do cenário de 2050 para 2100. Na região Sul/Sudeste do NEB são observados os menores valores médios de *ETP<sub>max</sub>* do período estudado, ficando em torno de 1700 a 1900 mm (Figura 6A), enquanto no cenário de 2050 esses valores variaram de 1750 a 1950 mm (Figura 6B) e para o cenário de 2100 de 1800 a 2100 mm (Figura 6C). Mesmo com o aumento da *ETP<sub>max</sub>* em quase todo Nordeste, pode-se encontrar estações que exibiram redução na *ETP<sub>max</sub>* para os cenários estudados, destacando-se as estações de Remanso, BA, com uma taxa de redução de -78,3 mm/período para o ano de 2050 e de -108,1 mm/período para o ano de 2100. Por outro lado, na estação de Cipó, BA, a tendência foi de -53,7 mm/período para o cenário de 2050 e de -128,7 mm/período para o cenário de 2100. Analisando-se todas as estações foi verificado maior diferença de aumento entre a *ETP<sub>max</sub>* média (situação atual) e o cenário de 2050 e uma diferença menor para o cenário de 2050 até 2100.

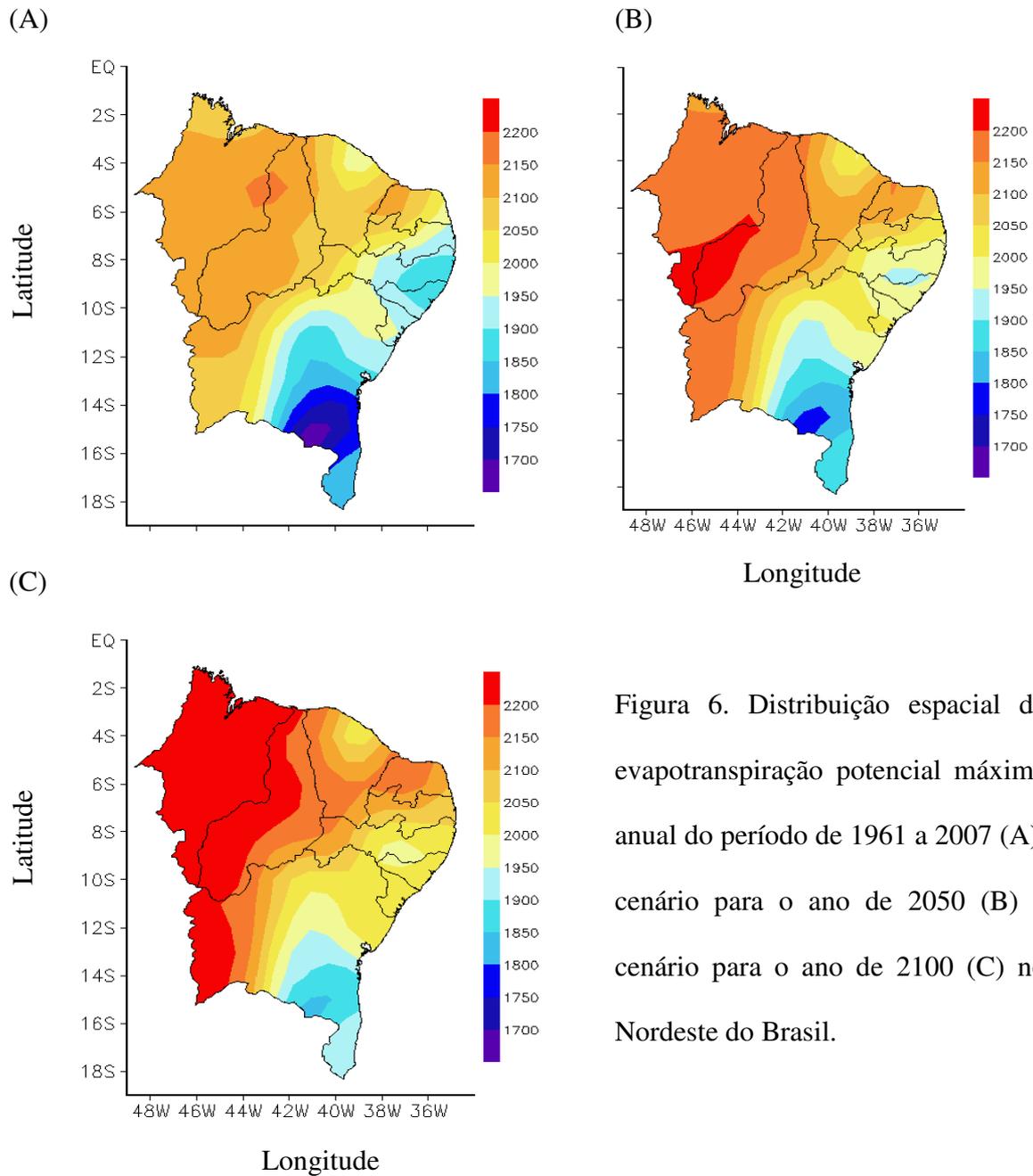


Figura 6. Distribuição espacial da evapotranspiração potencial máxima anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

#### 4.5. Evapotranspiração Potencial Mínima ( $ETP_{min}$ )

A Figura 7 exibe a espacialização da  $ETP_{min}$  no Nordeste do Brasil para a situação média atual e para os cenários de 2050 e 2100. Na Figura 7A encontra-se a distribuição de  $ETP_{min}$  média no período de 1961 a 2007, onde são observados valores variando de 800 a 1050 mm/período, caracterizando um tipo de clima mesotérmico, segundo a classificação

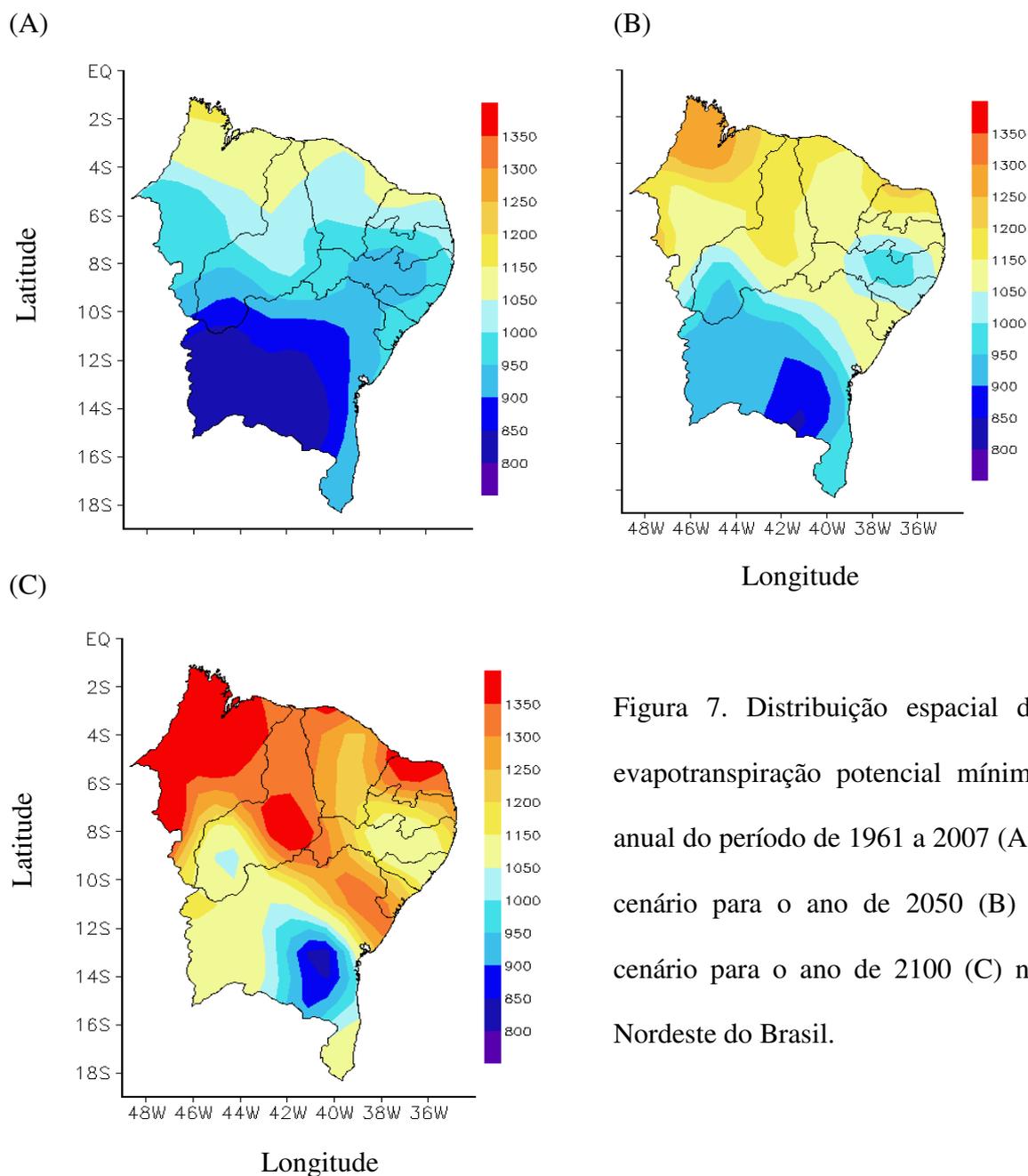


Figura 7. Distribuição espacial da evapotranspiração potencial mínima anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

climática de Thornthwaite (1948). Na Figura 7B tem-se o cenário de  $ETP_{min}$  para o ano de 2050, onde são encontrados valores variando de 800 a 1000 mm/período na parte sul da região e valores entre 1050 a 1250 mm/período na parte central e ao norte do NEB. Em tal cenário são verificados dois tipos de climas, megatérmico (norte e parte central do NEB) e mesotérmico (sul do NEB, Alagoas e parte de Pernambuco). No cenário de 2100 (Figura 7C) também são encontrados dois tipos climáticos, assim como para o cenário do ano de

2050, porém com resultados mais elevados de *ETP<sub>min</sub>* em toda região do Nordeste brasileiro; verificando-se valores acima de 1350 mm/período nos Estados do Maranhão, centro do Piauí e norte do Rio Grande do Norte. As estações que apresentaram as maiores diferenças de acréscimos na *ETP<sub>min</sub>* de um cenário para o outro, dentre outras, pode-se destacar: Macau, RN, e Carolina, PI, com 431,1 e 378,4 mm/período, respectivamente, em comparação com a situação atual e o cenário para 2050; entre os cenários de 2050 e 2100, destacam-se as estações de Jacobina, BA, com 570,5 mm/período e Cipó, BA, com 535,9 mm/período. As estações que apresentaram as maiores diferenças de aumento de *ETP<sub>min</sub>*, entre a situação média atual e o cenário de 2100, destacam-se as estações de Carolina, PI e Jacobina, BA. Observou-se, ainda, que houve reduções de *ETP<sub>min</sub>* em algumas estações, como: Maceió e Palmeira dos Índios, em Alagoas, Morada Nova, no Ceará, Bom Jesus do Piauí, no Piauí e Itaberaba, na Bahia, onde as maiores diferenças de decréscimos encontradas foram de -122,0 (entre a situação atual e o cenário de 2050) na estação de Maceió, AL, e de -740,0 (entre os cenários de 2050 e 2100) na estação de Itaberaba, BA. As maiores diferenças de acréscimo de *ETP<sub>min</sub>* foram verificados entre os cenários de 2050 e 2100, ao contrario da *ETP<sub>max</sub>*.

#### **4.6. Evapotranspiração Potencial Média (*ETP<sub>med</sub>*)**

Da mesma forma que ocorreu com os resultados de espacialização da *ETP<sub>max</sub>* e *ETP<sub>min</sub>*, foi observado aumento na evapotranspiração potencial média em relação aos cenários de 2050 e de 2100 (Figura 8). A *ETP<sub>med</sub>* no período analisado indica o tipo de clima com característica megatérmico em grande parte da região estudada, com valores variando entre 1100 a 1400 mm/período nos Estado da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Paraíba (Figura 8A). Observa-se que na região que compreende os Estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte são encontrados valores de *ETP<sub>med</sub>*

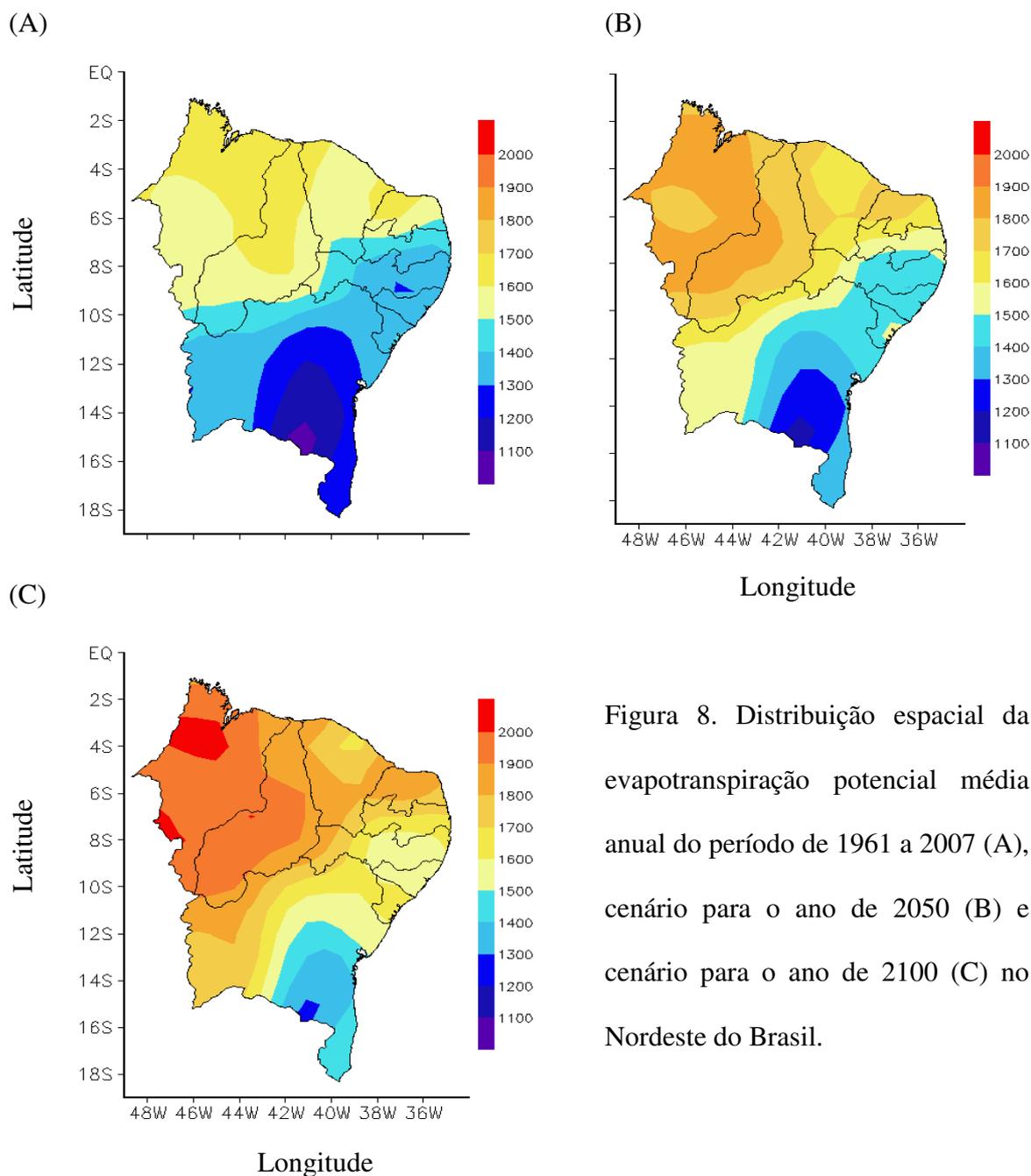


Figura 8. Distribuição espacial da evapotranspiração potencial média anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

entre 1500 e 1700 mm/período. Os resultados do cenário para 2050 apresentam aumento na *ETPmed* em relação a situação atual, com valores entre 1500 e 1800 mm/período (Figura 8B). No cenário de 2100, apenas pequenas áreas ao sul do NEB apresentam valores entre 1100 a 1400 mm/período, o restante da região apresenta valores entre 1500 a 2000 mm/período (Figura 8C). As estações que apresentaram as maiores taxas de aumento de

*ETPmed* foram Bom Jesus do Piauí, PI, com 327,7 mm/período e Tauá, CE, com 317,7 mm/período entre a *ETPmed* e o cenário de 2050. Já com relação à taxa de aumento encontrada entre o cenário de 2050 e 2100, destacam-se as estações de Campina Grande, PB, com 269,6 mm/período e Caracol, PI, com 268,4 mm/período. As estações que apresentaram os maiores acréscimos de *ETPmed* entre a situação média atual da região e o cenário para 2100 foram Barbalha, CE, e Caracol, PI, com 553,2 e 547,8 mm/período, respectivamente. Apesar de verificado o aumento de *ETPmed*, nas distribuições espaciais (Figura 8), também podemos destacar duas estações, onde foram encontradas reduções na *ETPmed*, entre elas estão: Maceió, em Alagoas e Itiruçu, na Bahia (concordando com declínio da tendência de temperatura mínima). Analisando todas as estações com relação aos cenários analisados, verifica-se diferença de aumento de *ETPmed* atual para o cenário de 2050 e uma menor diferença entre os cenários de 2050 e 2100, esse mesmo resultado foi verificado na evapotranspiração potencial máxima. Essas diferenças foram maiores para *ETPmed* quando comparadas com a *ETPmax*.

#### **4.7. Índice de Aridez Máximo (*Iamax*)**

A espacialização do índice de aridez máximo anual (*Iamax*) é exibida na Figura 9, onde são encontrados valores de *Iamax* em torno de 35 a 40, localizados no extremo norte do Maranhão. Já na região sul do Estado da Bahia são observados os menores valores de *Iamax* (entre 15 a 40), sendo os maiores valores encontrados na grande área do sertão nordestino, com um núcleo de valores de *Iamax* acima de 65. Valores dessa ordem também são encontrados em algumas estações do Rio Grande do Norte, como em Apodi, Cruzeta, Macau e Mossoró. Dentre as estações analisadas, destacam-se as de Vitória da Conquista, na Bahia e Campina Grande, na Paraíba, com o maior aumento de *Iamax* entre o cenário médio atual do período (Figura 9A) e o cenário para 2050 (Figura 9B), com 4,7 e 4,5,

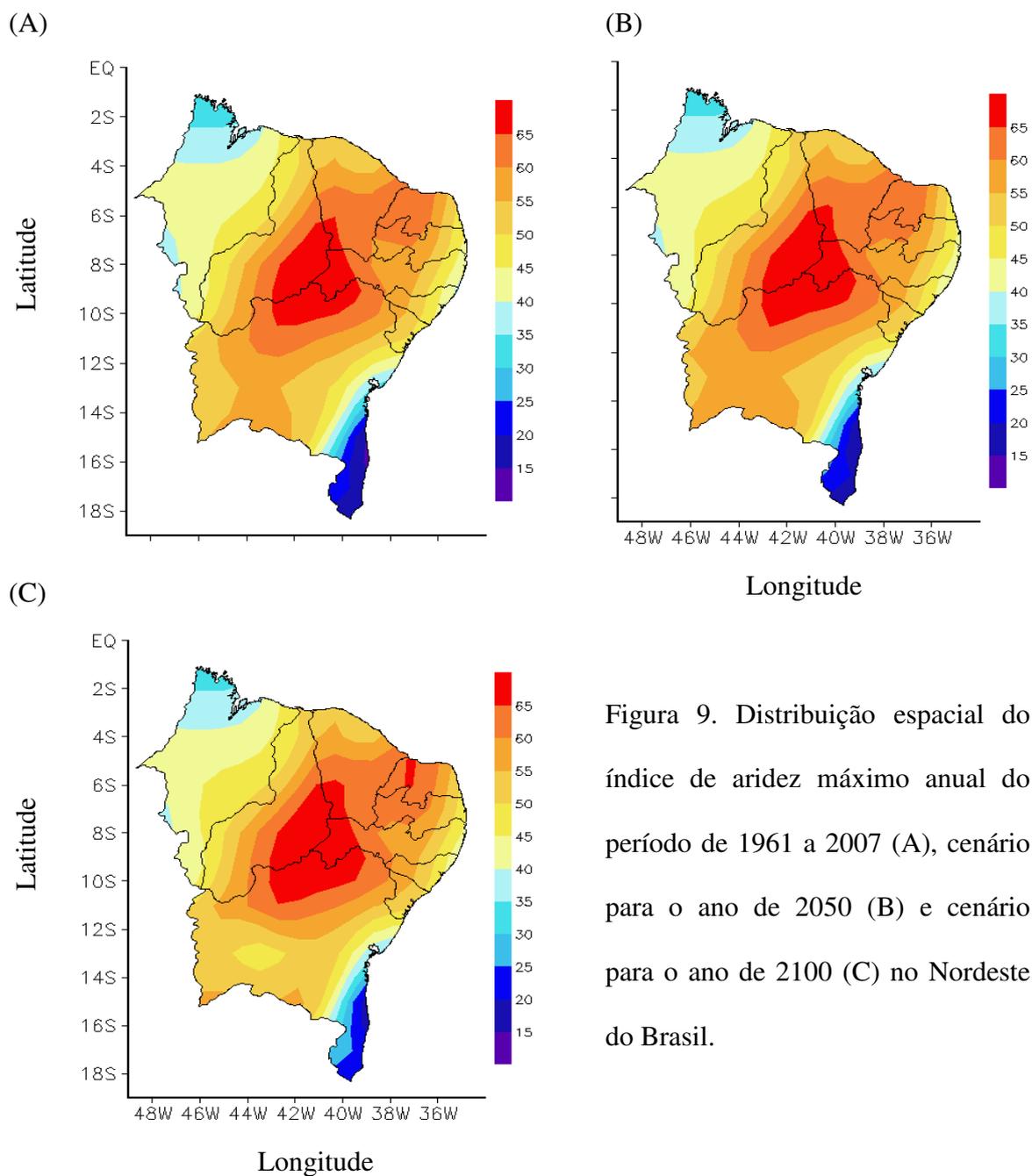


Figura 9. Distribuição espacial do índice de aridez máximo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

respectivamente. Foi observado que a estação de Natal, RN, apresentou redução do *Iamax* (-12,4) entre o período atual e o cenário para 2050, e aumento entre os cenários de 2050 e 2100 (13,2). Também foi verificado redução do *Iamax* entre os períodos (situação atual e cenário para 2050 e entre os cenários de 2050 e 2100) nas estações de Guaramiranga (-0,1 e -2,0), CE, Petrolina (-0,4 e -0,6) e Arcoverde (-0,4 e -0,4), PE, Chapadinha (-0,1 e -0,3),

MA, Remanso (-0,9 e -1,5), Jacobina (-0,3 e -1,1), Lençóis (-0,9 e -2,2) e Cipó (-1,0 e -2,8), BA. A maior diferença de redução do *Iamax* foi verificada na estação de Bom Jesus da Lapa, BA, entre os cenários de 2050 e 2100, que foi de -29,4. A maior amplitude de *Iamax* observada entre a situação média atual e o cenário para 2100 foi na estação de Guaratinga, BA, (9,4) e a maior redução foi na estação de Bom Jesus da Lapa, BA, (-28,3). A distribuição espacial do *Iamax* na região de estudo evidencia que não ocorreram grandes mudanças de um cenário para o outro (Figura 9). Entretanto, para a região sudoeste do Estado da Bahia as diferenças entre os valores de *Iamax* da situação atual e o cenário para 2050 variam entre 50 e 60 (Figura 9B); enquanto para o cenário de 2100 esses valores variam de 45 a 55 (Figura 9C). Embora a visualização das distribuições espaciais não tenha demonstrado tantas mudanças (Figura 9), da análise efetuada entre os valores das estações notou-se que em grande parte da região ocorreu aumento maior do *Iamax* entre a situação média atual e o cenário para 2050, e menor aumento entre os cenários de 2050 e 2100.

#### **4.8. Índice de Aridez Mínimo (*Iamin*)**

A Figura 10 exibe a espacialização do índice de aridez mínimo anual para a situação atual e para os cenários de 2050 e 2100. Ao contrário do *Iamax*, o *Iamin* apresenta distribuição espacial diferente nos dois cenários e situação atual. No mapa que descreve a situação atual, cenário médio, tem-se *Iamin* entre 15 e 25, que estende desde o litoral paraibano até Sergipe; também em grande parte do Maranhão e sudoeste da Bahia (Figura 10A). Os menores valores de *Iamin* são encontrados no sul da Bahia (variando entre 5 e 15); enquanto na parte central e norte do NEB são encontrados valores de *Iamin* variando entre 25 a 45. No cenário para 2050 observa-se um aumento no *Iamin* (entre 25 e 50), principalmente na região semi-árida do NEB (Figura 10B). No cenário para 2100 pode-se

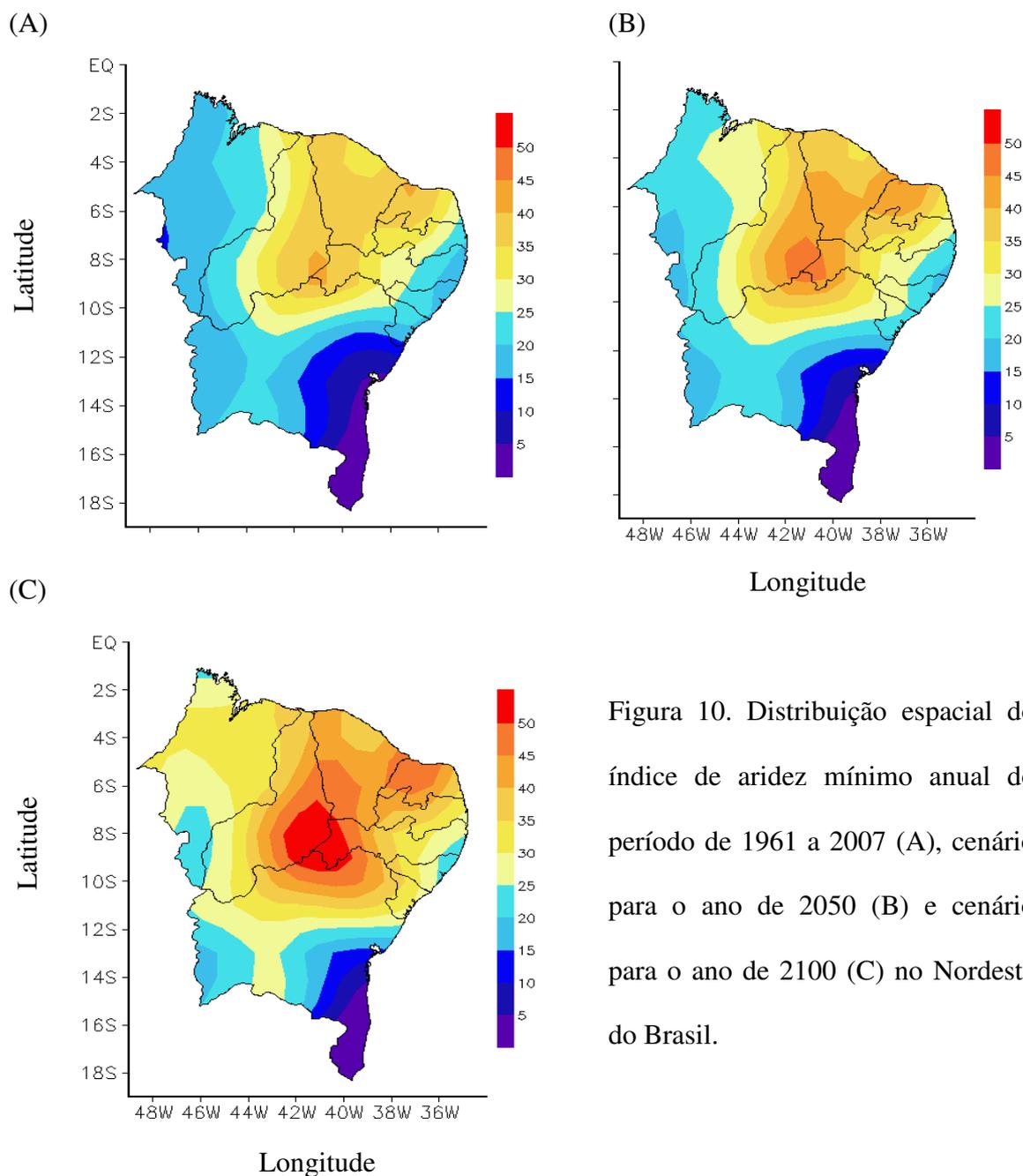


Figura 10. Distribuição espacial do índice de aridez mínimo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

verificar que a região central do NEB apresenta valores de *Iamin* acima de 50 e na região sudoeste e sudeste valores inferiores a 30 (Figura 10C). A estação de Cipó, BA, apresenta o maior aumento de *Iamin* (23,3) entre a situação atual e o cenário para 2050. A maior diferença dos valores de *Iamin* entre os cenários para 2050 e 2100 foi encontrada na estação de Jacobina, BA, (25,8). Por outro lado, as reduções mais acentuadas de *Iamin*

entre a situação atual e o cenário para 2050 foram verificadas em Paulo Afonso, BA, (-13,1) e entre os cenários para 2050 e 2100 em Maceió, AL, (-2,0). A maior diferença observada de *Iamin* entre a situação atual e o cenário para 2100 foi em Cipó, BA, e a maior redução foi na estação de Maceió, AL. Verifica-se, ainda, que ocorreu aumento do *Iamin* entre os dois cenários (2050 e 2100), ressaltando que nos cenários entre 2050 e 2100 ocorreu acréscimo mais acentuado, em torno de 76,4% das estações. Apesar da tendência de aumento, algumas estações apresentaram redução de *Iamin* entre os cenários analisados, especialmente nas estações de Maceió e Palmeiras dos Índios, em Alagoas, e de Correntina, Itaberaba e Vitória da Conquista, na Bahia, Sobral, no Ceará e Aracaju, SE.

#### **4.9. Índice de Aridez Médio (*Iamed*)**

As distribuições espaciais do índice de aridez médio anual (*Iamed*) no Nordeste do Brasil, situação atual e para os cenários de 2050 e 2100, são evidenciadas na Figura 11. É verificado aumento no *Iamed* entre a situação atual e os cenários estudados (Figura 11A, B e C). Pode-se, ainda, observar que em grande parte da região têm-se valores de *Iamed* entre 30 e 60, com exceção do extremo norte do Estado do Maranhão, onde se encontram valores entre 20 e 25; no sul da Bahia são encontrados os menores valores desse índice tanto para a situação atual quanto para os cenários estudados (Figura 11A). De acordo com o cenário de 2050 (Figura 11B), pode-se destacar o aumento nos valores do *Iamed*, até mesmo acima 60, na região do sertão nordestino. Na Figura 11C, que corresponde ao cenário para 2100, pode-se observar que a região central do NEB exhibe valores de *Iamed* acima de 60; em outras partes da região, valores entre 30 e 60. A região sul do Estado da Bahia apresenta os menores valores de *Iamed*. A maior diferença entre os valores de *Iamed* da situação atual na região e o cenário para 2050 encontra-se em Caracol, PI (10,7) e entre os cenários de 2050 e 2100 em Campina Grande, PB, (9,8). A estação de Campina Grande,

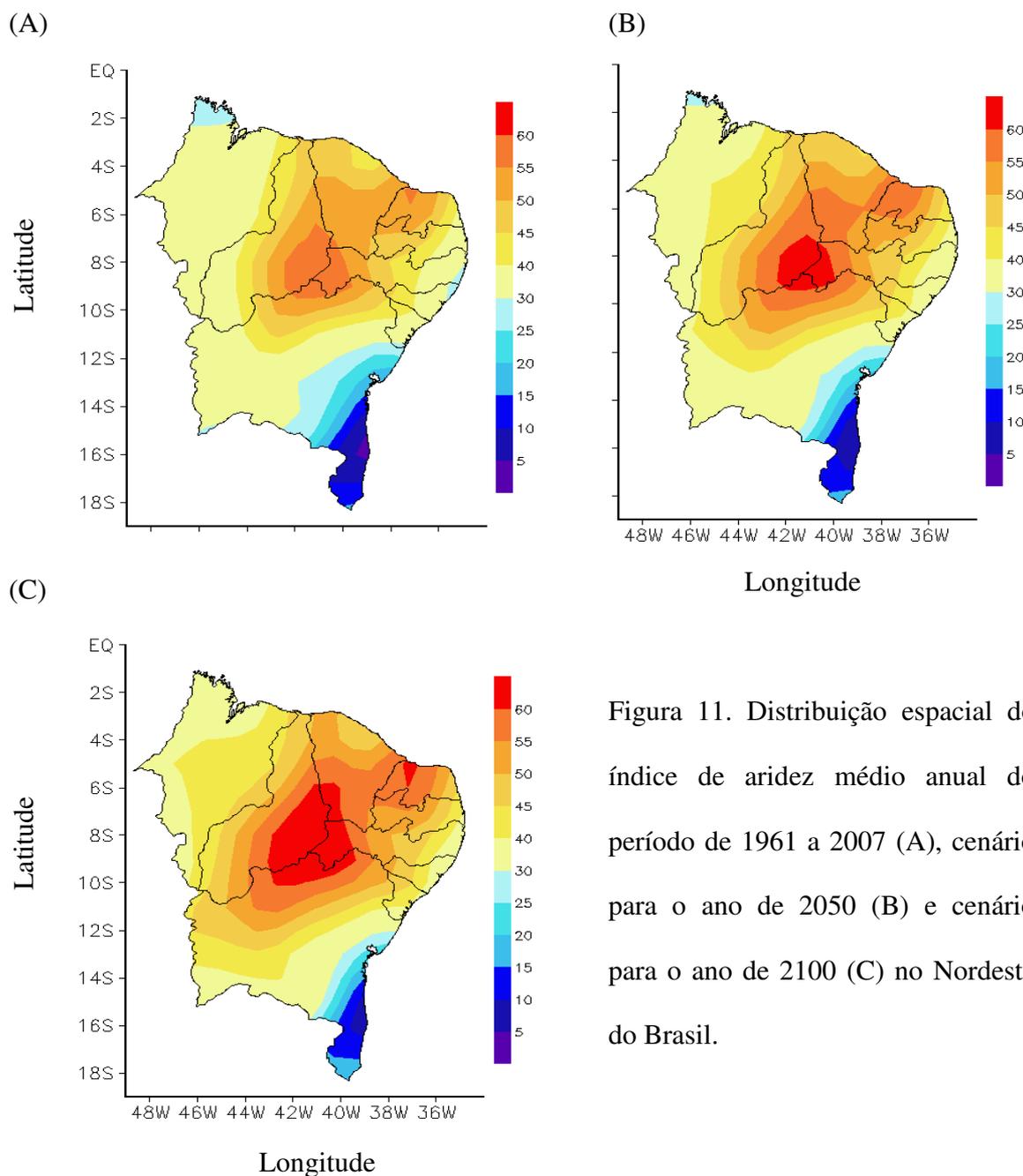


Figura 11. Distribuição espacial do índice de aridez médio anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

PB, apresentou a maior diferença entre os valores de *Iamed* (19,7) e entre a média da situação atual e o cenário para 2100. Também são observadas, porém em menor escala, reduções do *Iamed* em Itiruçu, BA, e Maceió, AL, em todos os cenários. Em 64% das estações ocorreu maior aumento do *Iamed* entre a situação atual e o cenário para 2050. Em 28 % delas o maior aumento ocorreu entre os cenários de 2050 e 2100.

#### 4.10. Índice de Umidade Máxima (*I<sub>max</sub>*)

A Figura 12 exibe os mapas da distribuição espacial do índice de umidade máxima anual (*I<sub>max</sub>*) para o NEB. Analisando a situação atual e dos dois cenários, verifica-se que ocorreu redução no *I<sub>max</sub>* em toda região. Na condição atual, podem-se encontrar valores,

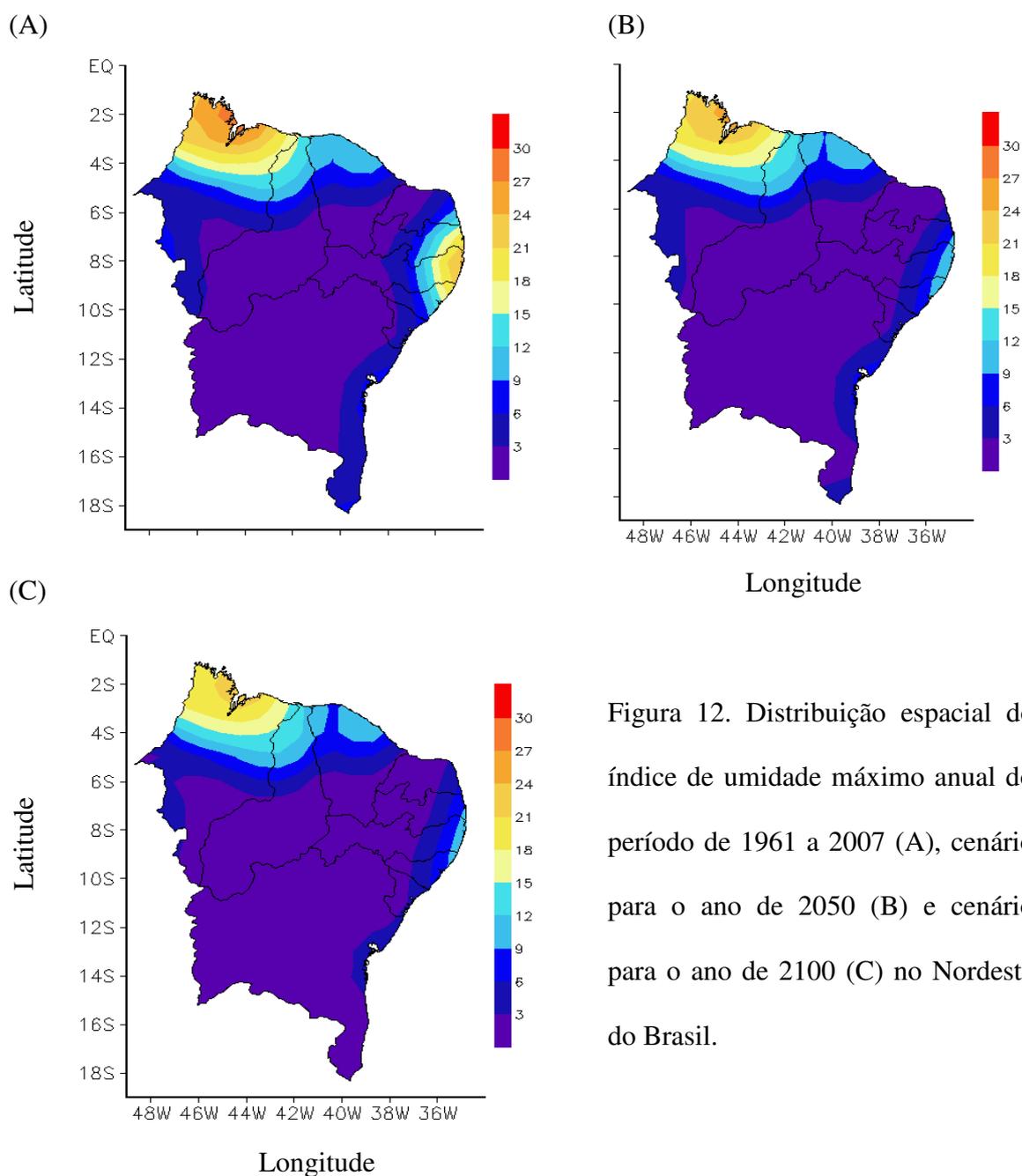


Figura 12. Distribuição espacial do índice de umidade máximo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

de *Iumax* entre 15 e 30, ao norte do Estado do Maranhão. No litoral do Ceará são encontrados valores de *Iumax* entre 9 e 12; enquanto que no oeste do Maranhão e sul da Bahia são encontrados valores variando de 3 a 6; já do Agreste até o Litoral da Paraíba, Pernambuco e Alagoas esses valores variam entre 9 e 24. Na parte semi-árida do Nordeste são encontrados, como esperados, os menores valores de *Iumax*, em torno de 0 a 3 (Figura 12A). No cenário para 2050 há decréscimo no *Iumax*, em direção ao litoral da região (Paraíba, Pernambuco e Alagoas), assim como no norte do Maranhão e sul da Bahia (Figura 12B). No cenário para 2100 verifica-se que o *Iumax* continua com tendências decrescentes em toda área do Nordeste do Brasil (Figura 12C), a exemplo do cenário para 2050, onde o Estado da Bahia, em quase sua totalidade, apresenta valores de *Iumax* inferiores a 3. A estação de Maceió, em Alagoas, foi a que obteve a redução mais acentuada do *Iumax*, entre o período atual e o cenário para 2050 (-77,3); entre os cenários de 2050 e 2100, destaca-se a estação de Salvador, na Bahia, com redução de -7,0.

#### **4.11. Índice de Umidade Mínima (*Iumin*)**

A Figura 13 exibe os mapas de distribuição espacial do índice de umidade mínimo anual (*Iumin*) para o NEB, é verificada a maior diferença entre cada um dos cenários estudados. Na situação média atual (Figura 13A) pode-se identificar valores de *Iumin* inferiores a 10, compreendendo a região norte da Bahia, sudeste do Piauí e oeste de Pernambuco. No litoral leste do NEB, encontram-se valores de *Iumin* variando entre 30 e 60. Na parte oeste da Bahia, sudoeste do Maranhão, norte do Ceará e sul do Piauí são encontrados valores entre 30 e 50. Na região norte do Maranhão há acréscimo de *Iumin* em direção ao litoral, de 70 a 90, e no sul da Bahia encontram-se valores de *Iumin* entre 50 e 80. No cenário para 2050 (Figura 13B) em comparação com a situação atual, são encontrados valores entre 50 e 60 na área central e sul da Bahia. Já na região oeste e norte

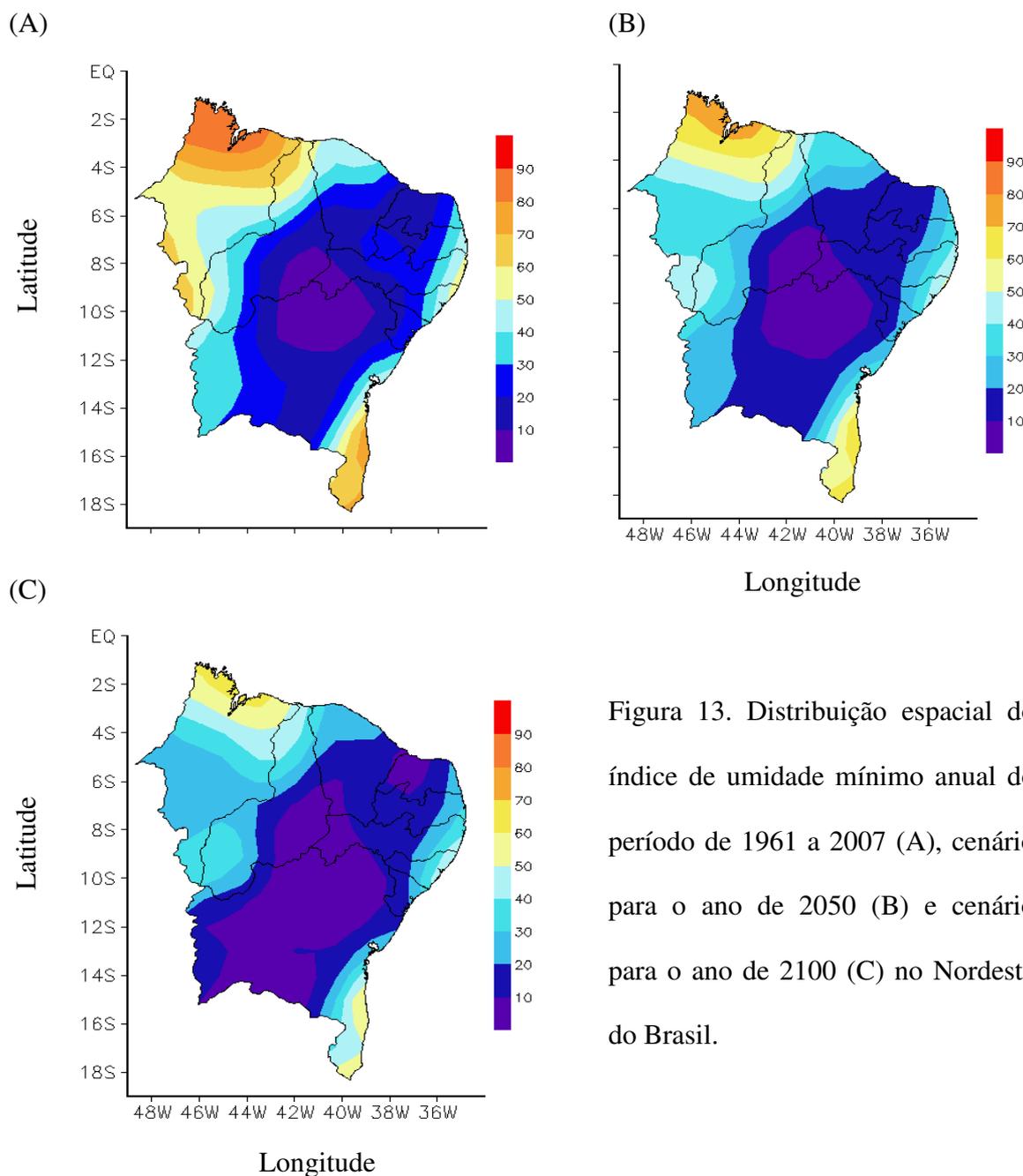


Figura 13. Distribuição espacial do índice de umidade mínimo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

do Maranhão os valores de *Iumin* estão em torno de 30 e 40 e, 50 e 80, respectivamente. No cenário para 2100 (Figura 13C) destaca-se a área central do semi-árido do Nordeste, com valores de *Iumin* em torno de 0 e 10 e entre 20 e 40 na parte leste da região. Na parte mais ao norte do Estado do Maranhão são observados valores de *Iumin* entre 50 e 70. A

estação de Maceió, Al, apresentou o maior aumento no *Iumin* (24,5) entre o período atual e cenário para 2050 e entre os cenários de 2050 e 2100 (26,5). As maiores reduções no *Iumin* foram verificadas nas estações de Carolina, MA, (-40,4), entre o período atual e o cenário para 2050; e de Guaramiranga, CE, (-37,5) entre os cenários de 2050 e 2100.

#### **4.12. Índice de Umidade Média (*Iumed*)**

A Figura 14 exibe a distribuição espacial do índice de umidade média anual (*Iumed*) para a situação atual no Nordeste do Brasil e os cenários estudados. Verifica-se redução no *Iumed* entre os cenários analisados, tal como para *Iumax* e *Iumin*. Analisando a situação atual do *Iumed* (Figura 14A) podem-se destacar duas regiões que apresentam os maiores valores, o extremo norte do Estado do Maranhão, com valores variando entre 40 e 50, e o sul do Estado da Bahia, com valores variando de 40 a 70. Esses resultados concordam com aqueles observados para *Iamed* nessas áreas (Figura 11A). Analisando os cenários para 2050 (Figura 14B) e para 2100 (Figura 14C) verifica-se que não houve tantas diferenças nos valores do *Iumed*. Nas regiões central e sul do Estado do Maranhão esses valores variaram entre 0 e 10; e no litoral leste do Nordeste os valores de *Iumed* ficaram entre 10 e 20. A estação de Maceió, em Alagoas, foi à única que apresentou acréscimo de *Iumed* (6,0), entre o período atual e cenário para 2050 e entre os cenários de 2050 e 2100 (7,2). Por outro lado, as estações que apresentaram os maiores decréscimos de *Iumed* foram Carolina, no Maranhão, entre o período atual e cenário de 2050 (-14,0) e Carinhanha, na Bahia, entre os cenários de 2050 e 2100 (-9,4).

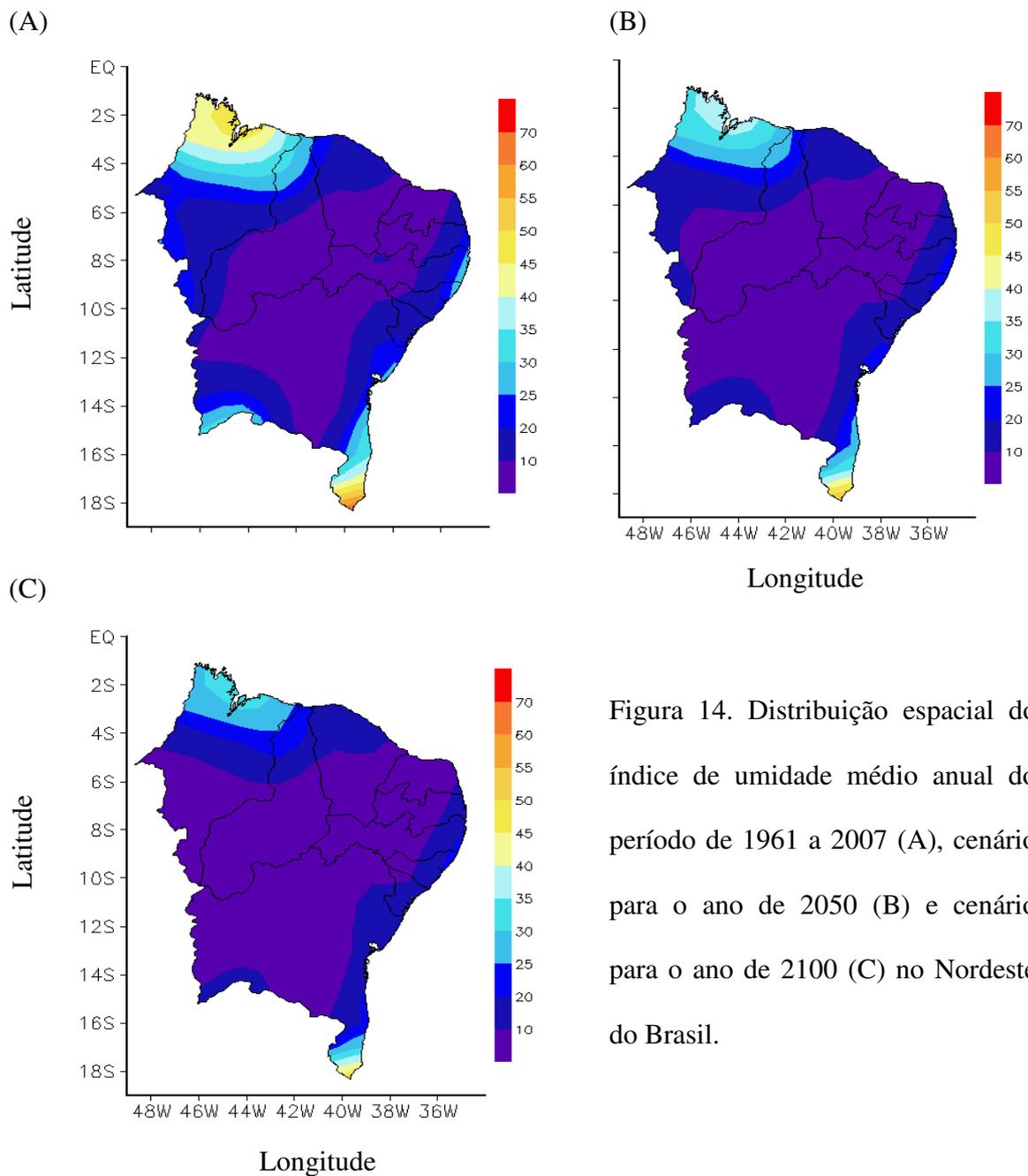


Figura 14. Distribuição espacial do índice de umidade médio anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

#### 4.13. Índice Hídrico Máximo ( $I_{hmax}$ )

Os mapas de índices hídricos máximos anuais ( $I_{hmax}$ ) correspondentes ao período atual e para os cenários de 2050 e 2100 são apresentados na Figura 15. Verifica-se que os maiores valores de  $I_{hmax}$  são encontrados na parte norte do Estado do Maranhão (-5 a 0)

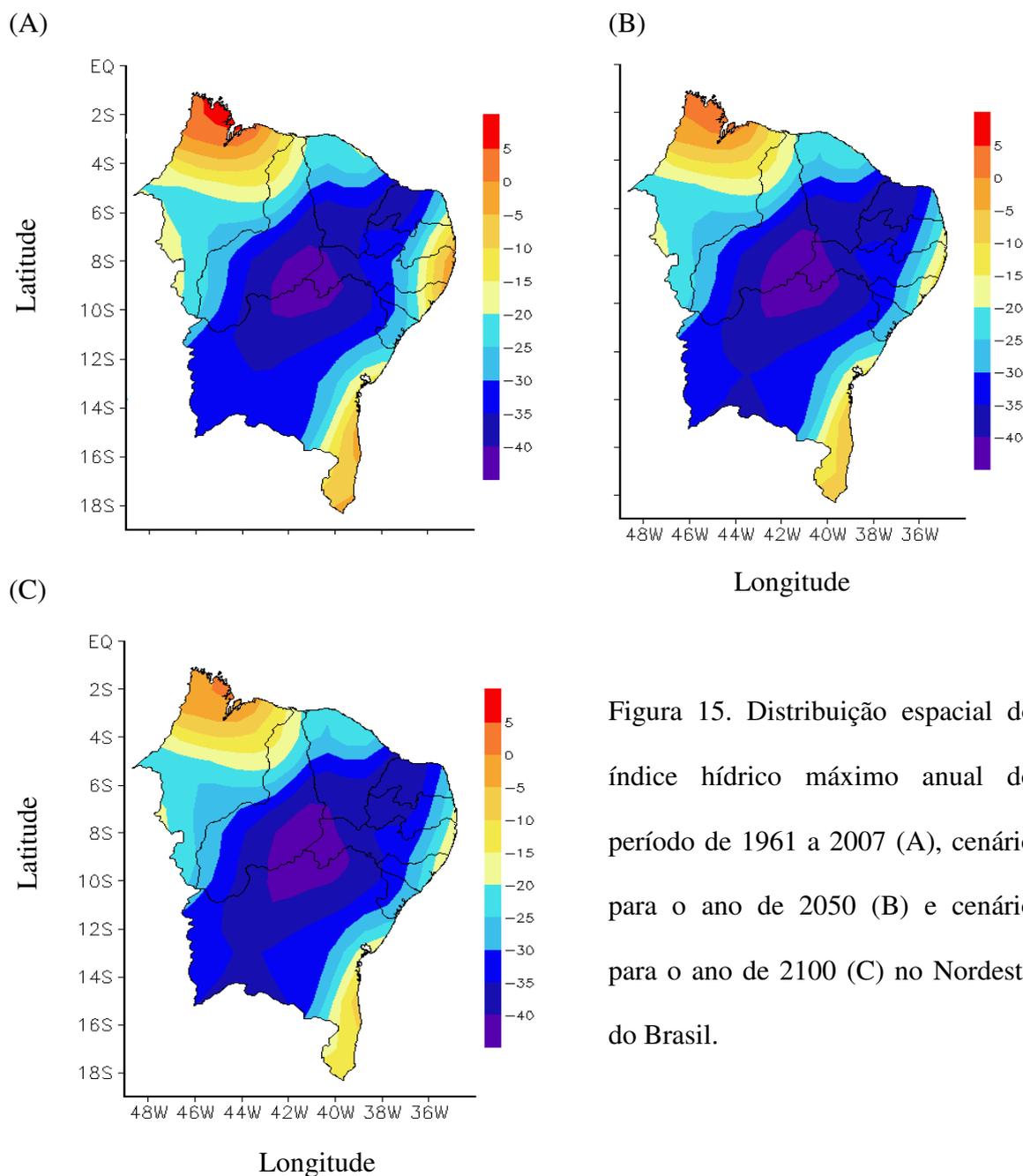


Figura 15. Distribuição espacial do índice hídrico máximo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

para a situação atual nota-se também uma faixa de  $I_{hmax}$  acima de 5 no Estado do Maranhão (Figura 15A). Na parte sul da região Nordeste (Estado da Bahia), também se encontram valores de  $I_{hmax}$  entre -20 a -5 para a situação atual e em todos os cenários estudados, caracterizando o tipo clima seco e sub-úmido ( $C_1$ ). Na situação atual encontram-se valores em torno de -20 a 0, na parte leste da região do NEB, que

corresponde ao tipo climático C<sub>1</sub> (seco e sub-úmido) do Litoral da Paraíba, Pernambuco e Alagoas (Figura 15A). Esse tipo de clima não permanece nos cenários estudados, pois são observados valores entre -25 e -15 no cenário para 2050 (Figura 15B) e chega a valores entre -30 e -15 no cenário para 2100 (Figura 15C). No interior do NEB (Sertão) são encontrados valores mais baixos de *Ihmax*, em torno de -40 a -30 na situação atual e para os cenários de 2050 e 2100 (Figura 15A, B e C). Também é possível notar um núcleo no centro da região, com valores inferiores a -40, na situação atual e nos cenários para 2050 e 2100, caracterizando um tipo de clima árido (E) e enfatizando a ampliação dessa área nos cenários. A estação de Guaramiranga, no Ceará, apresentou aumento no *Ihmax* de 1,3, já em Palmeiras dos Índios, em Alagoas, houve redução de -78,0 entre a situação atual e cenário para 2050. Na estação de Natal, no Rio Grande do Norte, verificou-se aumento de 2,8; e redução em Salvador, na Bahia, de 5,7 no *Ihmax* entre os cenários de 2050 e 2100. O período compreendido entre a situação atual e o cenário para 2050 foi o que sofreu o maior aumento na redução de *Ihmax* (66,2% das estações), já entre os cenários de 2050 e 2100, apresenta apenas 11,2% das estações em comparação com o primeiro período.

#### **4.14. Índice Hídrico Mínimo (*Ihmin*)**

Os mapas de índices hídricos mínimos anuais (*Ihmin*) são apresentados na Figura 16. Analisando os três cenários para o *Ihmin* é possível notar aumento na deficiência hídrica em grande parte da região NEB. No mapa que exhibe a situação atual média do *Ihmin* (Figura 16A) verifica-se que nas regiões norte do Maranhão e sul da Bahia são encontrados valores entre 60 e 70, caracterizando tipos climáticos úmidos (B<sub>3</sub>). Na parte oeste da Bahia, litoral do Ceará e nos litorais dos Estados de Alagoas, Pernambuco e Paraíba verificam-se valores de *Ihmin* entre 20 e 40, que de acordo com a classificação

climática de Thornthwate (1948) são áreas com clima do tipo B<sub>1</sub> (úmida). Já na região oeste do Maranhão são encontrados valores de *Ihmin* entre 40 e 50, pertencentes também ao tipo de clima úmido (B<sub>2</sub>). No NEB, em geral, verificam-se valores de *Ihmin* entre -30 a 10, com um núcleo no semi-árido entre -30 e -20. Nesse particular, destaca-se o Estado do Piauí, onde é possível encontrar os mesmos tipos de clima, em comparação com o cenário chuvoso estudado por Andrade Junior et al. (2005). No cenário para 2050 (Figura 16B) é verificado que apenas uma parte do sul da Bahia continua com o mesmo tipo de clima (B<sub>3</sub>). Já as outras localidades mencionadas na situação atual (Figura 16A), mudam de tipo de clima de B<sub>3</sub> para B<sub>2</sub> (norte do Maranhão), de B<sub>2</sub> para B<sub>1</sub> (oeste do Maranhão), de B<sub>1</sub> para C<sub>2</sub> (oeste da Bahia, parte do litoral do Ceará e nos litorais dos Estados de Alagoas, Pernambuco e Paraíba), caracterizando clima sub-úmido. No cenário para 2100 (Figura 16C) observa-se o aumento do déficit hídrico em quase todo o NEB, que caracteriza os climas do tipo: semi-árido (D), na parte central da região e expandindo-se para o Ceará e Rio Grande do Norte; seco sub-úmido (C<sub>1</sub>), com valores entre 0 e -20 (compreendendo o Estado de Sergipe, parte norte do Ceará, e do Agreste do Rio Grande do Norte até Alagoas e região centro-sudoeste da Bahia), Sub-úmido (oeste do Maranhão e Piauí); e climas úmidos no sul da Bahia e norte do Maranhão. A estação de Maceió, AL, apresentou o maior acréscimo de *Ihmin*, 26,3 (da situação média atual para o cenário de 2050) e 27,7 (do cenário de 2050 para o de 2100). Por outro lado, as maiores reduções foram encontradas nas estações de Carolina, MA, entre a situação atual do *Ihmin* médio para 2050 (-44.6) e de Garamiranga, CE, entre o cenário de 2050 para o cenário de 2100 (-40.5). Ressalta-se que ocorreu maior aumento na deficiência hídrica no *Ihmin* (em 70,7% das estações) para o período compreendido entre o cenário de 2050 e o de 2100.

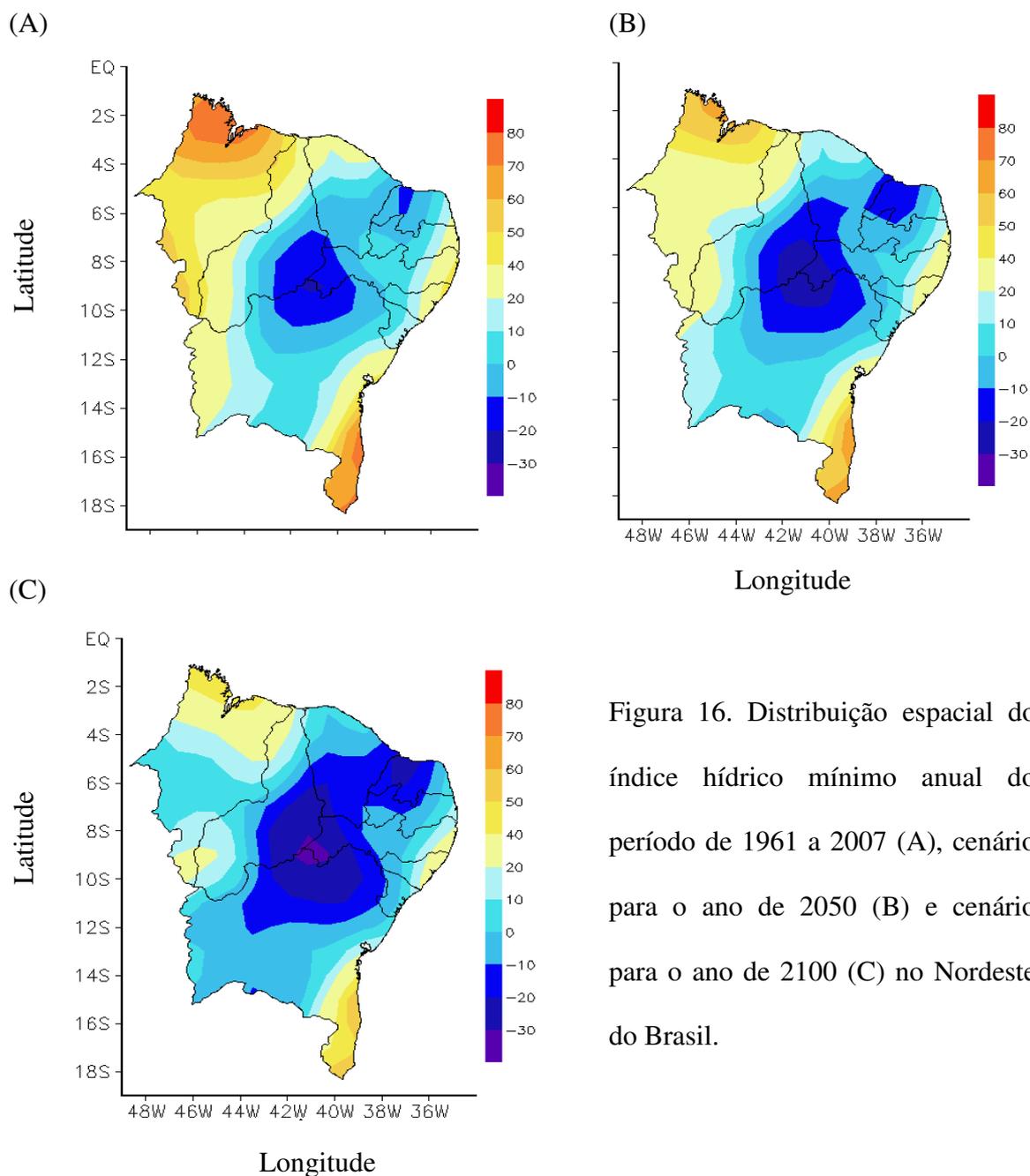


Figura 16. Distribuição espacial do índice hídrico mínimo anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

#### 4.15. Índice Hídrico Médio (*Ihmed*)

Os mapas de índices hídricos médios anuais (*Ihmed*) para a situação atual e para os cenários estudados são exibidos na Figura 17. Tal como para *Ihmax* e *Ihmin*, também há diminuição de *Ihmed*, indicando aumento na deficiência hídrica no NEB. São verificados

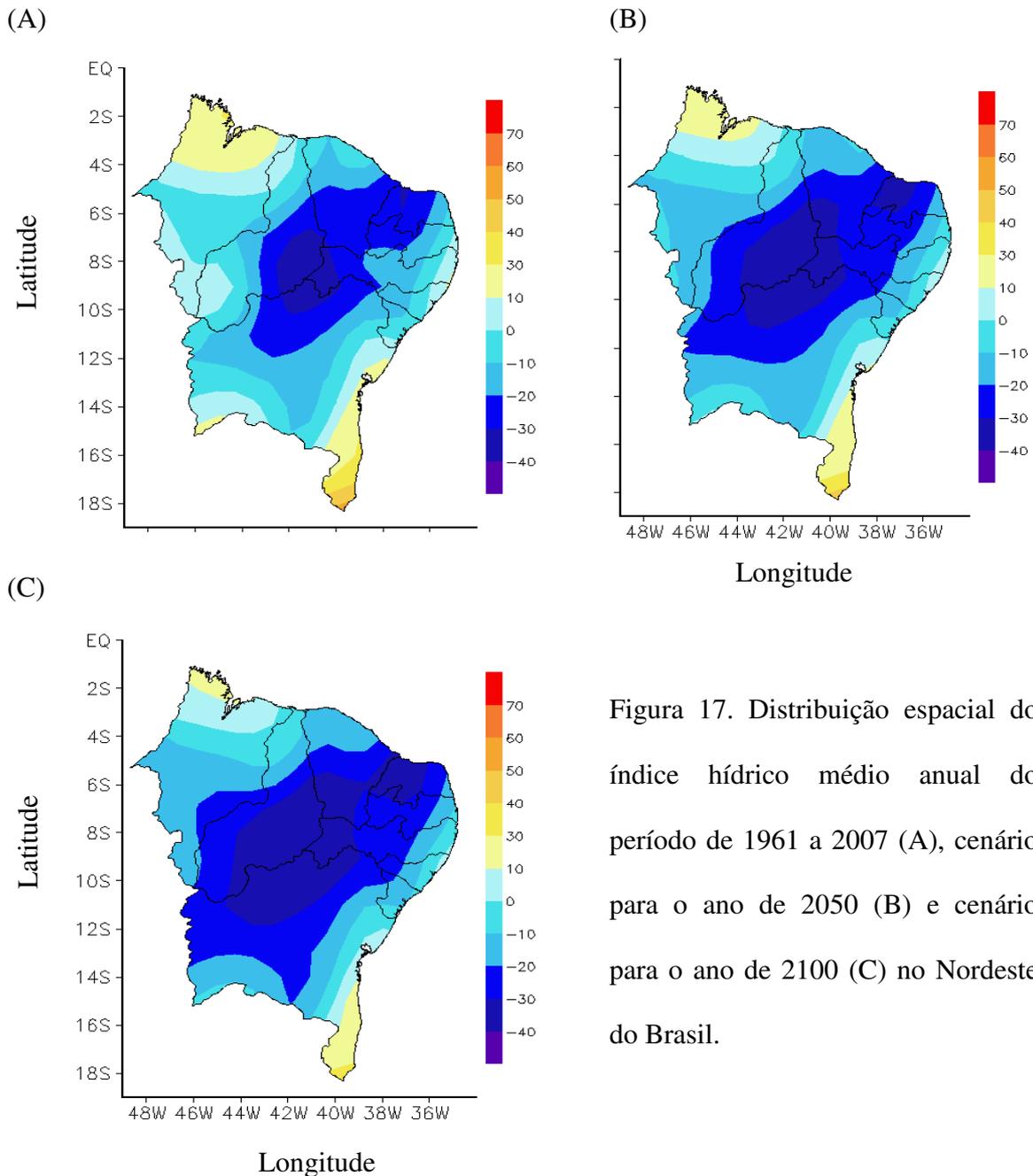


Figura 17. Distribuição espacial do índice hídrico médio anual do período de 1961 a 2007 (A), cenário para o ano de 2050 (B) e cenário para o ano de 2100 (C) no Nordeste do Brasil.

tipos climáticos sub-úmido ( $C_2$ ), seco sub-úmido ( $C_1$ ) e semi-áridos (D) na situação atual e para os cenários de 2050 e 2100 (Figura 17), sendo que para o cenário de 2100 ocorre maior expansão do *Ihmed*, atingindo até o sudeste do Estado do Maranhão. Apenas para a situação atual é possível encontrar o tipo de clima úmido ( $B_1$ ), precisamente no extremo sul da Bahia (Figura 17A). A estação de Maceió, Al, apresentou as maiores diferenças no

aumento do *Ihmed*,<sup>(7,8)</sup> para o período compreendido entre a situação atual e o cenário para 2050; e entre os cenários de 2050 e 2100, *Ihmed* de 9,0. Entre a situação atual e o cenário para 2050, a estação de Bom Jesus do Piauí, no Piauí, foi a que apresentou a maior redução no valor de *Ihmed* (-54,1); enquanto entre os cenários de 2050 e 2100, a estação de Carinhanha, na Bahia apresentou redução de -10,6 no *Ihmed*. O período compreendido entre a situação atual e o cenário para 2050 foi o ocorreu à maior redução no *Ihmed* (em 75,2% das estações); já entre os cenários de 2050 e 2100 houve maior aumento de déficit hídrico em 20,2% das estações.

## **5. CONCLUSÕES**

O presente trabalho analisou as tendências das séries temporais da temperatura do ar do Nordeste do Brasil (NEB) com vistas à obtenção de cenários climáticos para os anos de 2050 e 2100 na região. Foram encontradas tendências de aumento nas temperaturas do ar máximas, mínimas e médias para todo o NEB. As maiores taxas de aumentos das temperaturas máximas e médias anuais foram encontradas entre a situação atual e o cenário para 2050; já entre os cenários de 2050 e 2100 apresentaram reduções. A temperatura mínima anual apresentou maior aumento em suas taxas anuais no período compreendido entre os cenários de 2050 e 2100. Também foi verificado que as temperaturas mínimas apresentaram maiores amplitudes e variações do que as temperaturas médias e máximas. Como a evapotranspiração potencial é dependente da temperatura do ar, também foram encontradas grandes taxas de ETP em toda região estudada, principalmente nas partes central, oeste e norte, para os cenários analisados. O comportamento dos índices de aridez indicou aumento e os índices de umidade e hídrico indicaram redução nos cenários estudados, em toda a região do Nordeste do Brasil, principalmente na parte semi-árida, onde foi verificado aumento razoável sua área para os cenários avaliados.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J.M.D.; KAYANO, M.T. Estudos Preliminares da Precipitação no Sul do Ceará durante a Pré-Estação das Chuvas. *Climanálise*, v.6, p.42-50, 1991.

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; BARROS, A.H.C.; SILVA, C.O.; GOMES, A.A.N. Classificação climática e regionalização do semi-árido do Estado do Piauí sob cenários pluviométricos distintos. *Revista Ciência Agronômica*, Ceará, v.36, n.2, p.143-151, 2005.

ARNELL, N.W. Climate change and global water resources. *Global Environmental Change*, v.9, Supplement 1, p.S31-S49, 1999.

AZEVEDO, J.R.G. Water resources and global warming for the São Francisco River in Brazil. Southampton: University of Southampton, 1999, 193pp. Ph.D. Thesis.

AZIZ, O.I.A.; BURN, D.H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin. *Journal of Hydrology*, v.319, p.282 - 294, 2006.

BACK, Á.J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, n.5, p.717-726, 2001.

BAKKENES, M.; EICKHOUT, B.; ALKEMADE, R. Impacts of different climate stabilisation scenarios on plant species in Europe. *Global Environmental Change*, v.16, p.19 - 28, 2006.

- BARNES, S.L. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *Journal of Applied Meteorology*, v.3, p.396 - 409, 1964.
- BRAGANZA, K.; KAROLY, D.J.; HIRST, A.C.; MANN, M.E.; STOTT, P.; STOUFFER, R.J.; TETT, S.F.B. Simple indices of global climate variability and change: Part I - variability and correlation structure, *Climate Dynamics*, v.20, n.5, p.491-502, 2003.
- BURN, D.H.; HESCH, N. Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology*, v.336, n.1-2, p.61 - 73, 2007.
- CHAN, S.C. Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1990, 89p. Dissertação de Mestrado.
- CUNHA, L.V.; OLIVEIRA, R.; NUNES, V.B. Impactos das Alterações Climáticas sobre os Recursos Hídricos de Portugal. *Water Resources*, in Santos Forbes, e Moita, v.137, p.201-222, 2002.
- ELAGIB, N.A.; ABDU, S.A. Climate variability and aridity in Bahrain. *Journal of Arid Environments*, v.36, p.405 - 419, 1997.
- ELAGIB, N.A.; MANSELL, M.G. Recent trends and anomalies in mean seasonal and annual temperatures over Sudan. *Journal of Arid Environments*, v.45, p.263 - 288, 2000.
- GADGIL, A.; DHORDE, A. Temperature trends in twentieth century at Pune, India. *Atmospheric Environment*, v.39, n.35, p.6550 - 6556, 2005.
- GAN, M.A. Um estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e leste do Brasil. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1982, 2685-TDL/126. Dissertação de Mestrado.
- HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, v.103, p.77 - 92, 1977.

HULME, M.; MITCHELL, J.; INGRAM, W.; LOWE, J.; JOHNS, T.; NEW, M.; VINER, D. Climate change scenarios for global impacts studies. *Global Environmental Change*, v.9, Supplement 1, p.S3 - S19, 1999.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 1990) *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment-Report of IPCC Working Group*. Cambridge Univ. Press.1990.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 2001a) *Climate Change 2001: The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report*. Cambridge Univ. Press. 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 2001b) *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability- Contribution of Working Group 2 to the IPCC Third Assessment Report*. Cambridge Univ. Press. 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 2007) *Mudanças do Clima 2007: a Base das Ciências Físicas, S mario para os Formuladores de Políticas*, IPCC Paris, fevereiro de 2007.

KARACA, M.; TAYANÇ, M.; TOROS, H. Effects of urbanization on climate of Istanbul and Ankara. *Atmospheric Environment*, v.29, n.23, p.3411 - 3421, 1995.

KARL, T.R.; KNIGHT, R.W.; EASTERLING, D.R.; QUAYLE, R.G. Indices of climate change for the United States. *American Meteorological Society Bulletin*, Boston, v.77, n.2, p.279-292, 1996.

KENDALL, M.G. *Rank Correlation Methods*. London: Charles Griffin, 1975, 120 p.

KHALED H. H.; RAO, A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, v.204, n.1-4, p.182-196, 1998.

KOMATSU, E.; FUKUSHIMA, T.; HARASAWA, H. A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality. *Ecological Modelling*, v.209, p.351–366, 2007.

KOUSKY, V.E.; CHU, P.S. Flutuations in annual rainfall for Northeast Brazil. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v.56, p.457 - 465, 1978.

LACERDA, M.A.D.; LACERDA, R.D. Planos de combate a desertificação no nordeste brasileiro. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.4, n.1, 2004.

LIMA, R.A.F.A. Diagnósticos de Tendências de Mudanças Climáticas no Nordeste Setentrional. Campina Grande: Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA, 2008. 64p. Dissertação de Mestrado.

LOAICIGA, H.A.; VALDES, J.B.; VOGEL, R.; GARVEY, J.; SCHWARZ, H. Global warming and the hydrologic cycle. *Journal of Hydrology*, v.174, p.83 - 127, 1996.

MA, Z.; KANG, S.; ZHANG, L.; TONG, L.; SU, X. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China. *Journal of Hydrology*, v.352, p.239 - 249, 2008.

MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, v.13, p.245 - 259, 1945.

MARENGO, J.A. & VALVERDE, M.C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência*, Campinas, Ed. 8, p.5-28, 2007.

MARENGO, J.A. Caracterização do clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil e na América do Sul para o Século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC. CPTEC/INPE São Paulo, Brasil, n. 01, MMA, 2007.

MARENGO, J.A. Possíveis impactos da mudança de clima no Nordeste. <http://www.algosobre.com.br/atualidades/possiveis-impactos-da-mudanca-de-clima-no-nordeste.html>. Acessado em maio de 2008.

MARENGO, J.A.; SOARES, W.A. Impactos das mudanças climáticas no Brasil e possíveis futuros cenários climáticos: síntese do terceiro relatório do IPCC. In: Tucci, C.E.; Clima e Recursos Hídricos no Brasil. Associação Brasileira de Recursos Hídricos FBMC/ANA. Porto Alegre, Brasil, v.9, p.209 - 239, 2003.

MEDEIROS, S.S.; CECÍLIO, R.A.; MELO JÚNIOR, J.C.F.; SILVA JUNIOR, J.L.C. Estimativa e espacialização das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas na Região Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.9, n.2, p.247 - 255, 2005.

MODARRES R.; SILVA, V.P.R. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. Journal of Arid Environments, v.70, n.2, p.344 - 355, 2007.

MOLION, L.C.B. Aquecimento global: fato ou ficção. Ação Ambiental, v.4, n.18, p.19-21, 2001.

MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma Revisão das chuvas no Nordeste brasileiro, Revista Brasileira de Meteorologia- SBMET, v.17, n.1, p.1-10, 2002.

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, p.13-27, 2002.

NOBRE, C.A. Mudanças Climáticas Globais: Possíveis Impactos nos Ecossistemas Brasileiros, Parcerias Estratégicas, n. 12, setembro, 2001.

NOBRE, C.A.; LAPOLA, D.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L.F.; CARDOSO, M.; OYAMA, M. Mudanças Climáticas e possíveis alterações nos Biomas da América do Sul. 6º Relatório IPCC CPTEC/INPE, IAE/CTA, São Paulo, Brasil, 2007.

NOBRE, C.A.; MOLION, L.C.B. The Climatology of drought and drought prediction. The Impact of Variations on Agriculture, v.2, p.305 - 323, 1988.

OLESEN, J.E.; BINDI, M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, v.16, n.4, p.239-262, 2002.

OMETTO, J.C. *Bioclimatologia Vegetal*. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres Ltda., 1981. Cap.18, p.396-397.

PIMENTA, M.T.; SANTOS, M.J.; RODRIGUES, R. A. Susceptibilidade à Desertificação. *Revista Florestal*, v.11, n.1, p.27 - 33, 1998.

PINTO, H.S.; ZULLO JR, J.; ASSAD, E.D.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R.; CORAL, G.; ÁVILA, A.M. H. Zoneamento de Riscos Climáticos Para a Cafeicultura do Estado de São Paulo. In: XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia e III Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia, 2001, Fortaleza. *Anais do XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia e III Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia*. Santa Maria, RS: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, v.1, p.141 - 142, 2001.

SANTOS, C.A.C. Estimativas e Tendências de Índices de Detecção de Mudanças Climáticas com Base na Precipitação Diária no Rio Grande do Norte e na Paraíba. Campina Grande: UFCG, Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA, 2006. 115p. Dissertação de Mestrado.

SILVA, A.P.L.M. Mudanças climáticas urbanas. Campina Grande: UFPB, Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA - CMM TD, n.3, 1998. Dissertação de Mestrado.

SILVA, V.P.R. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, v.58, n.4, p.575 - 596, 2004.

SILVA, V.P.R.; BELO FILHO, A.F.; SILVA, B.B.; CAMPOS, J.H.B.C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa a da evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.4, p.547 - 553, 2005.

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.

SILVA, V.P.R.; CORREIA, A.A.; COELHO, M.S. Análise de tendência das series de precipitação pluvial do Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.2, n.1, p.111-114, 1998.

SIMON, C.; DEFRIES, R.S. Uma Terra, Um Futuro, MAKRON Books, São Paulo, 1992.

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; FERREIRA, M. F.; COSTA, A. C; WOZNIAK, M. A. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.8, n.2, p.11-320, 2000.

SOUSA JÚNIOR, I.F. A influência da urbanização no clima da cidade de Campina Grande - PB. Campina Grande: UFCG, Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA, 2006. 94p. Dissertação de Mestrado.

TAO, F.; YOKOZAWA. M.; XU, Y.; HAYASHI, Y.; ZHANG, Z. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. Agricultural and Forest Meteorology, v.138, p.82 - 92, 2006.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev., v.38, p.55 - 94, 1948.

TODISCO, F.; VERGNI, L. Climatic changes in Central Italy and their potential effects on corn water consumption. Agricultural and forest meteorology, v.148, n.1, p.1 - 11, 2008.

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

YUE, S.; PILON P.; CAVADIAS, G. Corrigendum to “Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series” [J. Hydrol. 259 (2002) 254–271] Journal of Hydrology, v.264, n.1 - 4, p.262 - 263, 2002.

YUE, S.; PILON P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. Journal of Hydrology, v.259, n.1 - 4, p.254 - 271, 2002.

**ANEXOS I.** Relação das estações meteorológicas utilizadas no estudo

	<b>Código</b>	<b>Estação</b>	<b>Latitude (S)</b>	<b>Longitude (W)</b>	<b>Altitude (m)</b>
1	82198	TURIAÇU	-1°34'	-45°22'	44,06
2	82280	SÃO LUIS	-2°32'	-44°13'	50,86
3	82376	ZÉ DOCA	-3°16'	-45°39'	47,28
4	82382	CHAPADINHA	-3°44'	-43°21'	103,5
5	82460	BACABAL	-4°13'	-44°46'	25,07
6	82476	CAXIAS	-4°52'	-43°21'	103,56
7	82564	IMPERATRIZ	-5°32'	-47°29'	123,3
8	82568	GRAJAÚ	-5°49'	-46°28'	163,07
9	82571	BARRA DO CORDA	-5°30'	-45°14'	153
10	82676	COLINAS	-6°02'	-44°14'	179,75
11	82765	CAROLINA	-7°20'	-47°28'	192,83
12	82768	BALSAS	-7°32'	-46°02'	259,38
13	82970	ALTO PARNAIBA	-9°06'	-45°56'	285,05
14	82287	PARNAIBA	-3°05'	-41°46'	79,5
15	82480	PIRIPIRI	-4°16'	-41°47'	161,12
16	82578	TERESINA	-5°05'	-42°49'	74,36
17	82678	FLORIANO	-6°46'	-43°01'	123,27
18	82780	PICOS	-7°02'	-41°29'	207,93
19	82879	SÃO JOÃO DO PIAUÍ	-8°21'	-42°15'	235,33
20	82882	PAULISTANA	-8°08'	-41°08'	374,22
21	82975	BOM JESUS DO PIAUÍ	-9°06'	-44°07'	331,74
22	82976	CARACOL	-9°17'	-43°20'	522,77
23	82294	ACARAU	-2°53'	-40°08'	16,5
24	82392	SOBRAL	-3°44'	-40°20'	109,62
25	82397	FORTALEZA	-3°45'	-38°33'	26,45
26	82487	GUARAMIRANGA	-4°17'	-39°00'	870,67
27	82493	JAGUARUANA	-4°47'	-37°46'	11,71
28	82583	CRATEUS	-5°10'	-40°40'	296,82
29	82586	QUIXERAMOBIM	-5°10'	-39°17'	79,5
30	82588	MORADA NOVA	-5°07'	-38°22'	43,62
31	82683	TAUÁ	-6°00'	-40°25'	398,77
32	82686	IGUATÚ	-6°22'	-39°18'	217,67
33	82777	CAMPOS SALES	-7°00'	-40°23'	583,5
34	82784	BARBALHA	-7°19'	-39°18'	409,03
35	82590	APODI	-5°37'	-37°49'	150
36	82591	MOSSORÓ	-5°12'	-37°18'	38
37	82594	MACAU	-5°07'	-36°46'	3,43
38	82596	CEARÁ MIRIM	-5°39'	-35°39'	61,35

Continua

					Continuação
39	82598	NATAL	-5°55'	-35°12'	48,6
40	82691	FLORANIA	-6°07'	-36°49'	324,45
41	82693	CRUZETA	-6°26'	-36°35'	226,46
42	82689	SÃO GONÇALO	-6°45'	-38°13'	233,06
43	82791	PATOS	-7°01'	-37°16'	249,09
44	82792	MONTEIRO	-7°53'	-37°04'	603,66
45	82795	CAMPINA GRANDE	-7°13'	-35°53'	547,56
46	82798	JOÃO PESSOA	-7°06'	-34°52'	7,43
47	82753	OURICURI	-7°54'	-40°03'	459,28
48	82789	TRIUNFO	-7°49'	-38°07'	1105
49	82797	SURUBIM	-7°50'	-35°43'	418,32
50	82886	CABROBO	-8°31'	-39°20'	341,46
51	82890	ARCOVERDE	-8°25'	-37°05'	680,7
52	82893	GARANHUNS	-8°53'	-36°31'	822,76
53	82900	RECIFE	-8°03'	-34°57'	10
54	82983	PETROLINA	-9°22'	-40°28'	370,46
55	82989	ÁGUA BRANCA	-9°17'	-37°54'	605,34
56	82990	PÃO DE AÇÚCAR	-9°45'	-37°26'	19,1
57	82992	PALMEIRAS DOS ÍNDIOS	-9°27'	-36°42'	274,9
58	82994	MACEIÓ	-9°40'	-35°42'	64,5
59	82996	PORTO DE PEDRAS	-9°11'	-35°26'	50,02
60	83097	PRÓPRIA	-10°12'	-36°52'	19,92
61	83096	ARACAJÚ	-10°57'	-37°03'	4,72
62	83195	ITABAIANINHA	-11°07'	-37°49'	208
63	82979	REMANSO	-9°38'	-42°06'	400,51
64	82986	PAULO AFONSO	-9°22'	-38°13'	252,69
65	83076	SANTA RITA DE CÁSSIA	-11°01'	-44°31'	450,3
66	83088	SENHOR DO BONFIM	-10°28'	-40°11'	558,24
67	83090	MONTE SANTO	-10°26'	-39°18'	464,6
68	83179	BARRA	-11°05'	-43°10'	401,58
69	83182	IRECE	-11°18'	-41°52'	747,16
70	83184	MORRO DO CHAPÉU	-11°13'	-41°13'	1003,27
71	83186	JACOBINA	-11°11'	-40°28'	484,74
72	83190	SERRINHA	-11°38'	-38°58'	359,63
73	83192	CIPÓ	-11°05'	-38°31'	145,31
74	83229	SALVADOR	-13°00'	-38°30'	51,41
75	83236	BARREIRAS	-12°09'	-45°00'	439,29
76	83242	LENÇÓIS	-12°34'	-41°23'	438,74
77	83244	ITABERABA	-12°31'	-40°17'	249,89
78	83249	ALAGOINHAS	-12°17'	-38°33'	130,92
79	83286	CORRENTINA	-13°20'	-44°37'	549,47
80	83288	BOM JESUS DA LAPA	-13°16'	-43°25'	439,96

Continua

					Continuação
81	83292	ITUAÇU	-13°49'	-41°18'	531,43
82	83295	ITIRUÇU	-13°21'	-40°07'	755,61
83	83339	CAETITE	-14°04'	-42°29'	882,47
84	83344	VITÓRIA DA CONQUISTA	-14°53'	-40°48'	874,81
85	83348	ILHÉUS	-14°48'	-39°04'	60,21
86	83398	CANAVIEIRAS	-15°40'	-38°57'	3,87
87	83408	CARINHANHA	-14°17'	-43°46'	450,18
88	83446	GUARATINGA	-16°44'	-39°33'	194,67
89	83498	CARAVELAS	-17°44'	-39°15'	2,88