



Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza – CCMN
Instituto de Geociências – IGEO
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia – PPGM

**CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA E MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

WANDERSON LUIZ SILVA

Orientadora: D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Rio de Janeiro (RJ)

Fevereiro/2014

CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

WANDERSON LUIZ SILVA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM – IGEO – CCMN – UFRJ), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências (Área: Meteorologia).

Orientadora: *D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski*

Rio de Janeiro (RJ)

Fevereiro/2014

**CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA E MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

WANDERSON LUIZ SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM – IGEO – CCMN – UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

Examinada por:

D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski (IGEO/UFRJ)

D. Sc. Ana Maria Bueno Nunes (IGEO/UFRJ)

PhD. Chou Sin Chan (CPTEC/INPE)

Rio de Janeiro (RJ)

Fevereiro/2014

Luiz Silva, Wanderson

Caracterização Climatológica e Mudanças Climáticas no Estado do Rio de Janeiro

Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, 2014.
95p. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

"I'm not a dreamer. I'm a dreamchaser."

(Sarah Brightman)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela graça de viver e desfrutar de todos os momentos de alegria, tristeza, oportunidades e dificuldades que a vida me impõe. O amparo divino move as mais puras energias para a expansão da minha fé e de minha sabedoria.

Obrigado a toda minha família pelo amor, carinho e cuidado. Agradeço, especialmente, à minha mãe, Rose, pelo seu resplandecente apoio, desde sua afetuosa atenção até sua deliciosa comida. Agradeço também ao meu pai, Wagner, por seu grande espírito estimulador e também pelo auxílio financeiro. À minha avó, Zilda, pela ternura de sua companhia e também pelas roupas lavadas e passadas. À minha irmã, Cynthia, pelos cômicos instantes que sempre me revigoram. E agradeço igualmente aos demais familiares pela presença e pela influência direta ou indireta no desenvolvimento de minha vida.

Agradeço à minha mega orientadora Claudine que me ajuda a trilhar minha vida acadêmica e científica desde 2009, se mostrando sempre muito atenciosa, empolgada, responsável e trabalhadora. Obrigado por me ensinar a ser pesquisador e pelos chocolates.

Ao Armando Tavares (INMET), a Chou Sin Chan (INPE), a Iracema Cavalcanti (INPE) e ao Ricardo Souza (UFRJ), pelo auxílio e colaboração a alguns elementos que constituem a essência da minha pesquisa de iniciação científica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante o meu Mestrado.

Obrigado a todos os professores do Departamento de Meteorologia da UFRJ pela contribuição aos conhecimentos adquiridos. Um obrigado especial aos professores e pesquisadores Claudine, Gutemberg, Justi, Albuquerque e Manyu.

Aos meus super amigos, Fabio, Suzanna, Bia, Ian, Carlos, Fabricio, Mariana, Leandro, Patricia, Tamires, Juju, Leo, Valmir, Carina, Elisa, Lívia, Luiz Felipe, Felipe, Fernandinha e Taciane, que me acompanham em todos os setores de minha vida. Um obrigado especial também aos veteranos e calouros mais próximos de mim.

À cantora Sarah Brightman, pelas suas sublimes energias, suas músicas e sua formidável voz que sempre me remetem paz e regozijo para realizar minhas tarefas.

Agradeço ainda a todos que fazem parte, de alguma maneira, da minha vida. Tenho certeza que cada um coopera do modo que Deus julga melhor e necessário para minha evolução vital.

SUMÁRIO TEMÁTICO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 <i>Objetivo</i>	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 O Clima no Estado do Rio de Janeiro	4
2.2 Mudanças Climáticas associadas a Extremos Climáticos	7
2.2.1 Detecção de Mudanças Climáticas no Clima Presente	7
2.2.2 Projeções Futuras de Mudanças Climáticas	17
3. DADOS E METODOLOGIA	31
3.1 Dados Observacionais	31
3.2 Modelo Climático Regional Eta-HadCM3	39
3.2.1 Ensemble do Modelo Global HadCM3 (<i>Hadley Centre</i>)	39
3.2.2 Modelo Regional Eta (INPE)	40
3.2.3 Integração do Modelo Climático Regional Eta-HadCM3	41
3.2.4 Dados do Modelo Eta-HadCM3	42
3.3 Indicadores de Extremos Climáticos	43
3.4 Testes Estatísticos	45
4. CLIMATOLOGIA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	48
4.1 Temperatura Mínima	49
4.2 Temperatura Máxima	52
4.3 Precipitação	56

5. INDICADORES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS:	
TENDÊNCIAS OBSERVADAS	62
5.1 Temperatura	62
5.2 Precipitação	67
6. INDICADORES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS:	
PROJEÇÕES FUTURAS	70
6.1 Temperatura	70
6.2 Precipitação	75
7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

RESUMO

Neste estudo elabora-se uma climatologia da temperatura do ar e da precipitação para o Estado do Rio de Janeiro com base em dados do INMET, da ANA e do Sistema Alerta Rio. Além disso, são analisadas as tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos de temperaturas mínima e máxima e de precipitação em 22 estações meteorológicas do INMET e, no caso da chuva, também em 43 estações pluviométricas da ANA. A seguir, as projeções futuras (2041-2070) de tais indicadores são avaliadas utilizando o modelo regional Eta-HadCM3.

Os resultados da climatologia mostram temperaturas mínimas médias oscilando entre 9,5 e 11°C (15,5 e 17°C) no inverno (verão) na Região Serrana. Valores mais elevados ocorrem principalmente no litoral, onde as médias de temperatura mínima variam entre 17 e 18,5°C (21,5 e 23°C) no inverno (verão). Já as menores temperaturas máximas médias oscilam entre 21,5 e 23°C (26 e 27,5°C) no inverno (verão) na Região Serrana. Os valores mais elevados encontram-se na Região Metropolitana e no Norte/Noroeste Fluminense, oscilando entre 26 e 27,5°C (32 e 33,5°C) no inverno (verão). A precipitação anual apresenta máximos em áreas elevadas (cerca de 2000 a 2500 mm ao ano) e mínimos sobre as regiões de baixada e de costa (entre 1200 e 1600 mm ao ano).

Para as tendências observadas em extremos climáticos de temperatura, a Região Metropolitana e a Região Norte e Noroeste do Estado apontam para aumentos estatisticamente significativos da temperatura máxima média (entre +0,01 e +0,04°C/ano) e da temperatura mínima média (entre +0,02 e +0,08°C/ano na Região Metropolitana e entre +0,01 e +0,02°C/ano no Noroeste Fluminense). Quanto à chuva, nota-se que há uma tendência estatisticamente significativa de aumento dos totais pluviométricos anuais nas Baixadas Litorâneas e em parte da Região Metropolitana, com magnitudes oscilando entre +8,0 e +32,0 mm/ano.

As projeções futuras de extremos climáticos de temperatura mostram aumento em relação ao clima presente das noites e dos dias quentes em todo o Estado do Rio de Janeiro, com maior intensidade nas áreas litorâneas (entre +60% e +90%). Quanto à precipitação, a porção sul do Rio de Janeiro apresentará os maiores aumentos das chuvas intensas, compreendendo uma faixa de variação entre +50 e +300 mm. Verifica-se também que as projeções são de aumento dos totais de dias secos consecutivos em todo o Estado.

ABSTRACT

Climatological Characterization and Climate Change in the State of Rio de Janeiro

This study elaborates a climatology of air temperature and precipitation for the State of Rio de Janeiro based on INMET, ANA and Alerta Rio data. Furthermore, it analyzes the trends in indicators of climate extremes of minimum and maximum temperatures and precipitation in 22 meteorological stations of INMET and, in the case of rain, also in 43 rainfall stations of ANA. Next, future projections (2041-2070) of such indicators are evaluated using the regional model Eta-HadCM3.

The results of the climatology show average minimum temperatures ranging between 9.5 and 11°C (15.5 to 17°C) in winter (summer) in the mountainous region. Higher values occur mainly on the coast, where the average minimum temperature ranges between 17 and 18.5°C (21.5 to 23°C) in winter (summer). The lowest average maximum temperatures range between 21.5 and 23°C (26 and 27.5°C) in winter (summer) in the mountainous region. The highest values are in the metropolitan region and in the north and northwest areas, ranging between 26 and 27.5°C (32 and 33.5°C) in winter (summer). The annual rainfall shows maxima in raised areas (about 2000-2500 mm per annum) and minima in the regions of marshland and coastline (between 1200 and 1600 mm per year).

For the observed trends in climate extremes of temperature, metropolitan region and north and northwest areas indicate statistically significant increases in the mean maximum temperature (between +0.01 and +0.04°C/year) and in the average minimum temperature (between +0.02 and +0.08°C/year in the metropolitan area and between +0.01 and +0.02°C/year at northwestern area). As for rain, it is noted that there is a statistically significant upward trend in annual totals rainfall in Baixadas Litoraneas and in part of the metropolitan area, with magnitudes ranging between +8.0 and +32.0 mm/year.

Future projections of climate extremes of temperature show an increase of warm days and nights throughout the State of Rio de Janeiro, with greater intensity in coastal areas (between +60 % and +90 %). As for rainfall, the southern portion of Rio de Janeiro will present the largest increases in intense rainfall, comprising a range of variation between +50 and +300 mm. It is also observed that the projections indicate more consecutive dry days throughout the state.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1* Distribuição espacial das temperaturas médias anuais entre 1931 e
Pág. **5** 1975 (Fonte: FIDERJ, 1978).
- Figura 2.2* Distribuição espacial da precipitação média anual entre 1931 e
Pág. **6** 1975 (Fonte: FIDERJ, 1978).
- Figura 2.3* Magnitudes das tendências (dias/década) de noites quentes (acima)
Pág. **11** e de dias quentes (abaixo) ao longo do período 1951-2010 (Fonte:
IPCC, 2013).
- Figura 2.4* Tendências observadas em índices de extremos climáticos para
Pág. **13** 1960-2000. A linha preta delimita as áreas onde as tendências são
estatisticamente significativas ao nível de 5% (Fonte: Marengo *et al.*, 2010).
- Figura 2.5* Tendência de: (a) precipitação total (1951-2000), em mm/década e
Pág. **14** (b) temperatura mínima (1961-2000), em °C/década. Círculos com
contornos grossos indicam significância estatística do teste de
Mann-Kendall ao nível de 5% (Fonte: Obregón e Marengo, 2007).
- Figura 2.6* Eventos de chuvas intensas por décadas em São Paulo no período
Pág. **15** de 1933 a 2009 (Fonte: Nobre *et al.* 2010 – Estação Meteorológica
do IAG/USP; análise de Júlia Reid, INPE).
- Figura 2.7* Temperaturas médias anuais e respectivas tendências para a cidade
Pág. **16** do Rio de Janeiro (estação climatológica principal do INMET) e
de São Paulo (estação do IAG/USP) (Fonte: Sansigolo *et al.*,
1992).

Figura 2.8 Mudanças na (a) temperatura média (°C) e na (b) precipitação média (%) da superfície do globo em 2081-2100 em relação ao período 1986-2005, conforme os cenários RCP2.6 (esquerda) e RCP8.5 (direita) do AR5 do IPCC (Fonte: IPCC, 2013).

Figura 2.9 Padrões projetados de mudanças futuras na precipitação (%) em relação às simulações do clima presente (1961-1990) no verão (acima) e no inverno (abaixo) (Fonte: Marengo *et al.*, 2011).

Figura 2.10 Anomalias de (a, b) precipitação média anual (%) e de (c, d) temperatura média anual (°C) projetadas pelos modelos climáticos regionais HadRM3P (à esquerda) e RegCM3 (à direita), para o período 2071-2100 com relação ao período 1961-1990, no cenário pessimista de emissões A2. As regiões em destaque indicam a RMSP e a RMRJ (Fonte: Torres *et al.*, 2009).

Figura 2.11 Evolução temporal dos totais pluviométricos anuais (PRCPTOT, linha sólida) e das chuvas intensas (R95p, linha tracejada) em milímetros na cidade do Rio de Janeiro durante o clima presente com os dados observacionais da estação do Alto da Boa Vista (linha azul) e da estação de Santa Cruz (linha vermelha), e com os dados simulados do modelo Eta-HadCM3 (média dos quatro membros: Cntrl, High, Mid e Low, linha preta) (Fonte: Dereczynski *et al.*, 2013).

Figura 2.12 Evolução temporal dos dias quentes (TX90p) em porcentagem de dias ao ano na cidade do Rio de Janeiro durante o clima presente com os dados observacionais da estação do Alto da Boa Vista (linha azul grossa) e da estação de Santa Cruz (linha vermelha grossa), e com os dados simulados do modelo Eta-HadCM3 (média dos quatro membros: Cntrl, High, Mid e Low). Para o período de 2011-2099, as linhas finas preta, vermelha, verde e azul se referem aos membros Cntrl, High, Mid e Low, respectivamente (Fonte: Dereczynski *et al.*, 2013).

Pág. 30

Figura 3.1 Mapa do Estado do Rio de Janeiro com a localização das estações meteorológicas do INMET (círculos), da ANA (quadrados) e do Alerta Rio (triângulos) utilizadas nesta pesquisa (informações sobre cada uma das estações estão nas Tabelas 3.1 a 3.3). As áreas coloridas destacam as distintas regiões do Estado.

Pág. 32

Figura 3.2 Topografia (m) do modelo Eta-HadCM3 sobre o Estado do Rio de Janeiro.

Pág. 43

Figura 4.1 Relevo do Estado do Rio de Janeiro.

Pág. 48

Figura 4.2 Temperaturas mínimas médias (°C) no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera no Estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observados do INMET.

Pág. 50

Figura 4.3 Temperaturas máximas médias (°C) no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera no Estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observados do INMET.

Pág. 53

- Figura 4.4* Diferença entre as temperaturas máximas e mínimas (amplitude térmica) médias anuais (°C) no Estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observados do INMET.
Pág. 56
- Figura 4.5* Totais pluviométricos médios (mm) no (a) ano, (b) verão, (c) outono, (d) inverno e (d) primavera no Estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observados do INMET, da ANA e do Alerta Rio.
Pág. 58
- Figura 4.6* Totais máximos médios de dias secos consecutivos (CDD) no ano no Estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observados do INMET, da ANA e do Alerta Rio.
Pág. 61
- Figura 5.1* Magnitudes das tendências observadas (°C/ano) em (a) TMINmean e (b) TMAXmean no Estado do Rio de Janeiro, elaboradas através dos dados observados do INMET entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.
Pág. 63
- Figura 5.2* Magnitudes das tendências observadas (%dias/ano) em (a) TN10p e (b) TX10p no Estado do Rio de Janeiro, elaboradas através dos dados observados do INMET entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.
Pág. 64
- Figura 5.3* Magnitudes das tendências observadas (%dias/ano) em (a) TN90p e (b) TX90p no Estado do Rio de Janeiro, elaboradas através dos dados observados do INMET entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.
Pág. 66

- Figura 5.4* Magnitudes das tendências observadas (mm/ano) nos totais anuais de precipitação (PRCPTOT) no Estado do Rio de Janeiro, elaborada através dos dados observados do INMET e da ANA entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.
Pág. 67
- Figura 5.5* Magnitudes das tendências observadas (mm/ano) nas chuvas intensas (R95p) no Estado do Rio de Janeiro, elaborada através dos dados observados do INMET e da ANA entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.
Pág. 68
- Figura 5.6* Magnitudes das tendências observadas (dia/ano) nos períodos secos (CDD) no Estado do Rio de Janeiro, elaborada através dos dados observados do INMET e da ANA entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.
Pág. 69
- Figura 6.1* Diferenças mínima (esquerdo) e máxima (direito) entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos indicadores TMINmean (acima) e TMAXmean (abaixo) no Estado do Rio de Janeiro (°C) projetadas pelo modelo Eta-HadCM3.
Pág. 71
- Figura 6.2* Valores de TMINmean na Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro.
Pág. 72
- Figura 6.3* Valores de TMAXmean na Região Norte/Noroeste do Estado do Rio de Janeiro.
Pág. 72
- Figura 6.4* Diferenças mínima (esquerdo) e máxima (direito) entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos indicadores TN10p (acima) e TX10p (abaixo) no Estado do Rio de Janeiro (%dias) projetadas pelo modelo Eta-HadCM3.
Pág. 73

- Figura 6.5* Diferenças mínima (esquerdo) e máxima (direito) entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos indicadores TN90p (acima) e TX90p (abaixo) no Estado do Rio de Janeiro (%dias) projetadas pelo modelo Eta-HadCM3.
Pág. 74
- Figura 6.6* Valores de TN90p no litoral do Estado do Rio de Janeiro.
Pág. 75
- Figura 6.7* Valores de TX90p nas Baixadas Litorâneas do Estado do Rio de Janeiro.
Pág. 75
- Figura 6.8* Diferenças mínima (esquerdo) e máxima (direito) entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos indicadores PRCPTOT (acima) e R95p (abaixo) no Estado do Rio de Janeiro (mm) projetadas pelo modelo Eta-HadCM3.
Pág. 76
- Figura 6.9* Valores de PRCPTOT na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro.
Pág. 77
- Figura 6.10* Valores de R95p na Região Sul do Estado do Rio de Janeiro.
Pág. 78
- Figura 6.11* Diferenças mínima (esquerdo) e máxima (direito) entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) do indicador CDD no Estado do Rio de Janeiro (dias) projetadas pelo modelo Eta-HadCM3.
Pág. 79
- Figura 6.12* Valores de CDD na Região Norte/Noroeste do Estado do Rio de Janeiro.
Pág. 79

LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1* Valores de emissões cumulativas de CO₂ entre 2012 e 2100 (em GtC) referentes aos quatro cenários de caminhos representativos de emissões do AR5 do IPCC.
Pág. **19**
- Tabela 3.1* Informações sobre as estações meteorológicas do INMET utilizadas neste estudo.
Pág. **33**
- Tabela 3.2* Informações sobre as estações pluviométricas da ANA utilizadas nesta pesquisa.
Pág. **35**
- Tabela 3.3* Informações sobre as estações pluviométricas do Alerta Rio utilizadas neste trabalho.
Pág. **36**
- Tabela 3.4* Informações sobre as falhas nos dados de temperatura das estações meteorológicas do INMET utilizadas neste trabalho. A cor azul está associada aos anos sem falhas; a cor vermelha corresponde aos anos com, no mínimo, um mês de falhas.
Pág. **38**
- Tabela 3.5* Informações sobre as falhas nos dados de precipitação das estações meteorológicas do INMET utilizadas neste trabalho. A cor azul está associada aos anos sem falhas; a cor vermelha corresponde aos anos com, no mínimo, um mês de falhas.
Pág. **38**
- Tabela 3.6* Índices de extremos climáticos de temperatura mínima calculados e analisados neste estudo.
Pág. **44**
- Tabela 3.7* Índices de extremos climáticos de temperatura máxima calculados e analisados nesta pesquisa.
Pág. **45**

Tabela 3.8 Índices de extremos climáticos de precipitação calculados e
Pág. **45** analisados neste trabalho.

LISTA DE SIGLAS

AB – Alta da Bolívia

ANA – Agência Nacional de Águas

APN – Asia Pacific Network

AR4 – Fourth Assessment Report of IPCC

AR5 – Fifth Assessment Report of IPCC

ASAS – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

ASPS – Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul

BC – Baixa Continental

CCCMA – Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis

CCI – Commission for Climatology

CJS – Corrente de Jato Subtropical

CLIVAR – Research Program Climate Variability and Predictability

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CREAS – Cenários Regionais de Mudanças Climáticas para a América do Sul

CRU – Climate Research Unit

DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

EPF – Ensemble de Perturbações Físicas

ESRI – Environmental Systems Research Institute

ETCCDMI – Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices

GFDL – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

GISS – Goddard Institute for Space Studies

HadCM3 – UK Met Office Hadley Centre Coupled Model (Version 3)

IAG – Instituto Astronômico e Geofísico

IAPAR – Instituto Agronômico do Paraná

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

JBN – Jato de Baixos Níveis

MCG – Modelo de Circulação Geral

MCGAO – Modelo de Circulação Geral da Atmosfera e dos Oceanos

MIROC – Model for Interdisciplinary Research on Climate

MM5 – Fifth-Generation Mesoscale Model

NCAR – National Center for Atmospheric Research

NCDC – National Climatic Data Center

NCEP – National Centers for Environmental Prediction

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

OMM – Organização Meteorológica Mundial

PNMM – Pressão ao Nível Médio do Mar

RCP – Representative Concentration Pathways

REQM – Raiz do Erro Quadrático Médio

RFEE – Frequência Relativa de Eventos Extremos

RMRJ – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

SCM – Sistema Convectivo de Mesoescala

SRES – Special Report on Emissions Scenarios

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UNFCCC – United Nation Framework Convention on Climate Change

USP – Universidade de São Paulo

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

1. INTRODUÇÃO

Uma minuciosa investigação da climatologia de uma determinada região é de suma importância tanto para o conhecimento do comportamento atmosférico médio, quanto para a compreensão de suas flutuações no decorrer do tempo. As variações climáticas, sejam elas naturais ou antrópicas, podem provocar impactos ambientais tais como elevação ou redução no nível médio do mar, aumento ou redução na frequência de ocorrência e na intensidade de secas, chuvas intensas, ondas de calor e também dos sistemas meteorológicos transientes (frentes, ciclones tropicais, ciclones extratropicais, entre outros). Portanto, o conhecimento das mudanças climáticas futuras contribui para o estabelecimento de medidas de mitigação, uma vez que tais impactos geram consequências nas atividades humanas, tais como a agricultura, saúde, desenvolvimento e planejamento urbano e gerenciamento de recursos hídricos.

O Estado do Rio de Janeiro apresenta um clima muito variado em função da orografia bastante acidentada, com morros, serras, vales, vegetação diversificada, regiões de baixada e baías, além da proximidade com o Oceano Atlântico. Apesar da enorme importância das informações climatológicas para diversas atividades, não existem pesquisas detalhadas sobre o assunto para o Estado do Rio de Janeiro.

Com uma área de 44 mil km² e uma população de 16 milhões de habitantes, o Rio de Janeiro é o Estado com a maior densidade demográfica do Brasil. Em janeiro de 2011, o desastre ocorrido na Região Serrana do Estado foi considerado como um dos dez piores deslizamentos de terra do planeta desde 2000 pela Organização das Nações Unidas, além de ter sido o mais destrutivo já ocorrido no Brasil. Na ocasião, segundo a Defesa Civil Estadual, registrou-se um total de 3.562 pontos de deslizamentos, 916 mortes, 345 desaparecidos e cerca de 30.000 desalojados ou desabrigados. Para a cidade do Rio de Janeiro, um estudo preliminar sobre tendências observadas e projeções futuras de extremos climáticos foi elaborado por Luiz Silva (2012), entretanto não existem trabalhos sobre este tema que abordem todo o Estado do Rio de Janeiro.

Os relatórios periódicos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) sobre as causas, impactos e medidas de mitigação das mudanças climáticas globais representam uma referência padrão do assunto para toda a comunidade científica, governos e indústrias em todo o mundo. O Quarto Relatório de Avaliação (*Fourth Assessment Report – AR4*) do IPCC (IPCC, 2007) menciona que enchentes e secas se tornarão mais frequentes na

América Latina. O Quinto Relatório de Avaliação (*Fifth Assessment Report – AR5*) do IPCC (IPCC, 2013) mostra que a temperatura média do Brasil pode se elevar cerca de 4,0°C até 2100 em seu pior cenário. A frequência e a intensidade de eventos extremos de precipitação e temperatura já têm aumentado em várias regiões do Brasil nos últimos 50 anos. Dias frios, noites frias e geadas tem se tornado menos frequentes, enquanto que o número de ocorrências de chuvas fortes, dias quentes, noites quentes e ondas de calor têm aumentado no Brasil (Marengo *et al.*, 2007). Fatores como desigualdades regionais e sociais aumentam a vulnerabilidade da população brasileira às mudanças climáticas.

Para elaborar projeções de mudanças climáticas futuras utilizam-se modelos numéricos de circulação geral da atmosfera. Entretanto, os modelos globais, que necessitam cobrir um amplo domínio, não são capazes de representar o grande número de processos de retroalimentação que ocorre nas escalas sub-grade controlados por aspectos locais, tais como a topografia, os limites terra-mar, a vegetação e outros. Portanto, projeções de mudanças climáticas futuras regionalizadas obtidas a partir de modelos regionais aninhados a modelos globais estão sendo elaboradas para várias regiões do mundo. No Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o modelo regional Eta (Mesinger *et al.*, 2012) foi adaptado para realizar integrações climáticas presentes e futuras (Chou *et al.*, 2012 e Marengo *et al.*, 2012), aninhado ao modelo global do *UK Met Office Hadley Centre* (HadCM3), denominando-se Eta-HadCM3. As integrações deste modelo serão utilizadas neste trabalho para o Estado do Rio de Janeiro.

1.1 Objetivo

O objetivo desta pesquisa é apoiar estudos de vulnerabilidade e adaptação aos cenários de mudanças climáticas no Estado.

De forma a atingir tal objetivo, elaboram-se inicialmente uma climatologia da temperatura do ar e da precipitação no Estado do Rio de Janeiro com base em dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Sistema Alerta Rio. A seguir, avaliam-se as tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos de temperaturas mínima e máxima e de precipitação em 22 estações meteorológicas do INMET (dados diários) no Estado do Rio de Janeiro e, no caso da chuva, também em 43 estações pluviométricas da ANA. Finalmente, as projeções futuras (2041-2070) de tais indicadores de extremos climáticos utilizando o

modelo regional Eta-HadCM3, com o cenário A1B do IPCC, considerando as variações entre seus quatro membros (Cntrl, High, Mid e Low) são investigadas.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre os temas pertinentes ao clima do Estado do Rio de Janeiro e à detecção e projeções de alterações climáticas. A metodologia e os dados utilizados para o estudo são abordados no Capítulo 3. No capítulo 4, mostram-se as análises das características climatológicas de temperatura e de precipitação no Estado do Rio de Janeiro. Os resultados das tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos são apresentados no Capítulo 5, enquanto que os resultados das projeções futuras em tais índices são expostos no Capítulo 6. Finalmente, as conclusões e as considerações finais deste trabalho encontram-se no Capítulo 7.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura deste estudo consiste em duas seções: a primeira descreve características do clima no Estado do Rio de Janeiro e a segunda trata de assuntos relacionados às tendências observadas e às projeções futuras de mudanças climáticas associadas a extremos climáticos.

2.1 O Clima no Estado do Rio de Janeiro

Em 1978, a Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Rio de Janeiro (FIDERJ) publicou um atlas com indicadores climatológicos do Estado do Rio de Janeiro, incluindo temperatura, precipitação e vento. Este trabalho apresenta resultados climatológicos de um total de 59 estações meteorológicas, sendo 35 do INMET, 23 do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e 1 da Light para o período de 1931 a 1975 (45 anos).

A distribuição espacial mensal da temperatura do ar sobre a topografia do Estado do Rio de Janeiro apresentada em FIDERJ (1978) indica que a altitude é o principal fator controlador desta variável. No mapa de temperaturas médias anuais (Figura 2.1) observam-se os menores valores (em torno de 14°C) nas áreas mais elevadas da Região Serrana e do Vale do Paraíba; e valores entre 22 e 24°C nas áreas de baixada e no litoral, onde se verifica uma menor variabilidade espacial da temperatura.

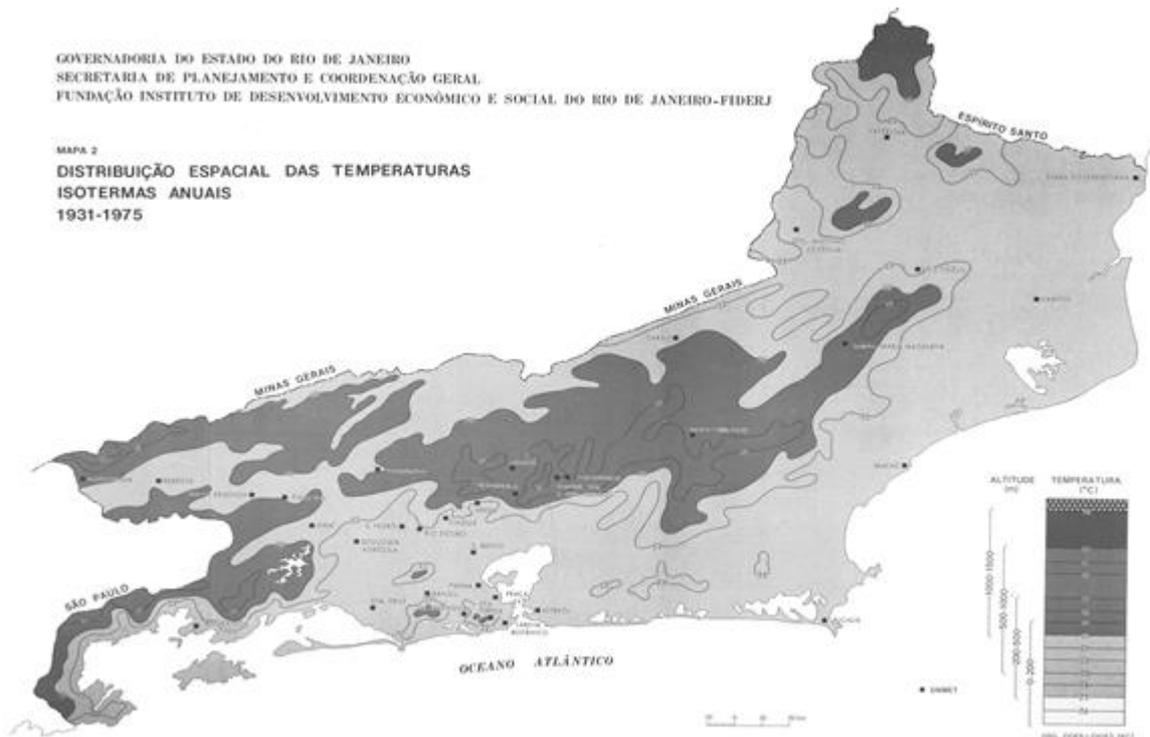


Figura 2.1 – Distribuição espacial das temperaturas médias anuais entre 1931 e 1975 (Fonte: FIDERJ, 1978).

De acordo com os mapas mensais apresentados em FIDERJ (1978), no mês de janeiro (representativo do verão), valores entre 17°C e 23°C são observados em áreas mais altas (entre 500 e 1500 m); nas áreas de baixada são encontrados os maiores valores (entre 23 e 26°C) e no litoral as temperaturas não variam significativamente, assumindo valores em torno de 26°C. A distribuição espacial de temperatura dos meses de abril e outubro (representativas do outono e da primavera, respectivamente) possui o mesmo padrão de distribuição espacial da média anual, inclusive em relação aos valores. As isotermas de julho (representativas do inverno) indicam valores mais baixos, com acentuada redução da temperatura com a altitude e elevado gradiente térmico entre as áreas de baixada, planalto e relevo. Em julho, valores entre 9 e 17°C são verificados em áreas mais altas (entre 500 e 1500 m); valores entre 17 e 20°C são observados nas áreas de baixadas e no litoral predominam valores em torno de 20°C.

Assim como a temperatura do ar, a precipitação também sofre forte influência da topografia, com máximos sobre as regiões de altitude elevada (Figura 2.2). A passagem de sistemas transientes, estabelecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a circulação marítima atuam junto ao relevo local, produzindo irregularidades espaciais no campo de chuva. Quanto à sazonalidade, verifica-se a predominância dos

meses de primavera e verão (outubro a março) como os mais chuvosos, e os de outono e inverno (abril a setembro) como os mais secos.

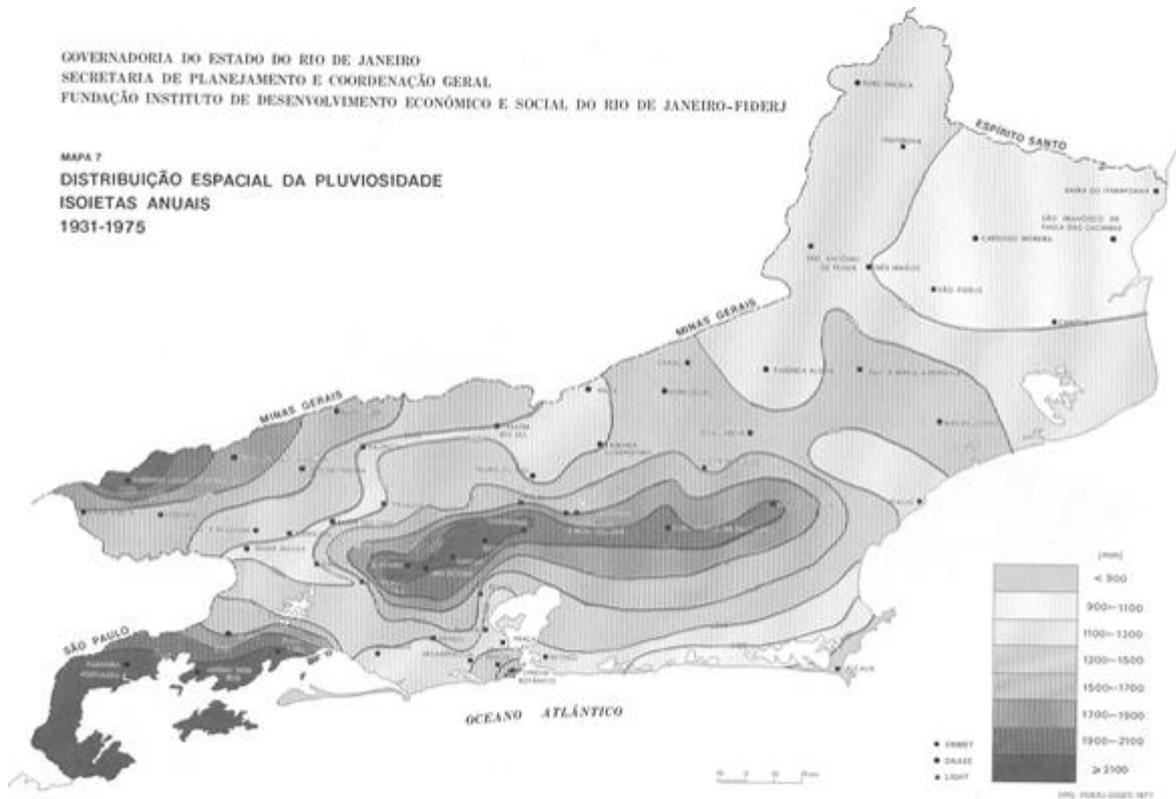


Figura 2.2 - Distribuição espacial da precipitação média anual entre 1931 e 1975 (Fonte: FIDERJ, 1978).

A análise dos mapas de FIDERJ (1978) indica que os maiores índices pluviométricos do Estado encontram-se na porção centro-sul fluminense, devido às chuvas orográficas. Os menores índices são encontrados nas áreas das baixadas litorâneas, mais próximas ao mar, e na maior parte do Norte Fluminense. No verão, os índices são mais elevados principalmente em função do estabelecimento da ZCAS e da convecção local. No inverno há redução destes índices pluviométricos, sendo a chuva neste período consequência de sistemas frontais. No outono, a precipitação é mais concentrada nas áreas litorâneas e também a barlavento das encostas, que são expostas às penetrações de massas de ar úmidas. Já na primavera, os índices de precipitação são maiores e mais uniformes que no outono, exceto em áreas litorâneas e de altitudes elevadas, devido ao aumento das temperaturas do ar.

2.2 Mudanças Climáticas associadas a Extremos Climáticos

O termo “mudanças climáticas” neste trabalho está sendo empregado para se referenciar a todas as alterações no clima, considerando-se tanto as mudanças naturais quanto as antrópicas, assim como utilizado pelo IPCC (IPCC, 2007), diferentemente do que é considerado pela *United Nation Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). O termo “mudanças climáticas” é empregado pela UNFCCC para se referir às alterações no clima atribuídas direta ou indiretamente à atividade humana.

A detecção da mudança climática é o processo de demonstrar que o clima tem mudado em algum sentido estatístico definido, sem provar a causa para tal alteração. Por outro lado, a atribuição é o processo de estabelecer as causas mais prováveis para a mudança detectada com algum nível definido de confiança (Le Treut e Somerville, 2007). Neste trabalho a ênfase é dada na detecção das mudanças relacionadas à temperatura e à precipitação, sem envolver aspectos relacionados à atribuição de tais alterações.

Neste item é apresentada uma revisão da literatura sobre a detecção das mudanças climáticas relacionadas a extremos climáticos no presente e suas projeções futuras, com ênfase no Brasil, abrangendo na medida do possível o Estado do Rio de Janeiro.

2.2.1 Detecção de Mudanças Climáticas no Clima Presente

De acordo com Alexander *et al.* (2006), durante décadas, a maior parte das análises de mudanças climáticas globais utilizando dados observacionais se basearam em mudanças nos valores médios de precipitação e temperatura do ar, que estavam disponíveis para boa parte do globo. Contudo, nem sempre um aumento na média está relacionado com um aumento dos extremos. As mudanças nos extremos como, por exemplo, redução dos dias frios, aumento da duração das ondas de calor, aumento na frequência de chuvas intensas ou de secas severas, tem um impacto muito maior na sociedade e ecossistemas em geral do que um aumento dos valores médios (Karl *et al.*, 1997; Easterling *et al.*, 2000; Meehl *et al.*, 2000 e Frich *et al.*, 2002). Para analisar tais indicadores de extremos é necessário obter uma longa série de dados diários e a disponibilidade destes dados em todo o planeta ainda é inadequada. No estudo “global” elaborado por Frich *et al.* (2002) quase nenhuma análise de extremos era possível para a maior parte da América Central e América do Sul, África e sul da Ásia.

O *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI) foi estabelecido pela Comissão de Climatologia (*Commission for Climatology – CCI*) da Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization – OMM*) e pelo *Research Program Climate Variability and Predictability* (CLIVAR) para coordenar dois esforços complementares a fim de viabilizar a análise global de extremos. Um esforço é a coordenação internacional de desenvolvimento de um conjunto de índices de mudanças climáticas focando primariamente em extremos. O segundo esforço é no sentido de coordenar workshops internacionais com o objetivo de preencher as lacunas identificadas em estudos anteriores a nível mundial.

O ETCCDMI propôs então a realização de workshops nos moldes da *Asia Pacific Network* (APN) (Manton *et al.*, 2011). Durante a APN, vários cientistas de diferentes países na região da Ásia/Pacífico conduziram o controle de qualidade de seus próprios dados e computaram índices de extremos climáticos para serem a seguir trocados entre os membros participantes. O Brasil foi um dos países escolhidos para congrega pesquisadores da América do Sul, e os resultados de tal workshop, realizado em agosto de 2004 em Maceió (AL), estão publicados em Vincent *et al.* (2005) e Haylock *et al.* (2006), relacionados, respectivamente, à temperatura do ar e à precipitação.

- *Tendências Observadas no Planeta*

Na análise dos extremos climáticos a nível global, Frich *et al.* (2002) utilizam índices baseados em valores diários de temperaturas máxima e mínima, e nos totais pluviométricos diários. Tais indicadores podem ser aplicados a uma grande variedade de climas e são capazes de detectar possíveis alterações climáticas em todas as estações do ano. Apenas séries com 40 anos ou mais de registros quase completos são utilizadas. Cerca de 3000 séries temporais de indicadores são analisadas. Os resultados de Frich *et al.* (2002) indicam que a maior parte do Hemisfério Norte e da Austrália apresenta um aquecimento no período de 1946 a 1999 e o número de dias com temperatura mínima inferior a 0°C sofreu um decréscimo mundial uniforme ao longo da segunda metade do século XX. Em muitas partes do planeta, a amplitude dos extremos de temperaturas máxima e mínima ao longo dos anos indica um declínio sistemático e estatisticamente significativo no decorrer das últimas 4 a 5 décadas. Ondas de calor com duração cada vez maior são observadas no Alasca, no Canadá, no centro-leste da Europa, na Sibéria e

no centro da Austrália e o indicador associado a noites quentes apresenta uma elevação na maior parte das áreas observadas, com exceção de algumas pequenas regiões do Canadá e da China. De uma forma geral, os índices relacionados aos extremos de precipitação mostram um padrão heterogêneo no globo, com alterações positivas e negativas. Nota-se um significativo aumento dos eventos de precipitação intensa no sul da África, no sudeste da Austrália, no oeste da Rússia, em partes da Europa e no leste dos Estados Unidos. Observa-se também uma evidente diminuição nos eventos de chuvas intensas no leste da Ásia e na Sibéria. Os autores concluíram que uma proporção significativa da área terrestre do planeta foi cada vez mais afetada por mudanças significativas nos extremos climáticos durante a segunda metade do século XX.

Para a América do Sul, Vincent *et al.* (2005) analisam as tendências observadas nos indicadores de extremos de temperatura em 68 estações no período de 1960 a 2000. Infelizmente nenhuma estação do Estado do Rio de Janeiro é incluída nesta verificação e considerando-se a Região Sudeste do Brasil, apenas as estações Água Funda, São Paulo e Campinas (SP) são utilizadas no trabalho por possuírem longas séries de dados. Os resultados mostram que há poucas estações com significativas tendências tanto negativas quanto positivas nos índices baseados na temperatura máxima diária. Apenas para a estação Ceres, no norte da Argentina, nota-se uma tendência com significativo decréscimo nos dias quentes (representados pela maior temperatura máxima diária a cada ano). Contrariamente, os indicadores baseados nas temperaturas mínimas diárias exibem tendências evidentes. Significativas tendências de redução das noites frias e aumento das noites quentes são observadas em várias estações localizadas ao longo das costas leste e oeste da América do Sul, e um pouco também no Sul do Brasil. As estações no interior do continente possuem tendências menos significativas. A amplitude térmica diária (média da diferença entre as temperaturas máxima e mínima diárias) decresceu cerca de 2 a 3°C em muitas localidades. Tendências sazonais também são examinadas pelos mesmos autores com o intuito de determinar se há alguma estação do ano com mudanças mais significativas nos indicadores baseados nas temperaturas máximas diárias e se o aquecimento observado nos índices anuais baseados nas temperaturas mínimas diárias pode ser atribuído a uma determinada estação do ano. Aparentemente a elevação (redução) na frequência de ocorrência das noites quentes (frias) ocorre predominantemente no verão e no outono. Mais uma vez, muitas das

estações com evidente elevação do número de noites quentes estão localizadas perto das costas leste e oeste do continente.

Das 68 estações meteorológicas envolvidas na pesquisa de Vincent *et al.* (2005), 54 delas são utilizadas por Haylock *et al.* (2006) para examinar possíveis mudanças na precipitação total e na precipitação extrema sobre o mesmo período (1960 a 2000). As tendências nos 12 índices de precipitação utilizados apresentam várias regiões com mudanças estatisticamente significativas em alguns dos indicadores. O padrão de tendências para os extremos é geralmente o mesmo no total pluviométrico anual, sendo de mudança para condições mais úmidas no Equador, no norte do Peru, na região do Sul do Brasil, no Paraguai, no Uruguai e no centro-norte da Argentina. Reduções significativas nos indicadores de precipitação são identificadas no sul do Peru e no sul do Chile.

No artigo de Alexander *et al.* (2006) são reunidos dados globais, coletados nos diversos workshops promovidos pelo ETCCDMI e em seguida os índices de extremos climáticos calculados são colocados em pontos de grade. Isto permite a apresentação do mais abrangente e atualizado quadro mundial até então das tendências nos indicadores de extremos de temperatura e precipitação. Índices sazonais e anuais para o período de 1951-2003 foram avaliados e as tendências em tais indicadores passaram por um teste de significância estatística. Os resultados mostram alterações significativas generalizadas nos indicadores de extremos de temperatura associados ao aquecimento, especialmente para aqueles índices derivados da temperatura mínima diária. Mais de 70% da área terrestre do planeta mostra uma diminuição evidente na ocorrência anual de noites frias e um aumento na ocorrência anual de noites quentes. Isto implica numa mudança positiva na distribuição da temperatura mínima diária em todo o globo. Os indicadores de extremos de temperatura máxima diária mostram mudanças semelhantes, mas com magnitudes menores. As alterações na precipitação apresentam uma elevação generalizada e significativa, mas as mudanças são muito menos espacialmente coerentes se comparadas com as alterações de temperatura. Os índices de precipitação para a América do Sul mostram uma tendência de condições mais úmidas ao longo do século XX, com declínio no número de dias secos consecutivos, porém ambos sem significância estatística.

O AR5 do IPCC (IPCC, 2013) compendia todas as pesquisas publicadas até então acerca das tendências observadas em extremos climáticos ao redor do planeta. De

acordo com o relatório divulgado recentemente, as três últimas décadas foram as mais quentes no globo desde 1850. A frequência de noites e dias quentes tem apresentado de fato um aumento em grande parte do planeta, inclusive no Brasil, onde a magnitude desta elevação alcança até 12 dias por década desde 1951, principalmente no centro-sul do país (Figura 2.3). Quanto aos índices de precipitação, apesar de uma distribuição mais heterogênea sobre o globo, também se verificam tendências significativas de aumento e de diminuição de chuvas intensas e de períodos de seca em diversas regiões.

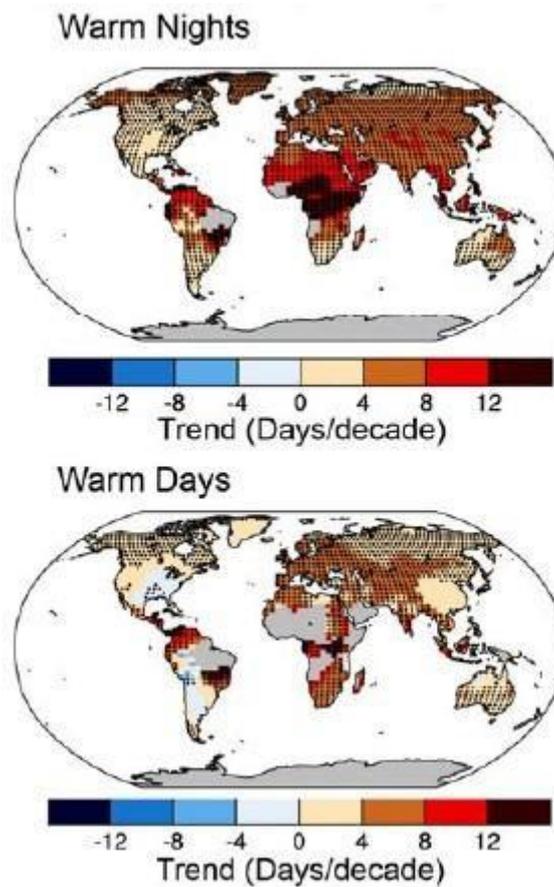


Figura 2.3 – Magnitudes das tendências (dias/década) de noites quentes (acima) e de dias quentes (abaixo) ao longo do período 1951-2010 (Fonte: IPCC, 2013).

- *Tendências Observadas na América do Sul*

Outras pesquisas retratam aspectos da detecção de mudanças climáticas baseadas em extremos para a América do Sul, incluindo o Brasil como, por exemplo, Marengo e Camargo (2007), Marengo e Valverde (2007), Obregón e Marengo (2007), Marengo *et al.* (2009 e 2010) e Rusticucci *et al.* (2010). Os resultados de tais trabalhos mostram tendências semelhantes às aquelas encontradas por Vincent *et al.* (2005) e Haylock *et al.* (2006).

Em Marengo *et al.* (2010) elabora-se uma comparação entre 3 índices de extremos climáticos observados e simulados por sete modelos acoplados provenientes do IPCC-AR4 para o período de 1960-2000 sobre a América do Sul. Os resultados com dados observacionais (Figura 2.4) mostram um aumento significativo das noites quentes (TN90), principalmente sobre o sudeste da América do Sul e a costa oeste do sul do Chile. Vincent *et al.* (2005) e Alexander *et al.* (2006) mostraram que este aumento na tendência de TN90 é observado ao longo de todo o ano na América do Sul, sendo mais elevado no verão e outono. Contudo, também são notadas diminuições não significativas das noites quentes sobre a Bolívia, sul do Peru e norte da Argentina. Com relação à precipitação, são observadas tendências de elevação no número de dias no ano com acumulado pluviométrico acima de 10 mm (R10), principalmente na costa oeste do Peru e do Equador e no sudeste da América do Sul. No norte do Peru ocorre um aumento de 4-8 dias com precipitação acima de 10 mm no período analisado, enquanto no sul do Brasil, Uruguai e Paraguai este aumento alcança até 12 dias. O índice que representa o número máximo de dias consecutivos secos (CDD) exhibe tendências positivas nas regiões se estendendo do oeste do Equador (10-20 dias), sul do Peru, Bolívia e norte da Argentina (10-50 dias) com tendências negativas no centro-oeste do Brasil, Paraguai, sul do Brasil e Uruguai, com redução entre 10 e 40 dias, em concordância com Haylock *et al.* (2006) e Alexander *et al.* (2006).

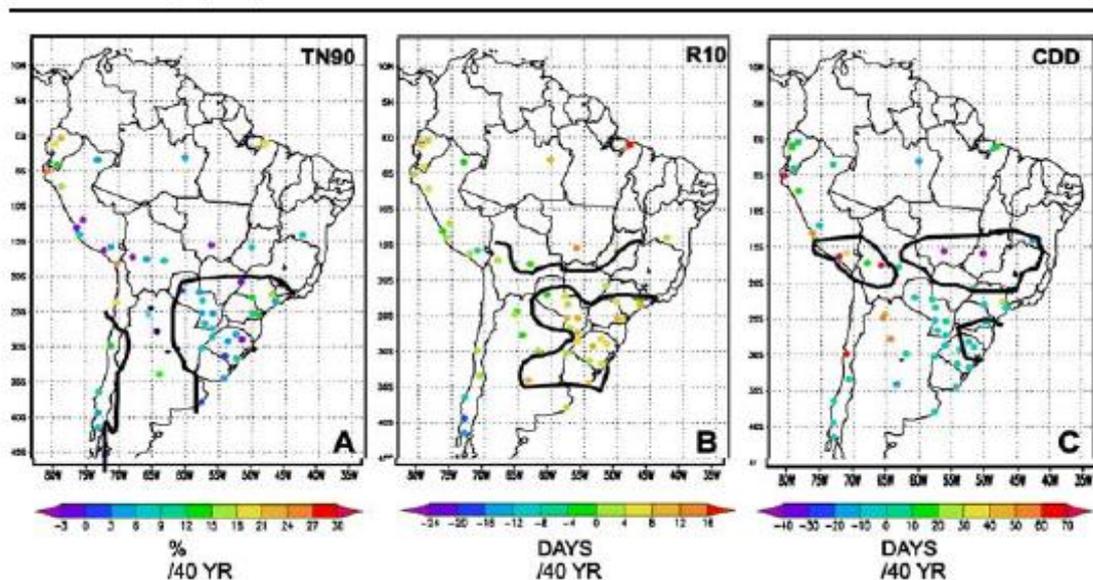


Figura 2.4 – Tendências observadas em índices de extremos climáticos para 1960-2000. A linha preta delimita as áreas onde as tendências são estatisticamente significativas ao nível de 95% (Fonte: Marengo *et al.*, 2010).

- *Tendências Observadas no Brasil*

Análises de detecção de mudanças climáticas na Região Sudeste do Brasil podem ser encontradas ainda em Sansigolo *et al.* (1992), Pinto *et al.* (2001), Duursma (2002) *apud* Marengo e Valverde (2007), Obregón e Marengo (2007), Coelho Netto *et al.* (2008), Maia (2008), Nobre *et al.* (2010) e Brandão (1987).

Duursma (2002) *apud* Marengo e Valverde (2007) mostra tendência de aquecimento em grandes cidades como São Paulo, com taxa de 0,6°C nos últimos 100 anos. Em Campinas, Pinto *et al.* (2001) mostram tendências positivas da temperatura mínima que ultrapassam os 2,5°C/100 anos. De acordo com Marengo e Valverde (2007) tais tendências não podem ser atribuídas somente à variabilidade natural do clima, mas também ao efeito antrópico associado ao crescimento das cidades.

Obregón e Marengo (2007) detectam tendências negativas na precipitação em um posto pluviométrico do Estado do Rio de Janeiro (Estação Piller, no município de Nova Friburgo) com valores entre -140 e -160 mm/década, e também no norte e oeste de Minas Gerais, porém verificam tendências positivas no Estado de São Paulo (Figura 2.5a). Com relação à temperatura mínima média anual, valores positivos são observados sobre todas as regiões do Brasil, incluindo o Rio de Janeiro (Resende e Nova Friburgo), com aumento de aproximadamente 0,2°C/década (Figura 2.5b).

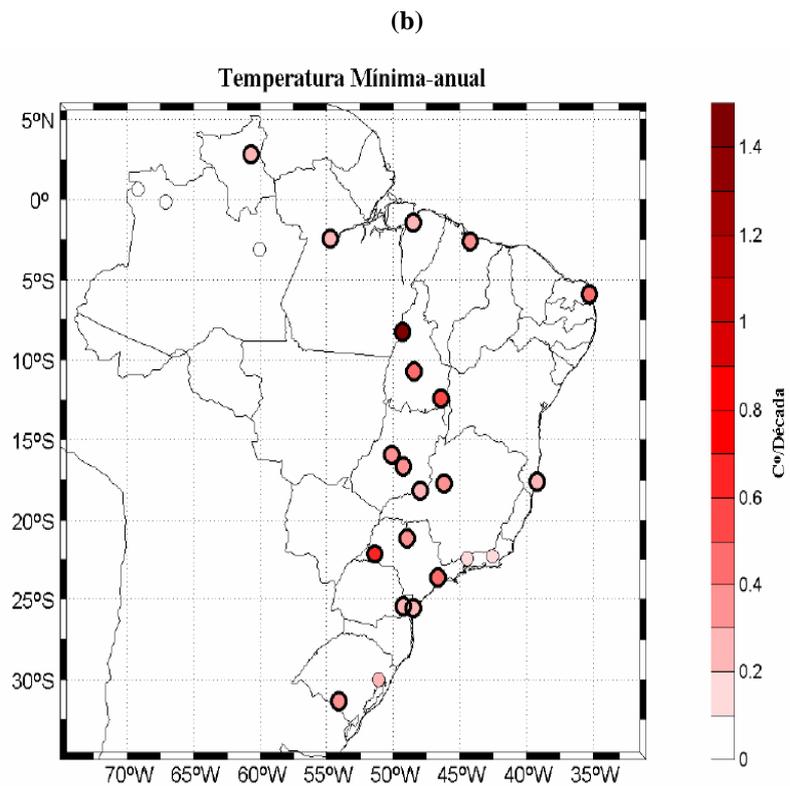
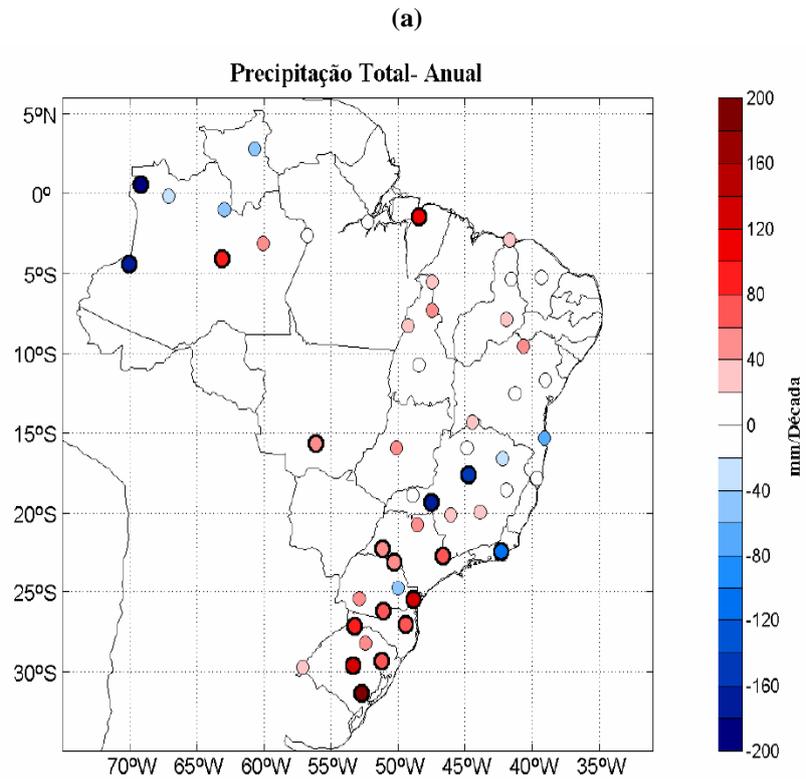


Figura 2.5 – Tendência de: (a) precipitação total (1951-2000), em mm/década e (b) temperatura mínima (1961-2000), em °C/década. Círculos com contornos grossos indicam significância estatística do teste de Mann-Kendall ao nível de 95% (Fonte: Obregón e Marengo, 2007).

Luiz Silva *et al.* (2013) fazem uma análise das tendências de extremos climáticos baseada em indicadores calculados a partir de dados observacionais diários de séries de 35 anos de 20 estações meteorológicas do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), no Estado do Paraná. Com relação às tendências de extremos climáticos, os resultados dos indicadores associados à temperatura apontam para um padrão de aquecimento generalizado estatisticamente significativo em grande parte do Paraná. A porcentagem de dias e noites quentes no Estado está aumentando consideravelmente a uma taxa média entre 0,1 e 0,4%/ano. As temperaturas mínima e máxima anuais médias indicam uma elevação em quase todo o Paraná em torno de +0,02°C/ano. Os indicadores de temperatura mínima apresentam tendências de aumento mais significativas que os de temperatura máxima. Por outro lado, a maior parte dos indicadores de extremos climáticos associados à precipitação não apresenta significância estatística, com exceção de alguns poucos em distintas regiões do Estado. Destes, destacam-se apenas as tendências de elevação dos períodos secos (+0,25 dia/ano) em Pato Branco e Planalto no sudoeste do Paraná e de redução das chuvas fortes (-0,5 mm/ano) em Cambará, Ibiporã e Umuarama no norte do Estado.

Nobre *et al.* (2010) mostram que para São Paulo, na estação do Instituto Astronômico e Geofísico (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), as chuvas intensas têm se tornado mais frequentes. Totais pluviométricos diários superiores a 50 mm, que ocorriam com frequência média de 9 vezes a cada 10 anos na década de 1930, passaram a ocorrer com frequência de 40 vezes na década de 2000 (Figura 2.6).

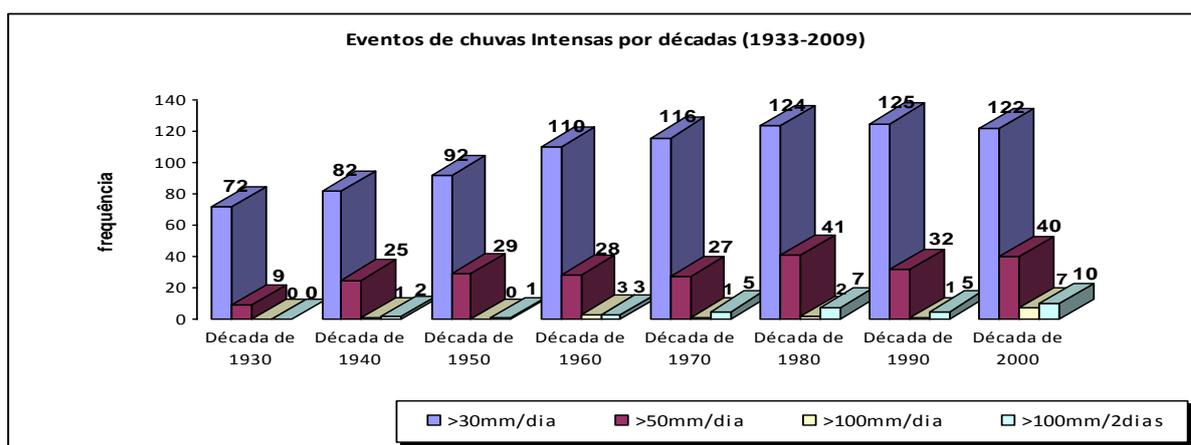


Figura 2.6 – Eventos de chuvas intensas por décadas em São Paulo no período de 1933 a 2009 (Fonte: Nobre *et al.* 2010 – Estação Meteorológica do IAG/USP; análise de Júlia Reid, INPE).

- *Tendências Observadas no Rio de Janeiro*

Segundo Coelho Netto *et al.* (2008), a frequência de eventos extremos de precipitação (>100 mm/dia) se elevou no período de 1977 a 2002 na Estação Capela Mayrink (Alto da Boa Vista, Rio de Janeiro) e também na Estação de Resende no Vale do Rio Paraíba do Sul (RJ), onde a série é mais longa (1937-2000).

Maia (2008) analisa as tendências na temperatura média mensal compensada (média entre as temperaturas mínima, máxima, das 06h, das 12h e das 18h) em Bangu (Rio de Janeiro), de janeiro de 1960 a dezembro de 1977 e na estação denominada Rio de Janeiro, de janeiro de 1960 a dezembro de 1989 e evidencia suaves tendências de aumento das temperaturas em ambas as localidades.

Sansigolo *et al.* (1992) avaliam, por sua vez, séries de temperaturas médias anuais para 9 cidades brasileiras e em todas ocorre aquecimento, principalmente em São Paulo (+0,03°C/ano) e no Rio de Janeiro (0,02°C/ano), como mostra a Figura 2.7.

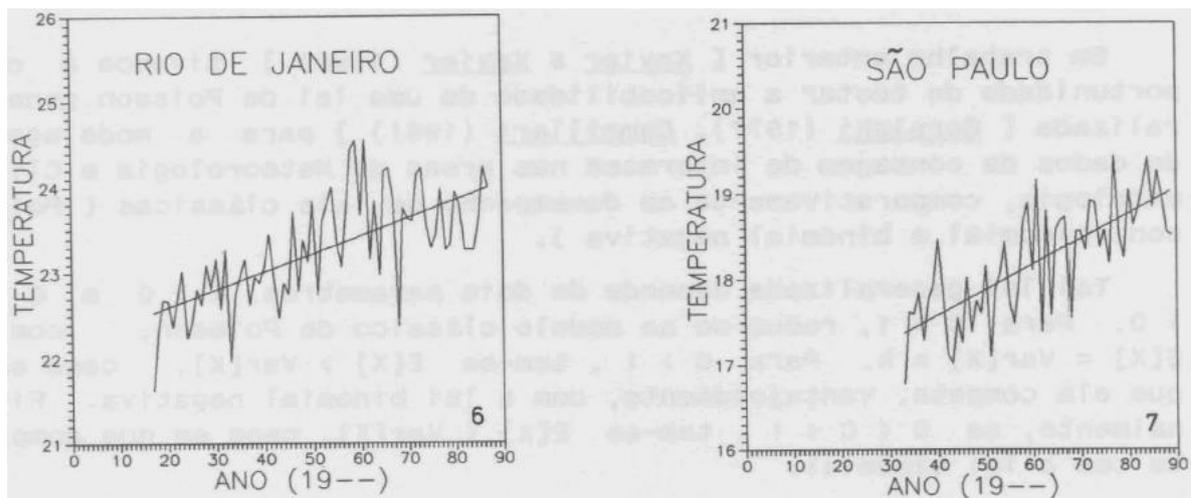


Figura 2.7 – Temperaturas médias anuais e respectivas tendências para a cidade do Rio de Janeiro (principal estação climatológica do INMET) e de São Paulo (estação do IAG/USP) (Fonte: Sansigolo *et al.*, 1992).

Brandão (1987) analisa tendências das variações de temperatura e de precipitação em 5 (cinco) estações meteorológicas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (Praça XV, Jardim Botânico, Tinguá, Ecologia Agrícola e São Bento) entre 1850 e 1980. No que diz respeito às tendências gerais de variação da temperatura média compensada e da precipitação durante os 130 anos de observação, encontra-se uma tendência geral de diminuição das temperaturas médias no Rio de Janeiro, com exceção do mês de agosto, que apresenta um aumento geral de 0,4°C, resultando também em

uma elevação, embora insignificante, no inverno. A precipitação anual também mostra uma tendência geral de decréscimo, porém o verão e a primavera caracterizam-se por uma tendência de aumento da chuva, principalmente nesta última, cuja elevação é de 125 mm em 130 anos, indicando uma tendência de um regime mais chuvoso. Aumentos significativos são verificados tanto para as temperaturas máximas quanto para as temperaturas mínimas, sendo que na Praça XV e em Tinguá, as maiores elevações ocorrem nas temperaturas máximas do verão e do outono. No Jardim Botânico, em Ecologia Agrícola e em São Bento, os aumentos mais significativos são registrados nas temperaturas mínimas do inverno e da primavera.

2.2.2 *Projeções Futuras de Mudanças Climáticas*

Modelos de Circulação Geral da Atmosfera e dos Oceanos (MCGAOs) são as ferramentas mais promissoras para elaborar projeções das mudanças climáticas futuras. Através da simulação de importantes processos físicos e dinâmicos, os MCGAOs podem representar as complexas interações não lineares que influenciam as mudanças climáticas a nível regional, assim como as interações entre os componentes do sistema climático e os mecanismos de retroalimentação (*feedbacks*), incluindo alterações na frequência de intensas tempestades entre outros eventos extremos (Gordon *et al.*, 2000). Os MCGAOs podem simular climas futuros como resposta às alterações na concentração de gases do efeito estufa e de aerossóis. Contudo, tais modelos, com resoluções espaciais tipicamente da ordem de centenas de quilômetros, não são capazes de capturar adequadamente os aspectos de escala regional. Uma solução para este problema é a regionalização (*downscaling*) das simulações dos modelos climáticos globais. Os métodos de *downscaling* podem ser estatísticos, utilizando funções de transferência empírica, ou dinâmico, através de modelos climáticos regionais. Tais estudos de *downscaling* dinâmico foram iniciados por Dickinson *et al.* (1989), Giorgi e Bates (1989), Giorgi (1990) e Kida *et al.* (1991).

Conjuntos (“*ensembles*”) de modelos representam uma nova abordagem para estudar as faixas de respostas climáticas plausíveis para uma dada forçante, com o objetivo de minimizar e quantificar as incertezas através de índices estatísticos. Duas classes de métodos de geração de ensembles podem ser definidas: o método “multi-modelo”, que representa uma coleção de modelos de circulação geral de diferentes centros de modelagem, e o método da “perturbação da física”, em que uma única

estrutura de modelo é utilizada e as perturbações são introduzidas aos esquemas físicos das parametrizações do modelo (Collins *et al.*, 2006).

Os resultados das projeções climáticas para o futuro com modelos numéricos deveriam ser avaliados, contudo isto não é possível já que não existem dados observacionais de períodos passados cujas mudanças nas forçantes sejam exatamente análogas àquelas esperadas no século XXI (Randall *et al.*, 2007) e, principalmente, porque não possuímos observações do futuro. Uma forma de aumentar a confiança nas projeções climáticas futuras é avaliar se o modelo consegue reproduzir as características do clima presente (século XX). Quando se trata dos modelos regionais, a confiabilidade das simulações em alta resolução depende da qualidade da condição de contorno lateral, que é fornecida pelo modelo global, e também da própria capacidade do modelo (regional) de desenvolver características regionais próximas da realidade no clima presente.

- *Projeções Futuras para o Planeta*

A nível global, o IPCC-AR4 (IPCC, 2007) projeta um aumento da temperatura do ar de 2 a 4,5°C em relação aos níveis registrados antes da Era Pré-Industrial. Os cálculos mais exatos estimam um aumento médio de 3°C, supondo que os níveis de dióxido de carbono se estabilizem em 45% acima da taxa atual. Avaliações do clima presente simulados pelos modelos globais participantes do IPCC-AR4 e análises de suas projeções futuras são elaboradas por diversos pesquisadores (Grimm e Natori, 2006; Lin *et al.*, 2006; Tebaldi *et al.*, 2006; Vera *et al.*, 2006; Garreaud e Falvey, 2008; Valverde e Marengo, 2010 e outros).

Uma primeira análise geral das projeções climáticas globais elaboradas pelos modelos que participaram do IPCC-AR4 foi elaborada por Tebaldi *et al.* (2006). Os pesquisadores analisam simulações históricas e futuras de dez indicadores de mudanças climáticas gerados por um conjunto de nove modelos de circulação geral (MCGs) do IPCC-AR4. Seus resultados mostram que as tendências históricas estão, em geral, de acordo com estudos observacionais, fornecendo um sentido básico de confiabilidade nas simulações dos MCGs. Simulações de alterações futuras de indicadores de extremos climáticos para os cenários de emissões futuras, “*Special Report on Emissions Scenarios*” (SRES): A2, B1 e A1B (IPCC, 2000), são então avaliadas. Assim como no

século XX, são projetados aumentos para extremos quentes e diminuições para extremos frios, consistentes com o aquecimento geral associado à elevação das emissões de gases do efeito estufa. Comum para todas as simulações é o fato de que as trajetórias do cenário B1 (menores emissões) se separam das trajetórias dos cenários A2 e A1B no decorrer do século XXI, por volta de 2040. Isto é consistente devido ao atraso na resposta do clima e ao acúmulo de CO₂. Os cenários A1B e A2 (maiores emissões) parecem acompanhar um ao outro em quase todo o século XXI na maior parte das simulações, com uma taxa alta e crescente para ondas de calor e noites quentes, e uma taxa alta e decrescente para a amplitude diurna da temperatura e dias frios, se comparadas ao cenário B1. Estas integrações com maiores forçantes tendem a se separar somente no final do século XXI.

As projeções futuras de mudanças no sistema climático são feitas utilizando-se uma hierarquia de modelos climáticos, desde simples modelos, passando por modelos de intermediária complexidade, até modelos do sistema terrestre. Estes modelos simulam as alterações baseados em um conjunto de cenários de forçantes antropogênicas. Um novo conjunto de cenários, os “Caminhos Representativos de Concentrações” (*Representative Concentration Pathways* – RCPs, Tabela 2.1), é utilizado nas novas simulações dos modelos climáticos do AR5 do IPCC (IPCC, 2013). Em todos os RCPs, as concentrações de CO₂ atmosférico são maiores em 2100 em comparação com os dias atuais, como resultado de um acréscimo das emissões cumulativas de CO₂ na atmosfera durante o século XXI. As projeções são realizadas para o final do século XXI (2081 – 2100) em relação ao período de 1986 – 2005.

Tabela 2.1 – Valores de emissões cumulativas de CO₂ entre 2012 e 2100 (em GtC) referentes aos quatro cenários de caminhos representativos de emissões do AR5 do IPCC.

CENÁRIO	Emissões cumulativas de CO ₂ entre 2012 e 2100 (em GtC*)	
	Média	Varição
<i>RCP2.6</i>	270	140 – 410
<i>RCP4.5</i>	780	595 – 1005
<i>RCP6.0</i>	1060	840 – 1250
<i>RCP8.5</i>	1685	1415 – 1910

* 1 Gigatonelada de carbono = 1 GtC = 10¹⁵ gramas de carbono. Isto corresponde a 3,67 GtCO₂.

De acordo com o AR5 do IPCC (IPCC, 2013), as mudanças na temperatura média da superfície do globo provavelmente excederão $+1,5^{\circ}\text{C}$ no final do século XXI em relação ao período de 1986 – 2005 para todos os cenários de RCP, exceto o RCP2.6. A temperatura provavelmente ultrapassará $2,0^{\circ}\text{C}$ para os cenários RCP6.0 e RCP8.5, porém não passará deste valor no cenário RCP4.5. O aquecimento continuará além de 2100, segundo os cenários de RCP, exceto o RCP2.6 (Figura 2.8a). Além disso, tal aquecimento seguirá exibindo uma variabilidade em escala temporal interanual à decadal e não será regionalmente uniforme.

O relatório também destaca que as alterações no ciclo global da água em virtude do aquecimento ao longo do século XXI não serão regulares. Os contrastes na precipitação entre regiões chuvosas e secas e entre estações chuvosas e secas aumentarão, apesar de algumas exceções regionais. As altas latitudes e o Oceano Pacífico Equatorial provavelmente experimentarão um aumento na precipitação média anual até o fim do século, segundo o cenário RCP8.5 (Figura 2.8b). Em diversas regiões secas das latitudes médias e subtropicais, a precipitação média provavelmente diminuirá, enquanto que em várias regiões úmidas das latitudes médias, a precipitação média provavelmente se elevará até 2100, conforme o cenário RCP8.5.

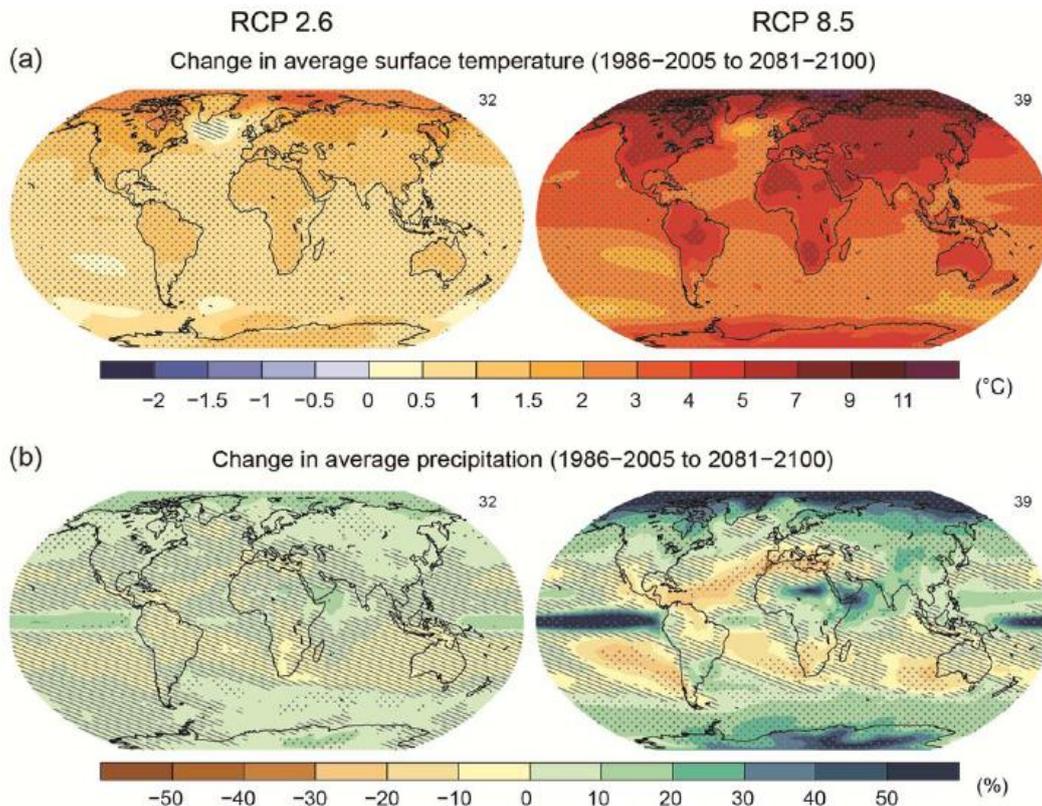


Figura 2.8 – Mudanças na (a) temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) e na (b) precipitação média (%) da superfície do globo em 2081-2100 em relação ao período 1986-2005, conforme os cenários RCP2.6 (esquerda) e RCP8.5 (direita) do AR5 do IPCC (Fonte: IPCC, 2013).

- *Projeções Futuras para a América do Sul*

Vera *et al.* (2006) analisam as saídas de um subconjunto de 7 modelos acoplados do IPCC-AR4, num total de 16 membros, para simular as características da precipitação sobre a América do Sul para o período 2070-2099. Inicialmente detecta-se que os modelos são capazes de reproduzir a extensão do máximo de precipitação tropical durante o verão, apesar da pequena diferenciação entre os mesmos na intensidade e na localização. Durante o outono, os modelos também simulam bem a migração para norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e da precipitação continental tropical, embora a maioria deles gere condições secas sobre a Amazônia e uma ZCIT mais estreita e mais zonalmente orientada do que a observada. No inverno, há uma grande dispersão entre as representações da precipitação dos modelos. Durante a primavera, os modelos conseguem reproduzir a migração para sul tanto da ZCIT quanto da precipitação tropical. Utilizando o cenário de mudanças climáticas A1B, os autores simulam as condições de precipitação no final do século XXI (2070 – 2099). A maior parte dos modelos reduz a precipitação durante o verão sobre a Patagônia e sul dos Andes, e aumenta sobre o Peru e o sudeste da América do Sul. Além disso, projetam-se alterações negativas de precipitação durante o outono sobre a costa sudoeste do continente e, mais uma vez, mudanças positivas no sudeste sul-americano. A configuração mais significativa que caracteriza as mudanças na precipitação durante o inverno é uma diminuição sobre grande parte da América do Sul. Durante a primavera, projeta-se uma redução da precipitação sobre o sul do continente e um aumento sobre o noroeste e sudeste sul-americano.

Valverde e Marengo (2010) analisam as mudanças no padrão de circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros (2011-2100) projetados por cinco modelos globais acoplados do IPCC-AR4, incluindo a terceira versão do MCGAO do *Hadley Centre* (HadCM3), todos forçados com cenário SRES-A2. A avaliação do clima presente (1961-1990) indica que nenhum dos modelos consegue simular o padrão sazonal da circulação atmosférica no clima presente similar ao representado pela Reanálise do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) / *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). No verão e na primavera, os modelos (exceto o MIROC – *Model for Interdisciplinary Research on Climate*) simulam a Alta da Bolívia (AB) e a Baixa Continental (BC) deslocados para oeste em relação à Reanálise. Os autores argumentam que o deslocamento da BC pode estar relacionado com a

dificuldade que os modelos possuem em representar a topografia e as fontes de calor. A BC está ligada à convecção sobre a Amazônia, que é dificilmente bem simulada pelos modelos numéricos e, conseqüentemente, isto também pode afetar a correta localização da mesma. Outra característica comum nos modelos é a Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) mais fraca em todas as estações do ano, o que sugere menor subsidência sobre sua área de atuação. Além disso, os modelos simulam a BC mais intensa do que na Reanálise. Em termos de precipitação, todos os modelos apresentam em maior ou menor proporção um déficit das chuvas sobre a Amazônia e um excesso de chuvas sobre os Andes. Os modelos também apresentam dificuldades em configurar a ZCAS, com seu padrão de chuvas estendendo-se desde a Amazônia até o Sudeste do Brasil, exceto o HadCM3. Em geral, os modelos concentram maior quantidade de chuva a leste do continente, o que origina em maior ou menor grau a diminuição da chuva sobre a Amazônia. Para o clima futuro, no verão e na primavera observa-se que a AB continua deslocada para oeste e a BC para noroeste com relação à climatologia (1961-1990) e no HadCM3 e GISS (*Goddard Institute for Space Studies*) esteve mais intensa. Em relação à temperatura do ar, todos os modelos, sem exceção, apontam para um aquecimento. O HadCM3 e o modelo do *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis* (CCCMA) são os mais extremos com anomalias positivas de até 8°C sobre o centro do continente no inverno e na primavera.

Estudos que tratam de simulações do clima presente e projeções de mudanças climáticas a nível regional, simulados por modelos de alta resolução para a América do Sul são encontrados em Marengo e Ambrizzi, 2006; Ambrizzi *et al.* 2007; Marengo *et al.*, 2007, 2009, 2010; Solman *et al.*, 2007; Nuñez *et al.*, 2008; Soares e Marengo, 2008; Alves e Marengo, 2010; Chou *et al.*, 2012 e outros.

Soares e Marengo (2008) investigam o fluxo de umidade e o Jato de Baixos Níveis (JBN) a leste dos Andes sobre a América do Sul em um cenário de aquecimento global através do modelo regional HadRM3P do *UK Hadley Centre* ao longo de dois períodos: o primeiro pode ser entendido como o clima presente (1980-1989); o segundo representa um clima futuro (2080-2089) globalmente aquecido com cenário de emissão SRES-A2. Tais simulações mostram um transporte de umidade mais intenso a partir das regiões tropicais para alimentar os SCMs no norte da Argentina no cenário SRES-A2, comparado com o presente. Isto está associado ao intenso fluxo de norte promovido

pelo JBN mais intenso e mais frequente no futuro, trazendo mais umidade da Bacia Amazônica em direção ao sul.

Solman *et al.* (2007) e Nuñez *et al.* (2008) aninharam o modelo regional *Fifth-Generation Mesoscale Model* (MM5) ao modelo global atmosférico HadAM3H para investigar as mudanças climáticas no sul da América do Sul. O modelo regional, com resolução horizontal de aproximadamente 50 km e com 23 níveis sigma na vertical, foi integrado no clima presente (1981-1990) e no clima futuro (2081-2090), com os cenários SRES-A2 e B2. O desempenho do modelo para representar o clima presente é investigado em Solman *et al.* (2007) e as projeções futuras são descritas em Nuñez *et al.* (2008).

Solman *et al.* (2007) demonstram que o modelo regional MM5 reproduz muitos aspectos da climatologia de mesoescala do período 1981-1990 que não são adequadamente captados pelo modelo global HadAM3H. O modelo regional representa melhor a circulação ciclônica nos baixos níveis topograficamente induzida no norte da Argentina durante os meses de verão, entretanto ele não consegue reproduzir a correta localização do sistema de baixa pressão e, em consequência, ocorre um grande desvio no campo de precipitação. Entre outros problemas na representação de sistemas está uma pobre captação do JBN, que é crítico para determinar a precipitação de verão na América do Sul subtropical. Os padrões espaciais médios sazonais das variáveis à superfície concordam razoavelmente bem com as observações, contudo alguns desvios no modelo foram identificados. Para a precipitação, os desvios na simulação incluem uma superestimativa sobre os Andes e uma subestimativa na Bacia do Prata durante o outono e a primavera, e uma superestimativa sobre o Paraguai e Sul do Brasil durante o verão e o outono. Apesar das dificuldades do modelo regional de representar adequadamente a quantidade da precipitação em algumas regiões, ele melhora a representação dos índices diários em relação ao modelo global, tais como a frequência de dias úmidos e de dias com chuvas superiores ao percentil 95. O MM5 simula adequadamente as temperaturas observadas média, mínima e máxima sobre todo o domínio, exceto sobre o centro da Argentina, onde um desvio positivo de quase 3°C é observado. Este desvio quente coincide com um desvio seco no conteúdo de umidade do solo. O desempenho do modelo regional é geralmente melhor durante a estação fria do que durante a estação quente.

Em Nuñez *et al.* (2008), as análises das projeções futuras com o modelo MM5 revelam que as mudanças simuladas para o período 2081-2090 são maiores para o cenário A2 do que para o cenário B2, apesar das poucas diferenças qualitativas. Para os dois cenários, o aquecimento no Sul do Brasil, no Paraguai, na Bolívia e no nordeste da Argentina é particularmente maior na primavera. Ao longo do ano, o sul da América do Sul sofre um aumento em ambos os cenários, A2 (entre 1,5 e 5,5°C) e B2 (entre 1 e 4°C). As maiores mudanças na temperatura média são projetadas para as regiões tropicais e subtropicais e as menores mudanças são projetadas para latitudes ao sul de 35°S. O padrão de mudanças para as temperaturas máxima e mínima são similares ao da temperatura média, contudo as mudanças são maiores para a temperatura máxima do que para a mínima, particularmente sobre regiões tropicais e subtropicais. As mudanças na precipitação variam substancialmente de estação para estação e através das regiões, em resposta à circulação de grande escala. Sobre a costa oeste da América do Sul, ambos os cenários projetam uma redução geral na precipitação. Tanto as simulações do cenário A2 quanto do B2 mostram uma elevação geral na precipitação sobre o centro-norte da Argentina, especialmente no verão e no outono, além de um decréscimo da mesma no inverno e na primavera. No outono, as simulações apontam para uma diminuição geral da precipitação no Sul do Brasil. Isto é o reflexo de alterações na circulação atmosférica durante o inverno e a primavera. Mudanças na Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) mostram uma célula de aumento de pressão centrada nos oceanos Atlântico Sul (verão e outono) e Pacífico Sul (primavera). As integrações também indicaram uma extensão para sul durante o verão das Altas Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico Sul (ASPS).

As simulações com o modelo regional Eta-HadCM3, utilizadas neste trabalho, são avaliadas no clima presente (1961-1990) por Chou *et al.* (2012) e no clima futuro (2011-2099) por Marengo *et al.* (2011). O modelo regional Eta do INPE, é integrado a partir de quatro membros do modelo global HadCM3: uma integração controle mais três integrações com perturbações na física do modelo (Collins *et al.*, 2006). O modelo Eta-INPE, aninhado a estas condições de contorno lateral, é configurado com resolução horizontal de 40 km e 38 camadas na vertical. Para o clima presente a concentração de CO₂ é mantida constante com 330 ppm e para o clima futuro utiliza-se o cenário SRES-A1B, mas com cada um dos membros tendo uma distinta sensibilidade climática.

Em Chou *et al.* (2012) a avaliação do clima presente com o modelo Eta-HadCM3 para a América do Sul mostra que a circulação nos baixos e nos altos níveis reproduz aproximadamente a circulação do modelo global HadCM3, sendo que nos baixos níveis as simulações são capazes de adicionar detalhes da mesoescala que estavam ausentes no modelo HadCM3. A climatologia regionalizada da temperatura do ar e da precipitação está de acordo com as observações da *Climate Research Unit (CRU) of East Anglia* (New *et al.*, 2000). Os maiores erros na simulação da precipitação e da temperatura continental têm sido identificados em áreas da Amazônia, norte da Argentina e Paraguai. Na região Amazônica durante o verão ocorre uma subestimativa da precipitação que é característica de simulações de vários modelos numéricos. Nas latitudes subtropicais do norte da Argentina uma subestimativa da precipitação é acompanhada por uma superestimativa da temperatura do ar. O espalhamento dos membros do *ensemble* é pequeno quando comparados com a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) do modelo. Contudo, o ciclo anual da precipitação e da temperatura em algumas áreas, tais como o Nordeste do Brasil, exibem maior dispersão entre os membros. A verificação do desempenho do modelo para reproduzir eventos El Niño e La Niña mostra sinais de anomalias de temperatura e precipitação típicas destes eventos para o verão, embora pequenos deslocamentos das posições das anomalias tenham ocorrido. Baseado na Temperatura da Superfície do Mar (TSM), o HadCM3 geralmente subestima o número de eventos El Niño e La Niña, o que pode ter causado o enfraquecimento do sinal nas simulações do Eta-HadCM3.

Marengo *et al.* (2011) avaliam as projeções climáticas do modelo Eta-HadCM3 para os períodos de 2011-2040, 2011-2100 e 2071-2099 para a América do Sul com foco em três grandes bacias hidrográficas no Brasil: Bacia dos Rios Amazonas, São Francisco e Paraná. As projeções de mudanças na circulação em baixos e altos níveis e na PNMM simulam um padrão de enfraquecimento da circulação tropical e fortalecimento da circulação subtropical, marcado pela intensificação da Baixa do Chaco e das Altas Subtropicais. Um forte aquecimento (entre 4 e 6°C) do continente sul-americano aumenta o gradiente meridional de temperatura, intensificando a Corrente de Jato Subtropical (CJS). Além disso, tal configuração aumenta o gradiente de temperatura entre o continente e o Oceano Atlântico Sul, levando a gradientes mais fortes de pressão entre o continente e o oceano e a alterações no transporte de umidade e na precipitação. Mudanças no transporte de umidade e nas chuvas são projetadas no setor do Atlântico Tropical, com enfraquecimento dos alísios no Atlântico Norte e

subsequentes grandes reduções de chuva na Amazônia e no Nordeste do Brasil (atingindo até 40%), enquanto que as chuvas aumentam na costa norte do Peru, no Equador e no sudeste da América do Sul, atingindo até 30% no norte da Argentina (Figura 2.9). Todas as alterações são mais intensas após 2040. Todas as projeções do modelo mostram um clima mais seco e quente nas bacias dos Rios Amazonas, São Francisco e Paraná, sendo que neste último as mudanças na precipitação são pequenas. A diferença entre a precipitação e a evaporação no cenário A1B regionalizado sugere déficits de água e redução do escoamento fluvial no leste da Amazônia e na Bacia do Rio São Francisco, tornando estas regiões suscetíveis a condições de estiagem no futuro. É possível notar que o Estado do Rio de Janeiro encontra-se praticamente em uma área de transição entre as regiões com as mais ressaltadas tendências de redução e de elevação da precipitação. Este fator pode contribuir com um maior grau de variabilidade e, portanto de incertezas, das projeções futuras associadas aos extremos de chuva no Estado.

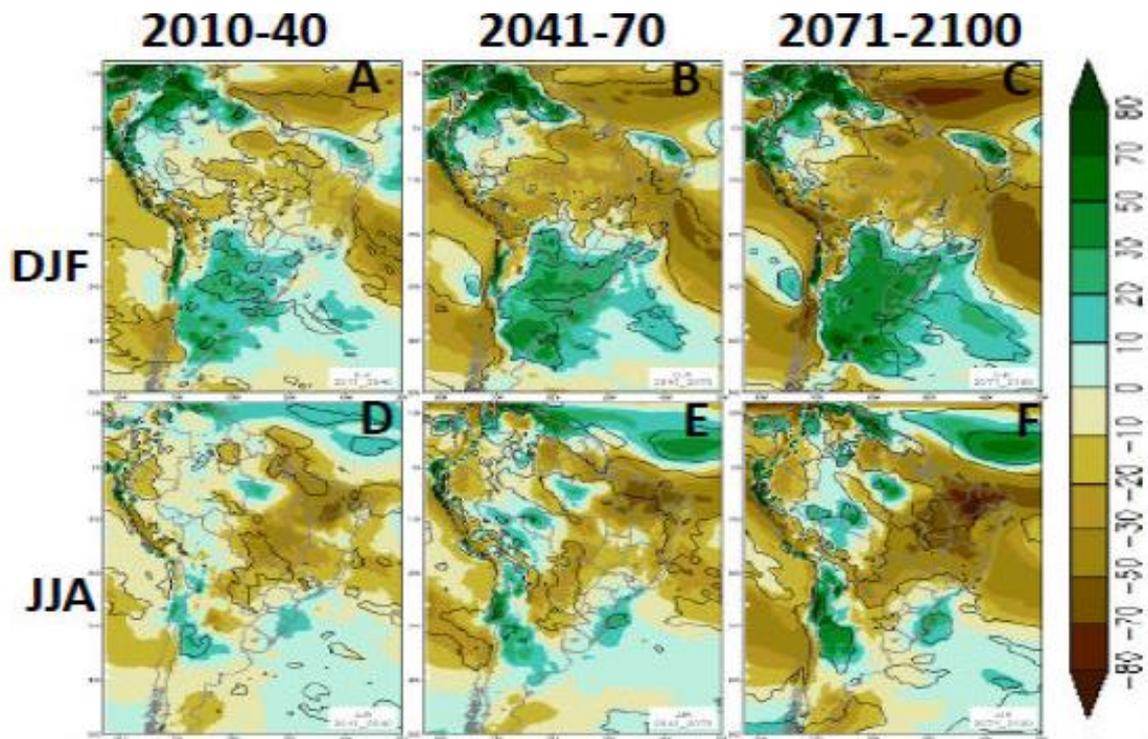


Figura 2.9 – Padrões projetados de mudanças futuras na precipitação (%) em relação às simulações do clima presente (1961-1990) no verão (acima) e no inverno (abaixo) através do modelo Eta-HadCM3 (Fonte: Marengo *et al.*, 2011).

- *Projeções Futuras para o Brasil*

Torres *et al.* (2009) avaliam as tendências dos extremos de temperatura e precipitação nas Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro (RMRJ) e de São Paulo (RMSP) no final do século XXI. Para isto são utilizadas as simulações de dois modelos climáticos regionais usados no projeto “Cenários Regionais de Mudanças Climáticas para a América do Sul” (CREAS): RegCM3 e HadRM3P, que possuem como condição de contorno lateral o modelo global HadAM3P. É importante ressaltar que neste trabalho não são utilizados dados observacionais da RMRJ e da RMSP para efeito de comparação com as simulações dos modelos regionais no clima presente. As simulações são realizadas para o período de 1961-1990 (clima presente) e para 2071-2100, no cenário futuro SRES-A2. Os modelos regionais indicam para a região de estudo um aumento da temperatura média anual que pode chegar a 2-3°C conforme o modelo RegCM3 e 3-4°C segundo o modelo HadRM3P. Os índices de extremos de precipitação para a RMRJ indicam um aumento no número de dias secos consecutivos e uma redução no número de dias no ano com precipitação acima de 10 mm. Para esta mesma região, os modelos preveem um aumento no máximo anual de precipitação acumulada em 5 (cinco) dias consecutivos, que poderia ocasionar enchentes e deslizamentos. As tendências nos índices extremos de temperatura, tanto para a RMRJ quanto para a RMSP, indicam um aumento no número de dias e noites quentes e uma diminuição na ocorrência de dias e noites frios. Estes resultados estão sumarizados na Figura 2.10 e são consistentes com um clima mais seco que o atual, com altas temperaturas diurnas e noturnas e com chuvas intensas concentradas em curtos períodos.

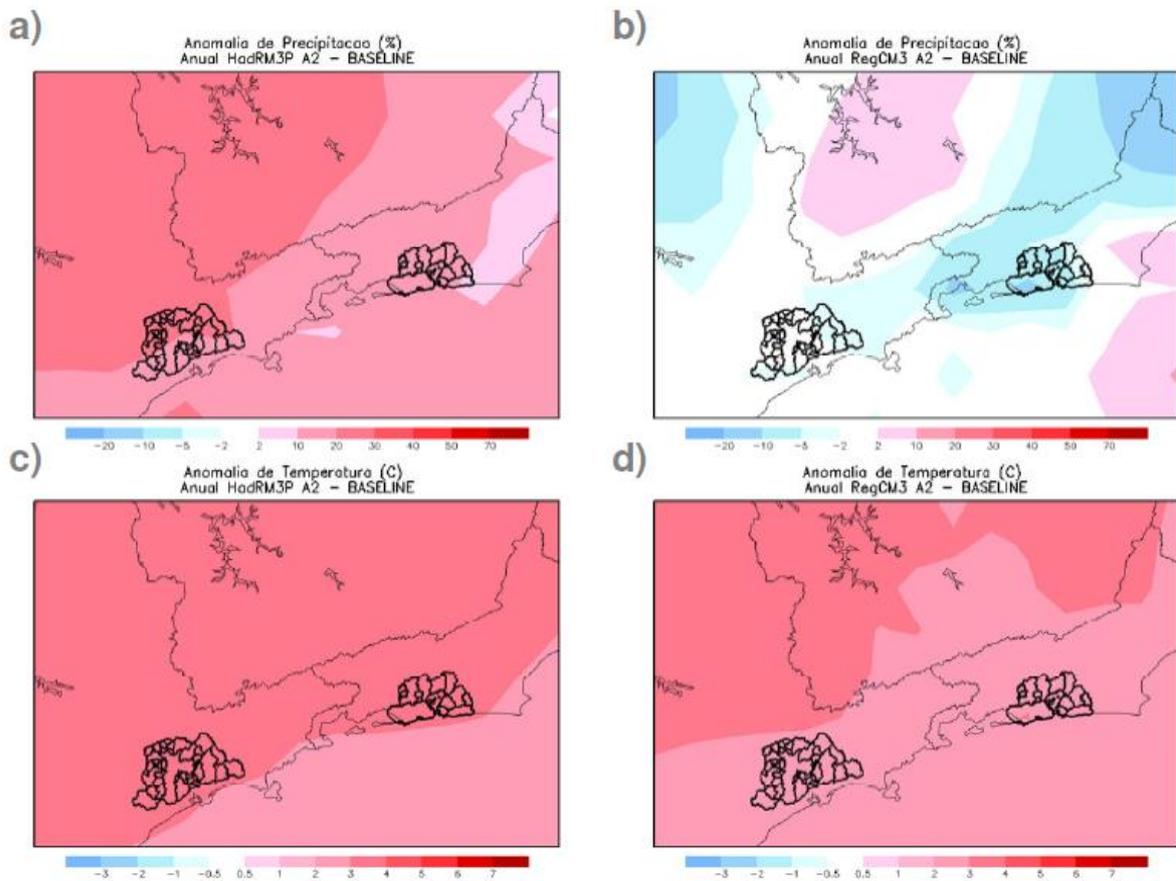


Figura 2.10 – Anomalias de (a, b) precipitação média anual (%) e de (c, d) temperatura média anual (°C) projetadas pelos modelos climáticos regionais HadRM3P (à esquerda) e RegCM3 (à direita), para o período 2071-2100 com relação ao período 1961-1990, no cenário pessimista de emissões A2. As regiões em destaque indicam a RMSP e a RMRJ (Fonte: Torres *et al.*, 2009).

Valverde *et al.* (2009) realizam uma análise observacional e de modelagem dos acumulados de chuva relacionados a eventos extremos sobre parte das regiões Norte e Nordeste do Brasil, com ênfase em 13 localidades. As saídas da integração controle do modelo climático regional Eta-HadCM3 (Chou *et al.*, 2012 e Marengo *et al.*, 2012) no clima presente (1961-1990) e futuro (2011-2040) com cenário SRES-A1B são utilizadas para gerar os indicadores RX1day e o RX5day, que correspondem aos valores máximos anuais de chuva acumulada em um e em cinco dias consecutivos, respectivamente. O erro encontrado entre os dados simulados no clima presente com modelo Eta-HadCM3 e os dados climatológicos observacionais é avaliado, indicando que o modelo subestima o total pluviométrico anual no norte das Regiões Norte e Nordeste. Nas projeções futuras dos índices aplica-se uma correção, a fim de diminuir em parte a deficiência que o modelo apresentou em simular a climatologia de 1961-1990. No caso do indicador RX1day quase todas as estações apresentam um incremento no acumulado de chuva,

com uma evidente variabilidade interanual, enquanto que para o índice RX5day a tendência não é tão evidente.

- *Projeções Futuras para o Rio de Janeiro*

Um estudo sobre detecção e projeções futuras de mudanças climáticas na cidade do Rio de Janeiro é elaborado através da análise de indicadores de extremos climáticos de precipitação e temperaturas mínima e máxima e pode ser verificado em Luiz Silva (2012) e em Dereczynski *et al.* (2013). Nestes trabalhos, os autores utilizam dados observacionais diários de precipitação e temperatura de duas estações meteorológicas do INMET (Alto da Boa Vista e Santa Cruz) e as saídas das simulações dos quatro membros do modelo climático regional Eta-HadCM3 (Chou *et al.*, 2012 e Marengo *et al.*, 2012). Os resultados indicam que os totais pluviométricos anuais têm se elevado e que os eventos de chuvas moderadas a fortes têm se tornado mais frequentes nos últimos anos no Alto da Boa Vista. Nesta estação, o total pluviométrico das chuvas mais intensas está crescendo significativamente a uma taxa de +11,8 mm/ano. Para o futuro projeta-se um aumento significativo tanto na frequência de ocorrência quanto na quantidade de chuvas associada a tais eventos extremos (Figura 2.11), além de períodos secos mais longos e períodos úmidos mais curtos. Com relação à temperatura, nota-se tendência de aquecimento, com valores mais significativos para os índices baseados na temperatura máxima. As médias anuais das temperaturas máximas (mínimas) podem ficar entre 2 e 6°C (2 e 5°C) acima dos valores do clima presente, no final do século XXI. Os dias e noites quentes (frios) estão se tornando mais (menos) frequentes a cada ano e para o futuro (2100) projeta-se que cerca de 40 a 80% dos dias (Figura 2.12) e entre 60 e 90% das noites no ano serão quentes, além de praticamente não ocorrerem mais dias e noites frios na cidade do Rio de Janeiro.

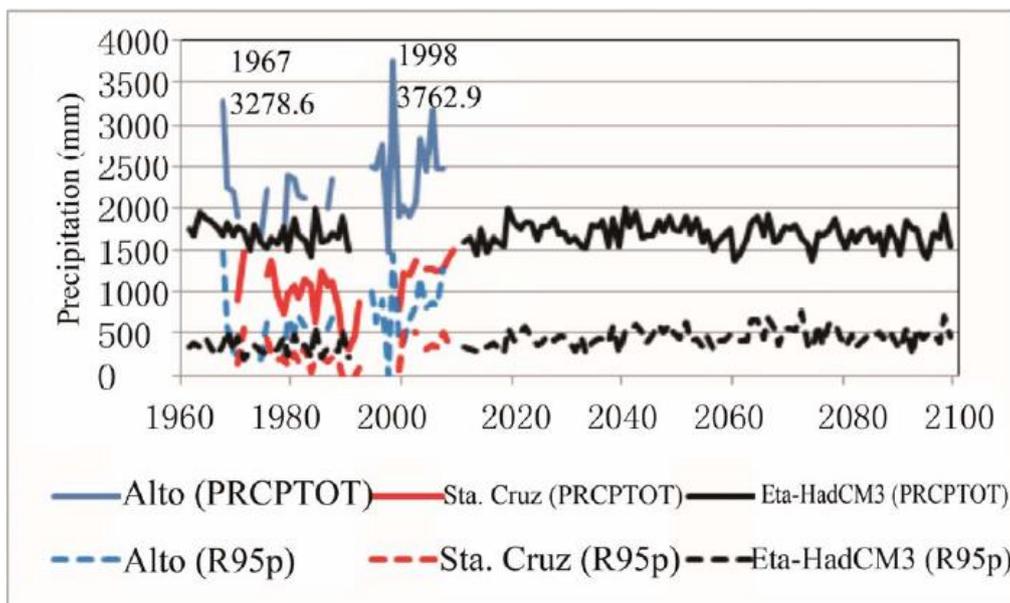


Figura 2.11 – Evolução temporal dos totais pluviométricos anuais (PRCPTOT, linha sólida) e das chuvas intensas (R95p, linha tracejada) em milímetros na cidade do Rio de Janeiro durante o clima presente com os dados observacionais da estação do Alto da Boa Vista (linha azul) e da estação de Santa Cruz (linha vermelha), e com os dados simulados do modelo Eta-HadCM3 (média dos quatro membros: Cntrl, High, Mid e Low, linha preta) (Fonte: Dereczynski *et al.*, 2013).

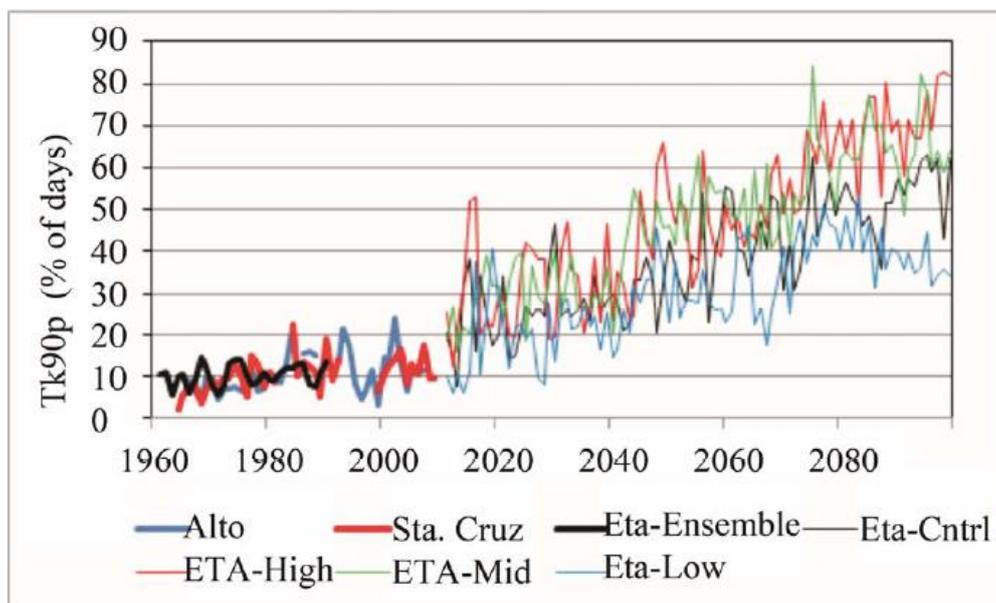


Figura 2.12 – Evolução temporal dos dias quentes (TX90p) em porcentagem de dias ao ano na cidade do Rio de Janeiro durante o clima presente com os dados observacionais da estação do Alto da Boa Vista (linha grossa azul) e da estação de Santa Cruz (linha grossa vermelha), e com os dados simulados do modelo Eta-HadCM3 (média dos quatro membros: Cntrl, High, Mid e Low, linha preta grossa). Para o período de 2011-2099, as linhas finas preta, vermelha, verde e azul se referem aos membros Cntrl, High, Mid e Low, respectivamente (Fonte: Dereczynski *et al.*, 2013).

3. DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentam-se os dados que serão utilizados na pesquisa, oriundos de observações meteorológicas (INMET, ANA e Alerta Rio) e de modelagem numérica (modelo climático regional Eta-HadCM3), além da metodologia que será empregada na análise de tais dados. O software RClimDex e os testes estatísticos aplicados neste estudo também são descritos.

3.1 Dados Observacionais

As localizações das estações meteorológicas de onde foram extraídos os dados observacionais são apresentadas na Figura 3.1 e suas descrições encontram-se nas Tabelas 3.1 a 3.3.

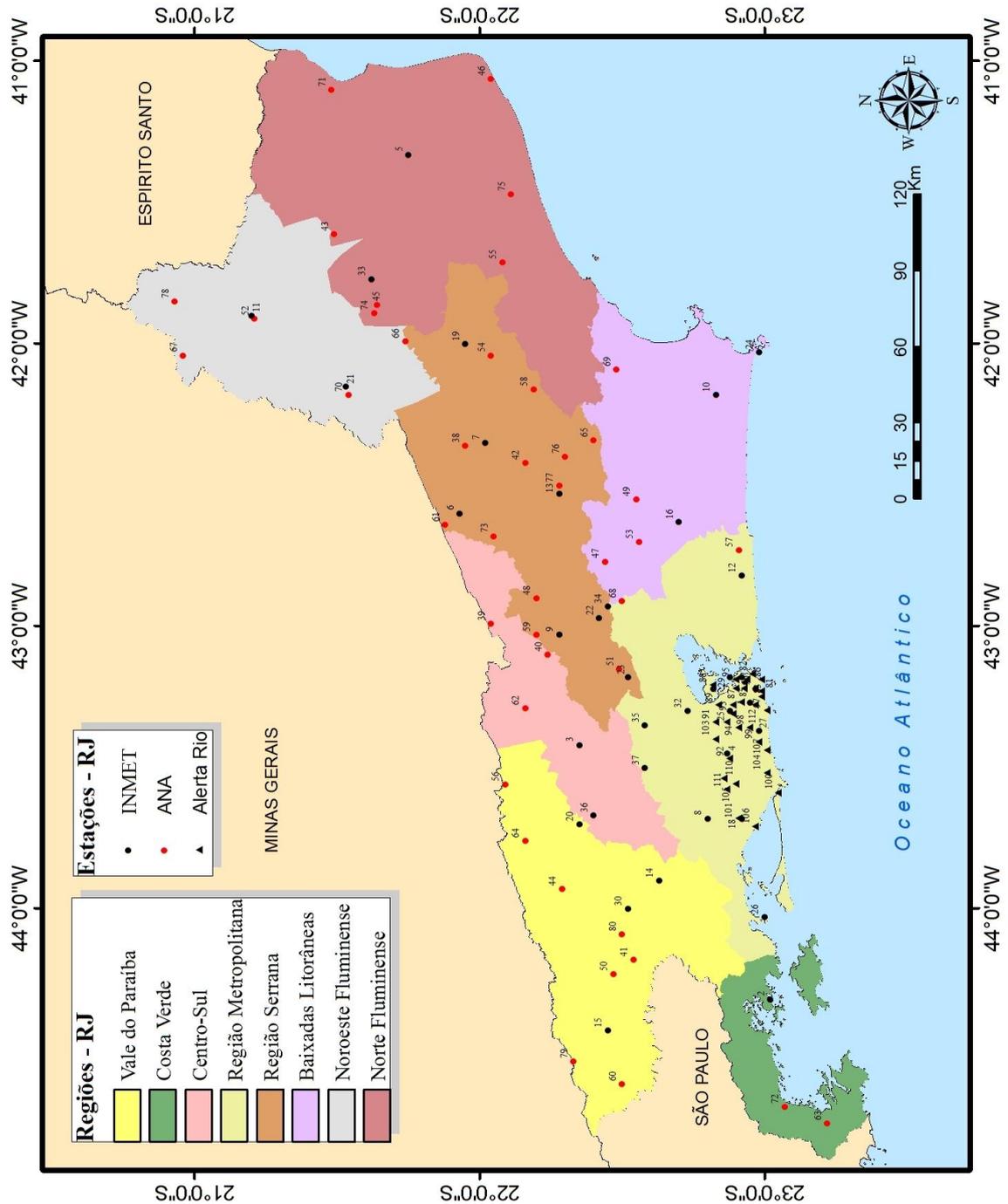


Figura 3.1 – Mapa do Estado do Rio de Janeiro com a localização das estações meteorológicas do INMET (círculos pretos), da ANA (círculos vermelhos) e do Alerta Rio (triângulos) utilizadas nesta pesquisa (informações sobre cada uma das estações estão nas Tabelas 3.1 a 3.3). As áreas coloridas destacam as distintas regiões do Estado, segundo o IBGE.

Para a determinação da climatologia e a investigação de mudanças climáticas em uma determinada região é ideal que se tenha longas séries de dados das variáveis a serem analisadas. Para o estudo climatológico, tais séries foram obtidas a partir das 37 estações meteorológicas convencionais listadas na Tabela 3.1. No caso da temperatura do ar, são apresentados os campos médios sazonais de temperaturas mínima e máxima diárias e também da média anual da amplitude térmica diária. Para a precipitação, são mostrados os totais pluviométricos médios anuais e sazonais, além da média anual dos maiores períodos com dias consecutivos secos. As médias sazonais são calculadas considerando-se o período dezembro-janeiro-fevereiro como verão, março-abril-maio como outono, junho-julho-agosto como inverno e setembro-outubro-novembro como primavera. Destas estações, apenas as 22 primeiras são utilizadas para a detecção de tendências em extremos climáticos, pois possuem dados diários de temperatura e de precipitação. O software ArcGIS (Versão 9.3) é empregado na composição dos mapas climatológicos referentes a estas variáveis.

Tabela 3.1 – Informações sobre as estações meteorológicas do INMET utilizadas neste estudo.

<i>Número</i>	<i>Estação Meteorológica</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Altitude</i>	<i>Período de Dados</i>
1	Alto da Boa Vista	22,95°S	43,27°W	347,1 m	1967 a 2012
2	Angra dos Reis	23,02°S	44,32°W	3,0 m	1961 a 2012
3	Avelar (P. do Alferes)	22,35°S	43,42°W	507,0 m	1985 a 2012
4	Bangu	22,87°S	43,45°W	40,3 m	1961 a 1998
5	Campos	21,75°S	41,33°W	11,2 m	1961 a 2012
6	Carmo	21,93°S	42,60°W	342,2 m	1961 a 2012
7	Cordeiro	22,02°S	42,35°W	505,9 m	1972 a 2012
8	Ecologia Agrícola	22,80°S	43,68°W	33,0 m	1961 a 2007
9	Petrópolis (G. Juriti)	22,28°S	43,03°W	980,0 m	1985 a 2006
10	Iguaba Grande	22,83°S	42,18°W	5,6 m	1991 a 2012
11	Itaperuna	21,20°S	41,90°W	123,6 m	1961 a 2012
12	Maricá	22,92°S	42,82°W	4,0 m	1987 a 2011
13	Nova Friburgo	22,28°S	42,53°W	856,6 m	1961 a 2002
14	Piraí	22,63°S	43,90°W	388,2 m	1961 a 2006
15	Resende	22,45°S	44,43°W	439,9 m	1961 a 2012

Tabela 3.1 – Continuação.					
16	Rio Bonito	22,70°S	42,63°W	62,0 m	1991 a 2012
17	Rio de Janeiro	22,88°S	43,18°W	11,1 m	1961 a 2012
18	Santa Cruz	22,92°S	43,68°W	63,0 m	1964 a 2012
19	Santa Maria Madalena	21,95°S	42,00°W	620,0 m	1961 a 2012
20	Valença (S. Mônica)	22,35°S	43,70°W	364,0 m	1982 a 2007
21	Santo Antônio de Pádua	21,53°S	42,15°W	95,0 m	1961 a 2012
22	Teresópolis	22,42°S	42,97°W	874,2 m	1961 a 2011
23	Araras	22,52°S	43,18°W	820,0 m	1961 a 1990
24	Cabo Frio (Alcalis)	22,98°S	42,03°W	7,0 m	1961 a 1990
25	Engenho de Dentro	22,88°S	43,30°W	30,0 m	1961 a 1990
26	Ilha Guafba	23,00°S	44,03°W	64,0 m	1961 a 1990
27	Jacarepaguá	22,98°S	43,37°W	12,0 m	1961 a 1990
28	Jardim Botânico	22,97°S	43,22°W	5,0 m	1961 a 1990
29	Penha	22,82°S	43,22°W	65,0 m	1961 a 1990
30	Pinheiral	22,52°S	44,00°W	385,0 m	1961 a 1990
31	Santa Teresa	22,92°S	43,18°W	180,0 m	1961 a 1990
32	São Bento (D. de Caxias)	22,73°S	43,30°W	6,0 m	1961 a 1990
33	São Fidélis	21,62°S	41,77°W	74,2 m	1961 a 1990
34	Teresópolis (P. Nacional)	22,45°S	42,93°W	959,0 m	1961 a 1990
35	Tinguá	22,58°S	43,35°W	125,0 m	1961 a 1990
36	Vassouras	22,40°S	43,67°W	437,0 m	1961 a 1990
37	Xerém	22,58°S	43,50°W	143,0 m	1961 a 1990

Os dados da ANA foram utilizados para complementar a pesquisa climatológica de precipitação no Estado do Rio de Janeiro. Ao todo, foram obtidas séries de dados de 43 estações pluviométricas (Tabela 3.2) através do sítio eletrônico <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Além disso, o fato de tais estações possuírem dados diários nos permite aperfeiçoar a verificação de tendências em extremos de chuva ao longo dos últimos anos no Estado do Rio de Janeiro.

Tabela 3.2 – Informações sobre as estações pluviométricas da ANA utilizadas nesta pesquisa.

<i>Número</i>	<i>Estação Meteorológica</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Altitude</i>	<i>Período de Dados</i>
38	Aldeia	21,95°S	42,36°W	376,0 m	1939 a 2008
39	Anta	22,04°S	42,99°W	230,0 m	1944 a 2008
40	Areal	22,24°S	43,10°W	450,0 m	1939 a 2008
41	Barra Mansa	22,54°S	44,18°W	376,0 m	1940 a 2008
42	Bom Jardim	22,16°S	42,42°W	530,0 m	1941 a 2008
43	Cardoso Moreira	21,49°S	41,61°W	20,0 m	1939 a 2008
44	Conservatória	22,29°S	43,93°W	550,0 m	1945 a 2008
45	Dois Rios	21,64°S	41,86°W	50,0 m	1939 a 2008
46	Farol de São Tomé	22,04°S	41,06°W	2,0 m	1966 a 2008
47	Fazenda Carmo	22,44°S	42,77°W	40,0 m	1967 a 2008
48	Fazenda Sobradinho	22,20°S	42,90°W	650,0 m	1936 a 2008
49	Gaviões	22,55°S	42,55°W	1620,0 m	1967 a 2008
50	Glicério	22,47°S	44,23°W	390,0 m	1967 a 2008
51	Itamarati	22,49°S	43,15°W	1085,0 m	1938 a 2008
52	Itaperuna	21,21°S	41,91°W	110,0 m	1942 a 2008
53	Japuiba	22,56°S	42,70°W	50,0 m	1967 a 2008
54	Leitão Cunha	22,04°S	42,04°W	425,0 m	1965 a 2008
55	Macabuzinho	22,08°S	41,71°W	19,0 m	1943 a 2008
56	Manuel Duarte	22,09°S	43,56°W	396,0 m	1942 a 2008
57	Manuel Ribeiro	22,91°S	42,73°W	10,0 m	1967 a 2008
58	Maria Mendonça	22,19°S	42,16°W	800,0 m	1965 a 2008
59	Moreli	22,20°S	43,03°W	600,0 m	1955 a 2008
60	Nhangapi	22,50°S	44,62°W	440,0 m	1956 a 2008
61	Paquequer	21,88°S	42,64°W	143,0 m	1956 a 2008
62	Paraíba do Sul	22,16°S	43,29°W	274,0 m	1939 a 2008
63	Parati	23,22°S	44,76°W	30,0 m	1972 a 2008
64	Pentagna	22,16°S	43,76°W	497,0 m	1944 a 2008
65	Piller	22,40°S	42,34°W	550,0 m	1951 a 2008
66	Ponto de Pergunta	21,74°S	41,99°W	61,0 m	1965 a 2008

67	Porciúncula	20,96°S	42,04°W	188,0 m	1939 a 2008
68	Represa Paraíso	22,50°S	42,91°W	60,0 m	1967 a 2008
69	Rio Dourado	22,48°S	42,09°W	35,0 m	1967 a 2008
70	Santo Antônio de Pádua	21,54°S	42,18°W	96,0 m	1966 a 2008
71	São Francisco de Paula	21,48°S	41,10°W	15,0 m	1972 a 2008
72	São Roque	23,07°S	44,70°W	30,0 m	1967 a 2008
73	Sumidouro	22,05°S	42,68°W	346,0 m	1951 a 2008
74	Três Irmãos	21,63°S	41,89°W	42,0 m	1943 a 2008
75	Usina Quissamã	22,11°S	41,47°W	15,0 m	1966 a 2008
76	Vargem Alta	22,30°S	42,40°W	1100,0 m	1965 a 2008
77	Vargem Grande	22,28°S	42,50°W	680,0 m	1965 a 2008
78	Varre-Sai	20,93°S	41,85°W	650,0 m	1967 a 2008
79	Visconde de Mauá	22,33°S	44,54°W	1030,0 m	1937 a 2008
80	Volta Redonda	22,50°S	44,09°W	418,0 m	1943 a 2008

Os dados do Alerta Rio também foram utilizados para integrar o panorama climatológico de chuva no Estado do Rio de Janeiro, especialmente sobre a capital fluminense. No total, séries de dados de 32 estações pluviométricas (Tabela 3.3) foram obtidas através do sítio eletrônico <http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/>.

Tabela 3.3 – Informações sobre as estações pluviométricas do Alerta Rio utilizadas neste trabalho.

<i>Número</i>	<i>Estação Meteorológica</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Altitude</i>	<i>Período de Dados</i>
81	Anchieta	22,83°S	43,40°W	50,0 m	1997 a 2012
82	Bangú	22,88°S	43,47°W	15,0 m	1997 a 2012
83	Barra (Itanhangá)	23,01°S	43,30°W	7,0 m	1997 a 2012
84	Barra (Riocentro)	22,98°S	43,41°W	1,0 m	1997 a 2012
85	Campo Grande	22,90°S	43,56°W	30,0 m	1997 a 2012
86	Copacabana	22,99°S	43,19°W	90,0 m	1997 a 2012
87	Gericinó	22,87°S	43,58°W	25,0 m	1997 a 2012
88	Grajaú	22,92°S	43,27°W	80,0 m	1997 a 2012

Tabela 3.3 – Continuação.					
89	Grande Méier	22,89°S	43,28°W	25,0 m	1997 a 2012
90	Grota Funda	23,01°S	43,52°W	10,0 m	1997 a 2012
91	Guaratiba	23,05°S	43,59°W	1,0 m	1997 a 2012
92	Ilha do Governador	22,82°S	43,21°W	1,0 m	1997 a 2012
93	Irajá	22,83°S	43,34°W	20,0 m	1997 a 2012
94	Jacarepaguá (C. Deus)	22,95°S	43,36°W	15,0 m	1997 a 2012
95	Jacarepaguá (Tanque)	22,91°S	43,36°W	73,0 m	1997 a 2012
96	Jardim Botânico	22,97°S	43,22°W	1,0 m	1997 a 2012
97	Laranjeiras	22,94°S	43,19°W	60,0 m	1997 a 2012
98	Madureira	22,87°S	43,34°W	45,0 m	1997 a 2012
99	Mendanha	22,86°S	43,54°W	30,0 m	1997 a 2012
100	Penha	22,84°S	43,28°W	111,0 m	1997 a 2012
101	Piedade	22,89°S	43,31°W	72,0 m	1997 a 2012
102	Recreio	23,01°S	43,44°W	10,0 m	1997 a 2012
103	Rocinha	22,99°S	43,25°W	160,0 m	1997 a 2012
104	Santa Cruz	22,91°S	43,68°W	15,0 m	1997 a 2012
105	Santa Teresa	22,93°S	43,20°W	170,0 m	1997 a 2012
106	São Cristóvão	22,90°S	43,22°W	25,0 m	1997 a 2012
107	Saúde	22,90°S	43,19°W	35,0 m	1997 a 2012
108	Sepetiba	22,97°S	43,71°W	62,0 m	1997 a 2012
109	Sumaré	22,97°S	43,28°W	355,0 m	1997 a 2012
110	Tijuca	22,93°S	43,22°W	340,0 m	1997 a 2012
111	Urca	22,96°S	43,17°W	90,0 m	1997 a 2012
112	Vidigal	22,99°S	43,23°W	85,0 m	1997 a 2012

Nas Tabelas 3.4 e 3.5 são apresentadas as informações sobre as falhas das estações meteorológicas 1 a 22 do INMET em relação aos dados diários de temperatura e precipitação, respectivamente. As estações meteorológicas 23 a 37 do INMET são normais climatológicas, portanto, não são mostradas. Somente são exibidas as lacunas

do INMET, pois os dados oriundos da ANA e do Alerta Rio possuem uma boa consistência e suas falhas, quando existentes, são inferiores a 5 dias em um único ano.

Tabela 3.4 – Informações sobre as falhas nos dados de temperatura das estações meteorológicas do INMET utilizadas neste trabalho. A cor azul está associada aos anos sem falhas; a cor vermelha corresponde aos anos com, no mínimo, um mês de falhas.

Temperatura		1960												1970												1980												1990												2000												2010											
Número	Estação	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3																		
1	Alto da Boa Vista	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
2	Angra dos Reis	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
3	Avelar (P. do Alferes)	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
4	Bangu	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
5	Campos	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
6	Carmo	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
7	Cordeiro	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
8	Ecologia Agrícola	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
9	Petrópolis (G. Juriti)	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
10	Iguaba Grande	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
11	Itaperuna	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
12	Maricá	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
13	Nova Friburgo	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
14	Pirai	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
15	Resende	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
16	Rio Bonito	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
17	Rio de Janeiro	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
18	Santa Cruz	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
19	Santa Maria Madalena	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
20	Valença (S. Mônica)	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
21	Santo Antônio de Pádua	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
22	Teresópolis	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											

Tabela 3.5 – Informações sobre as falhas nos dados de precipitação das estações meteorológicas do INMET utilizadas neste trabalho. A cor azul está associada aos anos sem falhas; a cor vermelha corresponde aos anos com, no mínimo, um mês de falhas.

Precipitação		1960												1970												1980												1990												2000												2010											
Número	Estação	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3																		
1	Alto da Boa Vista	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
2	Angra dos Reis	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
3	Avelar (P. do Alferes)	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
4	Bangu	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
5	Campos	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
6	Carmo	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
7	Cordeiro	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
8	Ecologia Agrícola	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
9	Petrópolis (G. Juriti)	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
10	Iguaba Grande	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
11	Itaperuna	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
12	Maricá	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
13	Nova Friburgo	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
14	Pirai	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
15	Resende	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
16	Rio Bonito	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
17	Rio de Janeiro	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
18	Santa Cruz	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
19	Santa Maria Madalena	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
20	Valença (S. Mônica)	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
21	Santo Antônio de Pádua	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											
22	Teresópolis	[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]												[Blue]											

3.2 Modelo Climático Regional Eta-HadCM3

Nesta pesquisa, serão utilizadas as simulações do clima presente (1961 – 1990) e as projeções do clima futuro (2041 – 2070) geradas pelo modelo regional Eta 40 km do INPE aninhado ao MCGAO HadCM3 do *Hadley Centre*. As informações relativas a tal modelo regional são sumarizadas a seguir e podem ser obtidas em Chou *et al.* (2012) e Marengo *et al.* (2012).

3.2.1 Ensemble do Modelo Global HadCM3 (Hadley Centre)

As condições de contorno do modelo Eta são fornecidas pelo membro controle e por mais 3 membros do modelo HadCM3 (Gordon *et al.*, 2000). A atmosfera do HadCM3 possui uma resolução horizontal de latitude $2,5^\circ$ x longitude $3,75^\circ$, com 19 níveis na vertical (Pope *et al.*, 2000). O modelo HadCM3 tem se mostrado bastante favorável para previsões climáticas dentre os demais modelos do conjunto do IPCC-AR4 para a simulação do clima no Brasil (Marengo *et al.*, 2010).

Experimentos com conjunto (*ensemble*) fornecem os meios pelos quais as incertezas nas projeções de mudanças climáticas podem ser exploradas. O *ensemble* do modelo HadCM3 utiliza uma aproximação em que a estrutura de um simples modelo é usada com perturbações introduzidas aos esquemas de parametrizações físicas do mesmo. Este “*ensemble* de perturbações físicas” (EPF) é muito caro em termos computacionais, contudo é um método capaz de examinar sistematicamente as incertezas nos diferentes componentes do modelo. Isto é feito inicialmente através da identificação de parâmetros no modelo que são tanto incertos quanto importantes para a resposta final do mesmo e, assim, torna-se viável utilizar um *ensemble* de vários membros para explorar as implicações destes parâmetros incertos (Collins *et al.*, 2006). Assim, uma variedade de parâmetros incertos foi identificada na atmosfera e na superfície terrestre do modelo. Estes parâmetros foram modificados dentro de um *ensemble* de grande extensão (mais de 300 membros), e então foram feitas realizações a partir de um eficiente sistema computacional. Deste *ensemble*, um subconjunto de 16 modelos variantes, cada um com uma combinação diferente de configurações de parâmetros, foi selecionado de acordo com seu desempenho na simulação real do clima atual (Murphy *et al.*, 2007). Em adição ao modelo HadCM3 padrão, os 16 modelos variantes foram rodados em modo transiente totalmente acoplado, forçados com o cenário SRES-A1B gerado pelas concentrações de CO₂ no final do século XXI. Apesar

de cada membro do *ensemble* ser forçado com as mesmas concentrações de CO₂, o efeito das diferentes combinações de configurações de parâmetros altera o grau de medida dos padrões de mudanças climáticas. A faixa de incerteza da temperatura média global no final do século XXI através dos membros do modelo possui magnitude similar à amplitude gerada pelo *ensemble* do AR4 (Collins *et al.*, 2006).

3.2.2 Modelo Regional Eta (INPE)

O clima regional é simulado utilizando-se o modelo regional Eta do INPE, que é procedente do modelo Eta (Mesinger *et al.*, 2011) desenvolvido na Universidade de Belgrado (Sérvia) e implementado operacionalmente pelo NCEP (Black, 1994). O modelo Eta foi escolhido pelo fato do mesmo ser utilizado operacionalmente de maneira satisfatória no INPE. Além disso, o sistema de coordenada vertical η utilizado neste modelo é recomendado sobre o continente sulamericano devido à presença da Cordilheira dos Andes.

A coordenada η é definida como:

$$\eta = \left[\frac{(p - p_t)}{(p_{sfc} - p_t)} \right] * \left[\frac{(p_{ref}(Z_{sfc}) - p_t)}{(p_{ref}(0) - p_t)} \right],$$

onde p é a pressão e Z é a altura. Os índices t e sfc indicam o topo e a superfície do modelo, respectivamente. O índice ref é relativo aos valores de uma referência atmosférica, ou seja, $p_{ref}(0)$ é a pressão na altura 0 e $p_{ref}(Z_{sfc})$ é a pressão à superfície.

Este modelo tem sido utilizado em estudos de previsões sazonais para a América do Sul (Bustamante *et al.*, 2006), onde as previsões foram melhoradas com respeito ao modelo do INPE, que possui uma resolução T62. O modelo é estabelecido com 38 níveis na vertical, com topo em 25 hPa através da coordenada vertical η (Mesinger, 1984). O tratamento da turbulência é baseado no procedimento de nível 2,5 de Mellor – Yamada (Mellor e Yamada, 1974); o modelo de transferência radiativa foi desenvolvido pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL), com onda longa e onda curta parametrizadas de acordo com Fels e Schwarzkopf (1975) e Lacis e Hansen (1974), respectivamente.

O modelo Eta utiliza o esquema de Betts – Miller (Betts e Miller, 1986) modificado por Janjic (Janjic, 1994) para parametrizar convecção de cúmulos rasos e profundos; a microfísica das nuvens é parametrizada utilizando o esquema de Zhao (Zhao e Carr, 1997). Os processos de transferência de energia na superfície terrestre são parametrizados pelo esquema NOAH (Ek *et al.*, 2003). Uma descrição mais detalhada da dinâmica do modelo pode ser encontrada em Chou *et al.* (2012).

Algumas modificações foram feitas no modelo Eta do INPE para adaptá-lo às rodadas de mudanças climáticas através da utilização da TSM procedente da média mensal do modelo HadCM3. O modelo atualiza a TSM diária por interpolação linear. A principal modificação no modelo Eta é o calendário de 360 dias, que foi necessário a fim de se utilizar as condições de contorno do HadCM3. A inclusão do aumento do CO₂ no modelo Eta do INPE foi possível através da atualização dos índices de absorção e transmissividade a cada 5 anos. Alterações no código original do modelo Eta do INPE foram feitas de modo que a concentração de CO₂ pudesse variar de acordo com os cenários. Em escalas de tempo decadais, uma interpolação linear foi desenvolvida de tal maneira que os valores anuais de CO₂ fossem gerados de forma a evitar saltos repentinos.

3.2.3 Integração do Modelo Climático Regional Eta-HadCM3

Como descrito na seção 3.2.1, o EPF do modelo HadCM3 com a forçante do efeito estufa atmosférico do cenário SRES-A1B é composto pelo modelo padrão mais 16 membros do mesmo, cada um com uma diferente sensibilidade climática. Espera-se que a grande variação na resposta da temperatura global no final do século XXI produza alguma grande variação também na resposta da temperatura do clima regional através de uma regionalização dinâmica (*downscaling*). Três membros mais o controle foram selecionados para medir o grau de incerteza no modelo global, uma vez que os mesmos representam razoavelmente bem o clima sobre a América do Sul. Desta forma, uma maior gama possível de simulações de modelos regionais de plausíveis climas futuros pode ser gerada.

Os conjuntos das condições de contorno do modelo HadCM3 passados ao modelo Eta do INPE foram denominados: CNTRL, HIGH, MID e LOW. O CNTRL é o membro não perturbado; o HIGH é um membro com alta sensibilidade climática, o MID é um membro com média sensibilidade e o LOW é um membro com baixa

sensibilidade. O membro não perturbado está entre os membros de baixa e média sensibilidade. Apesar de somente um cenário de emissões (SRES-A1B) estar disponível, as diferenças na sensibilidade dos modelos podem fornecer a ideia representativa de climas futuros plausíveis através de diferentes caminhos de emissões. O membro de alta sensibilidade provê mudanças possíveis semelhantes aos cenários SRES-A2 ou SRES-A1FI. Da mesma maneira, as alterações vistas no membro de baixa sensibilidade podem fornecer uma ilustração qualitativa de um cenário de baixas emissões, como o SRES-B1 (Marengo *et al.*, 2011).

O modelo Eta aninhado às condições de fronteira do modelo HadCM3 (modelo climático regional Eta-HadCM3) foi rodado no INPE para o clima presente (1961 – 1990) e para o clima futuro (2011-2040; 2041-2070 e 2071-2100), forçado pela TSM fornecida pelo modelo HadCM3, como descrito anteriormente. Análises das simulações do clima presente são apresentadas em Chou *et al.* (2012) e algumas projeções do clima futuro são mostradas em Marengo *et al.* (2012). No presente trabalho, as análises das mudanças presentes e futuras na temperatura e na precipitação em relação aos dados simulados serão feitas para o intervalo de tempo 2041-2070. A escolha de um período futuro com distância intermediária entre 2011 e 2099 se deve ao fato de, em caso de um período futuro demasiadamente distante como 2100, há uma maior dificuldade de apreensão temporal para os tomadores de decisão política. Além disso, é a partir da década de 2040 que as tendências das mudanças climáticas começam a apresentar dispersão maior nas simulações do modelo Eta-HadCM3.

3.2.4 Dados do Modelo Eta-HadCM3

A Figura 3.2 apresenta a topografia do modelo Eta-HadCM3 (40 km) no entorno do Estado do Rio de Janeiro utilizados neste trabalho. No centro de cada quadrado está o valor da altitude (m) no ponto de grade do modelo, onde se encontram os valores das variáveis, que são representativos de todo o quadrado desenhado.

Como as rodadas do modelo Eta-HadCM3 são fornecidas em intervalos de 6 horas (0, 6, 12 e 18 Z), considerou-se como temperatura máxima (mínima) diária o maior (menor) valor dentre as quatro saídas. Para a chuva diária o total pluviométrico é acumulado entre 18 Z do dia anterior até 12 Z do dia em questão, assim como estabelecido pela OMM (Organização Meteorológica Mundial).

Em relação às projeções futuras, a verificação das tendências dos indicadores de extremos climáticos é feita com base nas diferenças entre o clima futuro (2041-2070) e o clima presente (1961-1990). Mapas das diferenças médias dos valores dos índices (valores mínimos e máximos entre os quatro membros) no clima futuro e a média dos quatro membros no clima presente do modelo Eta-HadCM3 foram criados.

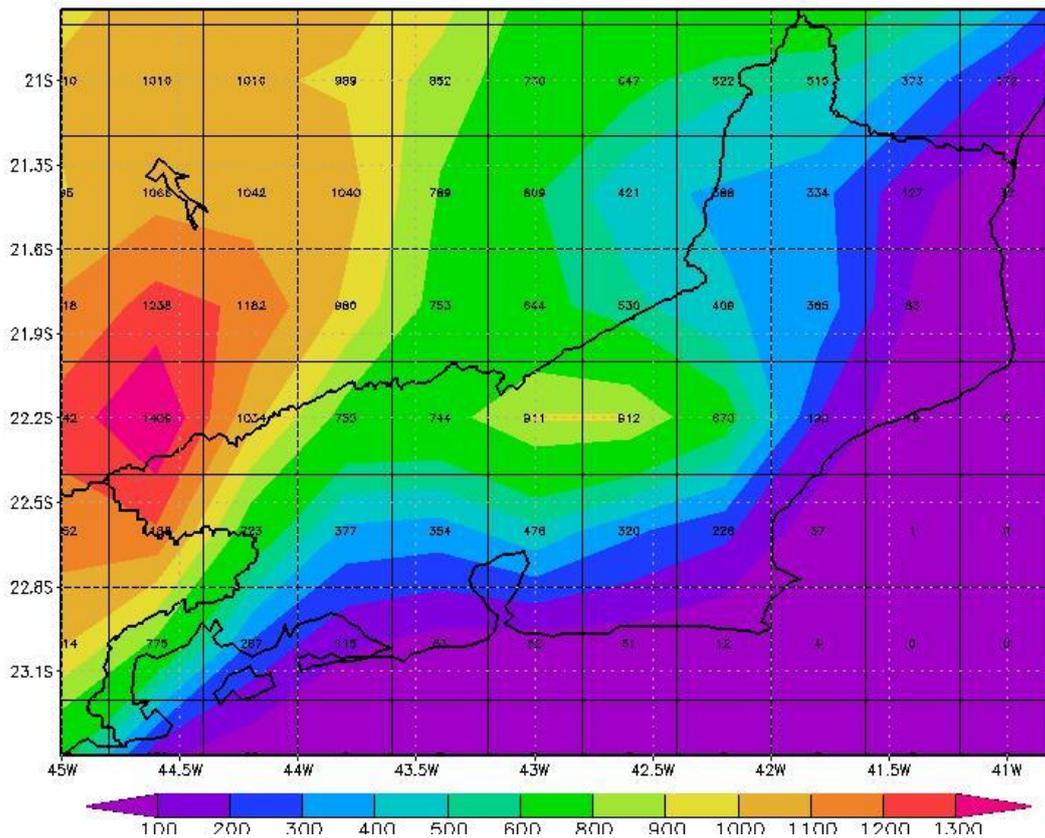


Figura 3.2 – Topografia (m) do modelo Eta-HadCM3 sobre o Estado do Rio de Janeiro.

3.3 Indicadores de Extremos Climáticos

Os indicadores de extremos climáticos podem ser divididos em 5 (cinco) diferentes categorias:

- Índices baseados em percentis, incluindo a ocorrência anual de noites frias (TN10p), noites quentes (TN90p), dias frios (TX10p), dias quentes (TX90p), chuvas fortes (R95p) e chuvas intensas (R99p); os valores dos percentis foram calculados com base na climatologia de 1961-1990;
- Índices absolutos que representam os valores máximo e mínimo anuais. Eles incluem a maior temperatura máxima anual (TXx), maior temperatura mínima

anual (TN_x), menor temperatura máxima anual (TX_n), menor temperatura mínima anual (TN_n), máxima precipitação anual em 1 dia (RX1day) e máxima precipitação anual em 5 dias consecutivos (RX5day);

- c) Índices em que os limiares são definidos pelo número de dias em que a temperatura ou a precipitação ficaram abaixo ou acima de um valor fixo, incluindo a ocorrência anual de dias com temperatura máxima acima de 25°C (SU25), temperatura mínima acima de 20°C (TR20) e número de dias no ano com precipitação acima de 30 mm (R30mm);
- d) Índices com duração definida por períodos excessivos de calor, frio, chuva ou seca. Eles incluem a duração de ondas de calor (WSDI), ondas de frio (CSDI), períodos úmidos (CDW) e secos (CDD);
- e) Outros índices incluem a precipitação anual total (PRCPTOT), distribuição média da precipitação anual total (SDII), temperaturas mínima (TMINmean) e máxima (TMAXmean) anuais médias e a amplitude térmica anual média (DTR).

Dentre os indicadores de extremos climáticos citados anteriormente, foram selecionados 9 (nove) com maior relevância de análise, assim como aplicados nos demais estudos por outros pesquisadores. Tais índices são apresentados nas Tabelas 3.6 à 3.8.

Tabela 3.6 – Índices de extremos climáticos de temperatura mínima.

Indicador Temperatura Mínima	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
TMINmean	Temperatura mínima anual média	°C
TN10p	Porcentagem anual de dias em que TN < percentil 10	%
TN90p	Porcentagem anual de dias em que TN > percentil 90	%

Tabela 3.7 – Índices de extremos climáticos de temperatura máxima.

Indicador Temperatura Máxima	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
TMAXmean	Temperatura máxima anual média	°C
TX10p	Porcentagem anual de dias em que TX < percentil 10	%
TX90p	Porcentagem anual de dias em que TX > percentil 90	%

Tabela 3.8 – Índices de extremos climáticos de precipitação.

Indicador Precipitação	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
PRCPTOT	Precipitação anual total	mm
R95p	Precipitação anual total dos dias em que PRCP > percentil 95	mm
CDD	Número máximo de dias secos consecutivos no ano (PRCP < 1 mm)	dias

O programa RClimdex (Zhang e Yang, 2004) é projetado para fornecer uma interface amigável para o cálculo de tais indicadores de extremos climáticos e foi aperfeiçoado pelo Serviço Meteorológico Canadense. Tal programa calcula estes índices e está disponível no sítio eletrônico <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/index.shtml>.

3.4 Testes Estatísticos

Para a avaliação de significância nas tendências climáticas presentes foi utilizado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall (Sneyers, 1975). Este teste considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples). O teste de Mann-Kendall é o método mais apropriado para analisar a significância de possíveis mudanças climáticas em séries climatológicas (Goossens e Berger, 1986).

Uma das vantagens deste teste é o fato do mesmo ser um teste não paramétrico, ou seja, os dados não precisam pertencer a uma distribuição particular. Outra vantagem

é que seu resultado é menos afetado por valores *outliers*, pois seu cálculo é baseado no sinal das diferenças, e não diretamente nos valores da variável. As fórmulas para o cálculo do teste estatístico de Mann-Kendall são apresentadas nas equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$Z = \frac{S + u}{[VAR(S)]^{1/2}} \quad (3.1)$$

onde: $u = -1$ se $S > 0$, $u = 0$ se $S = 0$ e $u = +1$ se $S < 0$

sendo:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n sign(x_j - x_k) \quad (3.2)$$

$$\text{onde: } sign(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{se } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{se } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

$$\text{e: } VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (3.3)$$

Nas equações anteriores, x são as séries temporais, variando de k ($j = k + 1$) a n . O número de grupos de valores repetidos é dado por g e o número de valores repetidos em cada grupo p (até g) é representado por t . A tendência é indicada pelo valor de Z , onde um Z positivo (negativo) significa uma tendência crescente (decrecente). Se a probabilidade p do teste de Mann-Kendall for menor que o nível de significância α , uma tendência estatisticamente significativa existe, enquanto que um valor de p maior que α confirma uma tendência não significativa. Para amostras onde não há tendência, o valor de Z é próximo de 0 e o valor de p é próximo de α .

A Curvatura de Sen é um método não paramétrico (assumindo uma tendência linear) utilizado para estimar a magnitude das tendências (Sen, 1968). Para o cálculo da Curvatura de Sen, expressa pelo valor de b na Equação 3.4, computam-se todas as curvaturas de todos os pares de valores usando uma série temporal. Como a Curvatura de Sen é insensível a valores *outliers* e dados ausentes, tal teste é mais rigoroso que a

usual curvatura de regressão e provê uma medida mais realística das tendências numa série temporal.

$$b = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_k}{j - i} \right), \forall j > i \quad (3.4)$$

4. CLIMATOLOGIA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

O Estado do Rio de Janeiro localiza-se entre os paralelos 20,5 e 23,5°S (aproximadamente 300 km de extensão norte-sul) e os meridianos 41 e 45°W (cerca de 400 km de extensão oeste-leste). Apesar de sua área reduzida, 43.780,157 km² (IBGE, 2010), o Estado apresenta um clima bastante diversificado em virtude da orografia acidentada, com morros, serras, vales, vegetação pluralizada, regiões de baixada e baías, além da proximidade com o Oceano Atlântico (Figura 4.1). Além disso, a posição latitudinal do Estado do Rio de Janeiro favorece sua ampla exposição à radiação solar. Nos campos da distribuição espacial de temperatura do ar e de precipitação destaca-se a presença marcante da Serra do Mar, localmente denominada de Serra dos Órgãos, com altitudes que variam entre 100 e 2.275 m.

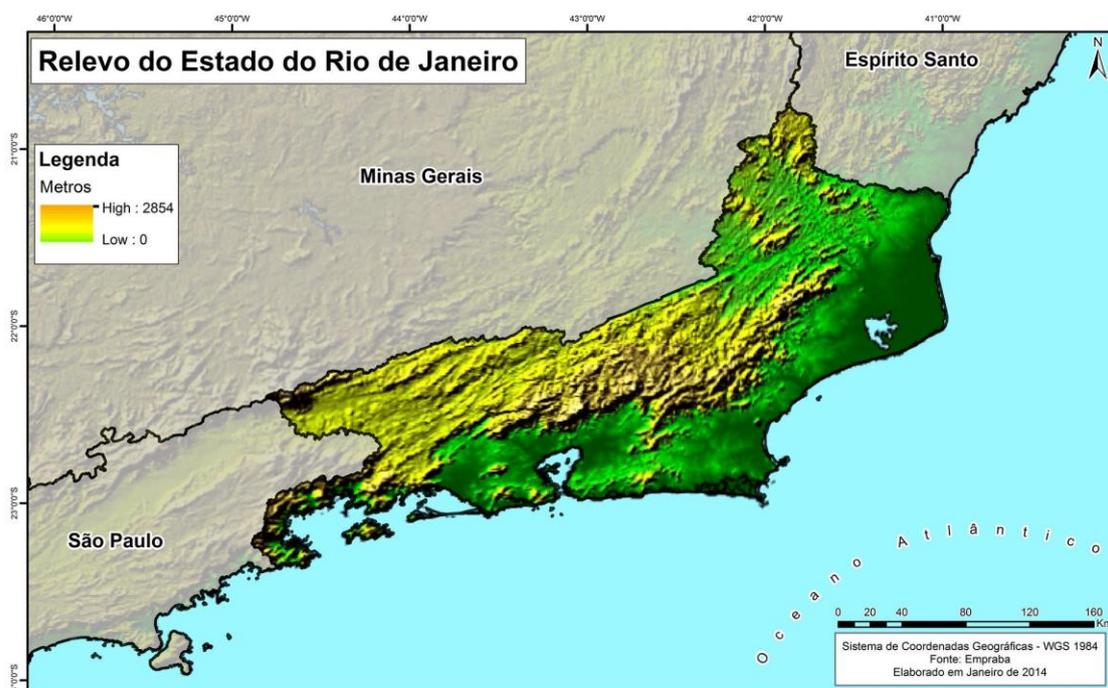


Figura 4.1 – Relevo do Estado do Rio de Janeiro.

Como visto no Capítulo 2, a Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Rio de Janeiro (FIDERJ) em 1978 publicou um atlas com indicadores climatológicos do Estado do Rio de Janeiro, incluindo temperatura, precipitação e vento. Tal trabalho é de valedoura utilidade, pois apresenta resultados climatológicos de um total de 59 estações meteorológicas, sendo 35 do INMET, 23 do Departamento

Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e 1 da Light para o período de 1931 a 1975 (45 anos). Entretanto, as análises associadas à temperatura do ar (35 estações) restringem-se somente às suas respectivas médias anuais, não levando em consideração os valores máximos e mínimos registrados diariamente. Quanto à verificação do comportamento da precipitação (59 estações), nota-se que a ausência de estações meteorológicas em dadas áreas omite alguns detalhes importantes relacionados à distribuição da variável como, por exemplo, os máximos de chuva encontrados ao longo da Serra dos Órgãos. Além disso, as análises sazonais das variáveis meteorológicas são realizadas com base em apenas um único mês representativo daquela estação do ano.

Neste trabalho, os aspectos climatológicos do Estado do Rio de Janeiro são verificados a partir de 112 estações meteorológicas, sendo 37 do INMET, 43 da ANA e 32 do Alerta Rio, ou seja, uma maior contribuição de postos. Destas estações, as 37 do INMET e mais uma do Alerta Rio (São Cristóvão) são usadas na análise da temperatura do ar, enquanto que todas as 112 estações são utilizadas para a avaliação da precipitação. Nos itens a seguir são analisadas as distribuições espacial e temporal das temperaturas mínima e máxima do ar e da precipitação no Rio de Janeiro. Além disso, outras características relevantes do clima no Estado são destacadas neste capítulo, tais como a variação diurna da temperatura e os períodos de estiagem.

4.1 Temperatura Mínima

Os campos de temperatura mínima do ar média sobre o Estado do Rio de Janeiro são apresentados na Figura 4.2 para as quatro estações do ano. Como esperado, a altitude e a proximidade do oceano são os principais fatores controladores desta variável. Notam-se menores valores durante todo o ano nas áreas mais elevadas (especialmente na Região Serrana), com temperaturas mínimas médias oscilando entre 9,5 e 11°C no inverno e entre 15,5 e 17°C no verão. Valores mais elevados ocorrem nas áreas de baixadas e planícies, atingindo principalmente a Zona Norte do Município do Rio de Janeiro e os litorais das Baixadas Litorâneas e do Norte Fluminense, onde os valores médios de temperatura mínima variam entre 17 e 18,5°C no inverno e entre 21,5 e 23°C no verão. No Vale do Paraíba e no Centro-Sul, tais valores oscilam entre 12,5 e 14°C no inverno e entre 17 e 18,5°C no verão. Certamente as temperaturas mínimas médias anuais mais elevadas no Norte/Noroeste Fluminense se devem, além da menor latitude, à influência dos ventos mais quentes de quadrante norte oriundos do ASAS, que são frequentes e intensos durante praticamente todo o ano nestas regiões.

Nas estações de transição (Figuras 4.2b e 4.2d), verifica-se que as temperaturas mínimas médias no outono são levemente mais elevadas do que na primavera, com exceção da Região Serrana, onde os valores permanecem em torno de 14°C em ambas as estações. No restante do Estado observa-se uma diferença de temperatura de cerca de 1 a 2°C entre o outono e a primavera. Do interior do Estado até o litoral, as temperaturas mínimas médias no outono variam de 16 a 20°C, sendo que na primavera estes valores ficam entre 15 e 19°C.

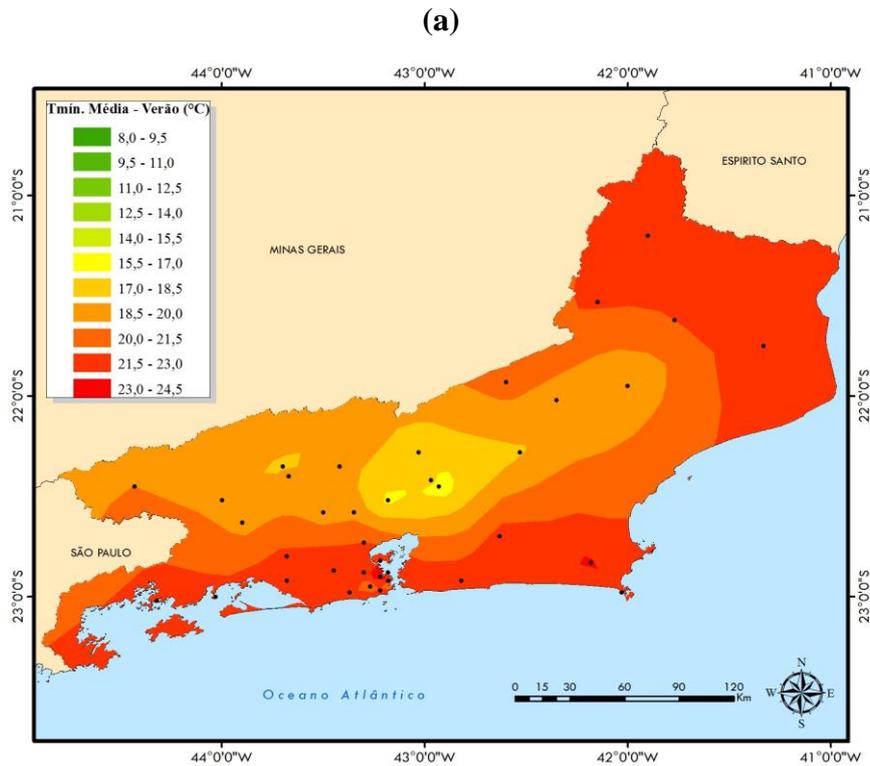
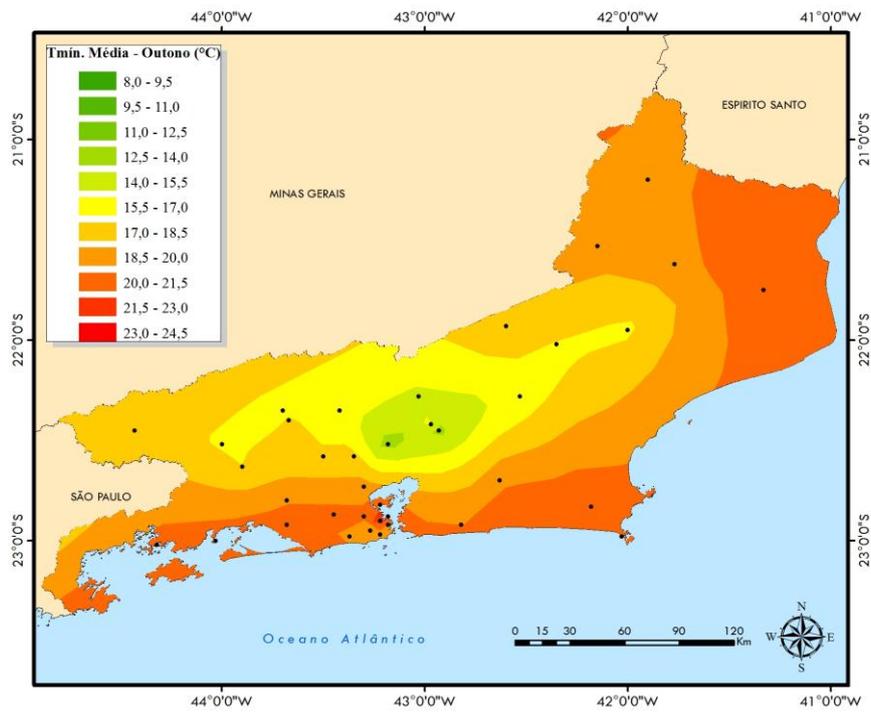


Figura 4.2 – Temperaturas mínimas médias (°C) no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera no Estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observados do INMET.

(b)



(c)

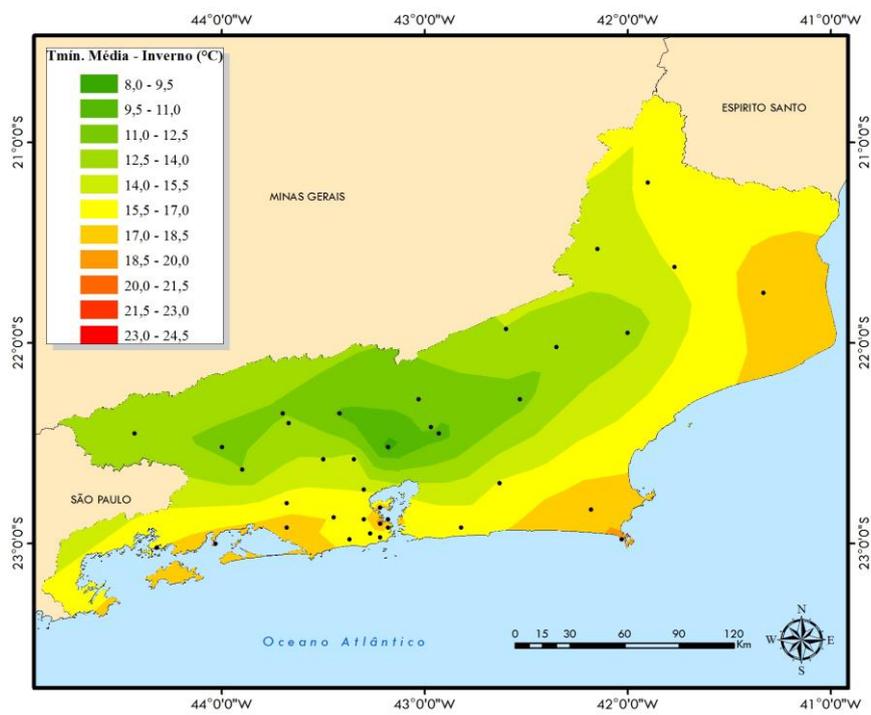


Figura 4.2 – Continuação.

(d)

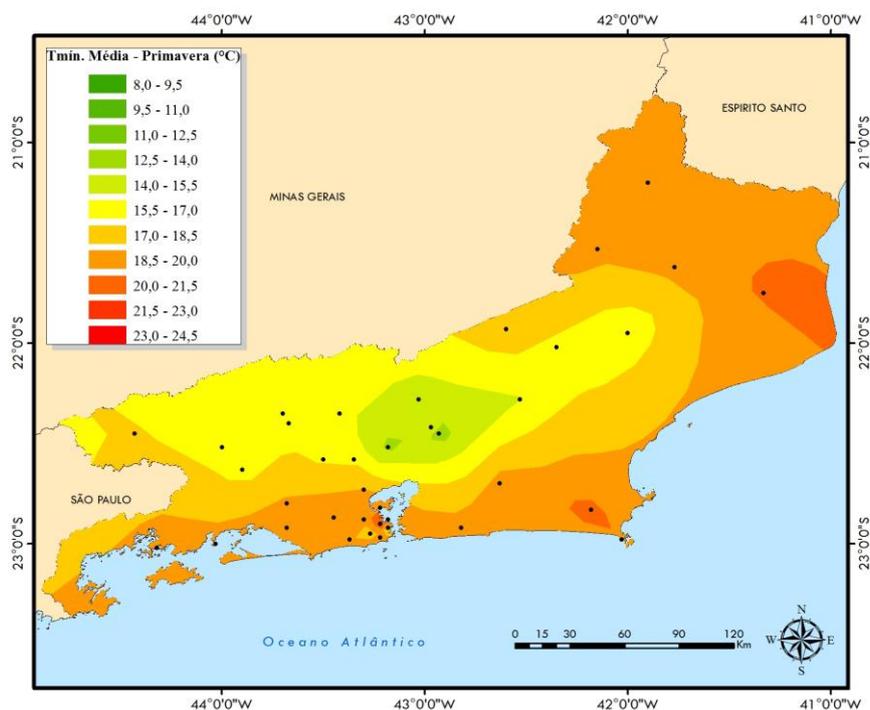


Figura 4.2 – Final.

4.2 Temperatura Máxima

A Figura 4.3 apresenta a distribuição média de temperatura máxima no Estado do Rio de Janeiro para o verão, outono, inverno e primavera. Assim como para a temperatura mínima, a altitude e a proximidade do mar também contribuem para a variação local desta variável. As menores temperaturas máximas médias anuais oscilam entre 21,5 e 23°C no inverno e entre 26 e 27,5°C no verão na Região Serrana. Os valores mais elevados encontram-se na Região Metropolitana e no Norte/Noroeste Fluminense, oscilando entre 26 e 27,5°C no inverno e entre 32 e 33,5°C no verão. As ilhas de calor também podem ser consideradas um fator que altera o campo de temperatura. A ilha de calor urbana é o calor característico das áreas urbanas, quando comparadas com seus arredores (não urbanizados) e geralmente refere-se ao aumento na temperatura do ar (principalmente à noite), mas pode igualmente referir-se ao calor relativo da superfície ou materiais subsuperficiais (Manley, 1958). Neste caso, a Região Metropolitana do Rio de Janeiro apresenta temperaturas máximas médias maiores que seu entorno. Na Costa Verde, os valores variam entre 23 a 24,5°C no inverno e entre 29 e 30,5°C no verão. Já no Vale do Paraíba e no Centro-Sul, as temperaturas máximas médias variam entre 24,5 e 26°C no inverno e entre 29 e 30,5°C no verão.

Nas estações de transição, assim como visto anteriormente para a temperatura mínima, observa-se que o outono (Figura 4.3b) também possui temperaturas máximas médias um pouco superiores às da primavera (Figura 4.3d). Do sul para o norte do Estado, as temperaturas máximas médias variam entre 26 e 32°C no outono e entre 25 e 31°C na primavera, passando por 24°C na Região Serrana em ambas as estações.

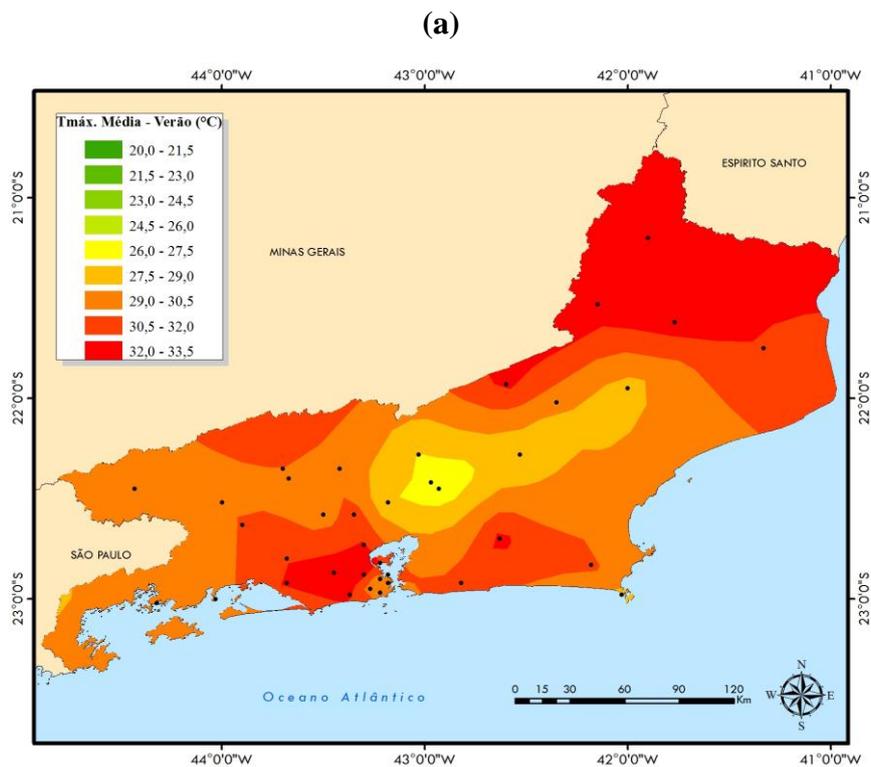
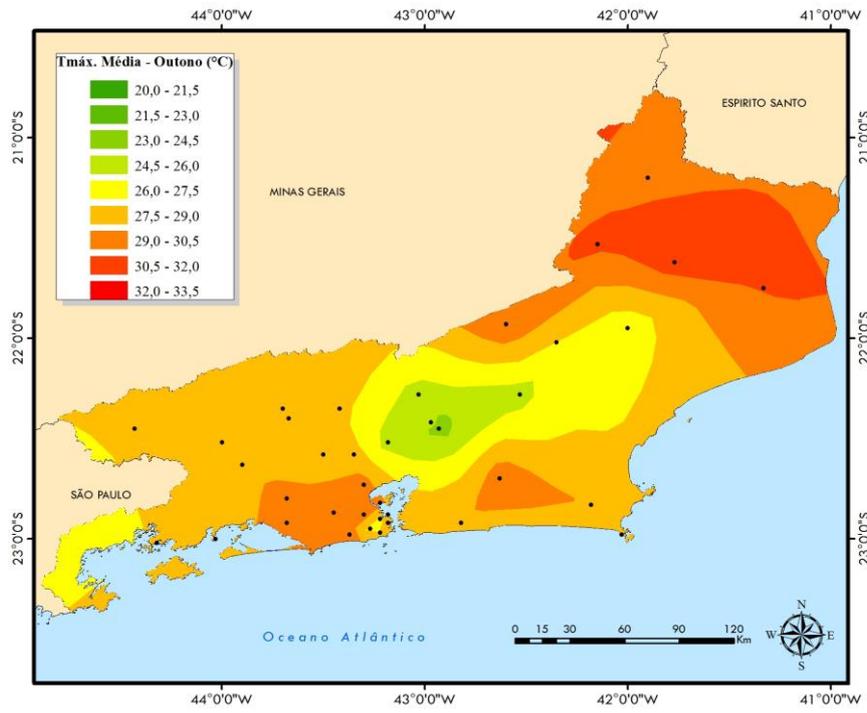


Figura 4.3 – Temperaturas máximas médias (°C) no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera no Estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observados do INMET.

(b)



(c)

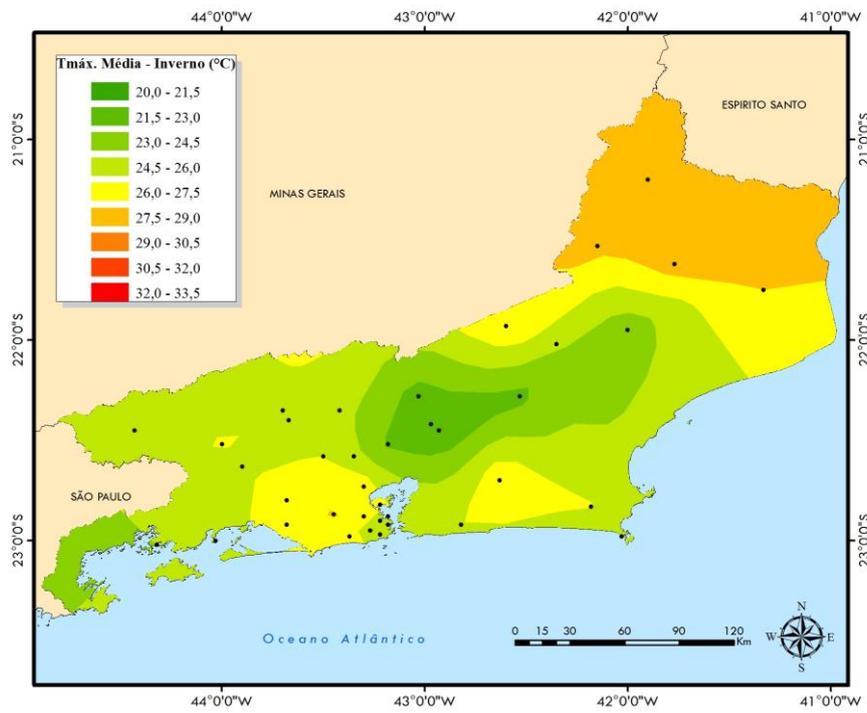


Figura 4.3 – Continuação.

(d)

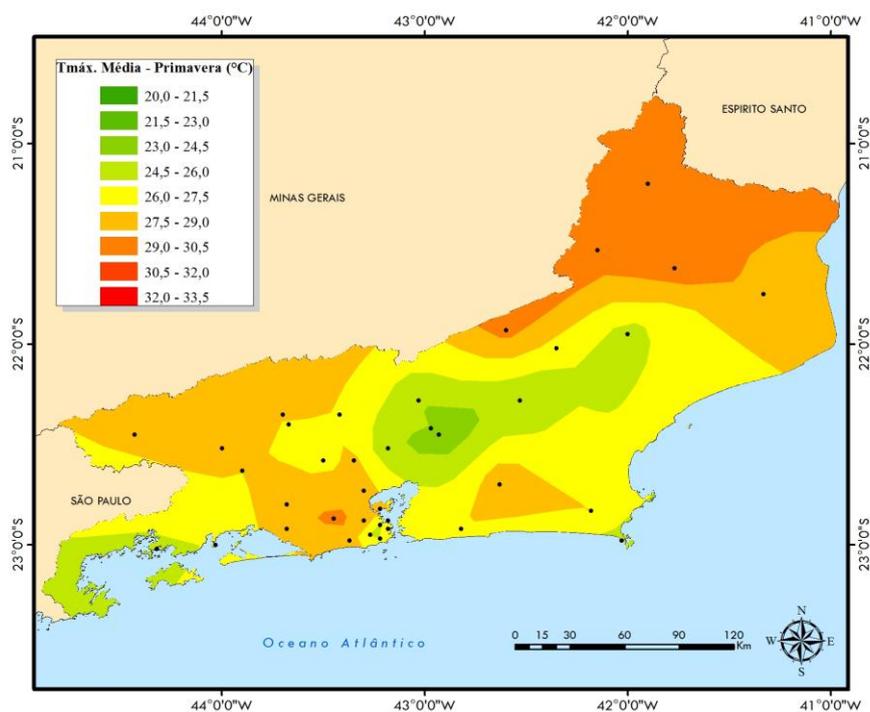


Figura 4.3 – Final.

A Figura 4.4 apresenta as diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas médias anuais (amplitude térmica – DTR) do Rio de Janeiro a fim de se obter uma distribuição da amplitude térmica diária média no Estado. Nota-se que há um gradiente levemente pronunciado desta amplitude térmica média na direção norte-sul. Nos oceanos, os elevados valores de calor específico e a intensa mistura na camada superficial ocasionam uma grande inércia térmica dos mesmos, reduzindo as variações de temperatura durante o dia nas áreas costeiras (Peixoto e Oort, 1993), portanto tais regiões mostram uma amplitude térmica menor do que nas demais áreas (cerca de 4 a 7°C). Em contraste, as regiões mais afastadas do oceano possuem uma maior amplitude térmica (entre 10 e 13°C) em função de não sofrerem a influência marítima. Em um pequeno trecho da Zona Oeste da Cidade do Rio de Janeiro, a maior amplitude térmica (por volta de 7 a 10°C) em relação às demais áreas litorâneas pode ser explicado em virtude do elevado adensamento urbano e por se localizar a sotavento do Maciço da Tijuca e do Maciço da Pedra Branca.

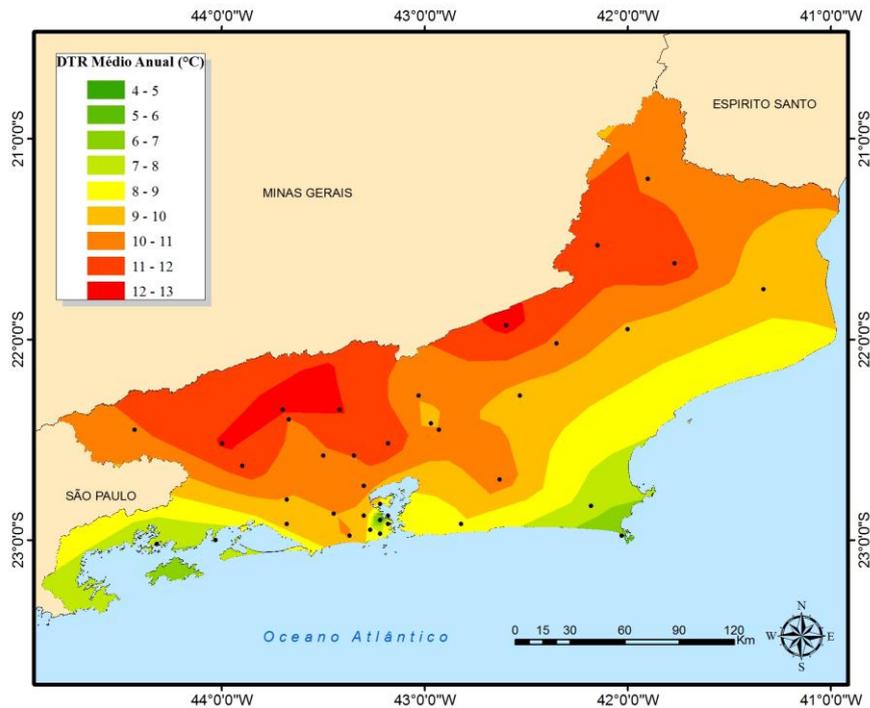


Figura 4.4 – Diferença entre as temperaturas máximas e mínimas (amplitude térmica) médias anuais (°C) no Estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observados do INMET.

4.3 Precipitação

Assim como a temperatura do ar, a precipitação também sofre considerável influência da topografia, com máximos nas áreas de elevada altitude e mínimos sobre as regiões de baixada e de costa (Figura 4.5). Como já mencionado anteriormente, a passagem de sistemas frontais, estabelecimento de ZCAS, ocorrência de SCMs e a circulação marítima interagem com a orografia local, produzindo irregularidades espaciais no campo de precipitação. Na região, o período chuvoso (seco) concentra-se nos meses de outubro a março (abril a setembro).

No Estado do Rio de Janeiro, os maiores índices pluviométricos médios anuais encontram-se na Região Serrana, onde a precipitação varia entre 2500 e 2800 mm, valores ligeiramente superiores aos observados no Maciço da Tijuca (2400 mm), situado na Cidade do Rio de Janeiro (Figura 4.5a). Em função do maior número de estações pluviométricas analisadas neste estudo, notam-se três máximos de precipitação ao longo da Serra dos Órgãos (Xerém, Represa Paraíso e Gaviões), fato este não detectado de maneira clara em FIDERJ (1978). Os menores índices pluviométricos médios anuais são observados nas áreas de baixadas litorâneas, mais próximas ao mar (em torno de 700 a 1300 mm), e na maior parte do Norte/Noroeste Fluminense (alcançando em média 1000

mm). Na Costa Verde e no Vale do Paraíba, os valores se estabelecem entre 1600 e 2200 mm. Na Região Metropolitana, a precipitação total anual média oscila entre 1000 e 1600 mm.

O padrão de distribuição espacial da precipitação se mantém ao longo do ano. No verão, os índices pluviométricos são os mais elevados especialmente devido ao estabelecimento da ZCAS e de convecção local (Figura 4.5b). No inverno, há redução brusca dos totais de precipitação, sendo a chuva neste período uma consequência maior de SFs (Figura 4.5d). Na Região Serrana, o total pluviométrico no verão (inverno) fica em média por volta de 800 a 1300 mm (50 a 200 mm). Nas regiões mais próximas ao litoral (incluindo Região Metropolitana, Baixadas Litorâneas e Norte Fluminense), este valor fica em torno de 100 a 600 mm no verão (100 a 300 mm no inverno). No Sul do Estado, a chuva total média fica em cerca de 700 a 1200 mm no verão (100 a 300 mm no inverno).

Durante as estações de transição, pode-se notar que a primavera (Figura 4.5e) possui totais pluviométricos médios ligeiramente maiores que os do outono (Figura 4.5c). Isto se deve ao fato da primavera já apresentar uma elevação das temperaturas, ocasionando maior evaporação e, conseqüentemente, maior precipitação perante condições instáveis. Os valores variam entre 50 e 500 mm em todo o Estado, com os maiores totais concentrados na Região Serrana e na Costa Verde, e os menores confinados particularmente às áreas litorâneas.

A Região Serrana é a área mais chuvosa do Estado do Rio de Janeiro enquanto que a Região dos Lagos e o litoral norte fluminense são considerados as áreas mais secas. Somente no verão, a Região Serrana já acumula toda a chuva média que se precipita em um ano inteiro na Região dos Lagos, ou seja, um valor em torno de 1000 mm.

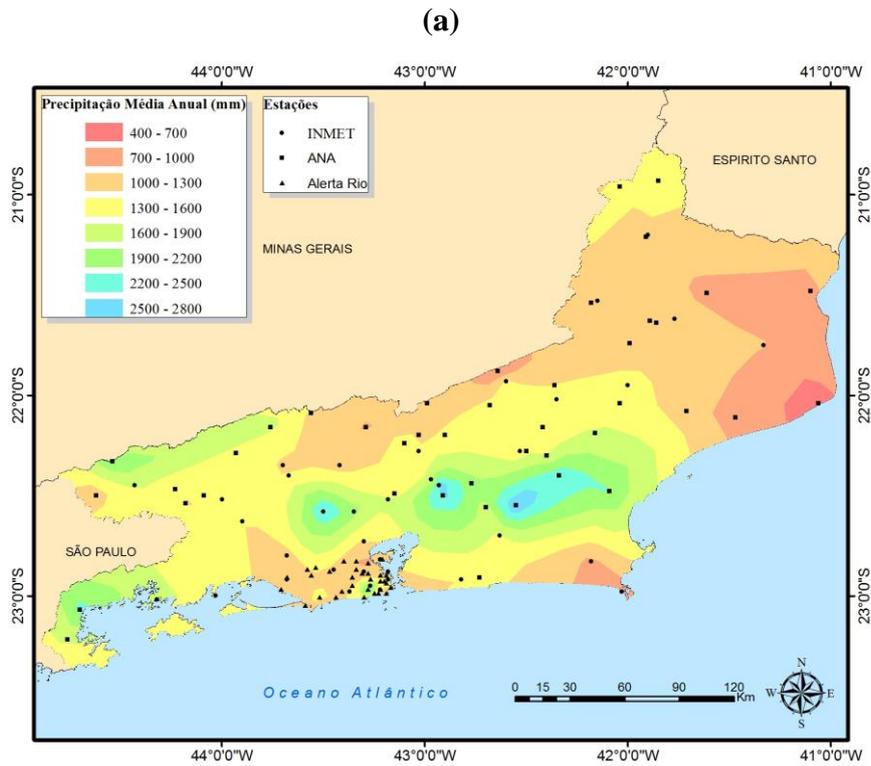
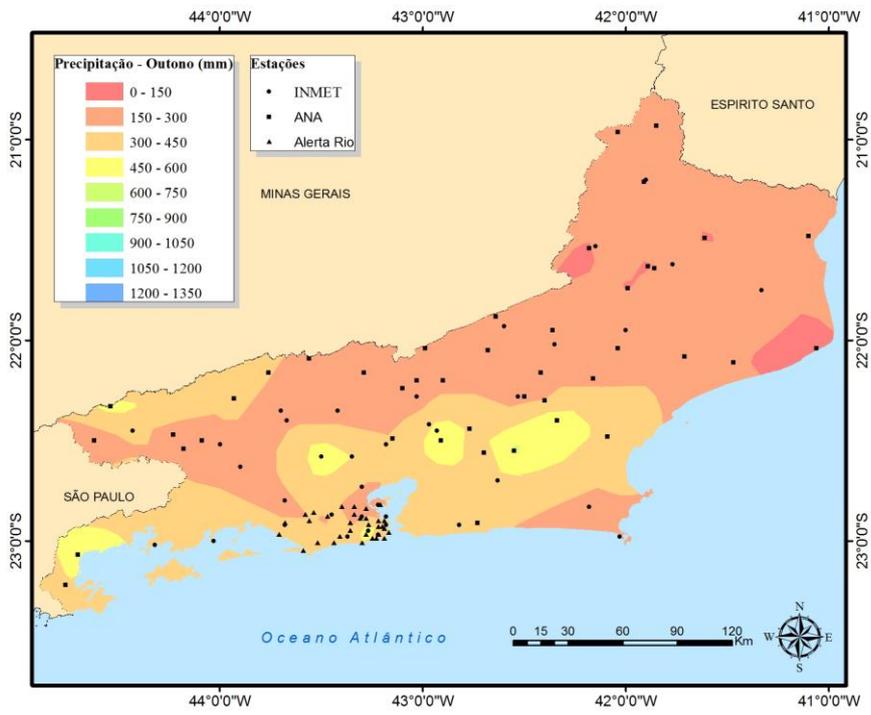


Figura 4.5 – Totais pluviométricos médios (mm) no (a) ano, (b) verão, (c) outono, (d) inverno e (e) primavera no Estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observados do INMET, da ANA e do Alerta Rio.

(c)



(d)

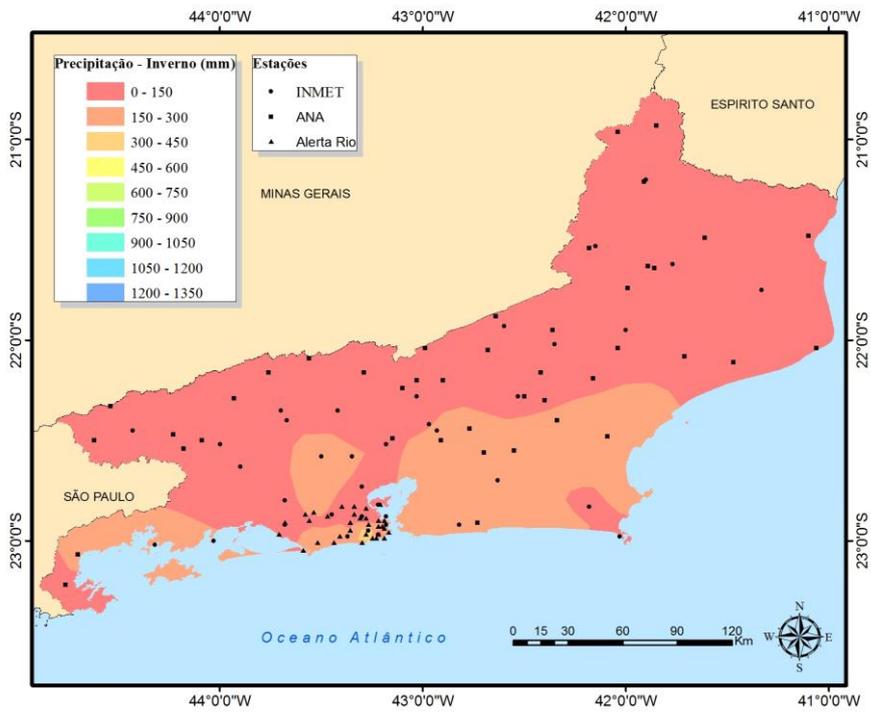


Figura 4.5 – Continuação.

(e)

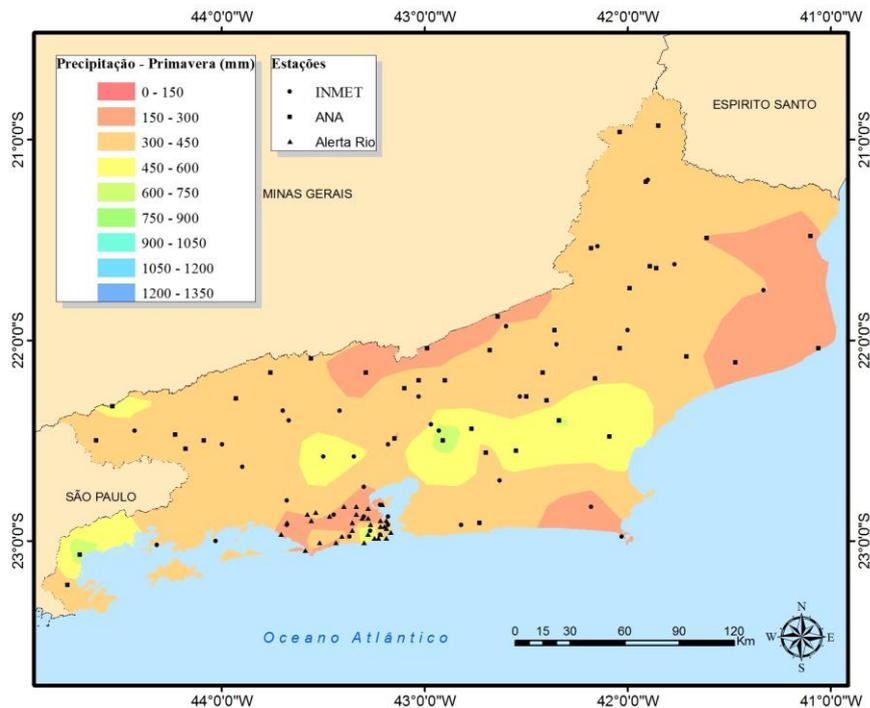


Figura 4.5 – Final.

A Figura 4.6 mostra as médias anuais dos totais máximos de dias secos consecutivos (CDD) no Rio de Janeiro, que afetam diretamente diversos setores da economia, tais como agricultura, geração de energia, entre outros. Verifica-se um gradiente de CDD orientado na direção norte-sul do Estado do Rio de Janeiro. As áreas mais próximas ao litoral apresentam CDD com menor duração (20 a 30 dias) do que aqueles observados no interior do Estado (40 a 60 dias). Provavelmente isto se deve à passagem de sistemas transientes pelo litoral e ao efeito da brisa marítima, quando ventos de sul transportam umidade do oceano em direção ao continente, aumentando a convergência na costa, gerando movimento ascendente e promovendo o levantamento da umidade na camada inferior da atmosfera. A orografia orienta o fluxo de umidade regulador da força para a condensação e instabilização, formando nuvens estratiformes que precipitam de forma contínua sobre o litoral (Reinking e Boatman, 1986). As regiões mais distantes do mar não sofrem influência direta deste fluxo de umidade, pois a topografia local funciona como uma barreira para a penetração dos ventos mais úmidos provenientes do oceano. Desta maneira, verificam-se valores de CDD maiores em tais áreas, enquanto que na região costeira a precipitação ocorre com maior frequência, mesmo que com fraca intensidade.

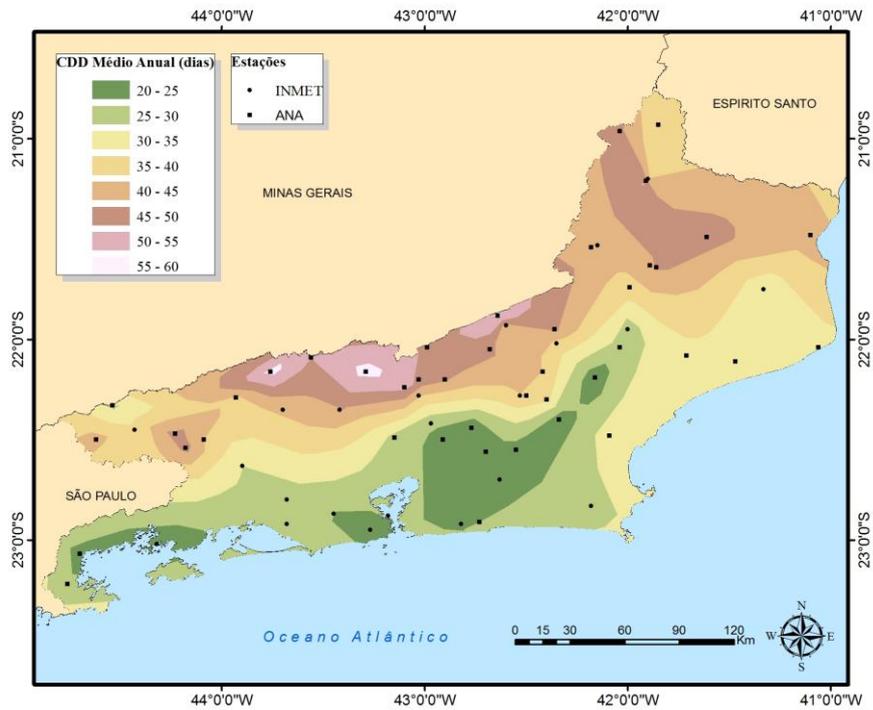


Figura 4.6 – Totais máximos médios de dias secos consecutivos (CDD) no ano no Estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observados do INMET, da ANA e do Alerta Rio.

5. INDICADORES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS: TENDÊNCIAS OBSERVADAS

Neste capítulo são apresentados os resultados das tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos de temperatura do ar e de precipitação no clima presente no Estado do Rio de Janeiro.

5.1 Temperatura

A Figura 5.1 apresenta as distribuições espaciais das magnitudes das tendências observadas nos indicadores TMINmean e TMAXmean no Estado do Rio de Janeiro, elaborados através dos dados do INMET. O índice TMINmean (TMAXmean) representa as temperaturas mínimas (máximas) médias anuais. Nota-se que na Região Metropolitana e no Noroeste do Estado ocorre um aumento significativo de ambos os indicadores. Para a temperatura mínima, as magnitudes de elevação ficam entre +0,01 e +0,04°C/ano nestas áreas, enquanto que para a temperatura máxima, tais valores oscilam entre +0,02 e +0,08°C/ano na Região Metropolitana e entre +0,01 e +0,02°C/ano no Noroeste Fluminense. A eminente elevação da temperatura na Região Metropolitana certamente está atrelada a seu adensamento urbano, como já observado em Luiz Silva (2012). Vale destacar também que esta região, assim como o Noroeste do Rio de Janeiro, já são as áreas mais quentes do Estado. O indicador TMINmean também exhibe tendências significativas de aumento na Região Serrana do Rio de Janeiro que alcançam +0,04°C/ano, à medida que o índice TMAXmean mostra uma elevação significativa de até +0,02°C/ano no Norte do Estado. Em contrapartida, uma estação nas Baixadas Litorâneas e outra na Região Serrana apresentam uma diminuição de TMINmean e TMAXmean, respectivamente. Esta redução fica em cerca de -0,04 a -0,02°C/ano, contudo não foi considerada estatisticamente significativa.

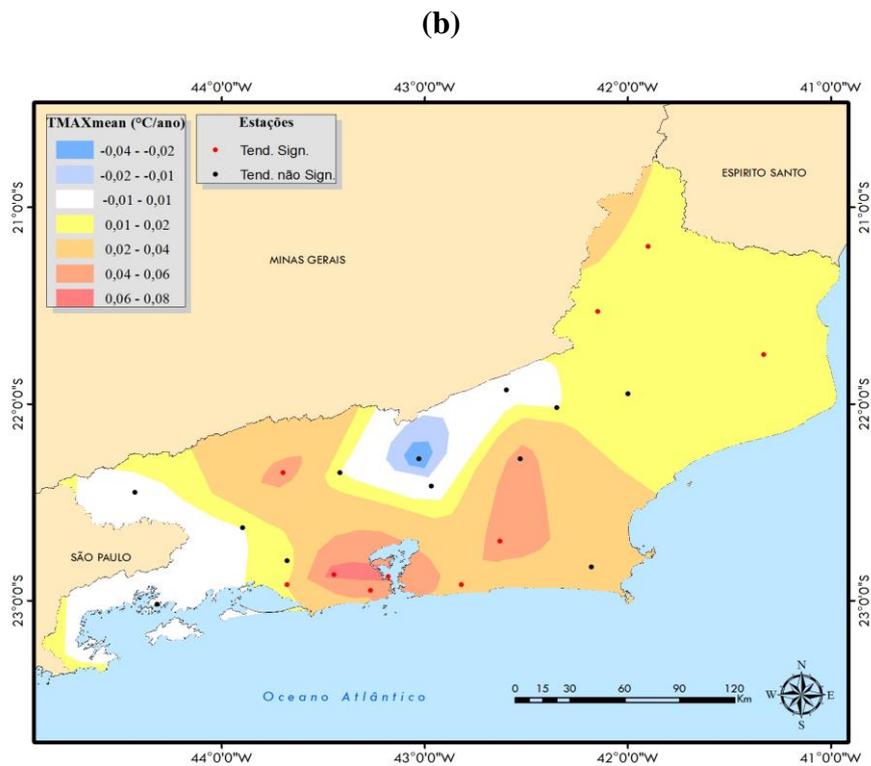
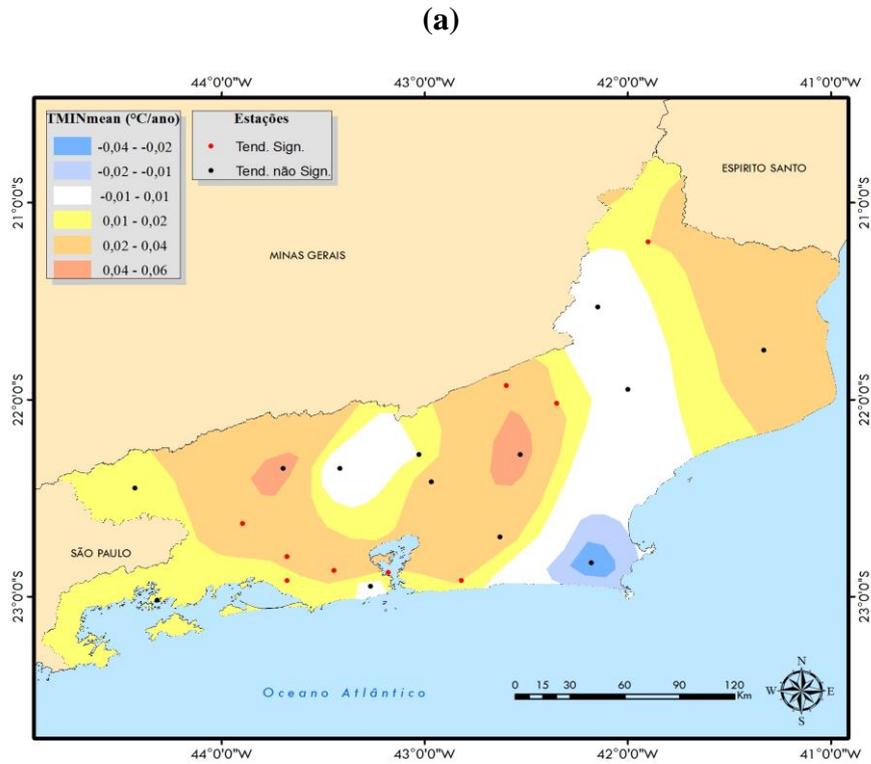


Figura 5.1 – Magnitudes das tendências observadas (°C/ano) em (a) TMINmean e (b) TMAXmean no Estado do Rio de Janeiro, elaboradas através dos dados observados do INMET entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.

As distribuições espaciais das magnitudes das tendências observadas das noites frias (TN10p) e dos dias frios (TX10p) no Estado do Rio de Janeiro, elaborados através dos dados do INMET, estão representados na Figura 5.2. Observa-se que a porcentagem de noites frias ao ano está diminuindo a uma taxa estatisticamente significativa que varia entre -0,3 e -0,1 %dias/ano no Vale do Paraíba, na Região Metropolitana e em partes da Região Serrana e do Norte do Estado. A porcentagem de dias frios também está reduzindo de maneira significativa na Região Metropolitana (-0,3 a -0,1 %dias/ano), reforçando a tendência de aquecimento desta área, seja ela de origem natural ou antrópica. Por outro lado, nota-se que há uma tendência significativa de aumento das noites e dos dias frios em parte do Noroeste Fluminense, com valores que oscilam entre +0,1 e +0,7 %dias/ano. Percebe-se também um aumento significativo das noites frias em parte das Baixadas Litorâneas (+0,1 a +0,5 %dias/ano), provavelmente por motivos similares.

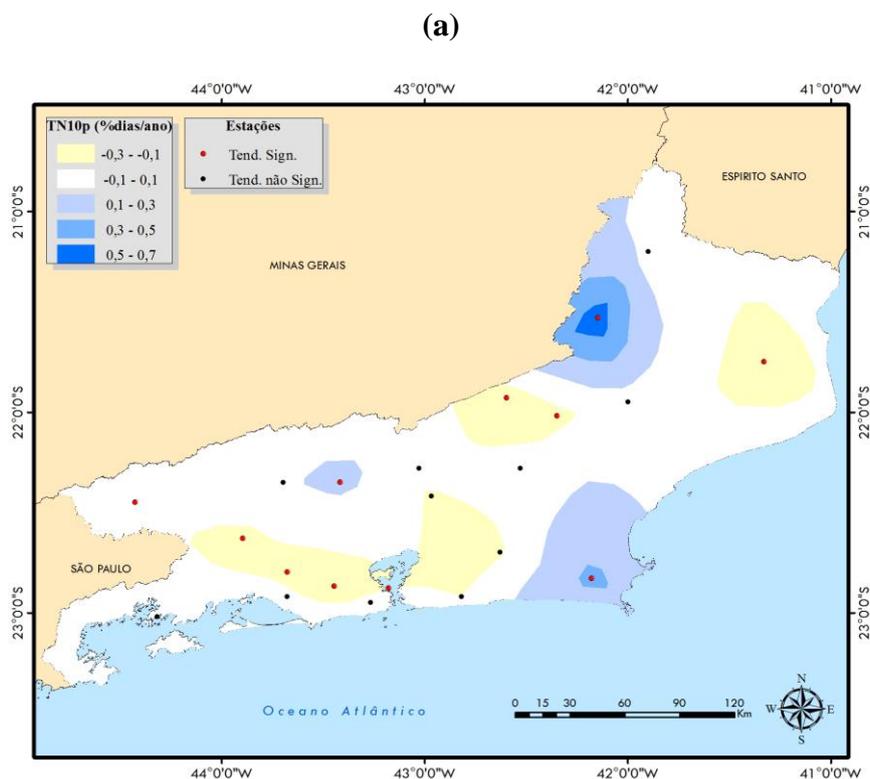


Figura 5.2 – Magnitudes das tendências observadas (%dias/ano) em (a) TN10p e (b) TX10p no Estado do Rio de Janeiro, elaboradas através dos dados observados do INMET entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.

(b)

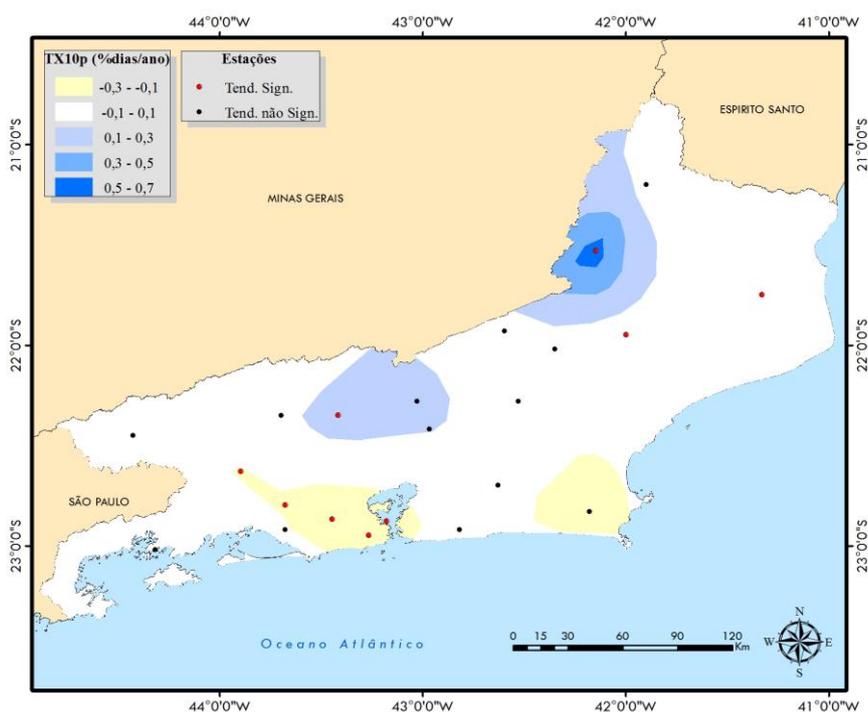


Figura 5.2 – Final.

A Figura 5.3 mostra as distribuições espaciais das magnitudes das tendências observadas das noites quentes (TN90p) e dos dias quentes (TX90p) no Estado do Rio de Janeiro, elaborados através dos dados do INMET. Verifica-se que há uma tendência generalizada de aumento das noites e dos dias quentes em todo o Estado. As porções central e norte do Rio de Janeiro, que já são regiões de elevadas temperaturas em comparação com o restante do Estado, apresentam as magnitudes mais significativas desta elevação. A maior parte do aumento da porcentagem de noites e de dias quentes no Estado varia entre +0,1 e +0,7 %dias/ano. A Região Metropolitana, a Região Centro-Sul e partes das Regiões Serrana e do Norte/Noroeste Fluminense exibem as maiores taxas de aumento do Rio de Janeiro, com valores que atingem cerca de +0,5 a +0,7 %dias/ano, indicando que estas regiões vêm passando por acentuados eventos extremos quentes ao longo dos anos. Somente uma estação na Região Serrana exibe uma tendência significativa de diminuição dos dias quentes, com uma taxa de redução em torno de -0,3 %dias/ano.

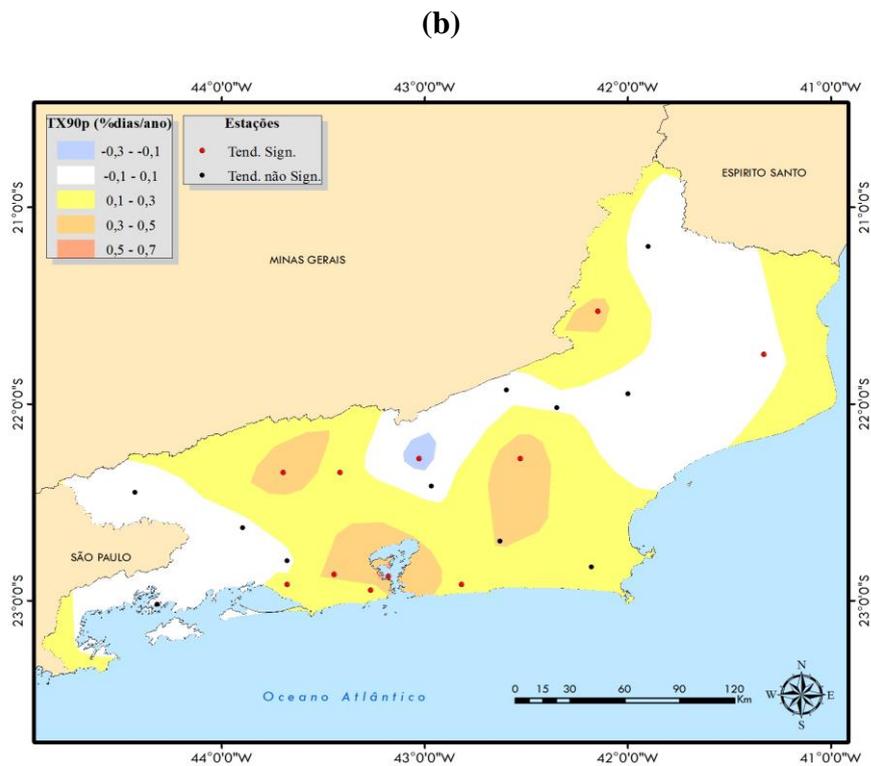
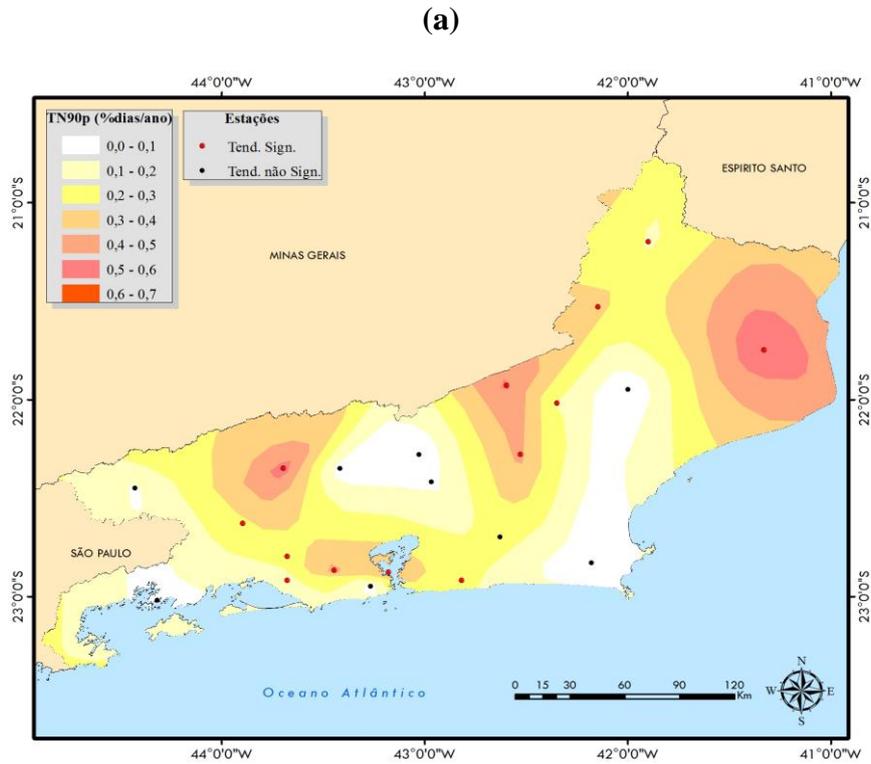


Figura 5.3 – Magnitudes das tendências observadas (%dias/ano) em (a) TN90p e (b) TX90p no Estado do Rio de Janeiro, elaboradas através dos dados observados do INMET entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.

5.2 Precipitação

O mapa das magnitudes das tendências observadas nos totais pluviométricos anuais (PRCPTOT) no Estado do Rio de Janeiro, elaborado através dos dados do INMET e da ANA, está apresentado na Figura 5.4. Nota-se que há uma tendência significativa de aumento de PRCPTOT nas Baixadas Litorâneas e em parte da Região Metropolitana, com magnitudes oscilando entre +8,0 e +32,0 mm/ano. No entanto, a porção do Norte Fluminense próxima ao oceano apresenta uma tendência significativa de diminuição das chuvas a uma taxa entre -8,0 e -4,0 mm/ano. Vale destacar que esta região já é uma das que possui o menor índice pluviométrico do Estado. Outras estações isoladas também mostram uma redução significativa da precipitação no Vale do Paraíba e na Região Serrana, sendo que nesta última área a localidade exibe uma diminuição de até -20 mm/ano. Ressalta-se que o comportamento da precipitação no tempo e no espaço é altamente variável, portanto se faz necessário uma abordagem bastante cautelosa ao se mencionar as suas tendências. Isto significa que em duas localidades bastante próximas, as tendências podem ter sinais contrários.

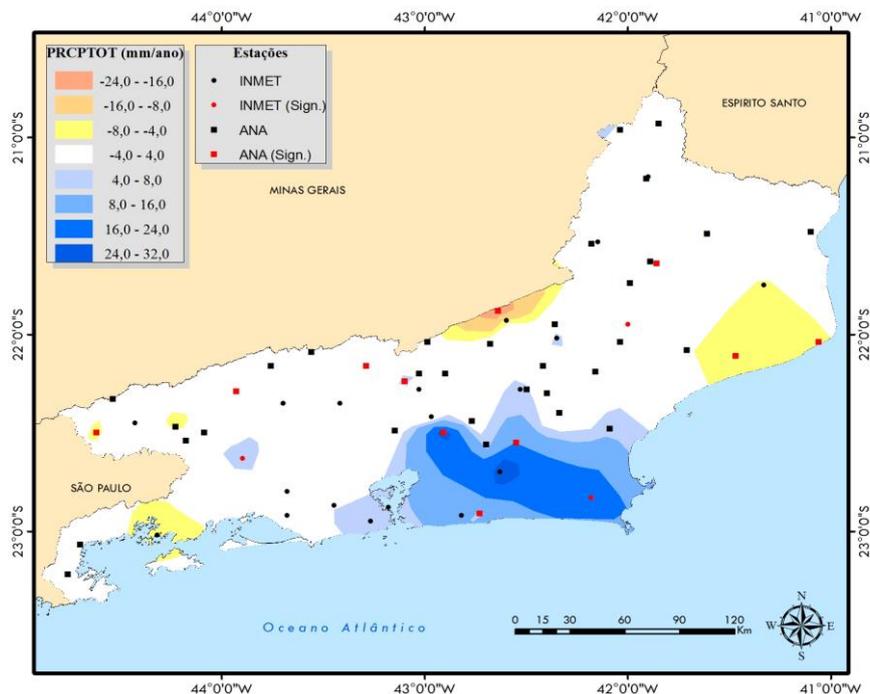


Figura 5.4 – Magnitudes das tendências observadas (mm/ano) nos totais anuais de precipitação (PRCPTOT) no Estado do Rio de Janeiro, elaborada através dos dados observados do INMET e da ANA entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os mapas das distribuições espaciais das magnitudes das tendências observadas das chuvas intensas (R95p) e dos períodos de estiagem (CDD) no Estado do Rio de Janeiro, respectivamente, elaborados através dos dados do INMET e da ANA. De um modo geral, a classificação das tendências de R95p está bastante heterogênea no Estado. Entretanto, observa-se de maneira notória a elevação significativa dos totais pluviométricos das chuvas mais fortes do ano nas Baixadas Litorâneas, com magnitudes variando entre +8,0 e +20 mm/ano. Tal elevação também é evidenciada em parte da Região Metropolitana, como já verificado em Dereczynski *et al.* (2013). Além disso, esta mesma área também exibe um aumento significativo de CDD de +0,2 a +0,6 dia/ano, isto é, possivelmente as chuvas mais intensas estão se concentrando em períodos mais curtos nesta região. Verifica-se também que os períodos secos estão se reduzindo significativamente no Vale do Paraíba e na região Centro-Sul do Rio de Janeiro (-0,8 a -0,1 dia/ano), enquanto que uma elevação também significativa é identificada na porção noroeste do Estado (+0,1 a +0,6 dia/ano), onde os períodos de estiagem já são bastante duradouros, como visto na climatologia do Estado.

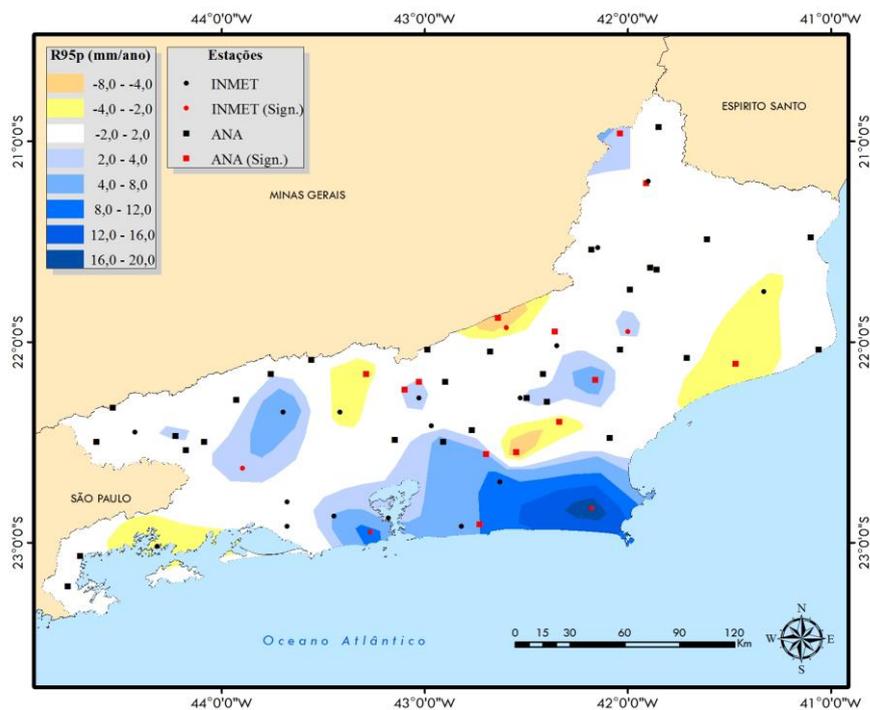


Figura 5.5 – Magnitudes das tendências observadas (mm/ano) nas chuvas intensas (R95p) no Estado do Rio de Janeiro, elaborada através dos dados observados do INMET e da ANA entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.

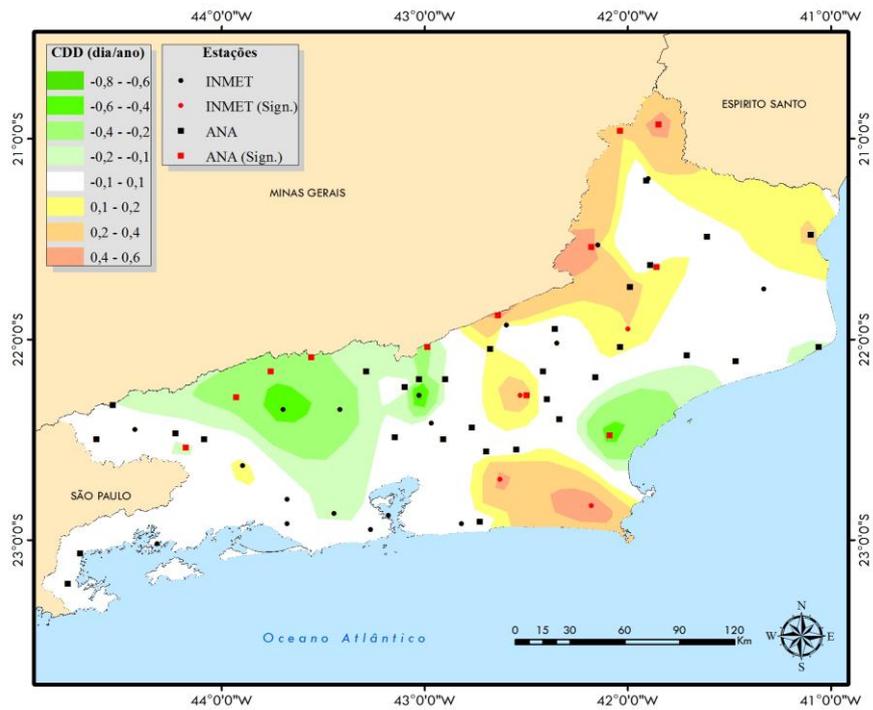


Figura 5.6 – Magnitudes das tendências observadas (dia/ano) nos períodos secos (CDD) no Estado do Rio de Janeiro, elaborada através dos dados observados do INMET e da ANA entre 1961 e 2012. Os pontos vermelhos indicam estações com tendências estatisticamente significativas ao nível de 95%.

6. INDICADORES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS: PROJEÇÕES FUTURAS

Neste capítulo são mostrados os resultados das projeções futuras dos indicadores de extremos climáticos obtidos a partir das simulações do Eta-HadCM3, baseando-se na diferença entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990), considerando-se o comportamento dos 4 membros do modelo (Cntrl, Low, Mid e High).

Apesar do período de 2041-2070 ter sido tomado como foco das análises do clima futuro, os demais períodos (2011-2040 e 2071-2100) também foram investigados neste trabalho. Os resultados mostram que as projeções futuras dos períodos 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100 diferem somente em relação às magnitudes das diferenças dos indicadores em comparação com o clima presente, mantendo sempre o mesmo sinal de aumento ou diminuição. As análises são realizadas através da avaliação dos valores mínimos e dos valores máximos existentes entre os 4 membros do modelo, ou seja, um mapa com um panorama das menores diferenças e outro mapa com um panorama das maiores diferenças entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990).

6.1 Temperatura

A Figura 6.1 apresenta as distribuições espaciais das diferenças entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos indicadores TMINmean e TMAXmean com seus valores mínimos e máximos projetados pelo modelo Eta-HadCM3 para o Estado do Rio de Janeiro. Nota-se que, em ambos os mapas, as projeções são de aumento das temperaturas mínimas e máximas médias anuais em todo o Estado do Rio de Janeiro. Conforme o modelo, TMINmean deve se elevar pelo menos de +1,1 a +1,4°C no Estado, podendo alcançar entre +2,0 e +3,5°C como valores máximos. As projeções são de que o maior aumento da temperatura mínima ocorra nas porções centro e sul do Rio de Janeiro. Ainda de acordo com o modelo, TMAXmean deve aumentar pelo menos de +1,0 a +1,5°C no Estado, podendo atingir entre +2,5 e +4,5°C como valores máximos, ou seja, superiores às taxas de TMINmean. Observa-se que a maior elevação da temperatura máxima deve ocorrer nas áreas interioranas, especialmente no extremo noroeste do Estado.

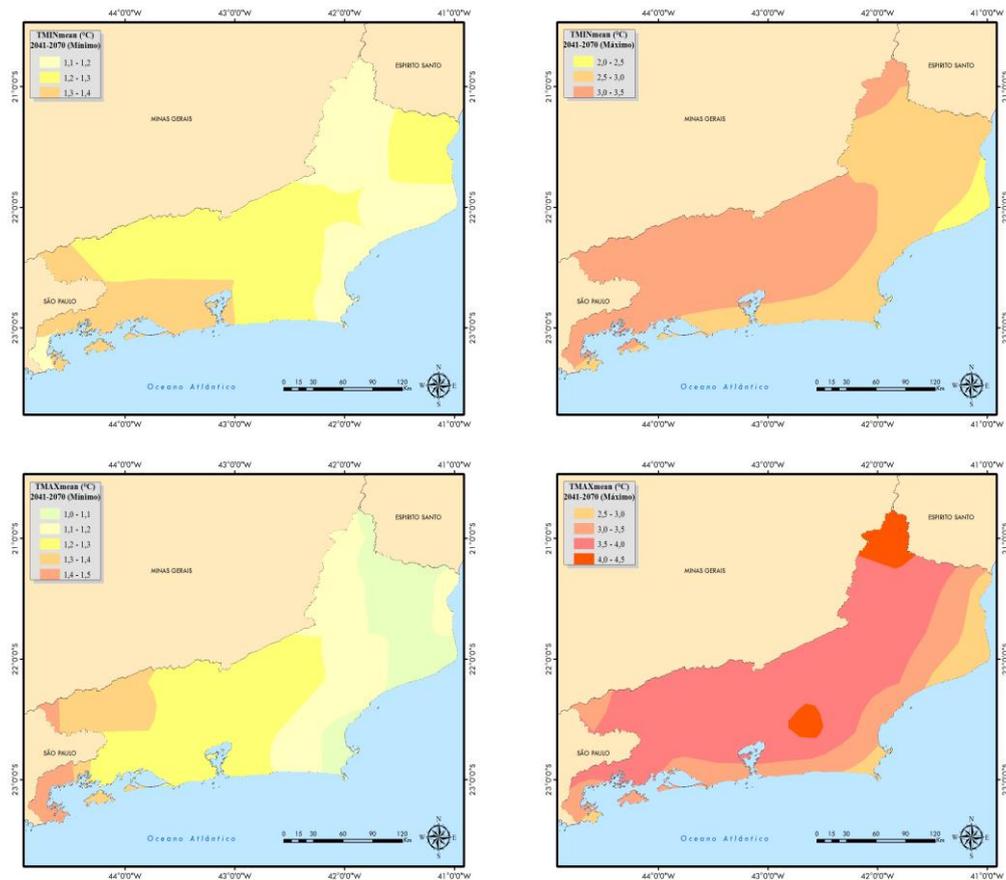


Figura 6.1 – Diferenças mínima (esquerdo) e máxima (direito) entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos indicadores TMINmean (acima) e TMAXmean (abaixo) no Estado do Rio de Janeiro (°C) projetadas pelo modelo Eta-HadCM3.

A Figura 6.2 apresenta a evolução temporal (1961-2100) do indicador de temperatura mínima média anual (TMINmean) na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, uma das áreas com maior faixa de dispersão no Estado e que pode mostrar um alto grau de elevação em tal índice. Conforme o modelo, TMINmean pode atingir de 21 a 24°C no final do século XXI, ou seja, uma elevação que se estabelece entre +2,5 e +5,5°C em comparação com o clima presente, como já observado em Luiz Silva (2012) e em Dereczynski *et al.* (2013). A Figura 6.3 mostra a evolução temporal (1961-2100) do índice de temperatura máxima média anual (TMAXmean) na Região Norte e Noroeste do Rio de Janeiro. TMAXmean aponta para um aumento com valores que alcançam de 28,5°C a 33,5°C até 2100, ou seja, uma diferença de +2,0 a +7,0°C em relação ao clima presente.

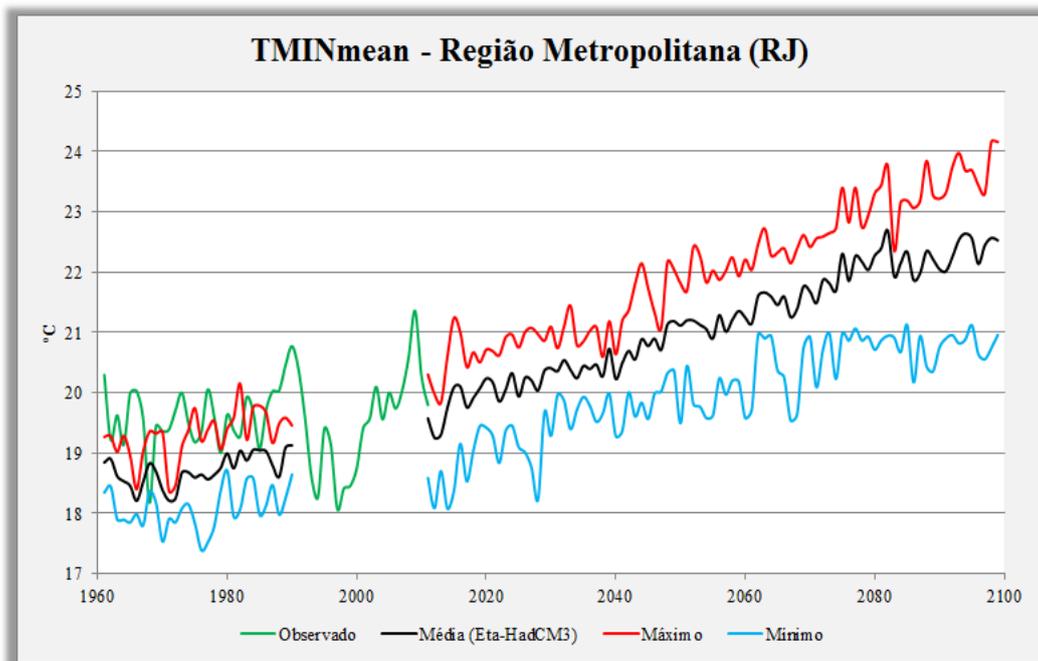


Figura 6.2 – Valores de TMINmean na Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro.

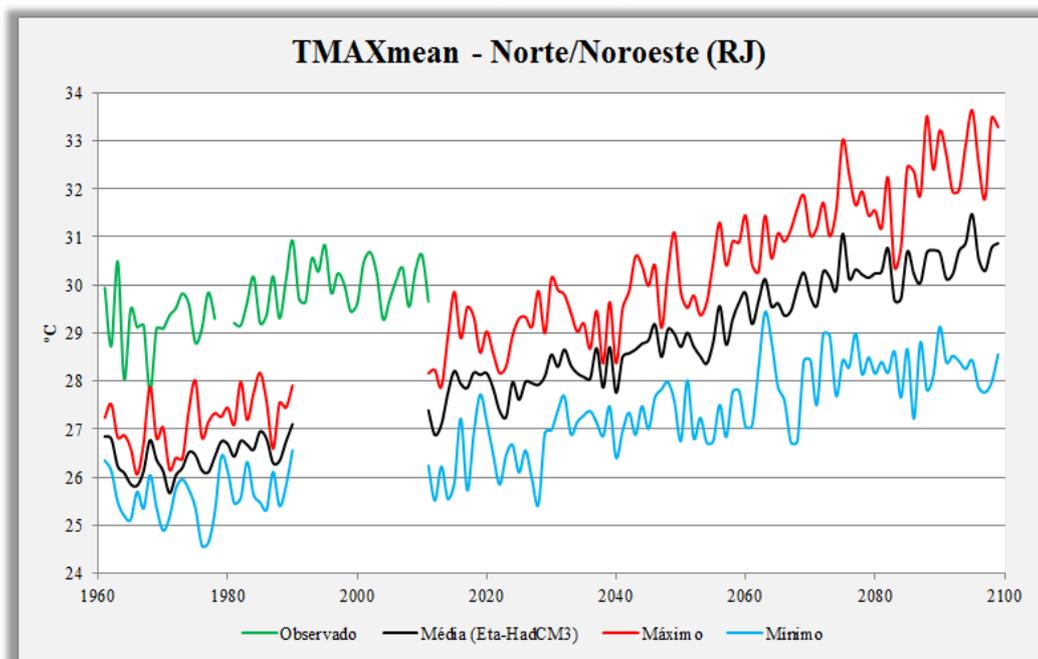


Figura 6.3 – Valores de TMAXmean na Região Norte/Noroeste do Estado do Rio de Janeiro.

As distribuições espaciais das diferenças entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos índices TN10p e TX10p com seus valores mínimos e máximos projetados pelo modelo Eta-HadCM3 para o Estado do Rio de Janeiro são representadas na Figura 6.4. Verifica-se que, em ambos os mapas, as projeções são de diminuição das noites frias e dos dias frios em todo o Estado do Rio de Janeiro. Uma diminuição entre -10,0 e -9,0% dias das noites frias no ano é projetada para o litoral fluminense. Os dias

frios apresentam valores que indicam uma diminuição entre -10,0 e -6,5 % dias no ano no Estado. Levando-se em conta que atualmente observamos que cerca de 10 a 15% das noites e dos dias do Estado do Rio de Janeiro são frios durante o ano, podemos afirmar com alguma cautela que praticamente não haverá mais dias e noites desta feição entre 2041 e 2070.

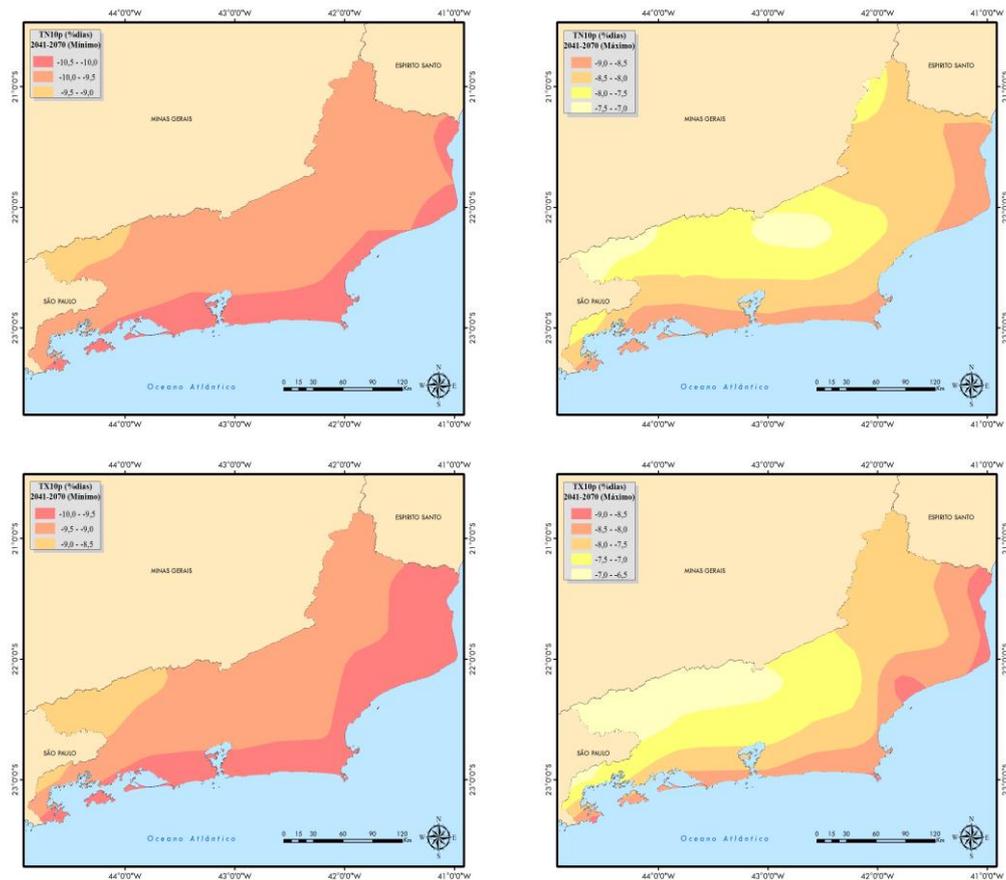


Figura 6.4 – Diferenças mínima (esquerdo) e máxima (direito) entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos indicadores TN10p (acima) e TX10p (abaixo) no Estado do Rio de Janeiro (%dias) projetadas pelo modelo Eta-HadCM3.

A Figura 6.5 mostra as distribuições espaciais das diferenças entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos indicadores TN90p e TX90p com seus valores mínimos e máximos projetados pelo modelo Eta-HadCM3 para o Estado do Rio de Janeiro. Observa-se que, em ambos os mapas, as projeções são de aumento das noites quentes e dos dias quentes em todo o Rio de Janeiro, havendo uma maior intensidade nas áreas litorâneas, regiões estas que já são relativamente quentes em comparação ao restante do Estado, como descrito na climatologia do capítulo anterior. Áreas como a Costa Verde, Região Metropolitana, Baixadas Litorâneas e Norte Fluminense

apresentam uma variação de aumento entre +30 e +70% de noites quentes no ano no período de 2041 a 2070. Quanto aos dias quentes, a maior parte do Estado do Rio de Janeiro deve apresentar um aumento de +15 a +40 % dias no mesmo período.

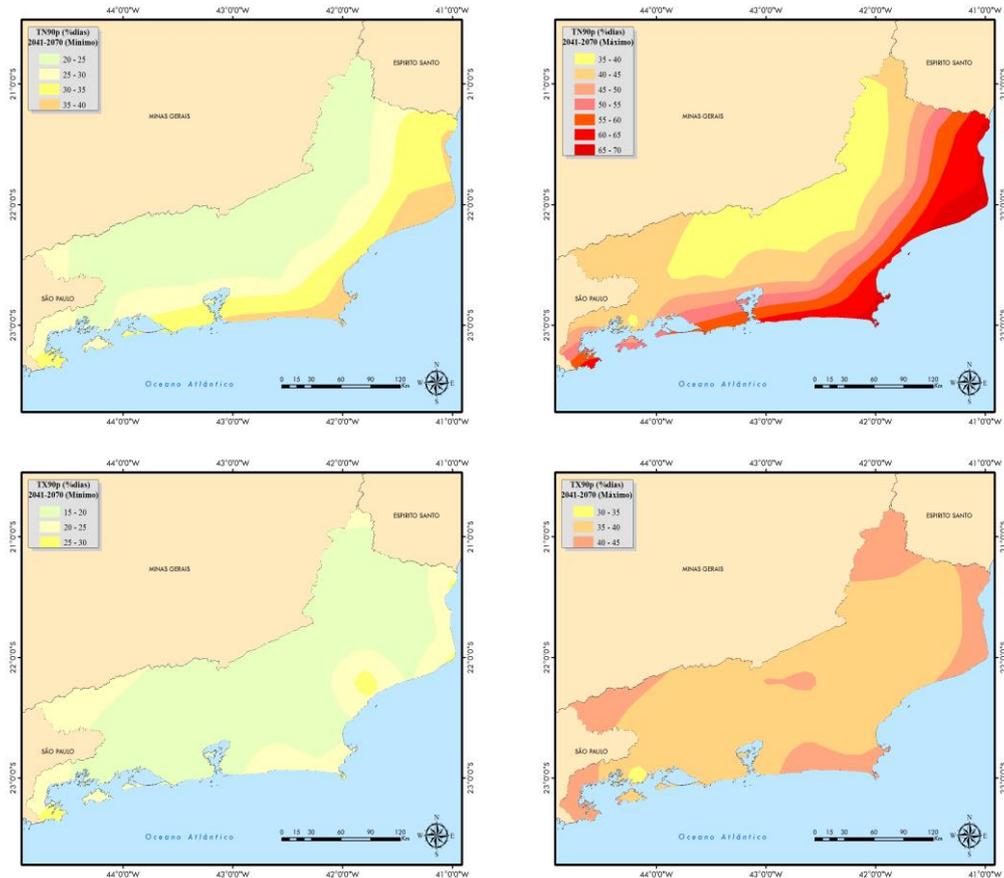


Figura 6.5 – Diferenças mínima (esquerdo) e máxima (direito) entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos indicadores TN90p (acima) e TX90p (abaixo) no Estado do Rio de Janeiro (%dias) projetadas pelo modelo Eta-HadCM3.

A Figura 6.6 apresenta a evolução temporal (1961-2100) do indicador de noites quentes (TN90p) no litoral do Rio de Janeiro, uma das áreas com maior faixa de dispersão de elevação no Estado em tal índice, além de já serem as regiões mais quentes. Verifica-se uma elevação de TN90p em tal região até 2100, com valores que devem ficar entre 65 e 95%. A Figura 6.7 mostra a evolução temporal (1961-2100) do índice de dias quentes (TX90p) nas Baixadas Litorâneas do Rio de Janeiro. De acordo com o modelo, o aumento dos dias quentes continua e seus valores podem atingir de 40 a 75% nesta região no final do século XXI, podendo influenciar de alguma maneira a extração de sal marinho, a atividade mais tradicional encontrada na região.

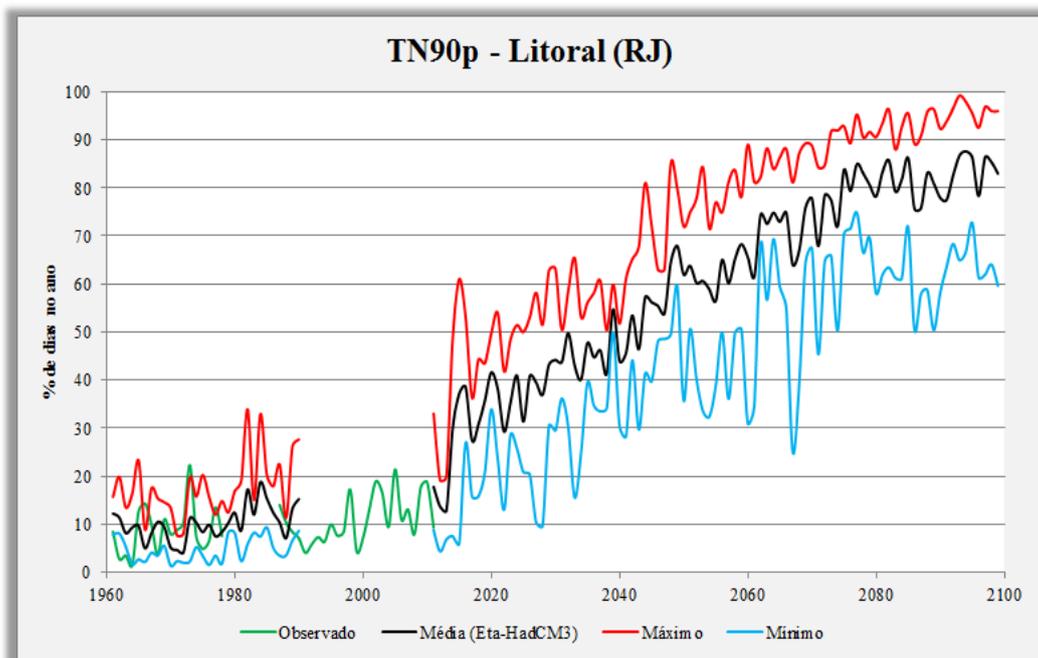


Figura 6.6 – Valores de TN90p (%dias no ano) no litoral do Estado do Rio de Janeiro.

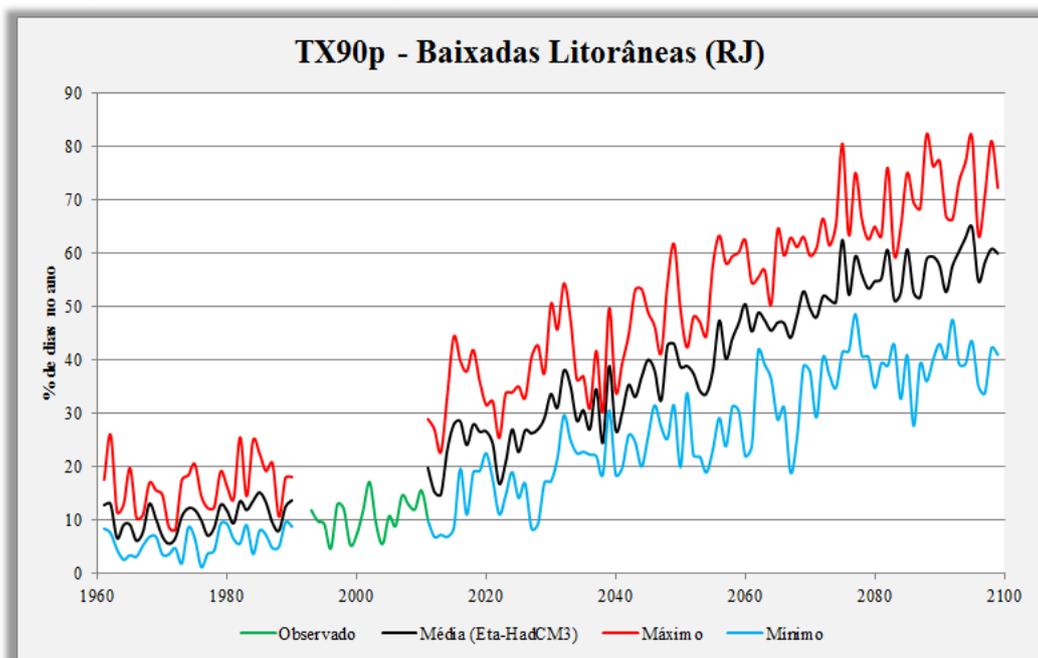


Figura 6.7 – Valores de TX90p (%dias no ano) nas Baixadas Litorâneas do Estado do Rio de Janeiro.

6.2 Precipitação

As distribuições espaciais das diferenças entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos índices PRCPTOT e R95p com seus valores mínimos e máximos projetados pelo modelo Eta-HadCM3 para o Estado do Rio de Janeiro são apresentadas na Figura 6.8. Nota-se que a faixa de dispersão entre aumento e diminuição de ambos os indicadores é grande em todo o Estado do Rio de Janeiro. A porção norte do Estado

possui a maior variação, como já verificado em Torres *et al.* (2009), apontando para uma faixa entre uma redução de PRCPTOT de -350 mm e uma elevação de +300 mm. A extensa faixa de variação que abrange o Estado do Rio de Janeiro em PRCPTOT pode estar relacionada com o fato de tal variável meteorológica sofrer considerável influência de outros elementos climáticos e fatores geográficos. Quanto ao índice R95p, a porção sul do Rio de Janeiro apresenta os maiores aumentos das chuvas intensas, compreendendo uma faixa de dispersão entre +50 e +300 mm no período de 2041 a 2070. Vale lembrar que esta área já possui elevados índices pluviométricos anuais, especialmente as regiões próximas à Angra dos Reis e à Resende. Além disso, esta região também concentra importantes núcleos de geração de energia, como usinas termelétricas, termonucleares e hidrelétricas, sendo que a eficiência desta última possui dependência direta dos totais pluviométricos acumulados.

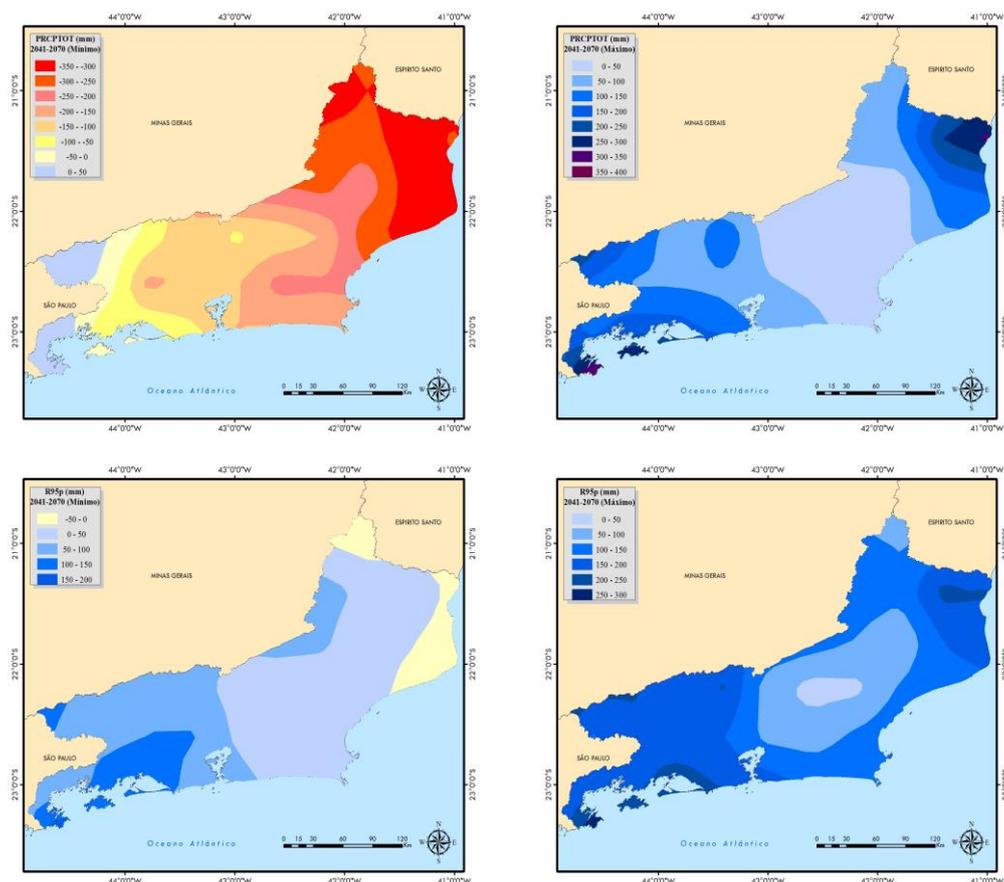


Figura 6.8 – Diferenças mínima (esquerdo) e máxima (direito) entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) dos indicadores PRCPTOT (acima) e R95p (abaixo) no Estado do Rio de Janeiro (mm) projetadas pelo modelo Eta-HadCM3.

A Figura 6.9 apresenta a evolução temporal (1961-2100) do indicador da precipitação total anual (PRCPTOT) na Região Serrana do Rio de Janeiro, uma das áreas com considerável faixa de dispersão no Estado em tal índice. Observa-se que pode haver tanto uma diminuição de PRCPTOT em torno de -400 mm, quanto uma elevação de +200 mm no índice na Região Serrana até o final do século XXI, havendo, de qualquer modo, influência direta, principalmente, na produção agrícola desta área. A Figura 6.10 mostra a evolução temporal (1961-2100) do índice de chuvas intensas (R95p) na Região Sul do Rio de Janeiro. Segundo o modelo, R95p pode atingir entre 300 e 650 mm até 2100, ou seja, uma elevação bastante enfática em comparação com o clima presente.

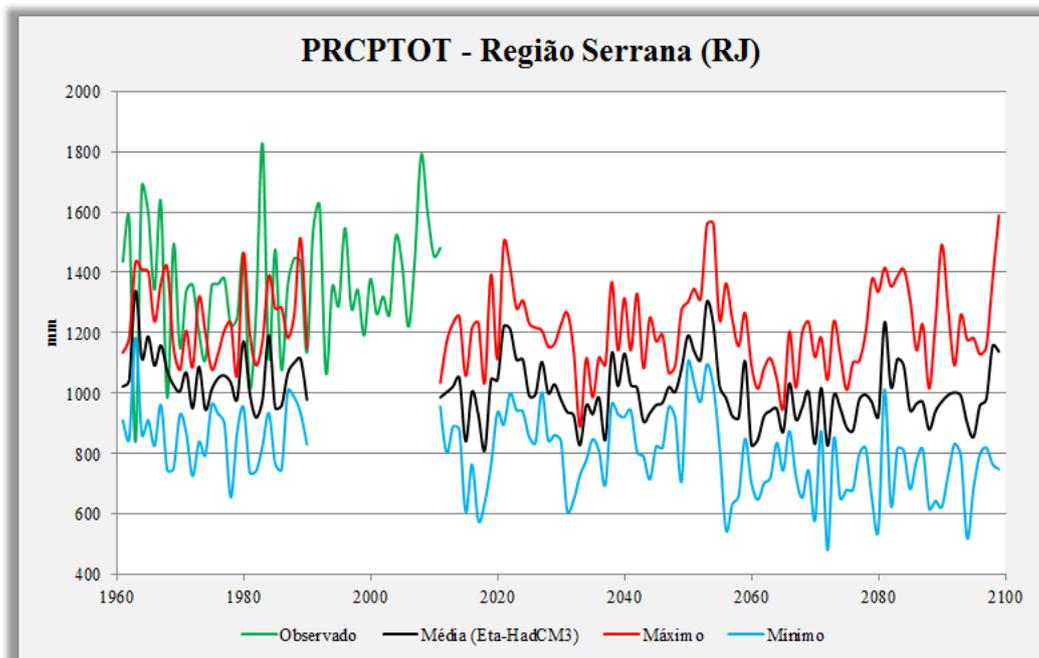


Figura 6.9 – Valores de PRCPTOT (mm) na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro.

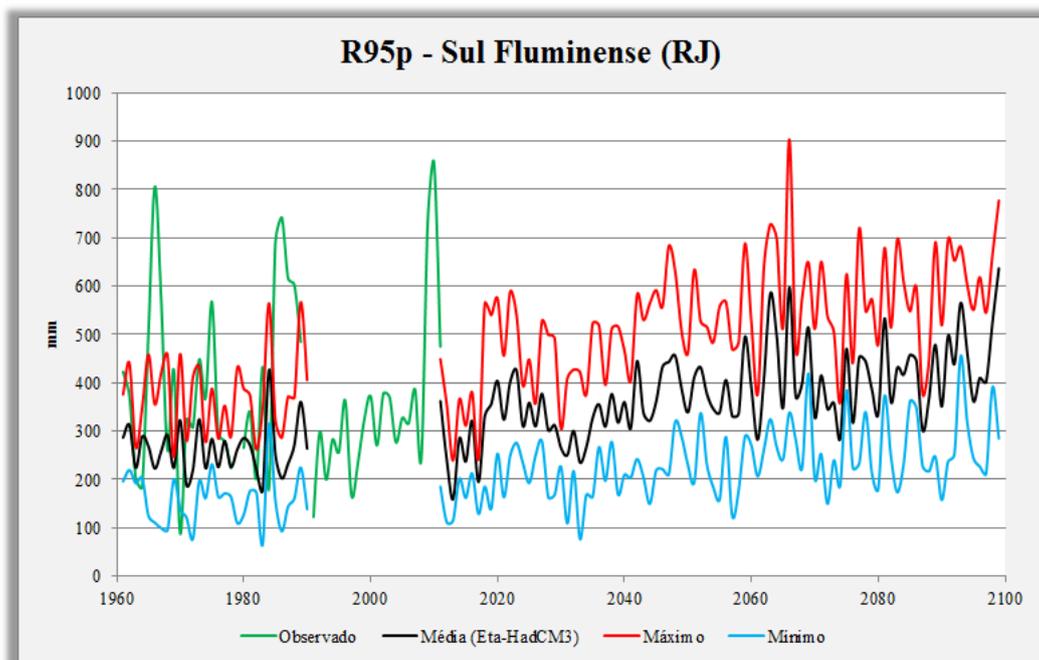


Figura 6.10 – Valores de R95p (mm) na Região Sul do Estado do Rio de Janeiro.

A Figura 6.11 representa as distribuições espaciais das diferenças entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) do indicador CDD com seus valores mínimos e máximos projetados pelo modelo Eta-HadCM3 para o Estado do Rio de Janeiro. Verifica-se que, em ambos os mapas, as projeções são de aumento dos totais de dias secos consecutivos em todo o Estado do Rio de Janeiro. O extremo norte do Estado apresenta a maior variação associada aos períodos de estiagem, com valores que variam entre +1,0 e +10,0 dias. Como observado anteriormente, as chuvas intensas tendem a aumentar em grande parte do Estado do Rio de Janeiro, assim como os períodos de estiagem também possuem projeções de elevação. Deste modo, provavelmente, as chuvas mais intensas estarão concentradas em períodos mais curtos até o final do século XXI.

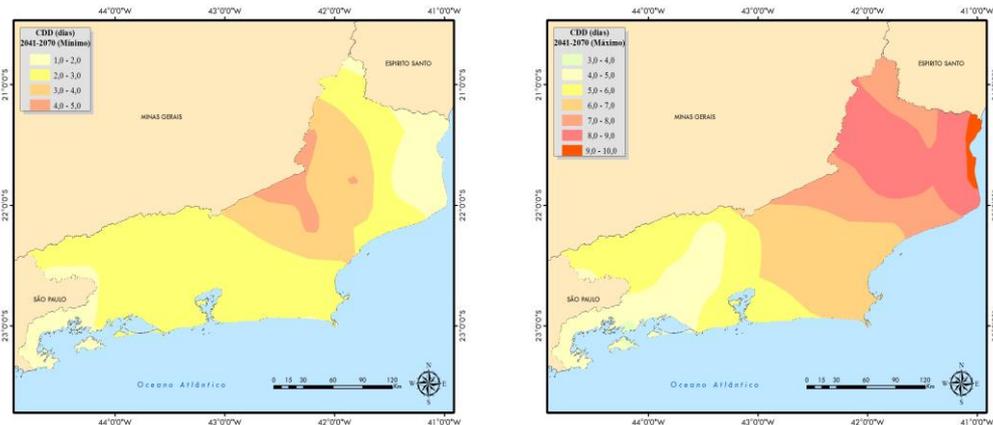


Figura 6.11 – Diferenças mínima (esquerdo) e máxima (direito) entre o futuro (2041-2070) e o presente (1961-1990) do indicador CDD no Estado do Rio de Janeiro (dias) projetadas pelo modelo Eta-HadCM3.

A Figura 6.12 apresenta a evolução temporal (1961-2100) do indicador de estiagens (CDD) na Região Norte e Noroeste do Rio de Janeiro. Nota-se que os valores de CDD podem ficar entre 20 e 40 dias até 2100, ou seja, existe a possibilidade do índice de estabilizar ao longo dos anos, assim como há a chance do mesmo dobrar no decorrer do período.

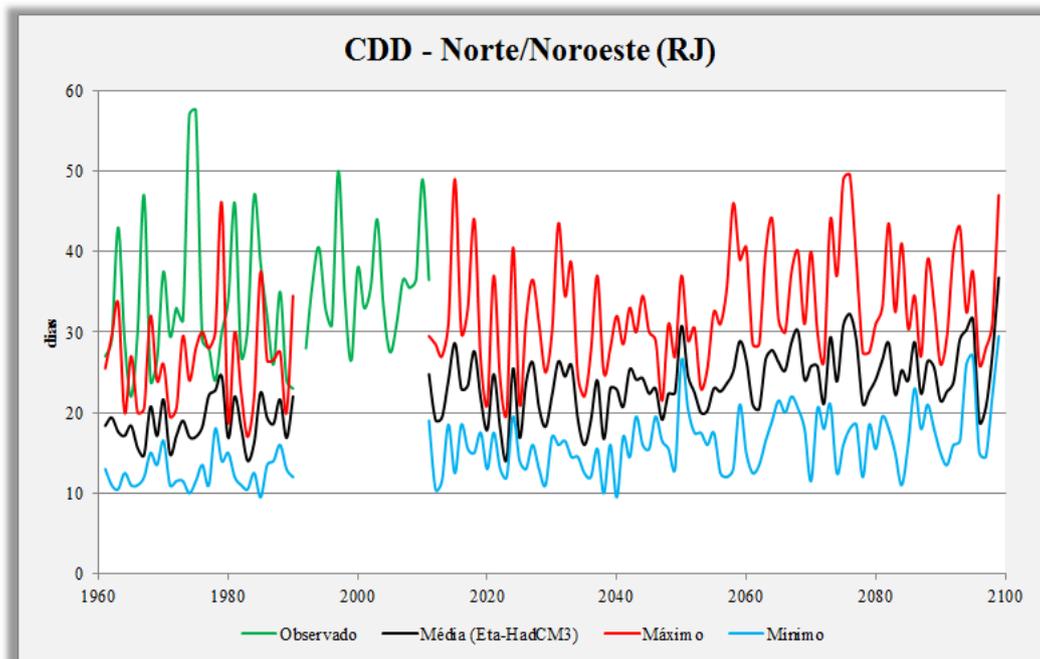


Figura 6.12 – Valores de CDD (dias) na Região Norte/Noroeste do Estado do Rio de Janeiro.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, uma climatologia da temperatura do ar e da precipitação é elaborada para o Estado do Rio de Janeiro com base em dados do INMET, da ANA e do Sistema Alerta Rio. Além disso, são analisadas as tendências observadas dos indicadores de extremos climáticos de temperaturas mínima e máxima e de precipitação em 22 estações meteorológicas do INMET (dados diários) no Estado do Rio de Janeiro, além das 43 estações pluviométricas da ANA para a chuva. Em seguida, as projeções futuras (2041-2070) de tais indicadores utilizando o modelo Eta-HadCM3, com o cenário A1B do IPCC, considerando as variações entre seus 4 membros (Cntrl, High, Mid e Low), são avaliadas.

Quanto aos aspectos climatológicos, notam-se menores valores durante todo o ano nas áreas mais elevadas (especialmente na Região Serrana), com temperaturas mínimas médias oscilando entre 9,5 e 11°C no inverno e entre 15,5 e 17°C no verão. Valores mais elevados ocorrem nas áreas de baixadas e planícies, atingindo principalmente a Zona Norte do Município do Rio de Janeiro e os litorais das Baixadas Litorâneas e do Norte Fluminense, onde os valores médios de temperatura mínima variam entre 17 e 18,5°C no inverno e entre 21,5 e 23°C no verão. No Vale do Paraíba e no Centro-Sul, tais valores oscilam entre 12,5 e 14°C no inverno e entre 17 e 18,5°C no verão. Já as menores temperaturas máximas médias oscilam entre 21,5 e 23°C no inverno e entre 26 e 27,5°C no verão na Região Serrana. Os valores mais elevados encontram-se na Região Metropolitana e no Norte/Noroeste Fluminense, oscilando entre 26 e 27,5°C no inverno e entre 32 e 33,5°C no verão. Na Costa Verde, os valores variam entre 23 a 24,5°C no inverno e entre 29 e 30,5°C no verão. Já no Vale do Paraíba e no Centro-Sul, as temperaturas máximas médias variam entre 24,5 e 26°C no inverno e entre 29 e 30,5°C no verão.

Assim como a temperatura do ar, a precipitação anual total também sofre uma importante influência do relevo, com máximos nas áreas de elevada altitude (cerca de 2000 a 2500 mm ao ano) e mínimos sobre as regiões de baixada e litorânea (entre 1200 e 1600 mm ao ano). Os acumulados chegam a 1000 mm em algumas áreas no verão (especialmente na Região Serrana e em algumas áreas do Sul Fluminense) contra 100 mm durante o inverno (principalmente na faixa litorânea).

Para as tendências observadas em extremos climáticos de temperatura, nota-se que na Região Metropolitana e na Região Norte e Noroeste do Estado ocorrem os

aumentos mais significativos dos indicadores TMAXmean e TMINmean. Para a temperatura mínima, as magnitudes de elevação ficam entre +0,01 e +0,04°C/ano nestas áreas, enquanto que para a temperatura máxima, tais valores oscilam entre +0,02 e +0,08°C/ano na Região Metropolitana e entre +0,01 e +0,02°C/ano no Noroeste Fluminense. Verifica-se que há uma tendência generalizada de diminuição dos dias e das noites frias e de aumento das noites e dos dias quentes em todo o Estado, sendo que as porções central e norte do Rio de Janeiro apresentam as magnitudes mais significativas desta elevação. A maior parte do aumento da porcentagem de noites e de dias quentes no Estado varia entre +0,1 e +0,7 %dias/ano.

Quanto às tendências observadas em extremos climáticos de precipitação, nota-se que há uma tendência significativa de aumento de PRCPTOT nas Baixadas Litorâneas e em parte da Região Metropolitana, com magnitudes oscilando entre +8,0 e +32,0 mm/ano. De um modo geral, a classificação das tendências de R95p está bastante heterogênea no Estado. Entretanto, observa-se de maneira notória a elevação significativa dos totais pluviométricos das chuvas mais fortes do ano nas Baixadas Litorâneas, com magnitudes variando entre +8 e +20 mm/ano. Além disso, esta mesma área também exibe um aumento significativo de CDD de +0,2 a +0,6 dia/ano, isto é, possivelmente as chuvas mais intensas estão se concentrando em períodos mais curtos nesta região.

Em relação às projeções futuras de extremos climáticos de temperatura, nota-se que as projeções são de aumento das temperaturas mínima e máxima médias anuais em todo o Estado do Rio de Janeiro. Conforme o modelo, as projeções indicam elevação de TMINmean entre +1,1 e +1,4°C no Estado, podendo alcançar entre +2,0 e +3,5°C como valores máximos. Ainda de acordo com o modelo, TMAXmean deve aumentar pelo menos de +1,0 a +1,5°C no Estado, podendo atingir entre +2,5 e +4,5°C como valores máximos, ou seja, superiores às taxas de TMINmean. As projeções futuras também indicam que as noites e os dias frios (TN10p e TX10p) serão praticamente inexistentes no Estado do Rio de Janeiro até o final do século XXI. Observa-se que as projeções são de aumento das noites e dos dias quentes em todo o Estado do Rio de Janeiro, havendo uma maior intensidade nas áreas litorâneas.

As projeções futuras de extremos climáticos de precipitação indicam que a faixa de variação entre aumento e diminuição dos totais pluviométricos médios anuais é grande em todo o Estado do Rio de Janeiro. A porção norte do Estado possui a maior

dispersão, apontando para uma faixa entre uma redução de PRCPTOT de -350 mm e uma elevação de +300 mm. Observa-se que as projeções são de elevação dos totais pluviométricos associados às chuvas fortes em todo o Rio de Janeiro, com exceção dos extremos norte e noroeste do Estado. A porção sul do Rio de Janeiro apresenta os maiores aumentos das chuvas intensas, compreendendo uma faixa de dispersão entre +50 e +300 mm no período de 2041 a 2070. Verifica-se que as projeções são de aumento dos totais de dias secos consecutivos em todo o Estado do Rio de Janeiro. O extremo norte do Estado apresenta as maiores variações associadas aos períodos de estiagem, com valores que variam entre +1,0 e +10,0 dias. Logo, as projeções apontam para uma elevação dos períodos secos, assim como para uma continuidade das chuvas intensas ocorrendo em um curto espaço de tempo.

De acordo com as projeções futuras, as Regiões Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro apresentarão as maiores suscetibilidades aos extremos climáticos. Nestas áreas, os valores máximos das diferenças futuro-presente são os maiores possíveis em relação à elevação da temperatura do ar. Os extremos também estão presentes nas projeções de precipitação, indicando possibilidade tanto de redução quanto de aumento enfático dos totais anuais de chuva, além da elevação dos períodos secos.

Sobre as projeções futuras do modelo é importante ressaltar que as simulações levam em conta apenas o aumento na concentração dos gases de efeito estufa e não mudanças no uso do solo e efeito de ilha de calor devido à expansão urbana. Além disso, quando se trata dos modelos regionais, a confiabilidade das simulações em alta resolução depende da qualidade da condição de contorno lateral, que é fornecida pelo modelo global, e também da própria capacidade do modelo (regional) de desenvolver características regionais realísticas do clima presente. Portanto, outros estudos de mudanças climáticas devem ser desenvolvidos utilizando-se diferentes modelos climáticos regionais.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a elaboração de diferentes métodos de investigação com o intuito, por exemplo, de atribuir notas por variável para cada cidade resultando em um quadro mais integrado das suscetibilidades de cada área, possibilitando, desta maneira, uma evidente identificação das regiões mais afetadas pelas mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A. M. G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; KUMAR, K. R.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D. B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M. e VAZQUEZ-AGUIRRE, J. L. Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, D05109, doi: 10.1029/2005JD006290, 2006.
- ALVES L. e MARENGO, J. A. Assessment of Regional Seasonal Predictability using the PRECIS Regional Climate Modeling System over South America. *Theoretical and Applied Climatology*, doi:10.1007/s00704-009-0165-2, 2009.
- AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.; MARENGO, J. A.; PISNITCHENKO, I. e ALVES, L. M. Cenários Regionalizados de Clima no Brasil para o Século XXI: Projeções de Clima usando Três Modelos Regionais. Relatório 3, Ministério do Meio Ambiente (MMA), DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Sub projeto: Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007.
- BETTS, A. K. e MILLER, M. T. A New Convective Adjustment Scheme. Part II: Single Column Tests using GATE Wave, BOMEX, ATEX and Arctic Air-mass Data Sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, v. 112, p. 693-703, doi: 10.1002/qj.49711247308, 1986.
- BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. *Weather Analysis and Forecasting*, v. 9, p. 256–278, 1994.

- BRANDÃO, A. M. P. M. Tendências e Oscilações Climáticas na Área Metropolitana do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado aprovada pelo Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987.
- BUSTAMANTE, J.; GOMES, J. L. e CHOU, S. C. 5-year Eta Model Seasonal Forecast Climatology over South America. 8th Inter Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. Foz do Iguaçu, 2006.
- CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F. e TAVARES, P. Downscaling of South America Present Climate driven by 4-member HadCM3 Runs. *Climate Dynamics*, 2012.
- COELHO NETTO, A. L.; AVELAR, A. S. e D'ORSI, R.. Domínio do Ecosistema da Floresta Atlântica de Encostas. Rio Próximos 100 anos. O Aquecimento Global e a Cidade. Rio de Janeiro, Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos, 2008.
- COLLINS, M.; BOOTH, B. B. B.; HARRIS, G. R.; MURPHY, J. M.; SEXTON, D. M. H. e WEBB, M. J. Towards Quantifying Uncertainty in Transient Climate Change. *Climate Dynamics*, v. 27, p. 127-147, doi: 10.1007/s00382-006-0121-0, 2006.
- DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S. e MACHADO, C. O. Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 1, p. 24-38, 2009.
- DERECZYNSKI, C. P.; LUIZ SILVA, W. e MARENGO, J. A. Detection and Projections of Climate Change in Rio de Janeiro, Brazil. *American Journal of Climate Change*, v. 2, n. 1, p. 25-33, doi: 10.4236/ajcc.2013.21003, 2013.
- DICKINSON, R. E.; ERRICO, R. M.; GIORGI, F. e BATES, G. T. A Regional Climate Model for the Western U. S. *Climate Change*, v. 15, p. 383-422, 1989.

- DUURSMA, E. K. Rainfall, River Flow and Temperature Profile Trends; Consequences for Water Resources. Heineken N.V.: Amsterdam. ISBN 90-9016054-X. v. 32, cd-rom PP, 2002.
- EASTERLING, D.; MEEHL, G.; PARMESAN, C.; CHANGNON, S.; KARL, T. e MEARNNS, L. Climate Extremes: Observations, Modeling and Impacts. Science, v. 289, p. 2068–2074, 2000.
- EK, M. B.; MITCHELL, K. E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUMMEN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G. e TARPLEY, J. D. Implementation of NOAA Land Surface Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model. J. Geophys. Res., 108:8851, doi: 10.1029/2002JD003246, 2003.
- FELS, S. B. e SCHWARZKOPF, M. D. The Simplified Exchange Approximation: A New Method for Radiative Transfer Calculations. J. Atmos. Sci., v. 32, p. 1475-1488, 1975.
- FIDERJ. Indicadores Climatológicos do Estado do Rio de Janeiro. Governadoria do Estado do Rio de Janeiro, Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral (SECPLAN), Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Rio de Janeiro (FIDERJ). Sistemas de Informação para o Planejamento Estadual (SIPE), 1978.
- FIGUEIRÓ, A. S. e COELHO NETTO, A. L. Do Local ao Regional: Análise Comparativa de Transectos Pluviométricos em Diferentes Escalas. V Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós Graduação em Geografia/ANPEGE, Florianópolis, 2003.
- FIGUEIRÓ, A. S. Mudanças Ambientais na Interface Floresta-Cidade e Propagação de Efeito de Borda no Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro: Um Modelo de Vizinhança. Tese de Doutorado em Geografia, UFRJ, 2005.

- FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN TANK, A. M. G. e PETERSON, T. Observed Coherent Changes in Climatic Extremes during the Second Half of the Twentieth Century. *Climate Research*, v. 19, p. 193–212, 2002.
- GARREAUD, R. D. e FALVEY, M. The Coastal Winds Off Western Subtropical South America in Future Climate Scenarios. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.1716, 2008.
- GIORGI, F. e BATES, G. T. The Climatological Skill of a Regional Model over Complex Terrain. *Mon Wea*, v. 117, p. 2325–2347, 1989.
- GIORGI, F. On the Simulation of Regional Climate using a Limited Area Model nested in a General Circulation Model. *J. Climate*, v. 3, p. 941–963, 1990.
- GOOSSENS, C. e BERGER, A. Annual and Seasonal Climatic Variations over the Northern Hemisphere and Europe during the Last Century. *Annales Geophysicae*, Berlin, v. 4, n. B4, p. 385-400, 1986.
- GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C. A.; BANKS, H.; GREGORY, J. M.; JOHNS, T. C.; MITCHELL, J. F. B. e WOOD, R. A. Simulation of SST, Sea Ice Extents and Ocean Heat Transport in a Version of the Hadley Centre Coupled Model without Flux Adjustments, *Clim. Dyn.*, v. 16, p. 147–168, 2000.
- GRIMM, A. M. e NATORI, A. Climate Change and Interannual Variability of Precipitation in South America. *Geophysical Research Letters*, v. 33, L19706, doi 10.1029/2006GL026821, 2006.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIÇÃO, Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A.; BIDEGAIN, M.; CORONEL, G.; CORRADI, V.; GARCIA, V. J.; GRIMM, A. M.; KAROLY, D.; MARENGO, J. A.; MARINO, M. B.; MONCUNILL, D. F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J. L.; TREBEJO, I. e VINCENT, L. A. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960-2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, v. 19, p. 1490-1512, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Banco de Dados disponível em www.ibge.gov.br, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990. Organizadores: Andrea Malheiros Ramos, Luiz André Rodrigues dos Santos, Lauro Tadeu Guimarães Fortes. Brasília, DF. INMET, p. 465, 2009.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Summary for Policymakers, Special Reports on Emission Scenários – SRES: A Special Report of Working Group III. Cambridge Univ. Press., New York, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report. Brussels, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis – Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Brussels, 2013.

JANJIC, Z. I. The Step-mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer and Turbulence Closure Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, v. 122, p. 927– 945, 1994.

- JOURDAN, P.; MARTON, E.; PIMENTEL, L. C. G. e SILVA, M. S. Caracterização do Regime de Vento em Superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Influência dos Aspectos Fisiográficos e do Ciclo Diário. Submetido à Revista Brasileira de Geofísica, 2010.
- KARL, T.; NICHOLLS, N. e GREGORY, J. The Coming Climate. *Sci. Am.*, v. 276, p. 54–59, 1997.
- KIDA, H.; KOIDE, T.; SASAKI, H. e CHIBA, M. A New Approach to Coupling a Limited Area Model with a GCM for Regional Climate Simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, v. 69, p. 723–728, 1991.
- LACIS, A. A. e HANSEN, J. E. A Parameterization of the Absorption of Solar Radiation in Earth's Atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, v. 31, p. 118–133, 1974.
- LE TREUT, H. e SOMERVILLE, R. Historical Overview of Climate Change Science. Cap. 1, p. 93-127, 2007.
- LIN, J-L.; KILADIS, G. N.; MAPES, B. E.; WEICKMANN, K. M.; SPERBER, K. R.; LIN, W.; WHEELER, M. C.; SCHUBERT, S. D.; DEL GENIO, A.; DONNER, L. J.; EMORI, S.; GUEREMY, J-F.; HOURDIN, F.; RASCH, P. J.; ROECKNER, E. e SCINOCCHA, J. F. Tropical Intraseasonal Variability in 14 IPCC AR4 Climate Models. Part I: Convective Signals. *Journal of Climate*, v. 19, n. 12, p. 2665–2690, 2006.
- LUIZ SILVA, W. Tendências Observadas e Projeções Futuras de Extremos Climáticos na Cidade do Rio de Janeiro. Monografia aprovada no Departamento de Meteorologia (Instituto de Geociências), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

- LUIZ SILVA, W.; DERECZYNSKI, C. P.; CHANG, M.; FREITAS, M. A. V.; MACHADO, B. J. S.; CHARGEL, L. T. e RUGGERI, J. P. Tendências Observadas em Indicadores de Extremos Climáticos de Temperatura e Precipitação no Estado do Paraná. Artigo submetido para avaliação na Revista Brasileira de Meteorologia, 2013.
- MAIA, L. Micro-clima e Eventos Climáticos Extremos. Rio Próximos 100 anos. O Aquecimento Global e a Cidade. Rio de Janeiro. Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos. Rio de Janeiro, 2008.
- MANLEY, G. On the Frequency of Snowfall in Metropolitan England. Quart. J. Roy. Meteorological Society, v. 84, p. 70-72, 1958.
- MANTON, M. J.; HEATH, L.; SALINGER, J. e STEVENSON, L. A. Climate in Asia and the Pacific: a Synthesis of APN Activities. Asia-Pacific Network for Global Change Research, v. 6, p. 78, 2011.
- MARENGO J. e AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in Impacts Assessments and Adaptations Studies from Continental to Regional and Local Scales: The CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South America) Initiative in South America. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, p. 291-296, 2006.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L.; VALVERDE, M.; ROCHA, R. e LABORBE, R. Eventos Extremos em Cenários Regionalizados de Clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de Clima Futuro usando Três Modelos Regionais. Relatório 5, Ministério do Meio Ambiente (MMA) – DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Sub projeto: Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007.

- MARENGO, J. A. e CAMARGO, C. G. C. Surface Air Temperature Trends in Southern Brazil for 1960–2002. *International Journal of Climatology*, v. 28, issue 7, p. 893–904, doi: 10.1002/joc.1584, 2007.
- MARENGO, J. A. e VALVERDE, M. C. Caracterização do Clima no Século XX e Cenário de Mudanças de Clima para o Brasil no século XXI usando Modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência, Campinas, Edição n° 8, Mudanças Climáticas*, 2007.
- MARENGO J. A.; JONES, R; ALVES, L. M. e VALVERDE, M. Future Change of Temperature and Precipitation Extremes in South America as derived from the PRECIS Regional Climate Modeling System. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.1863, 2009.
- MARENGO, J. A.; RUSTICUCCI, M.; PENALBA, O. e RENOM, M. An Intercomparison of Observed and Simulated Extreme Rainfall and Temperature Events during the Last Half of the Twentieth Century: part 2: Historical Trends. *Climatic Change*, v. 98, p. 509–529, doi: 10.1007/s10584-009-9743-7, 2010.
- MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F. e TAVARES, P. Development of Regional Future Climate Change Scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 Climate Change Projections: Climatology and Regional Analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. *Climate Dynamics*, 2012.
- MEEHL, G.; KARL T.; EASTERLING, D.; CHANGNON, S.; PIELKE, R.; CHANGNON, D.; EVANS, J.; GROISMAN, P.; KNUTSON, T.; KUNKEL, K.; MEARN, L.; PARMESAN, C.; PULWARTY, R.; ROOT, T.; SYLVES, R.; WHETTON, P. e ZWIERS, F. An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts and Model Projections. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, v. 81, p. 413–416, 2000.

- MELLOR, G. L. e YAMADA, T. A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Boundary Layers. *J. Atmos. Sci.*, v. 31, p. 1791-1806, doi: 10.1175/1520-0469(1974)031, 1974.
- MESINGER, F. A Blocking Technique for Representation of Mountains in Atmospheric Models. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, v. 44, p. 195–202, 1984.
- MESINGER, F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; LYRA, A. A.; BUSTAMANTE, J. F.; BASTOS, P. R.; LAZIC, L.; MORELLI, S. e RISTIC, I. An upgraded version of the Eta Model. Submetido ao *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2012.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Relatório Ambiental Urbano Integrado. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/sqa/urbana/>, 2002.
- MORAES, N. O.; MARTON, E. e PIMENTEL, L. C. G. Simulações Numéricas da Formação de Ilha de Calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 28 – 2/2005, p. 116-138, 2005.
- MOSS, R. H. e SCHNEIDER, S. H. Uncertainties in the IPCC TAR: Recommendations to lead authors for more consistent assessment and reporting. Cross-cutting issues in the IPCC Third assessment report. R. Pachauri e Taniguchi, T. Tokyo, Global Industrial and Social Progress Research Institute for IPCC, p. 33-52, 2000.
- MURPHY, J. M. B.; BOOTH, B. B. B.; COLLINS, M.; HARRIS, G. R.; SEXTON, D. M. H. e WEBB, M. J. A Methodology for Probabilistic Predictions of Regional Climate Change from Perturbed Physics Ensembles, *Philos. Trans. Soc., R., Ser. A.*, v. 365, p. 1993-2028, 2007.
- NEW, M.; HULME, M. e JONES, P. Representing Twentieth-Century Space Time Climate Variability. Part II: Development of 1901–1996 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate. *J. Clim.*, v. 13, p. 2217–2238, 2000.

- NOBRE, C. A.; YOUNG, A. F.; SALDIVA, P.; MARENGO, J. A.; NOBRE, A. D.; JUNIOR, S. A.; SILVA, G. C. M. e LOMBARDO, M. Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. Sumário Executivo, 2010.
- NUÑEZ, M. N.; SOLMAN, S. A. e CABRÉ, M. F. Regional climate change experiments over southern South América. II: Climate Change Scenarios in the Late Twenty-first Century. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-008-0449-8, 2008.
- OBREGÓN, G. e MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do Clima no Século XX no Brasil: Tendências de Chuvas e Temperaturas Médias e Extremas. Relatório nº 2, MMA, 2007.
- PEIXOTO, J. P. e OORT, A. H. *Physics of climate*. American Institute of Physics. New York, 520 p., 1993.
- PINTO, H. S.; ASSAD, E.; ZULLO, J.; BRUNINI, O. e EVANGELISTA, B. A. O Aquecimento Global e a Agricultura. Anais do XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Fortaleza, 2001.
- POPE, V.; GALLANI, M.; ROWTREE, P. e STRATTON, R. The Impact of New Physical Parameterizations in the Hadley Centre Climate Model. *Clim. Dyn.*, v. 16, p. 123–146, 2000.
- PRATES, E. J. e SILVA DIAS, M. A. F. Efeito da Topografia na Distribuição Espacial da Chuva no Estado de Minas Gerais no Verão de 1984/85. Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia, v. 8, p. 580-581. Belo Horizonte, 1994.

RANDALL, D. A.; WOOD, R. A.; BONY, S.; COLMAN, R.; FICHEFET, T.; FYFE, J.; KATTSOV, V.; PITMAN, A.; SHUKLA, J.; SRINIVASAN, J.; STOUFFER, R. J.; SUMI, A. e TAYLOR, K. E. Climate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M. e MILLER, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

REINKING, R. F. e BOATMAN, J. F. Upslope Precipitation Events. Ray, P. S. (Ed.). Mesoscale Meteorology and Forecasting, p. 437-471, 1986.

RUSTICUCCI, M.; MARENGO, J. A.; PENALBA, O e RENOM, M. An Intercomparison of Model-Simulated in Extreme Rainfall and Temperature Events during the Last Half of the Twentieth Century. Part 1: Mean Values and Variability. Climatic Change, v. 98, p. 493–508, doi: 10.1007/s10584-009-9742-8, 2010.

SANGIGOLO, C. A.; RODRIGUES, R. C. M. e ETCHICHURY, P. C. Tendências nas Temperaturas Médias do Brasil. Anais do VII Congresso Brasileiro de Meteorologia, v. 1, p. 367-371, 1992.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient based on Kendall's Tau. Journal of American Statistics Association, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SNEYERS, R. Sur L'analyse Statistique des Series D'observations. Genève: Organisation Météorologique Mondiale, p. 192, 1975.

SOARES, W. R. e MARENGO, J. A. Assessments of Moisture Fluxes East of the Andes in South América in a Global Warming Scenario. International Journal of Climatology. Publicado online em Wiley InterScience. <http://www.interscience.wiley.com>, doi: 10.1002/joc.1800, 2008.

- SOLMAN, S. A.; NUÑEZ, M. N. e CABRÉ, M. F. Regional Climate Change Experiments over Southern South America. I: Present Climate. *Clim. Dyn.*, v. 30, p. 533–552, 2007.
- TEBALDI, C.; HAYHOE, K.; ARBLASTER, J. e MEEHL, G. Going to the Extremes: An Intercomparison of Model-simulated Historical and Future Changes in Extreme Events. *Climatic Change*, v. 79, p. 185-211, 2006.
- TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. e VALVERDE, M. C. Projeções de Extremos Climáticos nas Regiões Metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro para o Final do Século XXI. *Anais do III Simpósio Internacional de Climatologia*. Canela, 2009.
- VALVERDE, M. C.; ANDRADE, E. e MARENGO, J. A. Chuvas Extremas sobre o Nordeste e Norte do Brasil no Outono de 2009: Uma Análise Local, Presente e Futura. *Anais do III Simpósio Internacional de Climatologia*. Canela, 2009.
- VALVERDE, M. C. e MARENGO, J. A. Mudanças na Circulação Atmosférica sobre a América do Sul para Cenários Futuros de Clima Projetados pelos Modelos Globais do IPCC AR4. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 1, p. 125-145, 2010.
- VERA, C.; SILVESTRI, G.; LIEBMANN, B. e GONZÁLEZ, P. Climate Change Scenarios for Seasonal Precipitation in South America from IPCC-AR4 Models. *Geophysical Research Letters*, v. 33, doi: 10.1029/2006GL025759, 2006.
- VINCENT, L. A.; PETERSON, T. C.; BARROS, V. R.; MARINO, M. B.; RUSTICUCCI, M.; CARRASCO, G.; RAMIREZ, E.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; BERLATO, M. A.; GRIMM, A. M.; MARENGO, J. A.; MOLION, L.; MONCUNILL, D. F.; REBELLO, E.; ANUNCIAÇÃO, Y. M. T.; QUINTANA, J.; SANTOS, J. L.; BAEZ, J.; CORONEL, G.; GARCIA, J.; TREBEJO, I.; BIDEGAIN, M.; HAYLOCK, M. R.; KAROLY, D. Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960-2000. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 18, p. 5011-5023, 2005.

ZHANG, X. e YANG, F. RCLimDex (1.0) – User Manual. Climate Research Branch
Environment Canada Downsview, Ontario, Canada, 2004.

ZHAO, Q. e CARR, F. H. A Prognostic Cloud Scheme for Operational NWP Models.
Mon. Wea. Rev., v. 125, p. 1931–1953, 1997.