

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**IMPACTOS DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS NA APTIDÃO
AGROCLIMÁTICA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA DE
PERNAMBUCO**

GABRIELA AYANE CHAGAS FELIPE SANTIAGO

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Menezes

Co-orientador: Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega

Recife, PE

Fevereiro, 2015

GABRIELA AYANE CHAGAS FELIPE SANTIAGO

**IMPACTOS DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS NA APTIDÃO
AGROCLIMÁTICA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA DE
PERNAMBUCO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Energia de Biomassa.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Menezes

Co-orientador: Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega

Recife, PE
Fevereiro, 2015

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

S235i Santiago, Gabriela Ayane Chagas Felipe.
Impactos de cenários climáticos futuros na aptidão agroclimática da cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco. / Gabriela Ayane Chagas Felipe Santiago. - Recife: O Autor, 2015.
95 f. : il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes.
Coorientador: Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2015.
Inclui referências bibliográficas, apêndices e anexo.

1. Projeções climáticas. 2. Zoneamento agroclimático. 3. Política agrícola. I. Menezes, Rômulo Simões Cezar, orientador. II. Nóbrega, Ranyére Silva, coorientador. III. Título.

CDD 633 (21. ed.)

UFPE
BDEN/2015-15

***IMPACTOS DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS
NA APTIDÃO AGROCLIMÁTICA DA CANA-DE-
AÇÚCAR NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO***

Gabriela Ayane Chagas Felipe Santiago

APROVADA EM: 25.02.2015

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes
Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior - Embrapa Meio Norte

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva – DCG/UFPE

Dr. Alexandre Hugo Cezar Barros - Embrapa Solos- UEP Recife

Visto e permitida a impressão

Coordenador(a) do PROTEN/DEN/UFPE

Dedico a meus pais e irmãos

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida, pelos desafios e conquistas.

À minha Família e amigos pela força e apoio dado ao longo desses dois anos.

Ao meu orientador Rômulo Menezes e co-orientador Ranyére Nóbrega pela confiança depositada e pelo apoio e dedicação.

Ao querido Prof. Everardo Sampaio por toda ajuda e milhares de revisões.

Ao Dr. Alexandre Barros, pelo apoio, conselhos e amizade.

À Dra. Angelica Giarolla, Dr. Celso Randow pelo apoio dado durante o tempo que passei no CCST-INPE.

Ao André Lyra e Guilherme Martins por todas as dúvidas tiradas e as minhas queridas amigas do aquário (CCST-INPE) que adoçaram a minha estadia em Cachoeira Paulista.

Aos meus queridos amigos Hilton Ferraz e Davi da EMBRAPA-solos que sempre tão carinhosamente me ajudaram e apoiaram.

E aos meus queridos amigos do grupo de pesquisa BIOMASSA que dividiram comigo maravilhosos momentos ao longo do tempo que passei no DEN. Gostaria de agradecer em especial ao Antônio Samuel, Eric Xavier, Diego Marcelino e Nilson Medeiros que muito mais que a amizade e generosidade, me dedicaram tempo para desenvolver essa pesquisa.

Enfim gratidão por todos aqueles que passaram por minha vida, pois foi esse longo caminho que me fez chegar até aqui.

Meu trabalho científico é motivado por um desejo irresistível de
entender os segredos da natureza- por nada mais.
Albert Einstein

RESUMO

O setor agrícola na região Nordeste do Brasil é responsável pela produção de alimentos e de produtos energéticos e é fortemente dependente do clima. Nesse sentido, cenários de mudanças climáticas que indicam aumento na temperatura do ar e diminuição da precipitação pluvial no Nordeste do Brasil indicam que poderão haver mudanças significativas neste setor, aumentando as áreas de risco para algumas culturas. Deste modo, o objetivo desta pesquisa foi o de avaliar as projeções dos elementos climáticos, precipitação e temperatura do ar, gerados pelo modelo regional Eta-HadCM3 para o estado de Pernambuco e identificar os efeitos que as alterações climáticas poderão causar na aptidão agroclimática da cultura da cana-de-açúcar, em cultivo de sequeiro, na Zona da Mata de Pernambuco. Para isto, utilizaram-se simulações do modelo Eta-HadCM3 no período de 1960-1990 (presente), 2010-2040 e 2041-2070 (futuro) no cenário A1B do IPCC. Os dados simulados para o clima presente foram usados para avaliar e corrigir erros sistemáticos das projeções. Após a correção, os dados de precipitação e temperatura do ar foram espacializados para todo o estado. Após essa etapa, foi feito o zoneamento da aptidão agroclimática da cana-de-açúcar na Zona da Mata para as projeções, utilizando três cenários pluviométricos (anos secos, regulares e chuvosos). De acordo com os resultados, observou-se que as projeções do modelo mostraram uma mudança gradual dos elementos climáticos, que poderá levar a uma acentuada diminuição da precipitação e temperaturas mais elevadas até 2070. Observou-se, ainda, que tais condições impactarão mais as áreas de produção de cana-de-açúcar no segundo período de análise (2041-2070). Conclui-se que o estado sofrerá, a partir de 2040, mudanças nos padrões de chuva e temperatura do ar e que tais mudanças levarão a uma redução de até 40% nas áreas com condições plenas ao cultivo da cana-de-açúcar na Zona da Mata, em anos com chuvas regulares sendo necessário investimento em medidas de adaptação as condições climáticas mais severas.

Palavras-chave: projeções climáticas; zoneamento agroclimático; política agrícola.

ABSTRACT

The agricultural sector in the Northeastern region of Brazil is responsible for the production of food and energy, but it is heavily dependent on climatic variables. In this sense, climate change scenarios indicate that there may be increases in air temperature and decreases in rainfall precipitation in northeastern Brazil, and this may cause major interferences in this sector, increasing the risk areas for some crops. Thus, the objective of this research was to evaluate the projections of climatic elements, precipitation and air temperature, generated by the regional model Eta-HadCM3 for the state of Pernambuco and identify the effects these changes may have on agro-climatic suitability of sugarcane under rain fed conditions in the Atlantic Forest area of Pernambuco. For this, we used simulations of the Eta-HadCM3 for the period of 1960-1990 (present), 2010-2040 and 2041-2070 (future) in the IPCC A1B scenario. The simulated data for this climate were used to evaluate and correct systematic errors of projections. After correction, the data of precipitation and air temperature were mapped for the whole state of Pernambuco. After that, we made the zoning of the agro climatic fitness of sugarcane in the Atlantic Forest area for projections using three rainfall scenarios (dry years, regular and rainy). According to the results, it was observed that the model projections show a gradual change of climatic elements, which could lead to a sharp decrease in rainfall and higher temperatures by 2070. These conditions will impact more areas of production of sugarcane in the second period of analysis (2041-2070). It is concluded that the state of Pernambuco will likely suffer changes in patterns of rainfall and air temperature and that such changes, by the year 2040, will lead to a reduction of up to 40% in areas with full conditions for the cultivation of sugarcane in the Atlantic Forest area, in years with rainfall regular, requiring investment in adaptation measures for the expected more severe weather conditions.

Keywords: climate projections; agroclimatic zoning; agricultural policy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil.	19
Figura 2 - Zoneamento climático da cana-de-açúcar em Pernambuco.....	23
Figura 3 – Esquema de um modelo atmosférico global.	26
Figura 4 – Downscaling do modelo Eta-HadCM3.	27
Figura 5 - Localização do estado de Pernambuco e suas mesorregiões.	31
Figura 6 - Altitude do estado de Pernambuco.	34
Figura 7 - Fluxograma do procedimento da correção da precipitação pluvial.	38
Figura 8 - Fluxograma do procedimento da correção da temperatura do ar.....	39
Figura 9 – Grade do Modelo Eta-HadCM3.	40
Figura 10– Fluxograma do procedimento com os dados meteorológicos.	40
Figura 11 - Fluxograma do procedimento do zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar..	46
Figura 12 - Valores do coeficiente de determinação (R^2) e do índice de concordância (d) para as variáveis precipitação pluvial, temperaturas mínima, máxima e média do ar, avaliados para cada membro do modelo Eta-HadCM3 - High, Midi, Low e Cntrl, durante o período de 1960-1990 no estado Pernambuco.....	47
Figura 13 - Comparação entre as temperaturas máximas do ar simuladas pelo modelo Eta-HadCM3 antes (membro) e após (membro_C) da remoção dos erros sistemáticos e as temperaturas máxima do ar observadas (Obs) no estado de Pernambuco, para o período de 1986-1990, segundo os membros de simulação (High, Midi, Low).....	54
Figura 14 - Comparação entre as temperaturas médias do ar simuladas pelo modelo Eta-HadCM3 antes (membro) e após (membro_C) remoção dos erros sistemáticos e as temperaturas média do ar observadas (Obs) no estado de Pernambuco, para o período de 1986-1990, segundo os membros de simulação (High, Midi, Low, Cntrl).	55
Figura 15 - Comparação entre as temperaturas mínimas do ar simuladas pelo modelo Eta-HadCM3 antes (membro) e após (membro_C) remoção dos erros sistemáticos e as temperaturas mínimas ao ar observadas (Obs) no estado de Pernambuco, para o período de 1986-1990, segundo os membros de simulação (High, Midi, Low).....	57
Figura 16 - Totais anuais de chuva (mm) para o estado de Pernambuco, A (Atual – observado/ 1960- 2012), B (2010-2040) e C (2041-2070). B e C são projeções do modelo Eta-HadCM3 no cenário A1B.	59

Figura 17 – Diferença percentual entre os totais anuais de chuva projetado pelo modelo Eta-HadCM3 no cenário A1B e a climatologia dos totais anuais observados para o estado de Pernambuco: A (2010-2040) e B (2041-2070).....	60
Figura 18 – Diferença em milímetros e percentual dos totais de chuva por trimestre entre o valores observado e os projetados pelo Modelo Eta-HadCM3 para o período de 2010-2040, (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON.	61
Figura 19 - Diferença em milímetros e percentual dos totais de chuva por trimestre entre o valores observado e os projetados pelo Modelo Eta-HadCM3 para o período de 2041-2070, (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON.	63
Figura 20 - Espacialização da diferença dos dados observados e projetados da temperatura máxima do ar (°C), sobre o estado de Pernambuco para o cenário A1B. (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON. As projeções são para o período de 2010-2040 e 2041-2070 do modelo Eta-HadCM3.....	65
Figura 21 - Espacialização da diferença dos dados observados e projetados da temperatura média do ar (°C), sobre o estado de Pernambuco para o cenário A1B. (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON. As projeções são para o período de 2010-2040 e 2041-2070 do modelo Eta-HadCM3.....	68
Figura 22 - Espacialização da diferença dos dados observados e projetados da temperatura mínima do ar (°C), sobre o estado de Pernambuco para o cenário A1B. (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON. As projeções são para o período de 2010-2040 e 2041-2070 do modelo Eta-HadCM3.....	69
Figura 23- Limitações de deficiência hídrica na zona úmida costeira do estado de Pernambuco.	73
Figura 24 - Zoneamento de aptidão agroclimática futuro da cultura da cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco, com projeções do modelo regional Eta-HadCM3 no período de 2010-2040, A- Cenário Regular; B- Cenário Seco e C- Cenário Chuvoso.	75
Figura 25- Zoneamento de aptidão agroclimática futuro da cultura da cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco, com projeções do modelo regional Eta-HadCM3 no período de 2041-2070, A- Cenário Regular; B- Cenário Seco e C- Cenário Chuvoso.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação dos postos pluviométricos utilizados para correção do Modelo Eta-HadCM3.	33
Tabela 2 - Pontos de grade do modelo Eta-HadCM3 escolhidos para o estudo de zoneamento climático da cana-de-açúcar na Zona da Mata pernambucana.	42
Tabela 3 - Critérios utilizados na avaliação de aptidão agroclimática da cultura da cana-de-açúcar.	44
Tabela 4 – Avaliação das simulações da temperatura máxima do ar no período presente (1960-1990) para os membros do modelo Eta-HadCM3, em alguns municípios de Pernambuco. R ² - Coeficiente de determinação (precisão), d – índice de concordância (exatidão).	49
Tabela 5 - Avaliação das simulações da temperatura média do ar no período presente (1960-1990) para os membros do modelo Eta-HadCM3, em alguns municípios de Pernambuco. R ² - Coeficiente de determinação (precisão), d – índice de concordância (exatidão).	50
Tabela 6 - Avaliação das simulações da temperatura mínima do ar no período presente (1960-1990) para os membros do modelo Eta-HadCM3, em alguns municípios de Pernambuco. R ² - Coeficiente de determinação (precisão), d – índice de concordância (exatidão).	50
Tabela 7 - Avaliação das simulações da precipitação pluvial no período presente (1960-1990) para os membros do modelo Eta-HadCM3, em alguns municípios de Pernambuco. R ² - Coeficiente de determinação (precisão), d – índice de concordância (exatidão).	51
Tabela 8 - Área das classes de aptidão climática para a cultura da cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco, em três cenários climáticos: secos, regulares e chuvosos, para os períodos de 2010-2040 e 2041-2070.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANNEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ASAN	Alta Subtropical do Atlântico Norte
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CAD	Capacidade de Água Disponível
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IDW	Inverse Distance Weighting
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCGA	Modelos Climáticos Globais
MCR	Modelos Climáticos Regionais
NCEP	National Centers For Environmental Prediction
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
ProÁlcool	Programa Nacional do Álcool
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SF	Sistemas Frontais
ÚNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
VCAS	Vórtices Ciclônicos de Ar Superior
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1 Cana-de-açúcar no Brasil.....	18
2.2 Cana-de-açúcar e energia de biomassa.....	20
2.3 Influência climática na cana-de-açúcar.....	21
2.4 Zoneamento climático.....	22
2.5 Mudanças climáticas e seus efeitos na cana-de-açúcar.....	24
2.6 Modelos Climáticos.....	26
2.6.1 Modelo Climático Regional Eta-HadCM3.....	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 Área de estudo.....	31
3.2 Climatologia.....	32
3.3 Dados meteorológicos.....	32
3.3.1 Precipitação pluvial.....	32
3.3.2 Temperatura do ar.....	34
3.4 Projeções Climáticas.....	35
3.4.1 Obtenção dos dados.....	35
3.4.2 Avaliação do modelo.....	35
3.4.3 Correção dos erros sistemáticos.....	37
3.4.3.1 Precipitação pluvial.....	37
3.4.3.2 Temperatura do ar.....	38
3.5 Mapeamento dos elementos climáticos.....	40
3.5.1 Dados meteorológicos.....	40
3.5.2 Dados do modelo.....	41
3.5.3 Álgebra de mapas.....	41
3.6 Zoneamento climático da cana-de-açúcar.....	42
3.6.1 Discriminação dos cenários pluviométricos.....	42
3.6.2 Critério de aptidão climática.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47

4.1	Análise estatística das simulações	47
4.1.1	Avaliação do modelo	47
4.1.2	Correção e validação dos erros sistemáticos	52
4.2	Mapas das projeções climáticas.....	58
4.3	Zoneamento de aptidão agroclimática futura da cultura da cana-de-açúcar	70
5.	CONCLUSÕES	77
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	778
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE	89
	ANEXO	95

1. INTRODUÇÃO

Segundo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês-AR5), o aquecimento climático é inequívoco, com muitas das mudanças observadas sem precedentes das últimas décadas a milênios (IPCC, 2013). O aquecimento da atmosfera e dos oceanos, a diminuição da neve e do gelo, o aumento do nível do mar e as crescentes concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, dentre os quais se destacam o dióxido de carbono, o metano e o óxido nitroso, representam um desafio sem precedentes para a humanidade. Tal característica se deve a dois fatores principais: a taxa em que esses gases são lançados na atmosfera e o tempo para que sejam reabsorvidos pelo sistema terrestre e oceanos ou decompostos física ou quimicamente na atmosfera (NOBRE, 2011).

Avaliar os impactos das mudanças climáticas e os efeitos que estas podem causar às atividades humanas tem sido alvo crescente de pesquisas científicas em diversas áreas do conhecimento. Apesar do crescente número de evidências, vários fóruns e pesquisadores questionam se as mudanças em andamento são anomalias devidas às variabilidades sazonais do clima, às atividades tectônicas, ou mesmo solares (BRUNINI, 2008). De qualquer forma, é prudente que a comunidade científica busque soluções e medidas mitigatórias para reduzir os possíveis efeitos negativos das adversidades climáticas.

O desenvolvimento e o estudo de cenários de mudanças climáticas em escala regional é, talvez, o primeiro passo para o entendimento dos impactos climáticos futuros, direcionado para o fornecimento de informação a ser utilizada para avaliações de vulnerabilidade e para estratégias de mitigação e adaptação às alterações climáticas (MARENGO et al., 2011a). De fato, estes cenários passam a ser uma ferramenta para a compreensão das alterações climáticas em escala regional e podem ajudar na identificação dos possíveis impactos nas atividades econômicas, como, por exemplo, nas diversas atividades agrícolas.

As mudanças climáticas representam grandes desafios para o manejo das culturas agrícolas. Isso ocorre porque, para que haja um bom crescimento e desenvolvimento das plantas, é necessário que os elementos climáticos, tais como temperatura do ar, precipitação pluvial e radiação solar estejam de acordo com as exigências da cultura. Assim, cenários climáticos que afetam a temperatura e a disponibilidade hídrica para as culturas apresentam novas fontes de incertezas no manejo e na produtividade agrícola (BRUNINI, 2008).

Uma alternativa para a redução nas emissões de gases do efeito estufa é o uso de fontes renováveis de energia em substituição aos combustíveis fósseis. As fontes renováveis de

energia são conhecidas como fontes de energia “limpa”, pois emitem menos poluentes para a atmosfera e têm menor impacto sobre o meio ambiente. Entre as principais fontes renováveis de energia, está a energia da biomassa, com destaque para a cultura da cana-de-açúcar no Brasil, da qual é produzido etanol e cujo bagaço também é aproveitado para geração de energia (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

O etanol pode ser produzido a partir de diferentes fontes de biomassa, como as culturas amiláceas (milho e grãos de cereais), sacarinas (cana-de-açúcar, beterraba sacarídea e o sorgo sacarino) e celulósicas (madeiras e resíduos das culturas). No Brasil, a produção de etanol é proveniente, principalmente, da fermentação do caldo sacarino da cana-de-açúcar. A produção total de etanol fechou em 23,64 bilhões de litros na safra 2012/13 e 27,96 bilhões de litros em 2013/14, um incremento de 3,53 bilhões de litros, o que corresponde a uma alta de 14,94% (CONAB, 2014). A produção de etanol vem crescendo a cada ano no mundo; porém, o aumento da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar irá demandar a expansão das áreas cultivadas, a melhoria nas tecnologias de produção ou, mais provavelmente, uma combinação desses dois fatores.

Na região Nordeste, o cultivo da cana-de-açúcar para a produção de etanol ocorre, predominantemente, na Zona da Mata. Porém, a aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar pode variar entre diferentes áreas da Zona da Mata nordestina, principalmente devido às variações da precipitação pluviométrica, assim como a variação de outras características ambientais, tais como o solo, o relevo, dentre outras. Por exemplo: nas áreas da Zona da Mata ao norte de Alagoas e sul de Pernambuco, as médias anuais de precipitação pluviométrica, na faixa que compreende algumas dezenas de quilômetros do litoral em direção ao interior, situam-se sempre acima de 1500 mm e podem atingir volumes superiores a 2000 mm. Por outro lado, nas áreas da Zona da Mata norte de Pernambuco e Zona da Mata da Paraíba, assim como na parte oeste da Zona da Mata desses estados, as médias anuais de precipitação pluviométrica situam-se em torno de 1200 a 1400 mm e, em alguns municípios, aproximam-se de 1000 mm anuais. Por esse motivo, em muitas dessas áreas, a deficiência hídrica é acentuada, necessitando o uso de irrigação para viabilizar a produção da cana-de-açúcar.

Fica evidente a limitação hídrica atual para o cultivo da cana-de-açúcar e a produção de etanol em certas áreas da Zona da Mata nordestina e, mais especificamente, de Pernambuco. Desse modo, uma vez que a demanda por água para fins não agrícolas poderá aumentar muito, no futuro, a viabilidade do cultivo da cana-de-açúcar nessa região pode ser cada vez mais restrita. Além disso, surgem preocupações sobre os impactos das mudanças climáticas futuras projetadas para essa região. Nesse sentido, esta pesquisa constitui um desafio no

estudo e na avaliação da viabilidade da produção da cana-de-açúcar na Zona da Mata pernambucana de acordo com possíveis efeitos das mudanças climáticas.

Portanto essa pesquisa busca aprimorar os estudos que abordam as mudanças climáticas em Pernambuco, diferenciando-se de trabalhos mais recentes que aplicam cenários genéricos com aumento e/ou diminuição da temperatura do ar e precipitação pluviométrica, apenas com base nas projeções do IPCC, sem assumir toda a dinâmica climática existente. Além disso, se propõe a aplicar cenários climáticos futuros para o estado de Pernambuco, utilizando-se de projeções de um modelo climático regional que são úteis para pesquisas de impactos climáticos, já que sua resolução espacial permite a simulação dos processos de meso-escala e melhorias para a representação de topografia e uso do solo (MARENGO et al., 2011).

Sendo assim, o objetivo desta pesquisa é avaliar o impacto das projeções dos elementos climáticos (precipitação pluvial e temperatura do ar) gerados pelo modelo regional Eta-HadCM3 para Pernambuco e identificar os efeitos que as alterações climáticas poderão causar nas áreas de aptidão agroclimática da cana-de-açúcar, em cultivo de sequeiro, na Zona da Mata do estado. Espera-se que as informações geradas no presente estudo possam subsidiar outras pesquisas e políticas agrícolas de mitigação e adaptação da cana-de-açúcar em condições de mudanças climáticas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é originária da Nova Guiné e teve, com as invasões árabes, sua propagação para o norte da África, sul da Europa e toda margem do mar Mediterrâneo. Ao mesmo tempo, os chineses a levaram para Java e Filipinas. Entretanto, foi na América que esta cultura encontrou ótimas condições para seu desenvolvimento (EVANGELISTA, 2011).

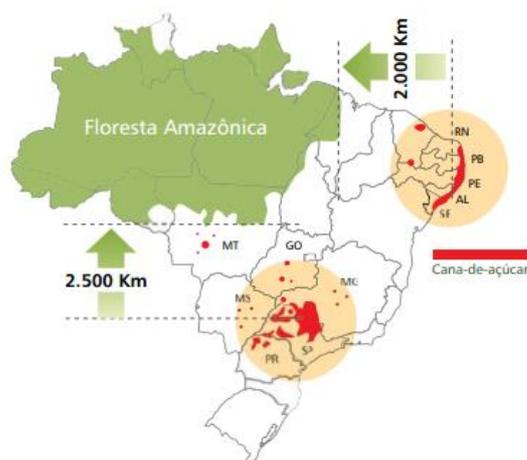
No Brasil, a cana-de-açúcar chegou logo após o descobrimento, mas só ganhou importância econômica a partir da segunda metade do século XVI, quando os engenhos passaram a operar em Pernambuco, Bahia, Alagoas, Sergipe e Paraíba (GUIMARÃES, 2010; EVANGELISTA, 2011). No século XVII, a produção se estendeu por parte da região Norte e nos outros estados do Nordeste. Nesse período, a cultura atendia à estratégia de Portugal, que queria ocupar sua colônia e obter lucros atendendo às suas necessidades (CANABRAVA, 2005).

Calmon (1935 apud THEODORO, 2011) diz que a monocultura da cana-de-açúcar começou a conquistar grandes extensões territoriais a partir da Zona da Mata Pernambucana. Em 1534, quando Duarte Coelho realizou a construção de engenhos na capitania de Pernambuco, que logo se expandiram em suas terras.

Depois de transformar o Nordeste brasileiro na primeira região de plantio e o cultivo se espalhar pela região Sudeste (Figura 1), o país tornou-se o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e álcool, no final do século XX (BASALDI et al., 1996). Um dos motivos para essa liderança foi a criação do Programa Nacional do Álcool (ProÁlcool) em 1975, programa federal de estímulo à produção e uso de etanol, criado como resposta à crise mundial do petróleo. O ProÁlcool fez do etanol parte integrante da matriz energética brasileira (UNICA, 2009).

Desde a década de 1970, o setor sucroenergético brasileiro vive em contínua evolução tecnológica. No entanto, devido a uma crise, no final da década de 80, relacionada à baixa do preço do petróleo, à alta do preço do açúcar e à falta de alguns ajustes na tecnologia dos motores dos veículos que utilizavam álcool, observou-se uma queda no consumo de etanol. Já em 2003, a introdução de veículos *flex* e a busca por combustíveis sustentáveis impulsionou novamente a produção de cana no país (OLIVETTE et al., 2010).

Figura 1 - Localização do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil.



Fonte: UNICA (2009).

Hoje, o setor canavieiro do Brasil ocupa lugar de destaque na fabricação e exportação de açúcar, na produção de álcool e na cogeração de energia a partir do bagaço da cana. Segundo a FAO (2014), o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. No ano de 2013, o país foi responsável por 34% da produção mundial e 88% na América do Sul.

Em Pernambuco, a produção de cana-de-açúcar destinada à fabricação de açúcar foi de 10.075,85 (mil t) e 4.326,45 (mil t) para o etanol, que corresponde a 34% e 18% da produção do Nordeste, respectivamente. Dessa forma, percebe-se o quão relevante é o Estado no cenário de produção de cana na Região (CONAB, 2014).

Com relação à próxima safra, a área cultivada com cana-de-açúcar que poderá ser colhida na safra 2014/15 no Brasil está estimada em 9.098,03 mil hectares, ou seja, um acréscimo de 3,3% ou 286,6 mil hectares em relação à safra passada, da qual Pernambuco detém 2,89% (263,03 mil hectares). Esse crescimento ocorreu, principalmente, devido à expansão de novas áreas de plantio das novas usinas em funcionamento na Região Centro-Sul do país. Com relação à produtividade em 2013/14, o estado de Pernambuco teve 50.600 kg/ha, apresentando um acréscimo de 14% com relação à safra passada (2012/13) e poderá apresentar mais um acréscimo de 7,9% na próxima safra (2014/15). Já no Nordeste, a perspectiva é de crescimento de 8,9% no rendimento da cultura em relação à safra passada (2013/14), devido a uma recuperação da produtividade dos canaviais que, foram severamente castigados por uma das maiores secas da região (CONAB, 2014).

2.2 Cana-de-açúcar e energia de biomassa

A bioenergia é um caso particular de energia química acumulada mediante processos fotossintéticos recentes. Em geral, denominam-se biomassa os recursos naturais que dispõem de bioenergia e que podem ser processados para fornecer formas bioenergéticas. Portanto, seriam exemplos de fontes de bioenergia: a lenha e os resíduos de serrarias, o carvão vegetal, o biogás resultante da decomposição anaeróbia de lixo orgânico e outros resíduos agropecuários, bem como os biocombustíveis líquidos, como o bioetanol e o biodiesel, e a bioeletricidade, gerada pela queima de combustíveis como o bagaço e a lenha (BNDES, 2008). O potencial energético e a viabilidade socioeconômica dependem da matéria prima utilizada, assim como da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos.

Segundo a ANNEL (2008), a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela vem sendo considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e que reduz a dependência dos combustíveis fósseis (não renováveis).

Das opções disponíveis, o etanol da cana-de-açúcar é o maior sucesso comercial dos combustíveis de biomassa em produção atualmente. O etanol da cana-de-açúcar possui balanço energético positivo de oito para um, ou seja, a cana gera oito unidades de energia para cada unidade de energia utilizada para produzi-la, e um custo aproximadamente nulo de mitigação de carbono. Com a atual busca por novas fontes alternativas devido ao aumento dos preços do petróleo e a busca por energias limpas (menor emissão de CO₂), a cana-de-açúcar tem-se mostrado uma dessas saídas, principalmente por seu grande potencial na produção de etanol e seus subprodutos. A cana é a segunda cultura no Brasil, em termos de valor de produção, e vem ganhando novos investimentos nos últimos anos, com o objetivo de suprir a demanda por álcool no mercado interno, devido à criação dos carros bicombustíveis e para atender às exportações (BRASIL, 2007).

O progresso no desenvolvimento de alternativas para a energia de biomassa, além de aliviar a pressão em recursos finitos de combustíveis fósseis, pode reduzir os custos de mitigação de emissões de carbono.

2.3 Influência climática na cana-de-açúcar

Diversas pesquisas correlacionam a produtividade das culturas agrícolas às condições climáticas. Nesse aspecto, Brunini (2008) afirmou que a cultura da cana-de-açúcar, ao longo de seu ciclo vegetativo, sofre bastante com variabilidade climática e que, para a produção de açúcar, assim como outras culturas, é muito exigente quanto à temperatura do ar e à distribuição das chuvas ao longo do seu ciclo de desenvolvimento.

Para Barros et al. (2012), os principais componentes climáticos que controlam o desenvolvimento, a produção e a qualidade da cana-de-açúcar são a disponibilidade hídrica adequada e bem distribuída, seguida de meses relativamente secos (indispensáveis à formação de sacarose), a radiação solar e a temperatura do solo e do ar.

A cana é uma planta de metabolismo fotossintético C4 que apresenta alta eficiência na conversão de energia radiante em energia química, ou seja, quanto maior a captação de luz solar (intensidade luminosa), maior será a fotossíntese realizada pela cultura, e conseqüentemente maior o acúmulo de açúcares (RODRIGUES, 1995; BRUNINI, 2008).

De um modo geral, a cultura da cana é adaptada a temperaturas elevadas, visto que é plantada em latitudes tropicais (36°N e 31°S) (BRUNINI et al., 2010; BARROS et al., 2012). No entanto, a faixa ótima para o crescimento da planta está entre 20°C e 35°C (CASAGRANDE, 1991) e 22°C e 30°C (BARBIERI et al., 1979). Para Barros et al. (2012), temperaturas entre 21°C e 32°C aumentam a fotossíntese e valores inferiores ou superiores a esse intervalo podem diminuir a fotossíntese.

Para Wrege (2004), o bom desenvolvimento vegetativo, com alta produção de sacarose é atingido quando há alta radiação solar e umidade no solo. Diferentemente, o processo de acúmulo de sacarose nos colmos requer uma redução da taxa de crescimento, que pode ocorrer devido à redução sazonal da disponibilidade hídrica ou da temperatura do ar.

Quanto à disponibilidade hídrica, para Collicchio (2008), o déficit hídrico nas primeiras fases de crescimento (estabelecimento e perfilhamento) tem um efeito maior na produtividade que no período de desenvolvimento (formação da colheita e maturação). Ele ressaltou também que os efeitos do déficit hídrico dependem da sua intensidade, duração e época de ocorrência, bem como da interação com outros fatores determinantes na produtividade final. Segundo Doorenbos e Kassan (1994), para obter a produtividade máxima, a cana-de-açúcar, dependendo do clima, necessita de evapotranspiração máxima de 1.500 a 2.500 mm, distribuídos uniformemente durante o ciclo de desenvolvimento.

Para Barros et al. (2012), se bem distribuída, um total de chuva entre 1.100 mm e 1.500 mm é adequado para a cultura, principalmente nos meses de crescimento vegetativo, seguido por um período relativamente mais seco de amadurecimento. Netafim (2012 apud BARROS et al., 2012) sugere que a disponibilidade hídrica promove o rápido crescimento e alongamento das plantas; porém, o excesso hídrico no período de amadurecimento pode prejudicar a qualidade da sacarose produzida e atrasar as operações da colheita.

A deficiência hídrica para a cultura resulta da combinação de fatores do solo, da planta e da atmosfera, que, juntos, controlam a taxa de absorção e perda de água pela cana (EVANGELISTA, 2011). Sendo assim, a determinação do balanço hídrico é imprescindível, uma vez que é uma ferramenta importante no monitoramento da variação do armazenamento de água no solo, tornando-se um importante indicador climatológico das condições de disponibilidade hídrica de uma região (COLLICCHIO, 2008).

2.4 Zoneamento agroclimático

Para toda planta existe um regime hídrico-energético ideal. Qualquer cultura que seja colocada em um local o mais próximo possível de seu regime hídrico-energético tenderá a produzir o máximo em menor tempo possível, possibilitando maior rendimento agrícola (OMETTO, 1981). Dessa forma, conhecer o ambiente físico, como o clima e o solo, é importante para o desenvolvimento de uma agricultura produtiva e rentável. Nesse contexto, quanto melhor for o conhecimento do ambiente, mais fácil será a escolha da cultura, da variedade viável e da melhor época de plantio (PEREIRA et al., 2002).

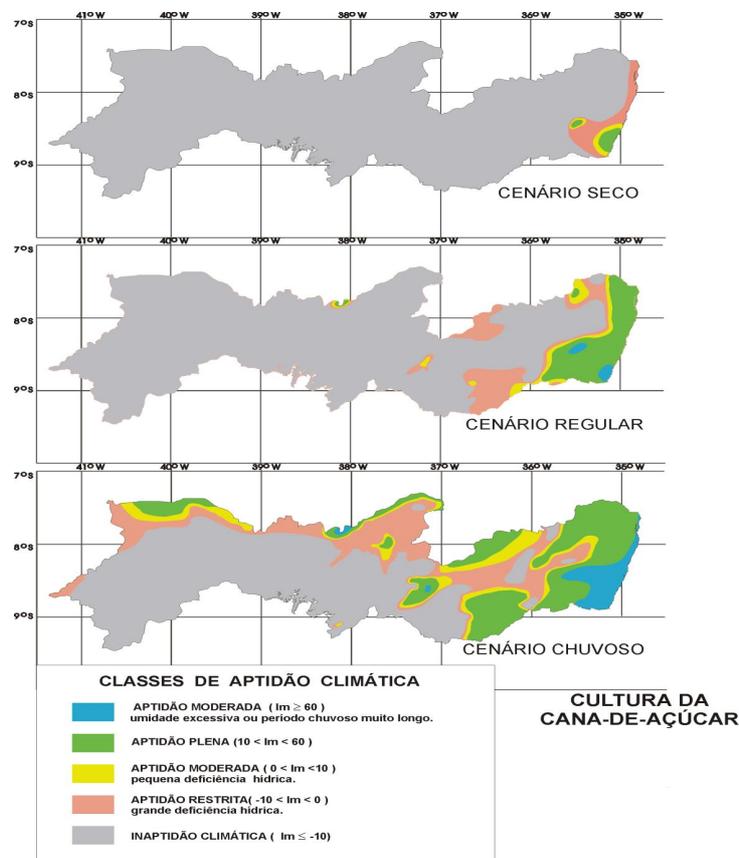
As atividades agrícolas, durante todo seu processo, são altamente influenciadas pelas condições climáticas. A cultura necessita de condições favoráveis durante todo o seu ciclo vegetativo, ou seja, exigem determinados limites de temperatura nas distintas fases vegetativa, disponibilidade hídrica mínima e de um período seco nas fases de maturação e colheita (PEREIRA et al., 2002).

Para um melhor planejamento, faz-se necessário o conhecimento de delimitações do clima, as quais permitam indicar se as condições climáticas locais satisfazem às exigências das culturas. Assim, o zoneamento agroclimático constitui-se uma ferramenta importante no processo de tomada de decisão, permitindo, a partir das análises das variabilidades climáticas locais e da sua espacialização, a delimitação de regiões com diferentes aptidões climáticas aos cultivos (MEDEIROS et al., 2013).

De fato, com o zoneamento agroclimático é possível determinar o potencial agrícola de uma região, proporcionando não apenas a escolha das culturas, como também o uso de técnicas de manejo ideal, como, por exemplo, a necessidade de irrigação durante o todo o cultivo, ou parte dele, em períodos secos (WALDHEIM et al., 2006). O zoneamento climático de culturas agrícolas determina as exigências climáticas, ou seja, o limite aceitável dos elementos do clima. Além disso, serve para planejamento de uso da terra, que, conseqüentemente, auxilia nas tomadas de decisão para políticas agrícolas (PEREIRA et al., 2002).

Varejão-Silva e Barros (2002) publicaram o zoneamento de aptidão climática do Estado de Pernambuco para as culturas mais comuns na região, dentre elas a cana-de-açúcar (Figura 2), mostrando as áreas aptas e restritas a cultura diante dos cenários pluviométricos (ano seco, regular e chuvoso). Percebe-se que em anos com chuvas regulares a cultura apresenta melhores condições na Zona da Mata Sul devido a uma maior oferta hídrica nessa região.

Figura 2 - Zoneamento climático da cana-de-açúcar em Pernambuco.



Fonte: Varejão-Silva e Barros (2002).

2.5 Mudanças climáticas e seus impactos na cana-de-açúcar

As evidências de que ocorrerão mudanças climáticas globais, em função do aumento da concentração de gases de efeito estufa, como o gás carbônico, o metano e o óxido nitroso, além do próprio vapor d'água, têm se apresentado cada vez mais consistentes e sido aceitas pela comunidade científica internacional (PELLEGRINO et al., 2007). O IPCC indicou, através de modelos matemáticos baseados em dados registrados nos oceanos, biosfera e atmosfera, um aumento entre 1,4 e 5,8°C da temperatura global até o final do século XXI. Para a América Latina está previsto um aumento de 2 a 6°C na temperatura do ar, medida em superfície, e aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos (IPCC, 2007).

A agricultura, dada sua dependência das condições do clima, é a atividade econômica que mais poderá sofrer com os efeitos das mudanças climáticas. Os riscos estão relacionados com as ações inesperadas da natureza, e a ocorrência de eventos extremos, como geadas, chuvas intensas e secas prolongadas. Sendo assim, em meio às influências das mudanças climáticas, o Brasil depara-se também com o desafio de promover um crescimento adequado da produção de cana-de-açúcar para atender às demandas interna e externa, as quais estão em expansão (CARVALHO e FURTADO, 2013).

O comportamento fisiológico das plantas é prejudicado por altas temperaturas do ar. A fotossíntese, que pode ser favorecida com a maior quantidade de gás carbônico disponível na atmosfera, tende a decrescer gradativamente na maioria dos vegetais, a partir de temperaturas maiores que 40°C. Acima de 40°C, os estômatos (estrutura presente na superfície das folhas, onde ocorre a troca de gases com a atmosfera) fecham-se, interrompendo a fotossíntese (ASSAD e PINTO, 2008).

No entanto, o aumento da temperatura do ar pode ser benéfico, até certo ponto, para algumas culturas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, como é o caso da cana-de-açúcar, como foi mostrado pelo zoneamento agrícola de risco climático realizado por Assad e Pinto (2008) para os cenários climáticos futuros A2 e B2 do IPCC (2007). Dentre as culturas para as quais foi feito o zoneamento, a cana-de-açúcar e a mandioca foram as únicas que tiveram aumento das áreas aptas nos cenários futuros, podendo dobrar de área nas próximas décadas.

Por estar adaptada às altas temperaturas do ar, a cana poderá ser beneficiada dentro dos cenários às quais foi submetida pelo zoneamento feito por Assad e Pinto (2008). Áreas localizadas nas maiores latitudes, com restrições ao cultivo da cana, podem apresentar regiões com potencial produtivo dentro de 10 a 20 anos. Regiões do Centro-Oeste, que hoje

apresentam um alto potencial produtivo, permanecerão como áreas de baixo risco, porém vão depender mais da irrigação complementar para manter a produtividade (ASSAD e PINTO, 2008).

Marin et al. (2007), aplicando incrementos apenas na temperatura média mensal do ar, com base nos cenários do IPCC-AR4, identificaram que, diante do aquecimento global, o cultivo da cana-de-açúcar sofrerá restrições hídricas em fases importantes para a formação da produção nas regiões centro e norte de São Paulo e o sul e leste poderão se tornar aptas, tanto no ponto de vista térmico quanto hídrico. No cenário mais pessimista do IPCC, os autores observaram que mais de 80% do estado poderá apresentar restrições hídricas, prejudicando a produção da cultura.

Macedo (2011), utilizando os dados das projeções (2010-2039) dos modelos globais HadCM3 e o MIROCmed, para os estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná, encontraram que, para a cultura do cana-de-açúcar, com as anomalias conjuntas de temperatura do ar e precipitação, houve aumento no número de municípios pertencentes à classe de alto risco climático. Quando observada de forma isolada na anomalia de temperatura do ar, o modelo MIROCmed apresentou condições mais pessimistas que o HadCM3. Já, com relação à precipitação, o modelo HadCM3 apresentou altas variações e, para as classes de baixo, médio e alto risco climático, houve, respectivamente, retração e expansão no número de municípios. No caso do modelo MIROCmed ocorreu o oposto.

Com relação à região Nordeste do Brasil, Campos et al. (2010) verificaram que, diante dos cenários de aumento na temperatura do ar, deve ocorrer um aumento das áreas agrícolas com alto e médio riscos climáticos e, conseqüentemente, uma redução nas áreas com baixo risco para todos os períodos simulados, resultados que indicaram que a atividade agrícola no Nordeste é bastante dependente da variação da temperatura do ar.

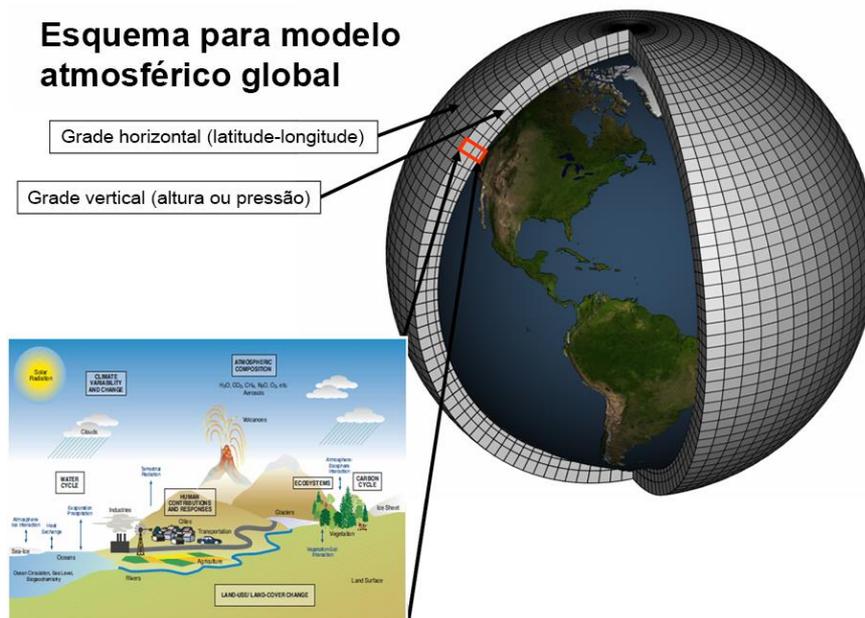
Avaliando os impactos das mudanças climáticas no cultivo da cana-de-açúcar no Nordeste, Silva et al. (2013) mostraram que, quando a variabilidade climática está associada à maior oferta hídrica, os cenários são um pouco mais animadores, visto que, para o cenário sem aumento na temperatura do ar, nenhum dos períodos simulados apresentam áreas totalmente inaptas ao cultivo da cana-de-açúcar. Para o cenário de aumento na temperatura do ar de 1,5 °C é possível observar que as áreas com aptidões agrícolas são sensivelmente reduzidas. Silva et al. (2012) encontraram algo semelhante no estudo sobre o cultivo do algodão herbáceo, cultivado em sistema de sequeiro, no cenário de mudança climática. Esses autores verificaram que o aumento da temperatura média do ar superior a 1,5°C torna-se fator limitante ao cultivo do algodoeiro na região, mesmo diante do aumento da oferta hídrica.

Em pesquisa realizada por Oliveira et al. (2012), sobre os impactos das alterações climáticas na cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro no Nordeste, os autores observaram que o aquecimento global acompanhado de anomalias de precipitação pluvial pode gerar graves consequências para a economia da região, face à inaptidão dessa cultura para uma produção economicamente viável sob níveis elevados de temperatura do ar.

2.6 Modelos Climáticos

Os modelos climáticos são as principais ferramentas disponíveis para estudar as respostas do sistema climático às várias forçantes climáticas (gases de efeito estufa, aerossóis, dentre outros), para fazer previsões climáticas sazonais, em escala decadal e para fazer projeções climáticas no próximo século. Esses modelos numéricos provêm de uma visão tridimensional do sistema climático (Figura 3) e representam os diferentes sistemas terrestres, incluindo a atmosfera, os oceanos, a vegetação, a superfície terrestre, as áreas polares etc., descrevendo seus processos físicos e dinâmicos (AMBRIZZI et al., 2007; FOWLER et al., 2007; PESQUERO et al., 2009; MARENGO et al., 2011a). Os modelos climáticos podem ser globais ou regionais, variando em detalhamento espacial (grade) e temporal, podendo assim ser aplicado para diferentes tipos de pesquisas.

Figura 3 – Esquema de um modelo atmosférico global.

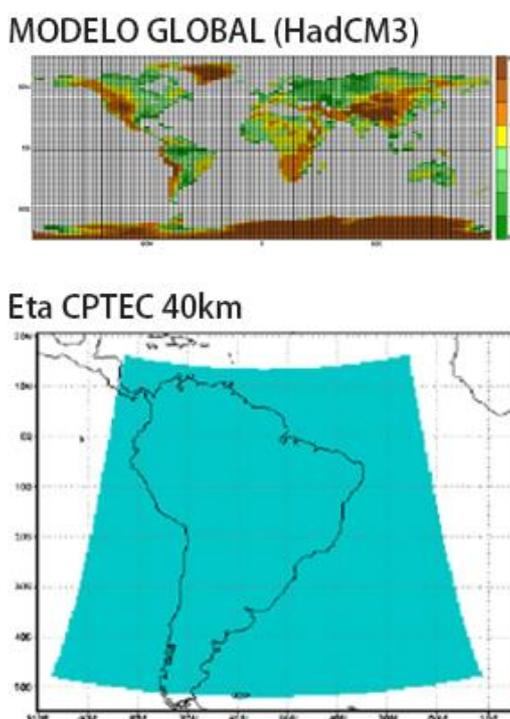


Fonte: www.gfdl.noaa.gov/pix/model_development/climate_modeling/climatemodel.png. Adaptado pelo autora (2014).

Os Modelos Climáticos Regionais (MCR) utilizam as informações geradas pelos Modelos Climáticos Globais (MCGA), porém com um maior detalhamento espacial e temporal das variáveis para as regiões simuladas. A técnica usada para transferência de informação em larga escala para escala menor é chamada de “downscaling” (AMBRIZZI et al., 2007). Esse método (Figura 4) nada mais é do que um refinamento de escala, o qual fornece informações mais detalhadas do clima, necessárias para muitos estudos de impacto climático. Existe uma elevada confiança de que downscaling agrega valor tanto em regiões de topografia altamente variável, quanto para fenômenos de pequena escala (CHOU et al., 2011; MARENGO et al., 2011a; IPCC, 2013).

A abordagem de downscaling que predomina no Brasil é o método dinâmico de redução de escala (PBMC, 2013). Este método utiliza as condições iniciais de contorno que são oriundas dos MCGAs desenvolvidos via modelagem dinâmica de processos nos oceanos e/ou atmosfera. Tais modelos têm a capacidade de representar fenômenos meteorológicos de escala global e com o acoplamento de grades menores conseguem também representar de forma mais detalhada os fenômenos de escala local (FOWLER et al., 2007; PBMC, 2013).

Figura 4 – Downscaling do modelo Eta-HadCM3.



Fonte: <http://pt.slideshare.net/ciatdapa/proyeccion-de-cambio-climtico-con-el-modelo-eta>. Adaptado pelo autora (2014).

O uso de MCRs apresenta vantagem nos estudos de mudanças climáticas, já que apresenta maior detalhamento dos cenários climáticos fornecidos pelos modelos globais, que geralmente apresentam baixa resolução espacial e menor custo computacional. Mesmo com aumento do poder computacional e da resolução dos modelos globais, continuará havendo a possibilidade e o interesse em detalhar ainda mais a descrição dos processos atmosféricos, das características da superfície etc. (PBMC, 2013).

No entanto, sabe-se que os modelos numéricos não conseguem reproduzir plenamente a enorme diversidade de fenômenos que influenciam a evolução das condições atmosféricas e, mesmo que os modelos fossem perfeitos, os erros ou falhas inerentes às observações, utilizadas no momento de geração da condição inicial da rodada do modelo, poderiam levar a uma projeção não confiável. Dessa forma, métodos estatísticos são utilizados para indicar os índices de erros, a destreza e as possíveis limitações do modelo. Torna-se, portanto, imprescindível o esforço em avaliar os resultados de modelos, já que se espera obter maior confiabilidade na aplicação desses cenários futuros.

O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas afirma que essas incertezas nas formulações dos modelos numéricos para resolver o sistema climático se refletem na magnitude dos erros sistemáticos das simulações. Por sua vez, a avaliação dos erros também contém as incertezas oriundas da qualidade das observações (postos pluviométricos, por exemplo), cuja rede sobre a América do Sul é deficiente do ponto de vista espacial e temporal. As incertezas sobre as medidas observacionais afetam diretamente a robustez da avaliação dos modelos climáticos (PBMC, 2013).

Nenhum modelo existente irá reproduzir de forma perfeita e fiel os sistemas envolvidos. No entanto, para uma maior confiabilidade das projeções é crucial, portanto, avaliar o desempenho destes modelos (MARENGO et al., 2007; IPCC, 2013), já que, quando corretamente analisados, os resultados obtidos por meio da modelagem podem ser de bastante utilidade (MACEDO, 2011). Segundo IPCC-AR5, uma abordagem direta para avaliação do modelo é comparar os resultados do modelo com as observações e analisar a diferença resultante. Portanto, uma avaliação sistemática de modelos por meio de comparações com observações, mesmo com as incertezas, é um pré-requisito para aplicar as projeções com mais segurança (IPCC, 2013).

2.6.1 Modelo Climático Regional Eta-HadCM3

O modelo climático regional Eta-HadCM3, que gera cenários climáticos futuros, foi derivado do modelo Eta desenvolvido pela Universidade de Belgrado, em parceria com o Instituto Hidrometeorológico da antiga Iugoslávia (MESINGER et al., 1988). Posteriormente, foi operacionalizado pelo *National Centers for Environmental Prediction* – NCEP (BLACK, 1994) e em 1996 o modelo tornou-se operacional no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC (CHOU et al., 2011; MARENGO et al., 2011a).

O modelo Eta é designado para pesquisa ou uso operacional em meteorologia. Seu nome deriva da letra grega *eta*, η , que denota a coordenada vertical, uma das características do modelo (MESINGER, 1984). Segundo Chou et al. (2011) e Marengo et al. (2011a), o sistema de coordenada vertical utilizado neste modelo é recomendado para uso na América do Sul, devido à presença da cordilheira dos Andes.

O modelo regional Eta do CPTEC/INPE foi ajustado para realizar integrações de escala de décadas para estudos de mudanças climáticas relacionadas a diferentes níveis de concentração de CO₂ atmosférico. A condição de contorno lateral e inferior são geradas pelo modelo HadCM3 (Eta-HadCM3), fornecidas pelo *Metoffice Hadley Centre* (MOHC) do Reino Unido, com projeções de cenário A1B do IPCC-AR4 e com resolução de 40 km na América do Sul, para o período de 1960-1990 (clima presente) (CHOU et al., 2011) e 2010-2100 (projeções futuras) (MARENGO et al., 2011a).

O cenário A1B (grupo) do IPCC-AR4 faz parte da família do cenário A1 e descreve um futuro de crescimento econômico muito rápido, com a população global atingindo um pico em meados do século, declinando em seguida com a rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. O Grupo A1B apresenta um equilíbrio entre todas as fontes de energia em que o equilíbrio é definido como não dependendo muito de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento apliquem-se a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final (IPCC, 2007).

Uma das formas de obter o ganho de qualidade das previsões de tempo é por meio do aperfeiçoamento da técnica “ensemble”, ou seja, a técnica de previsão por conjunto. Essa técnica consiste, essencialmente, na utilização de diversas previsões (chamadas também como “membros”), seja por meio da utilização de condições iniciais da superfície ligeiramente diferentes para iniciar o mesmo modelo, seja através de modelos sensivelmente modificados. Como resultado, obtém-se não apenas uma, mas um conjunto de previsões que ajudam a definir a incerteza da previsão e estender a previsibilidade do modelo por maior período.

O modelo Eta-HadCM3 é composto de quatro membros: tratamentos cntrl, low, midi e high. Os membros low, midi e high representam diferentes perturbações na versão ‘operacional’ do modelo (membro cntrl), que causam projeções com, respectivamente, baixa, média e alta elevação da temperatura média no final do século. Com esses diferentes membros, pode-se avaliar uma faixa de diferentes cenários de aumento de temperatura média global.

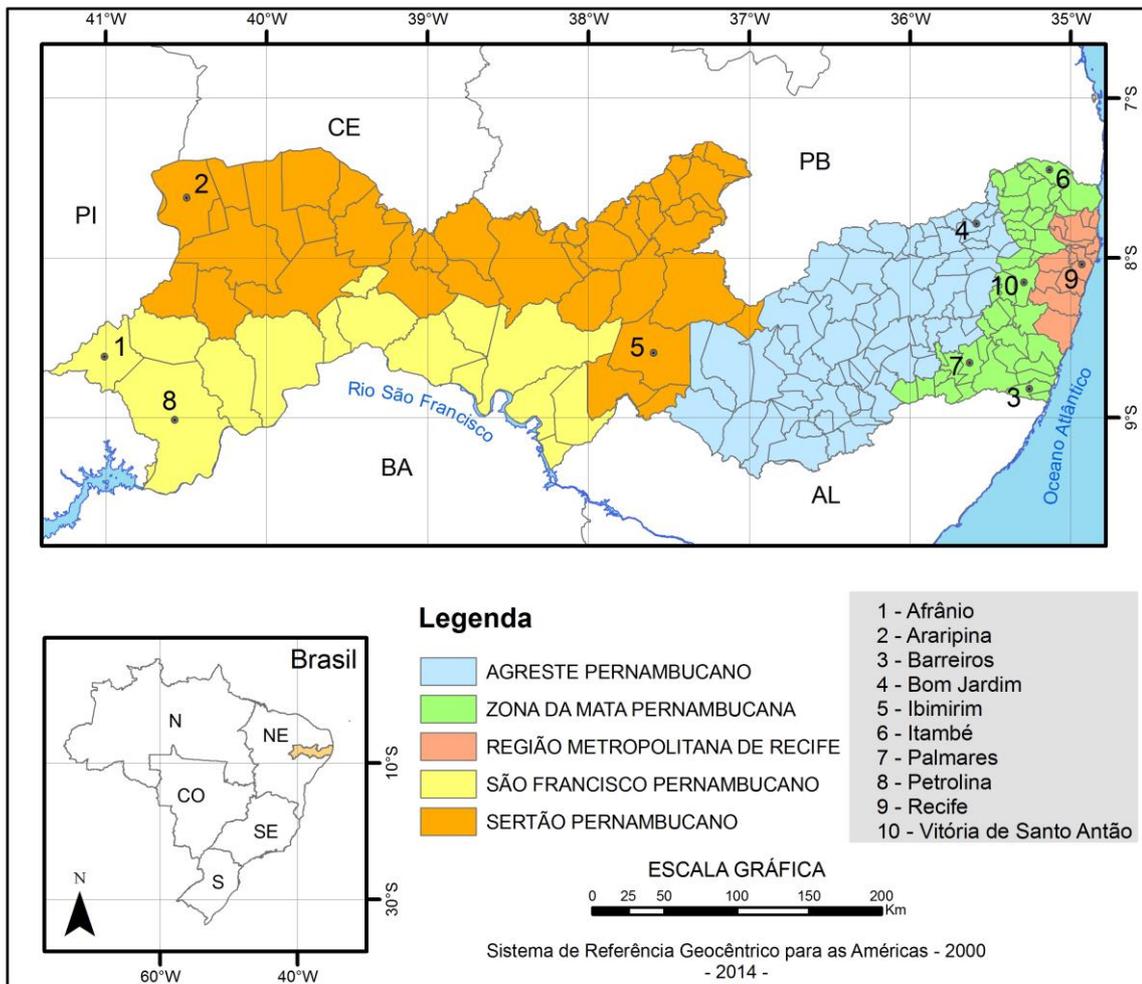
Segundo IPCC-AR5 uma abordagem mais comum para caracterizar os resultados do “ensemble” é calcular a média aritmética não ponderada dos resultados dos modelos individuais (membros), referidos como um multi-modelo. Essa abordagem dá um peso igual para cada modelo climático independentemente do número de simulações que cada modelo tem contribuído, de como os modelos são interdependentes, ou do quão bem cada modelo tem se saído na avaliação objetiva (IPCC, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estado de Pernambuco tem aproximadamente 98.937 km², localiza-se na região Nordeste do Brasil, entre as coordenadas geográficas 7°15'45" e 9°28'19" de latitude sul e 34°48'35" e 41°19'54" de longitude oeste. Limita-se ao norte com os estados do Ceará e da Paraíba, a leste com o Oceano Atlântico, a oeste com os estados da Bahia e do Piauí, e ao sul com os estados de Alagoas e da Bahia (Figura 5).

Figura 5 - Localização do estado de Pernambuco e suas mesorregiões.



Fonte: Autora (2014).

3.2 Climatologia

O estado de Pernambuco é caracterizado por três regimes pluviométricos: no extremo oeste, próximo à Petrolina, encontra-se o regime do Sul - sistemas frontais (SF) e vórtices ciclônicos de ar superior (VCAS). Grande parte do Sertão, nos cursos dos rios Pajeú e Moxotó, e Agreste oriental, apresenta-se com um regime típico do norte do Nordeste - Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Na Zona da Mata ocorre uma influência dos ventos alísios de nordeste, ondas de leste, aglomerados de cúmulo-nimbos associados à brisa marítima e ainda alta subtropical do Atlântico norte (ASAN) e do Atlântico sul (ASAS) (ARAÚJO FILHO et al., 2000).

O Agreste, sendo uma região intermediária entre áreas de clima úmido (Zona da Mata) e Seco (Zona do Sertão), apresenta similaridade ora com uma, ora com outra região. Dessa forma, nas áreas do Agreste, mais próximas ao Sertão, a contribuição da ZCIT é mais efetiva do que os sistemas que atuam na Zona da Mata, tendo o mês de março como o mais chuvoso. Entretanto, as precipitações são menos concentradas do que no Sertão. No Agreste mais próximo à Zona da Mata, as contribuições dos sistemas de Leste são muito mais importantes do que as da ZCIT, com o mês mais chuvoso deslocando-se para junho. Diferente do Sertão (com maior aridez), o Agreste pode ser visto como tendo condições de semiaridez (ARAÚJO FILHO et al., 2000).

3.3 Dados meteorológicos

Foram utilizados dados meteorológicos de precipitação pluvial mensal (mm), temperaturas do ar (°C) máxima, média e mínima mensal, com período de 1960 a 1990 (série climatológica), para avaliar aspectos de possíveis erros sistemáticos e incertezas associadas às projeções do modelo Eta-HadCM3.

3.3.1 Precipitação pluvial

Os dados mensais de precipitação pluvial para o estado de Pernambuco foram provenientes do banco de dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). No entanto, considerando que a grande maioria dos dados dos postos pluviométricos apresentam falhas em sua série e para assegurar maior confiabilidade dos resultados, foram suprimidos

todos os postos que apresentaram série menor que 25 anos, dentro do período de interesse (1960-1990).

Em seguida, foram preenchidas as falhas ainda existentes na série (1960-1990), considerando o valor do vizinho mais próximo, conforme descrito em Garcia et al. (2006), no raio máximo de 20 km, como sugerido por Vianna e Sentelhas (2014), respeitando as semelhanças das características geográficas. Para isso foi utilizada uma ferramenta de sistemas de informações geográficas (SIG) que permite identificar as distâncias entre os postos e também as diferenças de altitude. Já para verificar a consistência deste preenchimento foi aplicado o teste de dupla massa, proposto por Bertoni e Tucci (2007).

Depois de preenchidas as falhas e verificada a consistência dos dados, foram selecionados os postos listados na Tabela 1, para a verificação da precisão e da exatidão do modelo e posterior correção do erro sistemático dos dados projetados. Deve-se salientar o cuidado de selecionar os postos espalhados dentro do estado e com diferentes altitudes para que a correção dos dados do modelo Eta-HadCM3 fosse equilibrada dentro da climatologia de cada mesorregião.

Tabela 1 - Relação dos postos pluviométricos utilizados para correção do Modelo Eta-HadCM3.

Postos Pluviométricos	Mesorregião*	Latitude	Longitude	Altitude
Afrânio (Arizona)	SSF	-8,68	-40,96	477
Araripina (IPA)	Sertão	-7,46	-40,42	832
Barreiros (IPA)	Zona da Mata	-8,81	-35,20	17
Bom Jardim (IPA)	Agreste	-7,80	-35,57	153
Ibimirim (Moxotó)	Sertão	-8,72	-37,53	428
Itambé (IPA)	Zona da Mata	-7,41	-35,18	139
Palmares (IPA)	Zona da Mata	-8,68	-35,58	115
Petrolina (Sítio Carretão)	SSF	-8,71	-40,41	475
Recife (Várzea)	RMR	-8,05	-34,92	9
Vitória de Santo Antão (IPA)	Zona da Mata	-8,13	-35,30	167

Fonte: Autora (2013). * SSF – Sertão de São Francisco, RMR – Região Metropolitana de Recife.

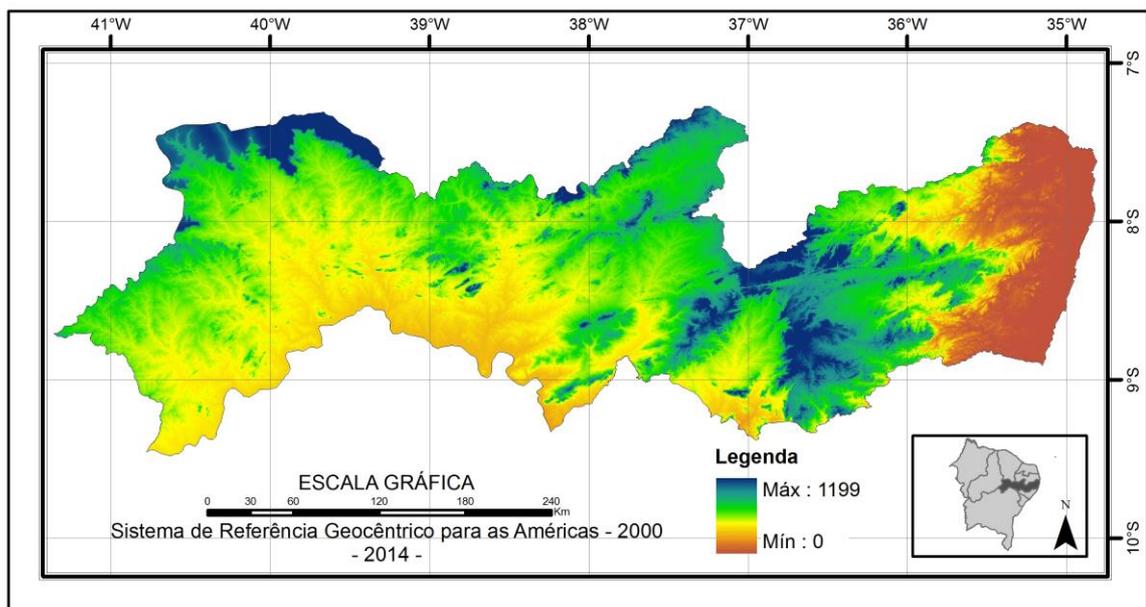
3.3.2 Temperatura do ar

Há uma baixa concentração espacial de locais com registros de temperatura do ar no estado, o que restringe o cálculo do balanço hídrico climatológico de algumas localidades, quando comparados aos de precipitação pluvial. Para contornar tal situação, foi necessário utilizar a série temporal de temperaturas do ar média, máxima e mínima mensais estimadas para locais onde apenas se dispunham de dados de chuva.

Para isso foi utilizado o *Estima-T* (CAVALCANTI et al., 2006), um software que estima temperatura do ar para a região do Nordeste brasileiro e que segundo Bezerra et al. (2014), apresenta desempenho satisfatório, como também já foi amplamente utilizado (MEDEIROS et al., 2009; POSSAS et al., 2012; BEZERRA et al., 2014).

Para cada um dos pontos foram determinados os coeficientes da função quadrática para as temperaturas média, máxima e mínima mensal em função das coordenadas locais: longitude, latitude e altitude (CAVALCANTI et al., 2006). Foram utilizadas as coordenadas dos postos pluviométricos da Tabela 1 (APAC) e os valores de altitudes foram obtidos das cartas do Brasil relevo (Figura 6), desenvolvidas pela Embrapa Monitoramento por Satélite (MIRANDA, 2005).

Figura 6 - Altitude do estado de Pernambuco.



Fonte: Autora (2013).

3.4 Projeções Climáticas

3.4.1 Obtenção dos dados

Para a simulação do cenário climático futuro foi utilizado o modelo climático regional Eta-HadCM3. Foram obtidos os dados das variáveis de precipitação pluvial (mm) e temperaturas do ar (°C) média, máxima e mínima mensal, com grade de 40 km para toda a América do Sul. Dos dados obtidos foram selecionados apenas os pertencentes à grade que compreende o estado de Pernambuco, para os períodos de 2010-2040 e 2041-2070. Para isso foram usadas as ferramentas GrADS¹ e CDO². Foram considerados os quatro membros do modelo, de acordo com a sensibilidade de resposta ao aumento de temperatura média: tratamentos cntrl, low, midi, e high.

No entanto, para determinar se o modelo está de uma forma geral representando as características climáticas do estado, é importante avaliar como o modelo Eta-HadCM3 simula o clima “presente”. Sendo assim, foi feita uma análise do desempenho nas simulações do clima presente do modelo (1960-1990) para todos os membros.

3.4.2 Avaliação do modelo

Para avaliar o desempenho do modelo Eta-HadCM3 foi realizada uma comparação dos valores observados e os simulados, através de análise de regressão, envolvendo o coeficiente de determinação (R^2) e o índice “d” (índice de concordância), proposto por Willmott et al. (1985). Foram usados dados independentes de temperatura do ar (máxima, mínima e média) e precipitação no período de 1960-1990 (PICINI, 1999; ALENCAR et al., 2011; SANTOS et al., 2011; CAMPAROTTO et al., 2013).

Quando se relacionam valores simulados com valores observados por análise de regressão pode-se obter informações da precisão e da exatidão que, conjuntamente, indicam a consistência entre os dados estimados com os medidos. A precisão é o grau de variação de resultados de uma medição e tem como base o desvio padrão de uma série de repetições da mesma análise; é dada pelo coeficiente de determinação (R^2). No entanto, o R^2 indica apenas

¹A Análise de Rede e Display System (GrADS) é um software interativo usado para facilitar o acesso, manipulação e visualização de dados das ciências da terra. É amplamente usado na meteorologia para a geração de gráficos e mapas de dados climáticos. Mais detalhes <http://www.iges.org/grads/>.

² O Climate Data Operators (CDO) representa um conjunto de comandos estatísticos e aritméticos uteis para processar dados meteorológicos no formato GRIB e netCDF. Mais detalhes <https://code.zmaw.de/projects/cdo>.

o grau de dispersão dos dados obtidos. O coeficiente de determinação tem um intervalo variando entre 0 e 1, sendo que valores próximos a 1 mostram o maior proximidade do comportamento das variáveis (CAMPAROTTO et al., 2013).

Por outro lado, o Índice “d” quantifica numericamente a exatidão e refere-se ao grau de conformidade de um valor estimado em relação ao valor verdadeiro ou observado, ou seja, é uma medida de quão bem o modelo estima o afastamento dos dados da média observada. O índice de concordância tem um intervalo variando entre 0 e 1, sendo que valores próximos a 1 mostram uma concordância perfeita (ALENCAR et al., 2011; CAMPAROTTO et al., 2013).

Foi organizada uma planilha contendo as variáveis temperatura do ar e precipitação pluvial referentes aos postos meteorológicos e do modelo Eta-HadCM3, de forma a permitir que ambas (observado e simulado) estivessem organizadas no mesmo período, para serem avaliadas pelo teste estatístico.

A aproximação dos valores estimados pelo modelo e observados por determinado método estudado, em comparação aos valores obtidos pelo método padrão, foi obtida pelo índice de concordância (d) (WILLMOTT et al., 1981).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (1)$$

em que: P_i corresponde ao i ésimo valor estimado; O_i o i ésimo valor observado; \bar{O} a média dos valores observados e n o número de observações consideradas no presente estudo.

A interpretação do índice de concordância “d” e coeficiente de determinação revela quatro possíveis situações, onde: a) caso em que o valor de R^2 é alto e o valor de d também é alto (situação ideal); b) caso em que o valor de R^2 é alto e o valor de d é baixo (os dados apresentam um bom ajuste, mas são quantitativamente diferentes); c) caso em que o valor de R^2 é baixo e o valor de d é alto (os dados não apresentam um bom ajuste, mas são quantitativamente iguais em alguns pontos); e d) representa um caso em que o valor de R^2 é baixo e o valor de d é baixo (pior situação).

3.4.3 Correção dos erros sistemáticos

Depois de avaliado o desempenho do modelo Eta-HadCM3 das variáveis, estudadas por meio do teste de Willmott et al. (1981) foi possível obter informações da precisão (R^2) e da exatidão (d). Foram então, corrigidos os erros sistemáticos gerados nas simulações do modelo para cada membro, já que são erros persistentes e que podem ser facilmente encontrados quando comparados valores observados com os valores simulados para o mesmo período.

3.4.3.1 Precipitação pluvial

Para corrigir os erros sistemáticos gerados pelo modelo Eta-HadCM3 na variável precipitação pluvial mensal, foi utilizado o método proposto por Hempel et al. (2013), que compara os dados observados com os dados presentes gerados pelo modelo no período de 1960-1990. Esse método consiste em uma correção multiplicativa, ou seja, a partir de informações do período presente foi criado um fator multiplicativo para a correção dos erros das projeções do modelo. O fator multiplicativo é gerado por:

$$C = \sum_{i=1}^{m=30} P_i^{WFD} / \sum_{i=1}^{m=30} P_i^{GCM} \quad (2)$$

Onde P_i^{WFD} é a precipitação mensal observada, P_i^{GCM} é a precipitação mensal simulada sem correção e i é o ano.

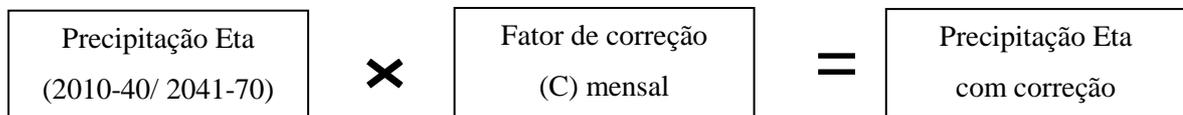
Foi criado um fator multiplicativo C para cada mês. No entanto, deve ter um limite superior de 10, a fim de evitar valores elevados de precipitação. Isso é justificado pelo fato de que um alto valor de C causa uma discrepância entre o valor simulado pelo modelo e o observado. Depois de obtidos os fatores multiplicativos mensais, eles foram usados para corrigir os valores projetados (2010-2040 e 2041-2070) pelo modelo (Figura 7).

A série temporal de precipitação é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\tilde{P}_{ij}^{GCM} = C \cdot P_{ij}^{GCM} \quad (3)$$

Onde \tilde{P}_i^{GCM} é a precipitação mensal simulada com correção, i é o ano e j é o mês.

Figura 7 - Fluxograma do procedimento da correção da precipitação pluvial.



Fonte: Autora (2013).

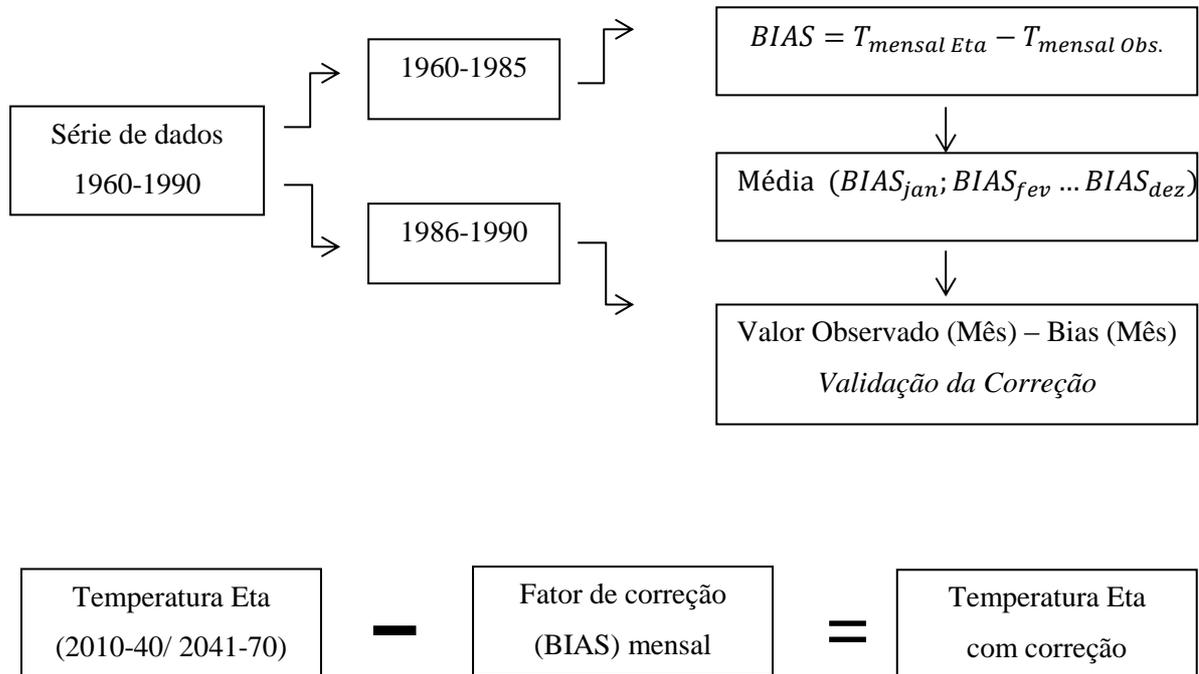
3.4.3.2 Temperatura do ar

Para as correções dos dados de temperatura do ar (máxima, média e mínima) utilizou-se o método aplicado por Rezende et al. (2011) e Rodrigues et al. (2011). Para obter os erros sistemáticos (também referidos usando-se o termo em inglês "*BIAS*") gerados pelo modelo, foram comparados os dados observados com os dados presentes simulados pelo modelo. Para isso, a série 1960-1990 (série histórica mensal) foi dividida em dois períodos (1960-1985 e 1986-1990). O primeiro período foi utilizado para encontrar o erro sistemático (*BIAS*) do modelo, de acordo com a seguinte equação:

$$BIAS = T_{mensal\ Eta} - T_{mensal\ Obs.} \quad (4)$$

Assim, foi criado um valor médio mensal ($BIAS_{jan}; BIAS_{fev} \dots BIAS_{dez}$), que foi subtraído do segundo período (1986-1990). A intenção era de se verificar o quanto os dados gerados pelo modelo diferenciam-se dos dados observados, justificando assim a correção desses erros, e aproximar as simulações do que seria esperado, tendo como base a observação (série histórica). Depois de verificado o desempenho da correção, o método foi estendido para os dados projetados (2010-2040 e 2041-2070) conforme a Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma do procedimento da correção da temperatura do ar.



Fonte: Autora (2013).

Depois de identificados os erros sistemáticos para as variáveis (precipitação pluvial e temperatura do ar) na simulação do clima presente do modelo (1960-1990) para cada membro, a partir dos pontos da Tabela 1, foram criados, por meio do método de interpolação Inverse Distance Weighting (IDW) proposto por Shepard (1968), um fator de correção para cada ponto de grade do modelo no estado de Pernambuco, os quais foram usados para corrigir os erros sistemáticos das projeções climáticas (2010-2040 e 2041-2070), através de álgebra de mapas. O método do IDW já foi amplamente utilizado para interpolação de variáveis climáticas, como mostraram Santos et al. (2013).

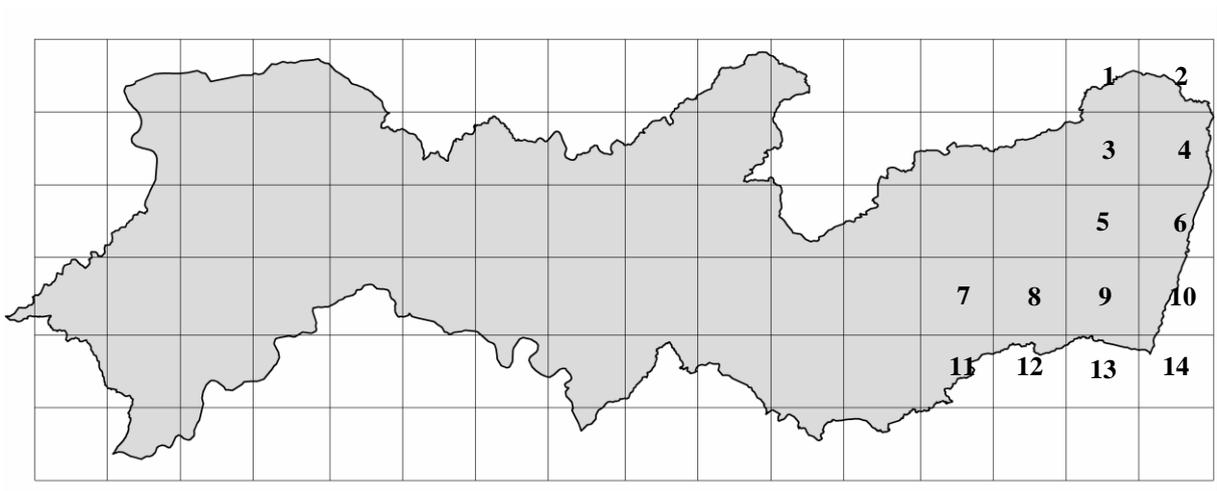
3.5 Mapeamento dos elementos climáticos

3.5.1 Dados meteorológicos

Foram utilizados dados meteorológicos de precipitação pluvial mensal (mm) disponibilizada pela APAC e dados de temperaturas do ar (°C) máxima, média e mínima mensal obtidos do Estima-t, com período de 1960 a 2012 (série histórica). Esses dados foram utilizados para comparar e avaliar o quanto as projeções do modelo apresentam situações otimistas ou pessimistas em relação à série histórica.

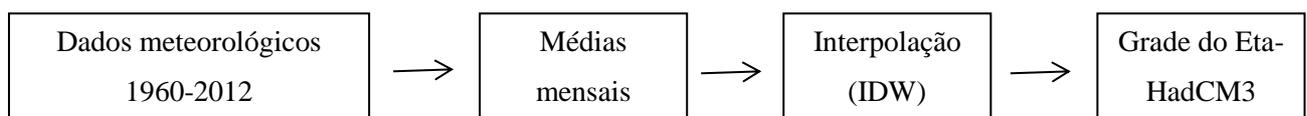
Os dados observados foram organizados em médias mensais e interpolados através do método IDW (SHEPARD, 1986). Em seguida, foram ajustadas as células para a mesma grade dos arquivos de saída do modelo Eta-HadCM3 (Figura 9), a fim de possibilitar a álgebra de mapas, entre os arquivos de dados observados e os do modelo. Conforme figura 10.

Figura 9 – Grade do Modelo Eta-HadCM3.



Fonte: Autora (2014).

Figura 10– Fluxograma do procedimento com os dados meteorológicos.



Fonte: Autora (2014).

3.5.2 Dados do modelo

Depois de selecionados e corrigidos os dados do modelo para cada membro (cntrl, high, midi e low) e período (2010-2040, 2041-2070), foram criadas as médias mensais dos membros para cada variável, de acordo com a seguinte equação:

$$Projeção = \frac{(Cntrl + High + Midi + Low)}{4} \quad (5)$$

As variáveis, temperatura máxima e mínima foram feitas apenas com os membros high, midi e low, já que elas não apresentam o membro cntrl.

Foram utilizadas as médias dos membros conforme sugerido pelo IPCC-AR5 que diz que para caracterizar os resultados do “ensemble” é necessário calcular a média aritmética não ponderada dos resultados dos modelos individuais (membros). Esta abordagem dá um peso igual para cada membro, já que todos contribuem para simulação da variável no respectivo cenário (IPCC, 2013).

3.5.3 Álgebra de mapas

Para a espacialização final das projeções do modelo, foi necessário organizar os dados conforme descrito acima, a fim de poder realizar a álgebra de mapas. Para os dados de precipitação foram gerados os totais anuais em milímetros (mm) e a diferença em porcentagem (%) dos dados observados. Obteve-se também a diferença dos totais trimestrais (DJF – MAM – JJA – SON), conforme as estações do ano, dos dados projetados e os observados.

Já com os dados de temperatura do ar foram obtidas apenas as diferenças entre os dados projetados pelo modelo dos dados observados, optou-se apenas pela avaliação trimestral (DJF – MAM – JJA – SON), a fim de compreender com mais detalhes como essas variáveis iriam responder ao aumento de CO₂ na atmosfera, por estação do ano.

3.6 Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar

O zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar foi aplicado apenas para a Zona da Mata pernambucana, devido a predominância do cultivo nesta mesorregião. Foram usados os dados de precipitação e temperatura média do ar dos pontos (Tabela 2) de grade do modelo Eta-HadCM3, que correspondem a mesorregião da Zona da Mata, das projeções do modelo para o período de 2010-2040 e 2041-2070. Depois de selecionados os pontos e corrigidos os erros sistemáticos, foram obtidas as médias aritméticas dos membros, como sugerido em IPCC (2013), já que um membro isolado não pode responder pela projeção do cenário.

Tabela 2 - Pontos de grade do modelo Eta-HadCM3 escolhidos para o estudo de zoneamento climático da cana-de-açúcar na Zona da Mata pernambucana.

Ponto	Microrregião da Zona da Mata	Latitude	Longitude	Altitude
Ponto 1	Mata setentrional pernambucana	-7,4	-35,4	125
Ponto 2	Mata setentrional pernambucana	-7,4	-35	96
Ponto 3	Mata setentrional pernambucana	-7,8	-35,4	162
Ponto 4	Mata setentrional pernambucana	-7,8	-35	60
Ponto 5	Vitória de Santo Antão	-8,2	-35,4	454
Ponto 6	Mata meridional pernambucana	-8,2	-35	23
Ponto 7	Mata meridional pernambucana	-8,6	-36,2	598
Ponto 8	Mata meridional pernambucana	-8,6	-35,8	349
Ponto 9	Mata meridional pernambucana	-8,6	-35,4	97
Ponto 10	Mata meridional pernambucana	-8,6	-35	0
Ponto 11	Mata meridional pernambucana	-9	-36,2	466
Ponto 12	Mata meridional pernambucana	-9	-35,8	380
Ponto 13	Mata meridional pernambucana	-9	-35,4	29
Ponto 14	Mata meridional pernambucana	-9	-35	0

Fonte: Autora (2014).

3.6.1 Discriminação dos cenários pluviométricos

O uso de cenários pluviométricos (seco, regular e chuvoso) a estudos dessa natureza foi aplicado no sentido de melhorar a metodologia clássica e adequá-la à realidade

climatológica do Estado, pois permite torná-los ajustados e adequados à variabilidade natural das precipitações e às expectativas pluviométricas dos modelos numéricos de previsão climatológica em uso no Brasil (VAREJÃO-SILVA e BARROS, 2002).

Para a identificação dos cenários pluviométricos foi inicialmente estabelecido, para cada ponto (Tabela 2), o total de precipitação registrado nos três meses consecutivos mais chuvosos de cada ano hidrológico completo. Em seguida, foi aplicada a distribuição gama incompleta (THOM, 1951), pois foi comprovado para diferentes áreas do Nordeste, que a distribuição dos totais mensais de chuva não segue a distribuição normal. As séries foram ajustadas em cada ponto (Tabela 2), seguindo a metodologia indicada por Mielke (1976) e a qualidade do ajustamento da curva teórica aos valores observados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (MASSEY, 1980) ao nível de significância de 0,05, conforme aplicado por Varejão-Silva e Barros (2002) para o zoneamento de aptidão climática para culturas agrícolas em Pernambuco.

Em seguida, foram discriminados os anos hidrológicos de cada ponto (Tabela 2), numa das categorias indicadas: a) *anos secos* - aqueles anos em que o total de precipitação, acumulado nos três meses consecutivos mais chuvosos, foi igual ou menor que o valor correspondente à probabilidade de 25%; b) *anos chuvosos* - aqueles anos cujo total de precipitação, acumulado nos três meses consecutivos mais chuvosos, é superior ao valor correspondente à probabilidade de 75%; e c) *anos regulares*, todos aqueles anos não classificados nas duas categorias anteriores (VAREJÃO-SILVA e BARROS, 2002).

O conjunto dos anos “secos”, “regulares” e “chuvosos” de cada ponto, foi utilizado para se obter as correspondentes médias mensais dos totais pluviométricos, necessárias para caracterizar os respectivos cenários. Os balanços hídricos climatológicos foram, então, estimados, separadamente, para os cenários "seco", "regular" e "chuvoso", usando-se o método proposto por Thornthwaite e Mather (1957).

3.6.2 Critério de aptidão climática

Para o critério de aptidão climática para a cana-de-açúcar foi utilizado o método de Thornthwaite (THORNTHWAITE e MATHER, 1957) no cálculo do balanço hídrico climatológico de cada ponto (Tabela 2) para os referidos cenários pluviométricos. A capacidade de água disponível (CAD) no solo foi determinada de acordo com as exigências edafoclimáticas de cada cultura. Para cana-de-açúcar foi de 120 mm (VAREJÃO-SILVA e BARROS, 2002).

Para calcular o balanço hídrico foram utilizados os valores do acumulado mensal de precipitação (mm) e a média mensal da temperatura do ar (°C) das projeções de 2010-2040 e 2041-2070 do modelo Eta-HadCM3, obtendo assim, os valores das variáveis necessários para o cálculo do índice de umidade (I_m) (Tabela 3), critério de zoneamento para a cultura da cana-de-açúcar aplicado por Varejão-Silva e Barros (2002).

Tabela 3 - Critérios utilizados na avaliação de aptidão agroclimática da cultura da cana-de-açúcar.

Aptidão climática	Im *
Moderada - por excesso hídrico	$Im \geq 60$
Plena	$10 < Im < 60$
Moderada – pequena deficiência hídrica	$0 < Im \leq 10$
Restrita - deficiência hídrica	$-10 < Im < 0$
Inapto - deficiência hídrica acentuada	$Im \leq -10$

*Índice de umidade

Fonte: Varejão-Silva e Barros (2002).

Para calcular o I_m foi preciso obter os valores do índice de aridez (I_a) e do índice hídrico (I_h), conforme as seguintes equações:

$$I_a = 100 \frac{DEF_A}{EP_{O_A}} \quad (6)$$

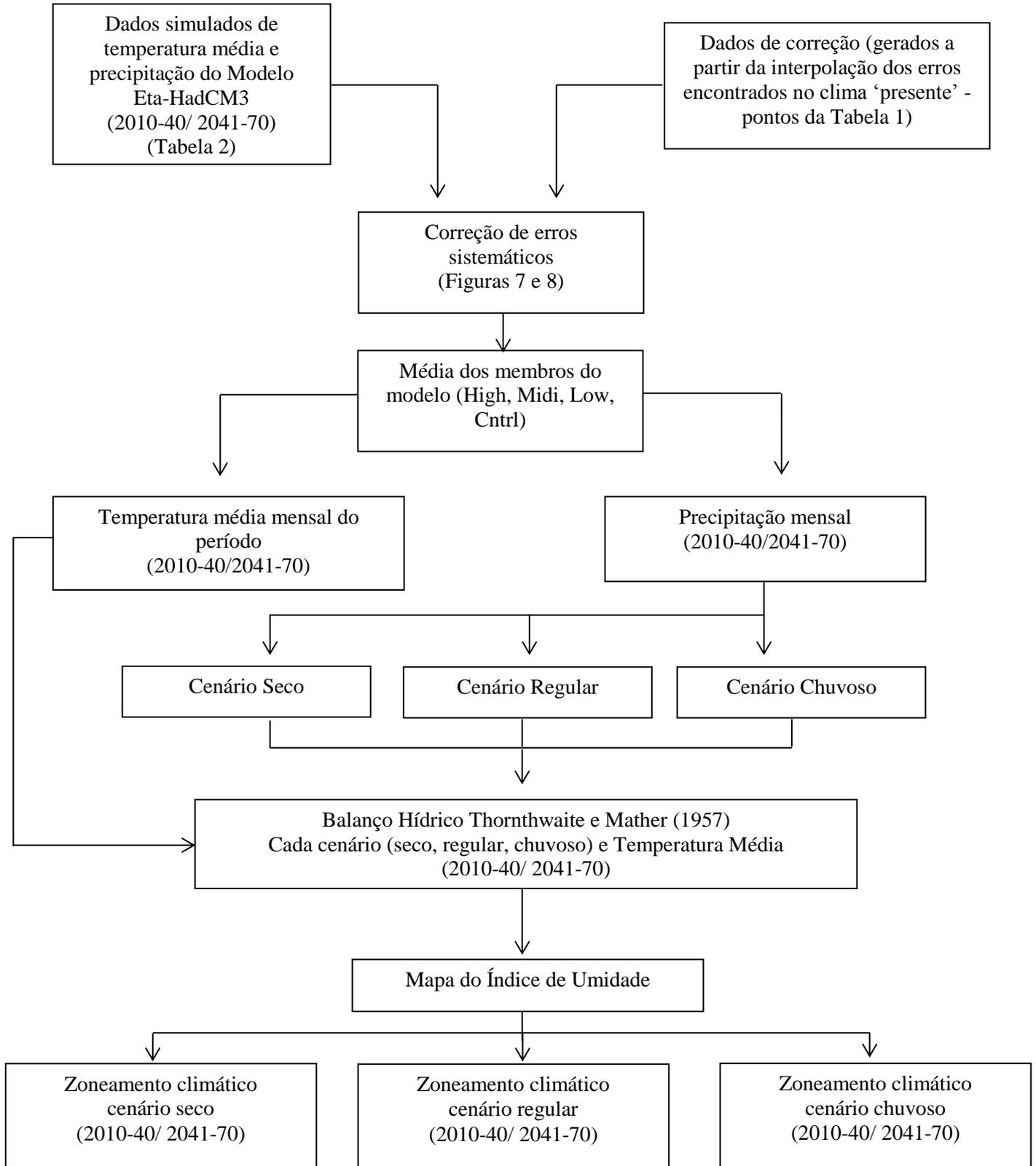
$$I_h = 100 \frac{EXC_A}{EP_{O_A}} \quad (7)$$

$$I_m = I_a - I_h \quad (8)$$

Onde o DEF_A é o valor da deficiência hídrica, EXC_A é o valor do excedente hídrico, EP_{0A} , é a evapotranspiração. O subscrito 'A' indica totais anuais (KRISHAN, 1980 apud VAREJÃO-SILVA, 2006).

Depois de obtidos os valores do índice de umidade (Im) para cada ponto (Tabela 2), eles foram interpolados usando o IDW. As etapas seguidas para o zoneamento climático da cana-de-açúcar são explicadas conforme a Figura 10.

Figura 11 - Fluxograma do procedimento do zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar.



Fonte: Autora (2014).

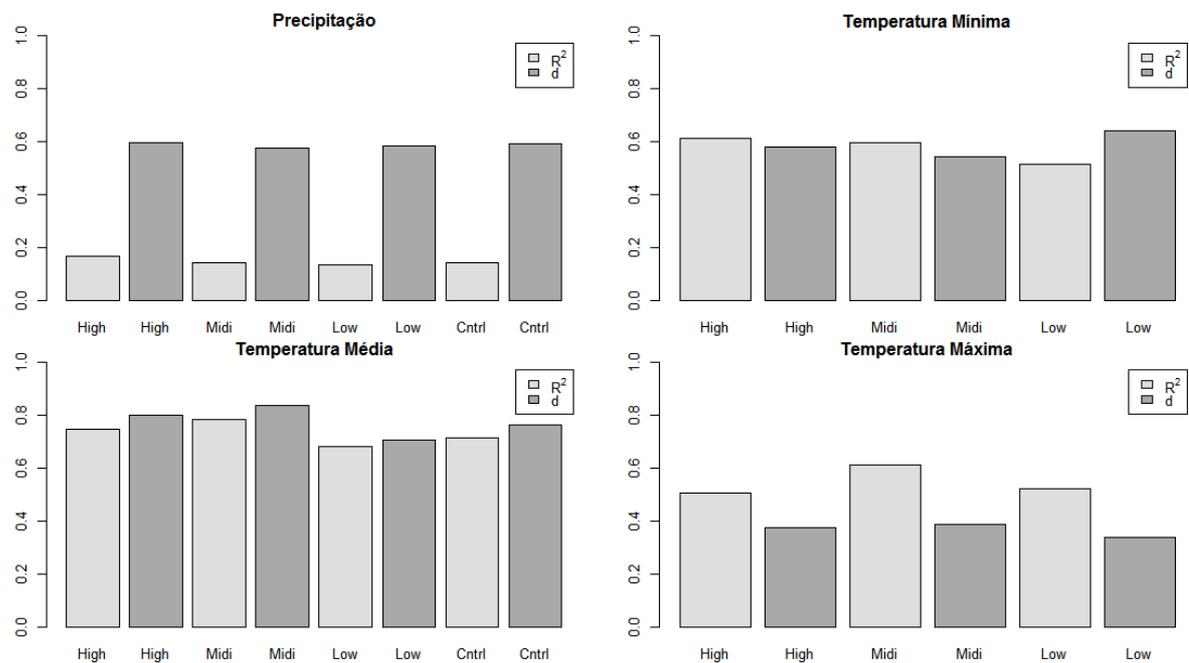
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise estatística das simulações

4.1.1 Avaliação do modelo

Foram realizadas análises estatísticas para verificar a precisão e a exatidão dos dados simulados pelos membros do modelo Eta-HadCM3 por meio do teste de Willmott e da regressão linear. De um modo geral, as variáveis de temperatura do ar (média, máxima, e mínima) e precipitação pluvial apresentaram comportamento semelhante nos diferentes membros do modelo (cntrl, high, midi e low) (Figura 11).

Figura 12 - Valores do coeficiente de determinação (R^2) e do índice de concordância (d) para as variáveis precipitação pluvial, temperaturas mínima, máxima e média do ar, avaliados para cada membro do modelo Eta-HadCM3 - High, Midi, Low e Cntrl, durante o período de 1960-1990 no estado Pernambuco.



Fonte: Autora (2014).

Os valores de precipitação projetados foram mais exatos (d) do que precisos (R^2), ou seja, o modelo não representou bem a variabilidade da precipitação. Resultado semelhante foi identificado por Ambrizzi et al. (2007), que identificaram que o modelo ETA/CPTEC, para os cenários A2 e B2, apresentou baixo índice de correlação (0,49) em simular o ciclo sazonal da chuva no Nordeste do Brasil. Entretanto, deve-se levar em consideração a complexidade da simulação desta variável, que é influenciada por diferentes fenômenos atmosféricos, além de diferença de escala espacial entre os valores simulados e observados, pois enquanto o modelo gera uma informação em grades de 40X40 km a estação meteorológica mede a precipitação pontualmente. Valverde e Marengo (2010) apontam que os modelos climáticos globais ainda não conseguem reproduzir com alto grau de confiabilidade o padrão sazonal de precipitação que a climatologia observacional apresenta. Além do mais, considerando-se que toda a técnica de regionalização ou *downscaling* contém erros derivados do modelo global, que força o modelo regional (AMBRIZZI et al., 2007), era de se esperar uma maior dificuldade do modelo em representar espacialmente a precipitação regional.

As temperaturas máxima, média e mínima do ar apresentaram comportamentos diferentes nas simulações quanto à precisão e à exatidão. A temperatura média apresentou os melhores resultados, com coeficiente de determinação e índice de concordância elevados em todos os pontos, a média de precisão foi maior que 0,6 e exatidão maior que 0,7 (Figura 11). Essa variável, de um modo geral, foi a melhor simulada pelo modelo Eta-HadCM3, tanto nos valores médios quando no padrão sazonal.

Os valores de temperatura máxima foram mais precisos do que exatos em todos os membros; no entanto, o membro que apresentou melhor desempenho foi o midi. Essa variável apresentou valores subestimados em relação aos valores observados. As projeções de temperatura mínima também apresentaram valores de precisão e exatidão acima de 0,5 e esta foi a segunda variável mais bem representada nos membros simulados pelo modelo; no entanto, boa parte dos valores foram superestimados.

Uma visão mais detalhada dos índices mostra que não existe conformidade das áreas com os melhores resultados, para as temperaturas máxima e média. Nos índices referentes à temperatura máxima (Tabela 5) os melhores desempenhos do coeficiente de determinação foram nos municípios de Barreiros (Zona da Mata), e Bom Jardim (Agreste), mas com índices de concordância abaixo de 0,5, com valores subestimados. Isto mostra que as simulações desses municípios conseguem representar a variabilidade sazonal, mas com valores distantes da média. Já os que apresentaram os índices mais baixos foram os municípios de Afrânio (Sertão de São Francisco) e Palmares (Zona da Mata).

Tabela 4 – Avaliação das simulações da temperatura máxima do ar no período presente (1960-1990) para os membros do modelo Eta-HadCM3, em alguns municípios de Pernambuco. R²- Coeficiente de determinação (precisão), d – índice de concordância (exatidão).

TEMPERATURA MÁXIMA								
Local	HIGH		MIDI		LOW		CNTRL	
	R ²	d	R ²	d	R ²	d	R ²	d
Afrânio	0,47	0,29	0,54	0,29	0,49	0,25	-	-
Araripina	0,29	0,48	0,40	0,49	0,38	0,42	-	-
Barreiros	0,60	0,42	0,71	0,44	0,57	0,39	-	-
Bom Jardim	0,53	0,42	0,65	0,45	0,54	0,39	-	-
Ibimirim	0,57	0,34	0,63	0,35	0,63	0,32	-	-
Itambé	0,52	0,38	0,67	0,41	0,52	0,35	-	-
Palmares	0,51	0,36	0,64	0,38	0,50	0,34	-	-
Petrolina	0,53	0,31	0,59	0,31	0,55	0,27	-	-
Recife	0,54	0,38	0,67	0,40	0,51	0,35	-	-
Vitória	0,52	0,36	0,65	0,38	0,53	0,33	-	-

Fonte: Autora (2014).

Com relação às temperaturas médias (Tabela 6), as melhores simulações foram em Bom Jardim (Agreste) e Petrolina (Sertão de São Francisco). Já nos municípios de Palmares (Zona da Mata) e Recife (RMR), apesar dos valores serem mais baixos foram significativos, com médias de 0,6, o que salienta o bom desempenho do modelo em representar tanto os valores médios da variável, como o comportamento sazonal, o que implica em menores erros sistemáticos.

No caso das temperaturas mínimas (Tabela 7), houve conformidade espacial, com os melhores resultados, tanto de concordância e coeficiente de determinação, nas simulações no oeste do Estado, com os melhores valores no Sertão e Sertão de São Francisco nos municípios de Afrânio, Ibimirim e Petrolina. No lado Leste, mais próximo à costa, como em Recife, Itambé e Bom Jardim, foi constatado baixo desempenho.

Tabela 5 - Avaliação das simulações da temperatura média do ar no período presente (1960-1990) para os membros do modelo Eta-HadCM3, em alguns municípios de Pernambuco. R²- Coeficiente de determinação (precisão), d – índice de concordância (exatidão).

TEMPERATURA MÉDIA								
Local	HIGH		MIDI		LOW		CNTRL	
	R ²	d						
Afrânio	0,75	0,93	0,73	0,92	0,71	0,80	0,71	0,85
Araripina	0,68	0,56	0,70	0,56	0,67	0,76	0,64	0,70
Barreiros	0,78	0,84	0,83	0,90	0,69	0,73	0,67	0,86
Bom Jardim	0,78	0,93	0,83	0,95	0,69	0,79	0,77	0,88
Ibimirim	0,80	0,70	0,80	0,76	0,79	0,58	0,80	0,63
Itambé	0,75	0,91	0,81	0,94	0,65	0,77	0,71	0,86
Palmares	0,71	0,67	0,79	0,74	0,62	0,57	0,70	0,62
Petrolina	0,77	0,93	0,76	0,93	0,74	0,79	0,74	0,84
Recife	0,71	0,83	0,78	0,90	0,60	0,69	0,69	0,77
Vitória	0,75	0,70	0,82	0,79	0,66	0,58	0,74	0,65

Fonte: Autora (2014).

Tabela 6 - Avaliação das simulações da temperatura mínima do ar no período presente (1960-1990) para os membros do modelo Eta-HadCM3, em alguns municípios de Pernambuco. R²- Coeficiente de determinação (precisão), d – índice de concordância (exatidão).

TEMPERATURA MÍNIMA								
Local	HIGH		MIDI		LOW		CNTRL	
	R ²	d	R ²	d	R ²	d	R ²	d
Afrânio	0,63	0,73	0,62	0,71	0,62	0,83	-	-
Araripina	0,60	0,32	0,57	0,31	0,56	0,41	-	-
Barreiros	0,65	0,44	0,60	0,41	0,51	0,50	-	-
Bom Jardim	0,59	0,55	0,60	0,50	0,46	0,64	-	-
Ibimirim	0,64	0,85	0,60	0,83	0,57	0,73	-	-
Itambé	0,56	0,43	0,56	0,40	0,43	0,50	-	-
Palmares	0,58	0,61	0,59	0,55	0,43	0,70	-	-
Petrolina	0,66	0,73	0,65	0,70	0,64	0,83	-	-
Recife	0,63	0,42	0,59	0,39	0,49	0,48	-	-
Vitória	0,59	0,71	0,59	0,63	0,46	0,79	-	-

Fonte: Autora (2014).

Quanto à precipitação, (Tabela 8) os municípios no Sertão e Sertão de São Francisco apresentaram índices mais baixos, exceto Araripina, que juntamente com Itambé e Palmares, tiveram os melhores desempenhos das simulações do modelo.

Tabela 7 - Avaliação das simulações da precipitação pluvial no período presente (1960-1990) para os membros do modelo Eta-HadCM3, em alguns municípios de Pernambuco. R²- Coeficiente de determinação (precisão), d – índice de concordância (exatidão).

Local	PRECIPITAÇÃO							
	HIGH		MIDI		LOW		CNTRL	
	R ²	d						
Afrânio	0,14	0,57	0,12	0,57	0,13	0,60	0,12	0,59
Araripina	0,28	0,61	0,24	0,64	0,27	0,69	0,19	0,61
Barreiros	0,16	0,62	0,21	0,65	0,15	0,58	0,19	0,64
Bom Jardim	0,18	0,63	0,12	0,57	0,12	0,57	0,17	0,63
Ibimirim	0,05	0,40	0,03	0,40	0,07	0,51	0,05	0,44
Itambé	0,16	0,63	0,12	0,58	0,13	0,58	0,19	0,65
Palmares	0,19	0,65	0,18	0,63	0,15	0,60	0,17	0,63
Petrolina	0,14	0,57	0,10	0,56	0,08	0,55	0,07	0,52
Recife	0,18	0,63	0,16	0,60	0,14	0,60	0,14	0,61
Vitória	0,20	0,64	0,12	0,56	0,12	0,57	0,16	0,62

Fonte: Autora (2014).

4.1.2 Correção e validação dos erros sistemáticos

Precipitação pluvial

Com a comparação da simulação do período presente (1960-1990) com os dados observados do mesmo período, observou-se que nos municípios das mesorregiões do Sertão e do Sertão de São Francisco, de um modo geral, os membros conseguiram representar o comportamento sazonal da chuva, identificando os períodos secos e chuvosos. No entanto, os valores foram subestimados em parte ou em todo o ano, o que já tinha sido indicado pelos baixos índices de precisão (R^2) comentados anteriormente.

Em Araripina e Ibimirim, no Sertão, houve uma diminuição em média de 37,4% a 63,4% no período chuvoso, já no período seco, o leste do Sertão (Ibimirim) apresentou um acréscimo entre 36,5% e 80,1% nos membros, enquanto que em Araripina houve uma diminuição entre 70,5% e 84,9%. Em Afrânio, as reduções (40,4% no membro high) foram maiores que Petrolina (34,7% no cntrl) no período chuvoso.

O comportamento sazonal da precipitação não foi bem representado na zona Leste do estado, como por exemplo nas mesorregiões do Agreste, Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife (RMR). Nessas regiões, a maior parte dos municípios apresentou o pico de período chuvoso antecipado e subestimado, assim como períodos secos também subestimados. Na Zona da Mata a redução máxima para os postos foi em média de 32,3% no período chuvoso. Já no Agreste houve maior diminuição no período seco que no chuvoso, com redução máxima de 49,6% (seco) e 36% (chuvoso). Enquanto que na RMR houve diminuição no período chuvoso de 45,2% (midi), já no período seco houve um acréscimo de 62% no membro midi e uma redução no outros membros.

De um modo geral, o comportamento das simulações do modelo Eta-HadCM3 para a precipitação de Pernambuco, corrobora as simulações feitas por Chou et al. (2011), que analisaram o comportamento do modelo Eta-HadCM3 para o tempo presente (1960-1990) e identificaram que em algumas regiões da América do Sul, incluindo o Nordeste do Brasil, os membros apresentavam valores subestimados em relação aos observados. Dessa forma, torna-se imprescindível a correção dos erros sistemáticos, uma vez que essa subestimativa nos valores poderá causar cenários ainda mais severos, no que diz respeito à seca.

Temperatura do ar

As projeções do clima presente (1960-1990) do modelo Eta-HadCM3 para as temperaturas máxima, média e mínima, apresentaram dinâmica semelhante aos valores observados (climatologia), como foi visto com os resultados do coeficiente de determinação com valores médios acima de 0,5, para as temperaturas, no entanto com casos de superestimação e subestimação dos valores. Após a identificação dos erros sistemáticos realizada para 1960-1985 e a remoção do mesmo no período de 1986-1990 (período de validação), observou-se que todos os membros tiveram um ganho na qualidade nos ajustes aos valores observados.

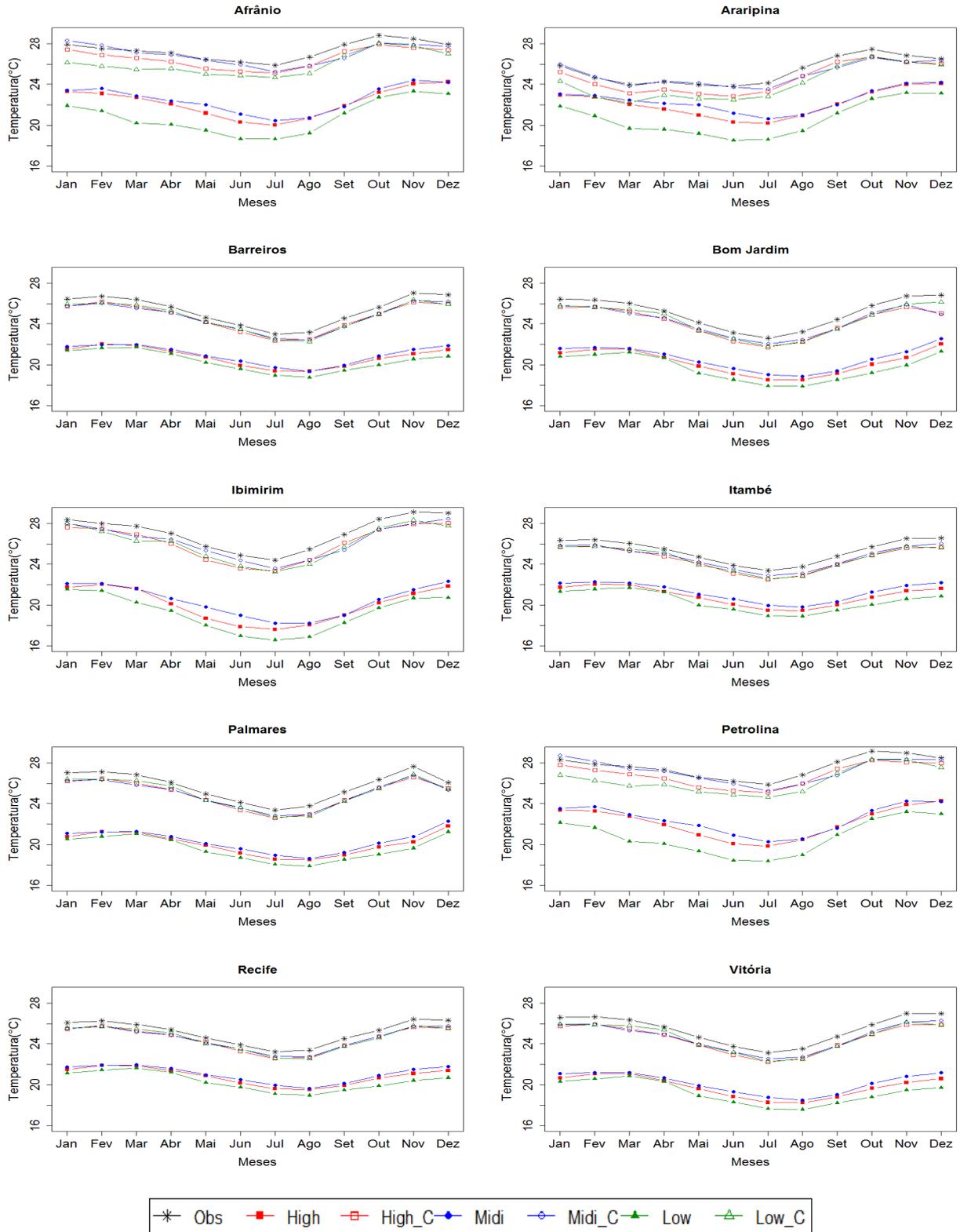
Nas Figuras 12, 13 e 14 estão apresentadas as projeções para os membros (cntrl, high, midi e low) antes e após a remoção dos erros sistemáticos e os valores observados, das variáveis de temperatura máxima, média e mínima, respectivamente, para o período de 1986 a 1990.

No caso das temperaturas máximas do ar (Figura 12), observa-se que o modelo tende a subestimar a temperatura observada em todos os pontos. O membro que mais se aproximou dos valores observados foi o midi, seguido do high e do low. A média dos valores subestimados foi de 2,7°C em Araripina e 7°C em Ibimirim, ambos localizados no Sertão. Nas outras mesorregiões (Sertão de São Francisco, Agreste, Zona da Mata e RMR) a variação de erros foi de 4°C a 5°C.

As temperaturas médias (Figura 13) foram melhor representadas pelo modelo, como se observou anteriormente com o índice de concordância e o coeficiente de determinação. Os valores projetados pelo modelo, para cada membro, tiveram situações de subestimação e superestimação em relação aos valores observados, diferente das máximas que tiveram em todos os casos valores subestimados.

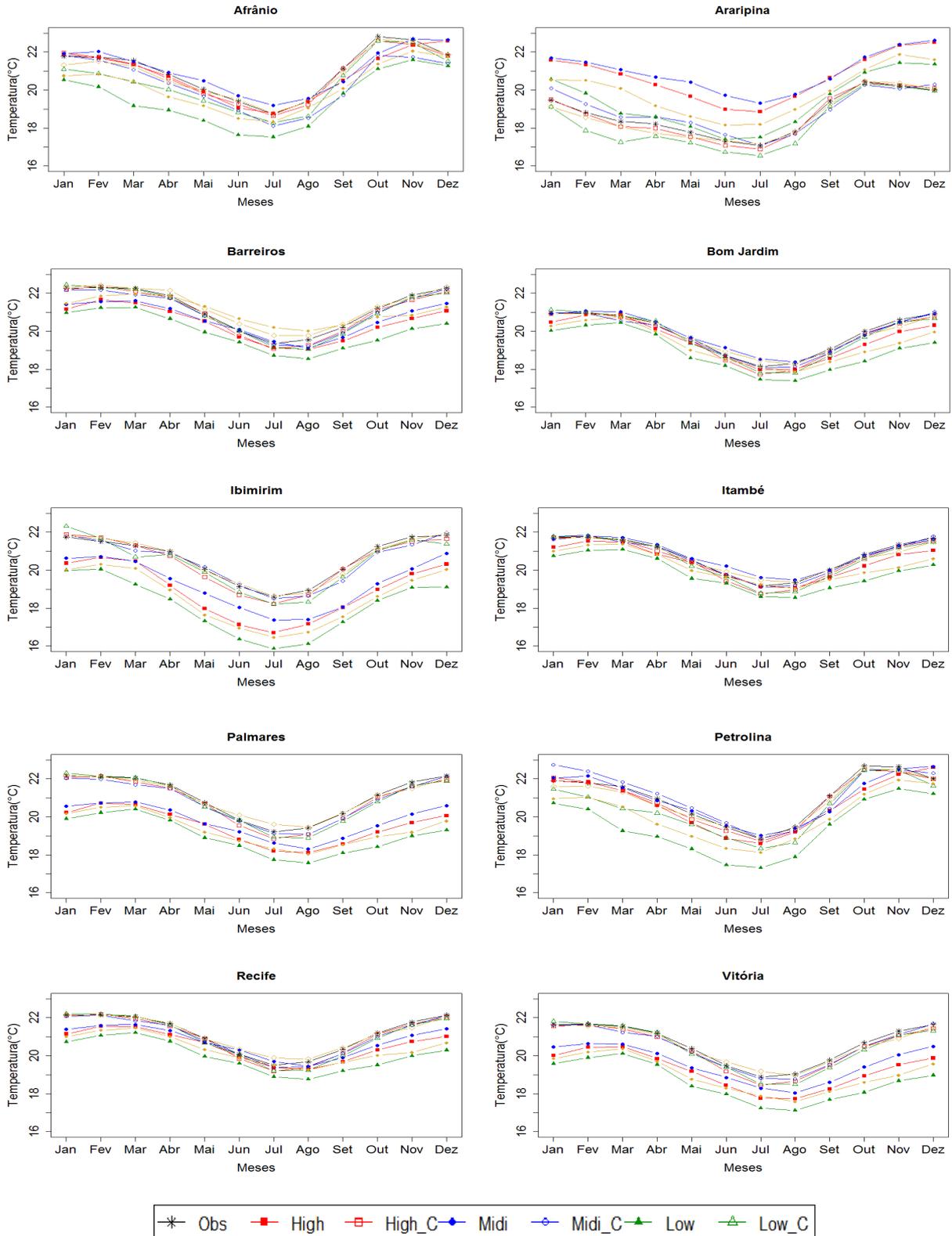
Os municípios que apresentaram os maiores erros foram Araripina e Ibimirim no Sertão e Palmares e Vitória na Zona da Mata, com erros médios em torno de 1,5°C. Já em todos os outros casos (Sertão de São Francisco, Agreste, RMR e parte da Zona da Mata) o erro médio anual foi menor que 1°C, mostrando o quanto as simulações estavam próximas dos dados observados. Foi observado também que nos casos das subestimativas o membro low foi o que mostrou valores mais distantes dos observados, enquanto que o midi o mais próximo às observações.

Figura 13 - Comparação entre as temperaturas máximas do ar simuladas pelo modelo Eta-HadCM3 antes (membro) e após (membro_C) da remoção dos erros sistemáticos e as temperaturas máxima do ar observadas (Obs) no estado de Pernambuco, para o período de 1986-1990, segundo os membros de simulação (High, Midi, Low).



Fonte: Autora (2014).

Figura 14 - Comparação entre as temperaturas médias do ar simuladas pelo modelo Eta-HadCM3 antes (membro) e após (membro_C) remoção dos erros sistemáticos e as temperaturas média do ar observadas (Obs) no estado de Pernambuco, para o período de 1986-1990, segundo os membros de simulação (High, Midi, Low, Cntrl).



Fonte: Autora (2014).

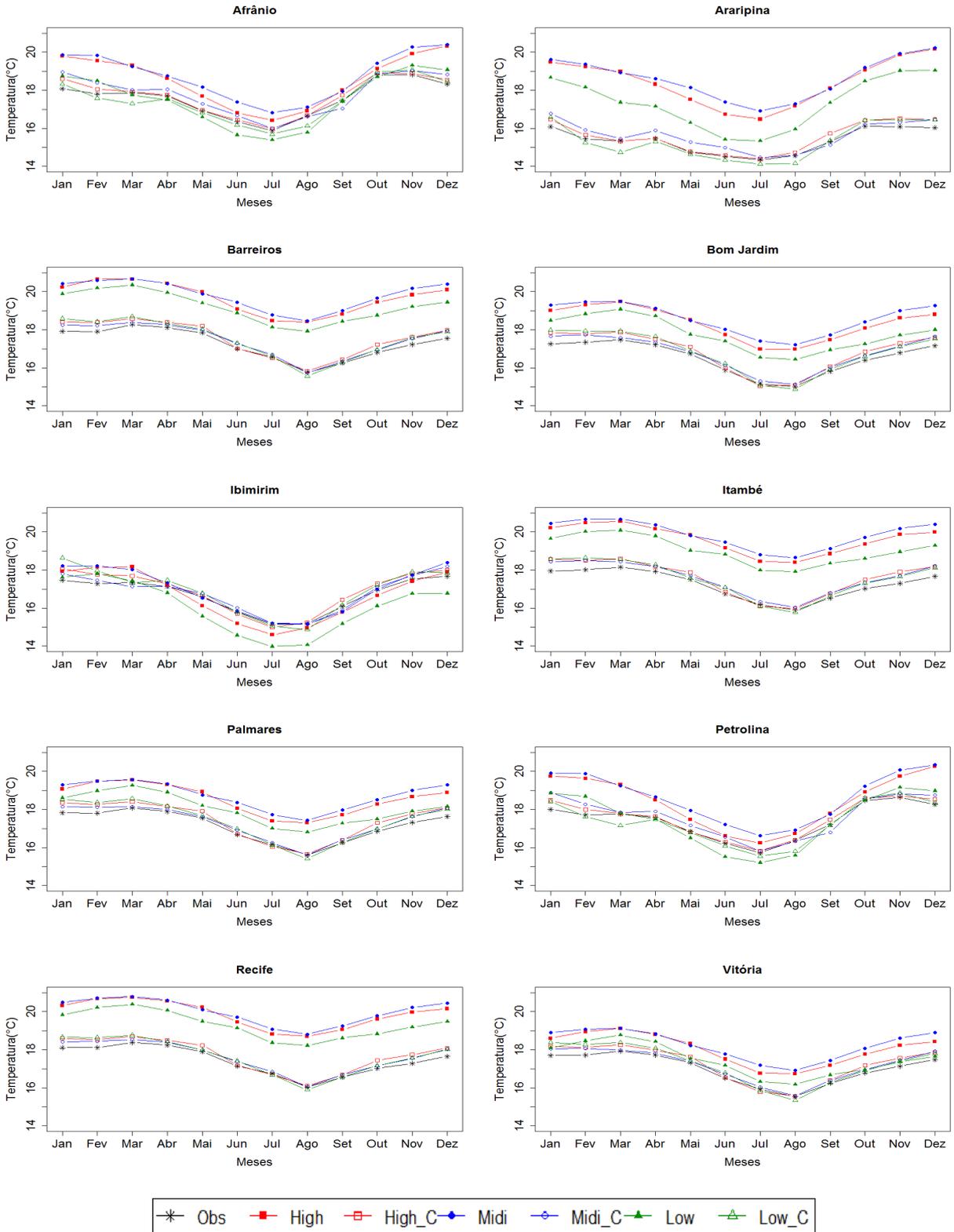
Com relação às temperaturas mínimas (Figura 14) se observa que o modelo tende a superestimar os valores simulados em relação aos observados em todos os pontos, com relação aos observados. Isso ocorre porque o incremento da concentração de gases de efeito estufa, principalmente do CO₂ (dióxido de carbono), tem influência direta no balanço de ondas longas, com efeito sobre a temperatura noturna (IPCC, 2007), o que justifica a superestimava.

Nas temperaturas mínimas, o modelo mostrou mais superestimativas nos municípios da Zona da Mata, Agreste e RMR, com exceção de Araripina no Sertão que teve o maior valor médio anual, ou seja, o modelo superestimou em média de 2,8°C do valor observado. O membro que mais se aproximaram dos valores observados, foi o low, seguido do high e do midi. Enquanto que, em Ibimirim (Sertão) e Sertão de São Francisco observaram-se superestimativas inferior a 1°C. O verão e o outono foram às estações mais afetadas.

Depois das correções, todos os membros se aproximaram do valor esperado, em Araripina e Petrolina o melhor desempenho foi o high, enquanto que Bom jardim, Palmares e Recife foi o membro midi. Dessa forma fica claro que o desempenho dos membros pode variar de acordo com a variável e com a localidade.

Após a correção dos erros sistemáticos de todos os membros, percebeu-se que os valores simulados pelo modelo se aproximaram do valor observado do período, apresentando uma melhora significativa, justificando assim a importância desse método de correção para evitar prolongação dos erros nos cenários futuros, e com projeções mais confiáveis para a região de estudo.

Figura 15 - Comparação entre as temperaturas mínimas do ar simuladas pelo modelo Eta-HadCM3 antes (membro) e após (membro_C) remoção dos erros sistemáticos e as temperaturas mínimas ao ar observadas (Obs) no estado de Pernambuco, para o período de 1986-1990, segundo os membros de simulação (High, Midi, Low).



Fonte: Autora (2014).

4.2 Mapas das projeções climáticas

Precipitação pluvial

Com relação à distribuição geográfica das chuvas anuais no estado, o modelo Eta-HadCM3 no cenário A1B apresenta para o futuro (Figura 15), uma situação mais otimista no período de 2010-2040 do que 2041-2070, no qual a redução é mais acentuada nos totais anuais. Resultados semelhantes foram apontados por Valverde e Marengo (2010), Marengo et al. (2011a, b) e PBMC (2013) identificaram por meio de projeções climáticas de diferentes modelos que a medida que se aproxima do fim do século, as mudanças nos padrões climáticos são mais significativas em todo o Nordeste do Brasil.

Comparando-se as estimativas com a climatologia observada, ficam evidentes as mudanças dos padrões dos totais de precipitação anual ao longo das projeções futuras. No período 2010-2040, o Sertão e parte do Agreste apresentaram as reduções mais significativas nos totais anuais de precipitação, com os valores projetados em 350 mm, enquanto que o valor médio observado no clima presente é de 650 mm. Já nas outras mesorregiões, o modelo mostrou redução menos acentuada, além de acréscimo nos totais de precipitação anual no sul Zona da Mata e na RMR, onde a chuva passou de 1000-1500 mm (climatologia atual) para 1500-2000 mm (2010-2040).

Por outro lado, no período de 2041-2070, as estimativas indicam redução de precipitação em todas as mesorregiões exceto a RMR e o extremo sul da Zona da Mata, que permanecem com valores totais semelhantes aos dados observados.

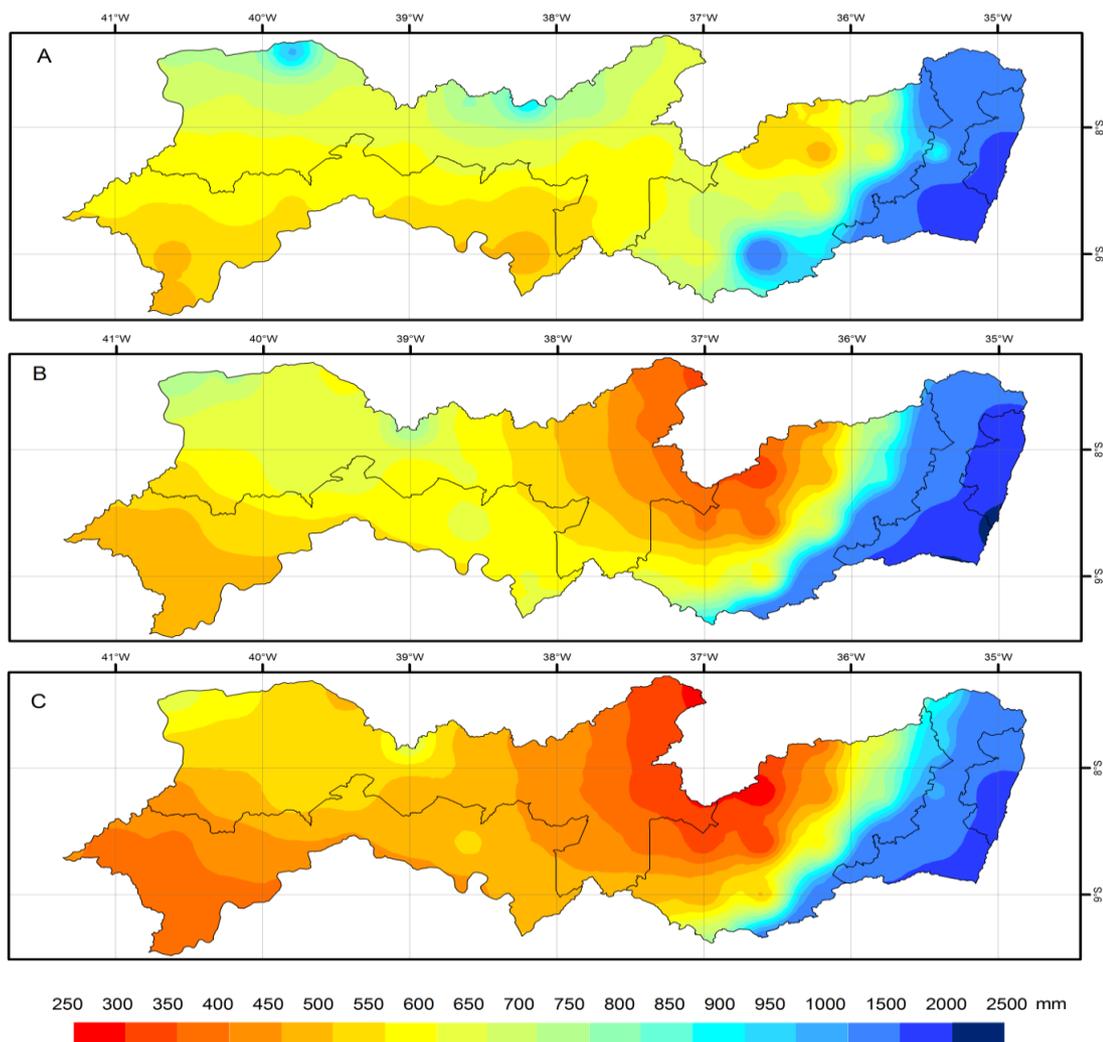
No período de 2010-2040, o modelo mostrou redução mais acentuada de precipitação no Agreste e no Sertão, variando de 20 a 40% e chegando a 60% no extremo norte do Sertão. Já no Sertão de São Francisco, as projeções mostraram um acréscimo de até 20% no leste da mesorregião. Entretanto, no período seguinte entre 2041-2070 quase todo o estado apresenta reduções na precipitação, que variam de 20 a 60%, onde o norte-nordeste do Sertão apresentou a situação mais extrema de redução de chuvas anuais (Figura 16).

Resultados semelhantes foram obtidos por Marengo et al. (2011a) que, comparando as projeções de 3 MCRs (Eta CCS, RegCM3 e HadRM3P) para a América do Sul no cenário A2 (pessimista), identificaram que, no inverno, a redução da precipitação, em grandes partes da Amazônia e Nordeste do Brasil, alcançam 60 a 80% nas simulações com o Eta CCS e 20-40%, nas simulações com outros dois modelos. Resultados semelhantes também foram apresentados pelo PBMC (2013), com projeções de precipitação em áreas de bioma caatinga

apresentando decréscimo entre 10% e 20% durante as próximas três décadas (até 2040), e diminuição entre 25% e 35% no período de 2041-2070, resultado mais otimista que os apresentados pelo modelo Eta-HadCM3.

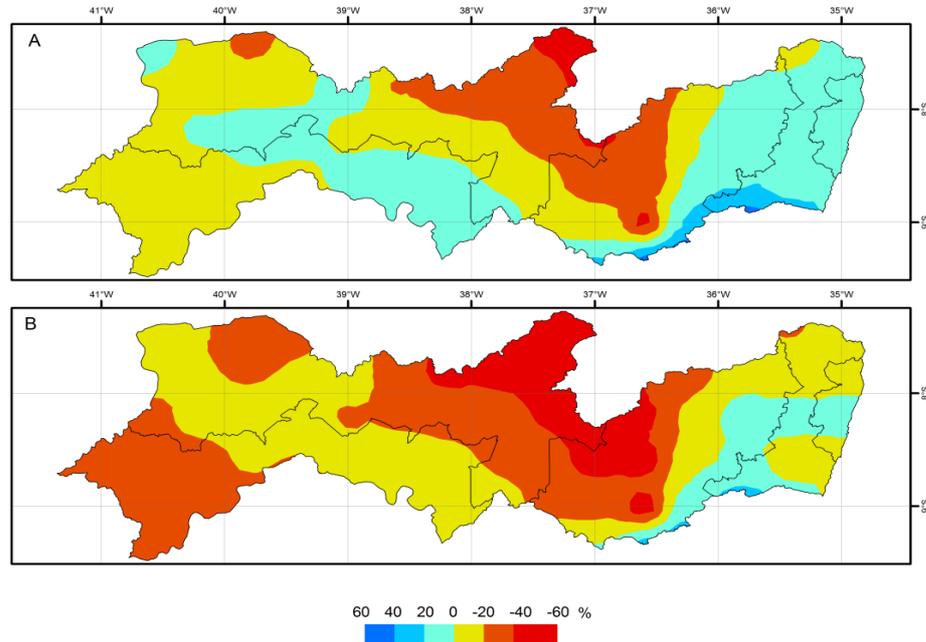
Mesmo diante das incertezas na simulação da precipitação pluvial nota-se que o modelo mostrou um padrão geral de redução progressiva da precipitação anual, semelhante ao que vem sendo discutido em nível de modelagem regional no Nordeste do Brasil. O que evidencia maior probabilidade de redução nos totais de precipitação.

Figura 16 - Totais anuais de chuva (mm) para o estado de Pernambuco, A (Atual – observado/ 1960- 2012), B (2010-2040) e C (2041-2070). B e C são projeções do modelo Eta-HadCM3 no cenário A1B.



Fonte: Autora (2014).

Figura 17 – Diferença percentual entre os totais anuais de chuva projetado pelo modelo Eta-HadCM3 no cenário A1B e a climatologia dos totais anuais observados para o estado de Pernambuco: A (2010-2040) e B (2041-2070).

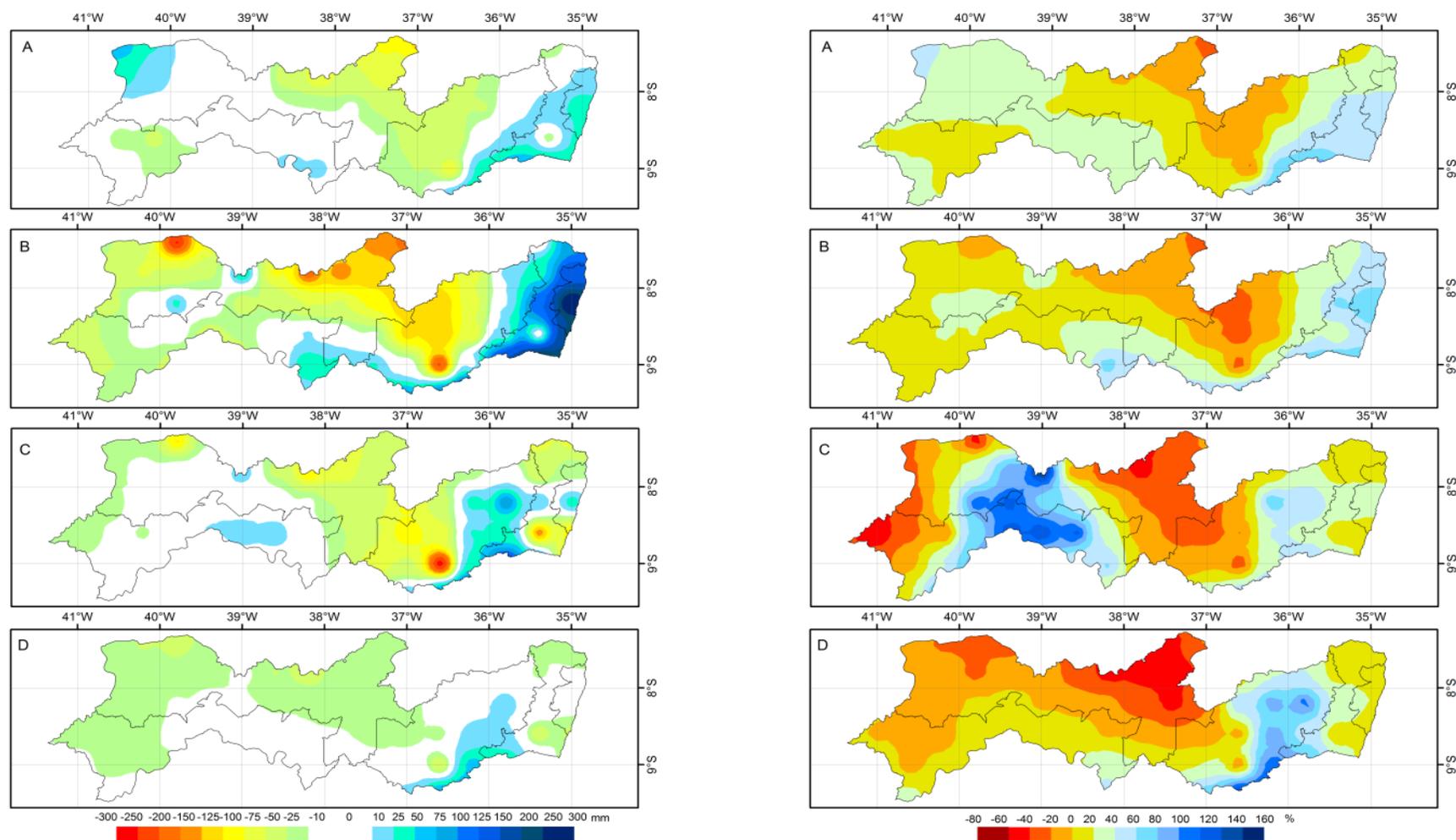


Fonte: Autora (2014).

Quando analisadas as anomalias por trimestre no período de 2010-2040 (Figura 17) percebe-se que as mudanças mais significativas foram em março, abril e maio (MAM) e junho, julho e agosto (JJA). No outono austral, estação mais chuvosa no Sertão, Sertão de São Francisco e Agreste, as projeções mostram redução na precipitação total anual de até 250 mm, o que equivale a uma redução de até 40% em relação ao clima presente em algumas áreas. A situação é mais crítica no norte do Sertão, com redução variando de 50 a 125 mm, enquanto que os totais anuais de chuva observadas são de 250 a 400 mm. Já o Agreste, onde chove em média de 400-500 mm, e que tem como característica a transição climática entre as condições litorâneas e do sertão, teria redução de 50 a 150 mm no oeste e acréscimo no seu lado leste (próximo ao limite com a Zona da Mata) de até 100 mm.

Em JJA (inverno austral), período chuvoso na Zona da Mata e na RMR, o modelo apresenta redução no norte e sudeste da Zona da Mata e acréscimo de até 40% no centro. O modelo mostrou que o trimestre chuvoso dessas duas mesorregiões foi antecipado para a estação anterior (MAM), com acréscimo de 20 a 60% que corresponde de 100 a 300 mm. Já no período seco, que ocorre no trimestre setembro, outubro e novembro (SON) haveria reduções acentuadas, chegando até 60%, no sertão submetendo a região a condições mais severas no que diz respeito à seca.

Figura 18 – Diferença em milímetros e percentual dos totais de chuva por trimestre entre o valores observado e os projetados pelo Modelo Eta-HadCM3 para o período de 2010-2040, (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON.



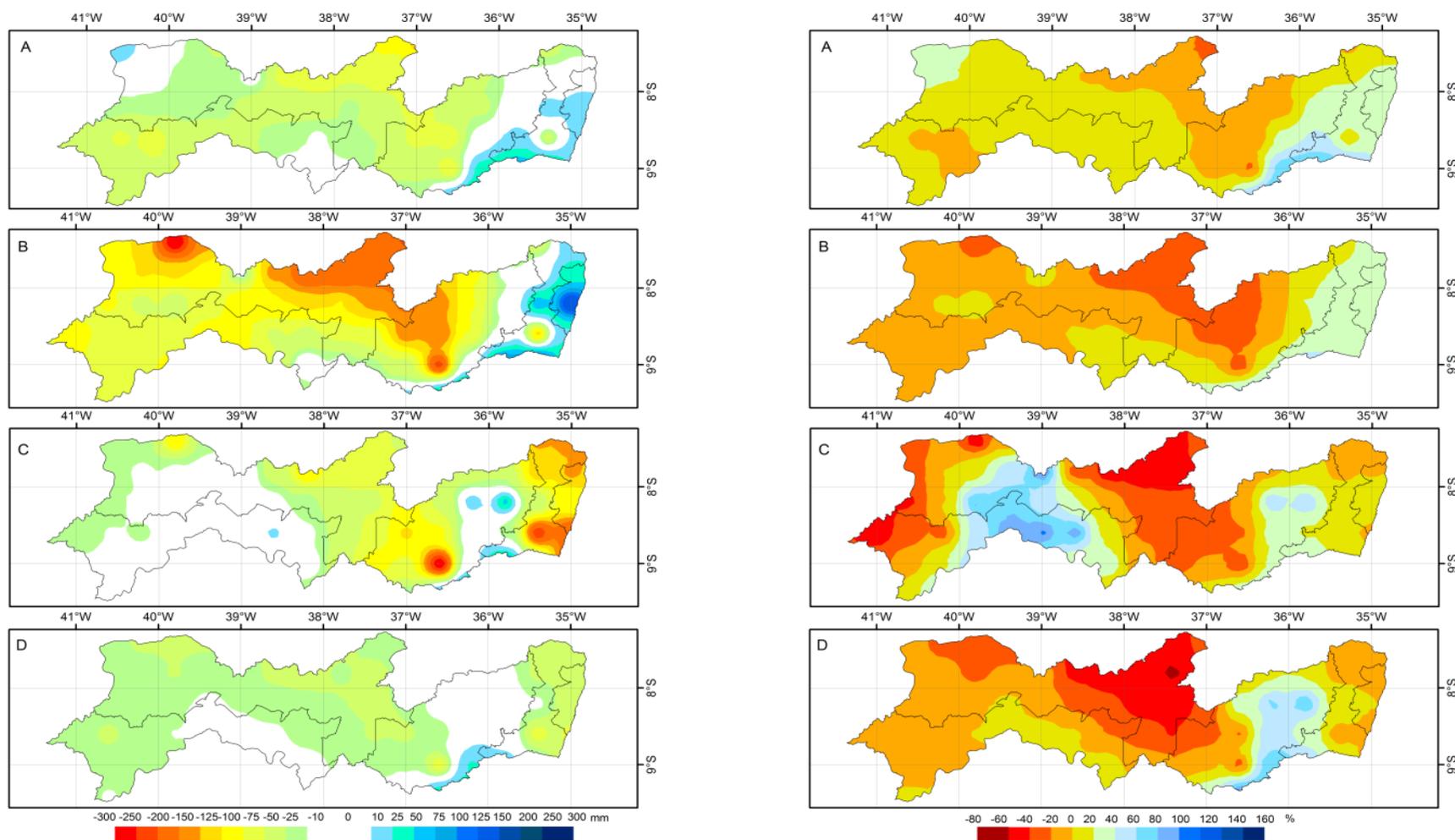
Fonte: Autora (2014).

Em 2041-2070 (Figura 18), o modelo apresenta redução na estimativa de precipitação pluvial em todos os trimestres. De forma análoga foi observado no período anterior, os trimestres mais afetados foram MAM e JJA. As únicas mesorregiões que apresentaram acréscimo nos totais de chuva foram a RMR e o sul da Zona da Mata, no verão e no outono austral.

O período mais seco, SON, também foi bastante afetado, e todo o leste do Sertão apresentou redução de 40 a 60% nas estimativas de precipitação, situação que não fica muito clara quando analisadas a partir dos mapas de anomalias, já que as reduções da precipitação são pequenas em comparação às dos outros trimestres. No entanto, quando se considera que a chuva atual em SON é em torno de 25 a 50 mm, o modelo mostra forte redução com as chuvas podendo ser de 10 mm no nordeste do Sertão.

A redução da precipitação nas projeções, nos meses de MAM, trimestre mais chuvoso para a maior parte do estado, pode estar associada à redução na intensidade dos ventos alísios do Atlântico Tropical norte e fortalecimento dos alísios do Sul, que levam a ZCIT a uma posição mais ao norte, reduzindo, portanto, as chuvas no semiárido. Já as reduções nos meses de JJA, época de maior precipitação na Zona da Mata e na RMR, pode estar associada à redução nas ondas de leste na costa. Espera-se também diminuição das frentes frias, explicando a diminuição da chuva no Sertão de São Francisco, no segundo período (MARENGO et al., 2011a).

Figura 19 - Diferença em milímetros e percentual dos totais de chuva por trimestre entre o valores observado e os projetados pelo Modelo Eta-HadCM3 para o período de 2041-2070, (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON.



Fonte: Autora (2014).

Temperatura do ar

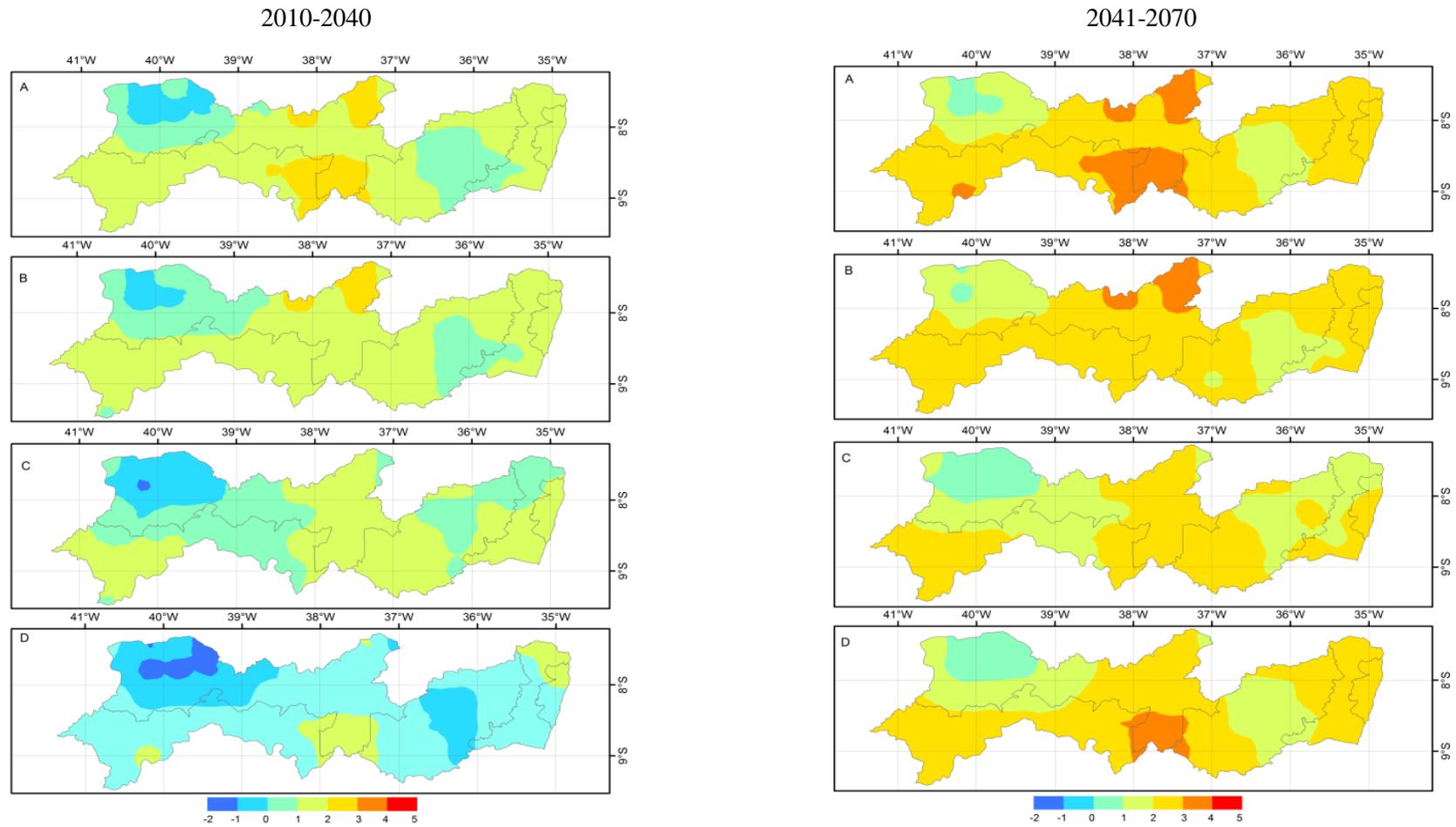
Com relação à temperatura do ar, o modelo sugere aumento gradual ao longo do tempo, com os piores cenários para o fim do período de 2041-2070. Marengo et al. (2011a) identificaram que as temperaturas regionais estão associadas com as concentrações de CO₂, e que com o aumento de forma progressiva dessas concentrações (de acordo com o cenário SRES A1B), as mudanças climáticas regionais tornam-se mais graves. Evidenciou-se ainda que através de modelos climáticos, em curto prazo, na década de 2020 (2011-2040), a concentração atmosférica de CO₂ esperada é de 418 ppm e o aquecimento global associado (simuladas por HadCM3) atinge 1,3 ° C, o que corresponde a um aumento de 1,7° C na temperatura no Brasil (simulado pelo Eta-HadCM3). Em médio prazo, até 2050 (2041-2070) e com uma concentração de CO₂ estimada em 523 ppm, o aumento na temperatura global seria de cerca de 2,5°C, e no Brasil de 3,2°C. Nos últimos 30 anos do século (2071-2100), as concentrações de CO₂ poderiam subir para 638 ppm e o aquecimento global anual chegaria a 3,3° C, que corresponderiam a um aumento projetado de 4,5 °C no Brasil.

As temperaturas médias e as mínimas apresentaram aumento mais significativo na maior área do estado, com acréscimo de 1-3°C nas médias de 2010-2040 e 2-4°C em 2041-2070, com o aquecimento mais concentrado no verão austral. Já o inverno austral foi o período menos afetado pelo aumento da temperatura do ar no estado, concordando com os resultados encontrados por Marengo et al. (2011a) para a América do Sul, que diz em que as temperaturas deverão aumentar em média de 1-2 °C em 2010-2040 e 2,5-3,5°C em 2041-2070 e que os aumento das temperaturas são maiores no verão do que no inverno.

Em partes do Agreste e do Sertão, haverá aumento de temperatura menos acentuado que no entorno, devido ao gradiente de altitude, com o Planalto da Borborema e a Chapada do Araripe, chegando até mesmo a apresentar situações de redução na temperatura máxima, em média de 1°C, na chapada do Araripe em todas as estações do período de 2010-2040.

Com relação às temperaturas máximas percebe-se que o aumento é mais significativo no verão e no outono, chegando a cerca de 3-4°C, no período de 2041-2070, no nordeste e sudeste do Sertão. Já no inverno neste mesmo período o aumento seria em torno de 1-3°C. Na Figura 19, fica muito claro um padrão de áreas mais aquecidas e mais amenas quando comparado às estações do ano nos diferentes períodos, em que a situação mostra-se mais acentuada em 2041-2070, como já foi observado anteriormente.

Figura 20 - Espacialização da diferença dos dados observados e projetados da temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$), sobre o estado de Pernambuco para o cenário A1B. (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON. As projeções são para o período de 2010-2040 e 2041-2070 do modelo Eta-HadCM3.



Fonte: Autora (2014).

No período de 2010-2040, a temperatura média apresenta aumento mais acentuado no verão austral, de 2-3°C na maior parte do estado e aumento de até 2°C no oeste do estado (Sertão e Sertão do São Francisco) (Figura 20). Já no período de 2041-2070, aumento de 3-4°C mais acentuado no verão e no outono. Já as temperaturas mínimas (Figura 21) tiveram aumento de 1-2°C em 2010-2040 na maior parte do estado, chegando até a 3°C, e, em 2041-2070 aumento entre 2-4°C sendo mais acentuado na zona costeira e sul do Sertão de São Francisco.

Percebe-se claramente que o modelo apresenta um padrão das áreas influenciadas pelo aumento das temperaturas entre as estações de um período para o outro, mostrando apenas aumento da temperatura mais acentuado no período seguinte, como já era de se esperar pelo aumento das concentrações de CO₂ nas simulações do cenário. Com pequenas exceções nas áreas de influência na primavera e no verão, como pode ser visto na Figura 21-D, em que as anomalias de temperatura mínima de 2-3°C no leste do Sertão (2010-2040), passa a ter um aumento de temperatura de 3-4°C (2041-2070) em um área bem maior que no período anterior.

Marengo e Valverde (2007) afirmaram que o aquecimento no Brasil pode variar por região e que seus condicionantes podem ser as mudanças naturais de clima. Este aquecimento pode se dar por causa de fatores naturais, como os aquecimentos do Atlântico Sul ou El Niño, observados desde 1950, ou a fatores antropogênicos (por exemplo, queima de combustível fóssil e industrialização e mudanças de uso da terra e subseqüentes queimadas), o que é discutido pelo IPCC (2007).

Com relação às consequências do aumento das temperaturas, o IPCC afirma que é certo que haverá maior frequência de temperaturas extremas de calor e menos frio sobre a maioria das áreas de terra em escalas de tempo diárias e sazonais. É muito provável aumento na frequência e duração de ondas de calor, mas ocasionais extremos frios no inverno continuarão a ocorrer (IPCC, 2007; IPCC, 2013). Além disso, muitas cidades terão de enfrentar mais problemas com determinados poluentes atmosféricos, visto que a concentração de poluentes no ar é uma resposta às mudanças climáticas e que, em parte, a formação desses poluentes depende da temperatura e da umidade (SATTERTHWAITE, 2007).

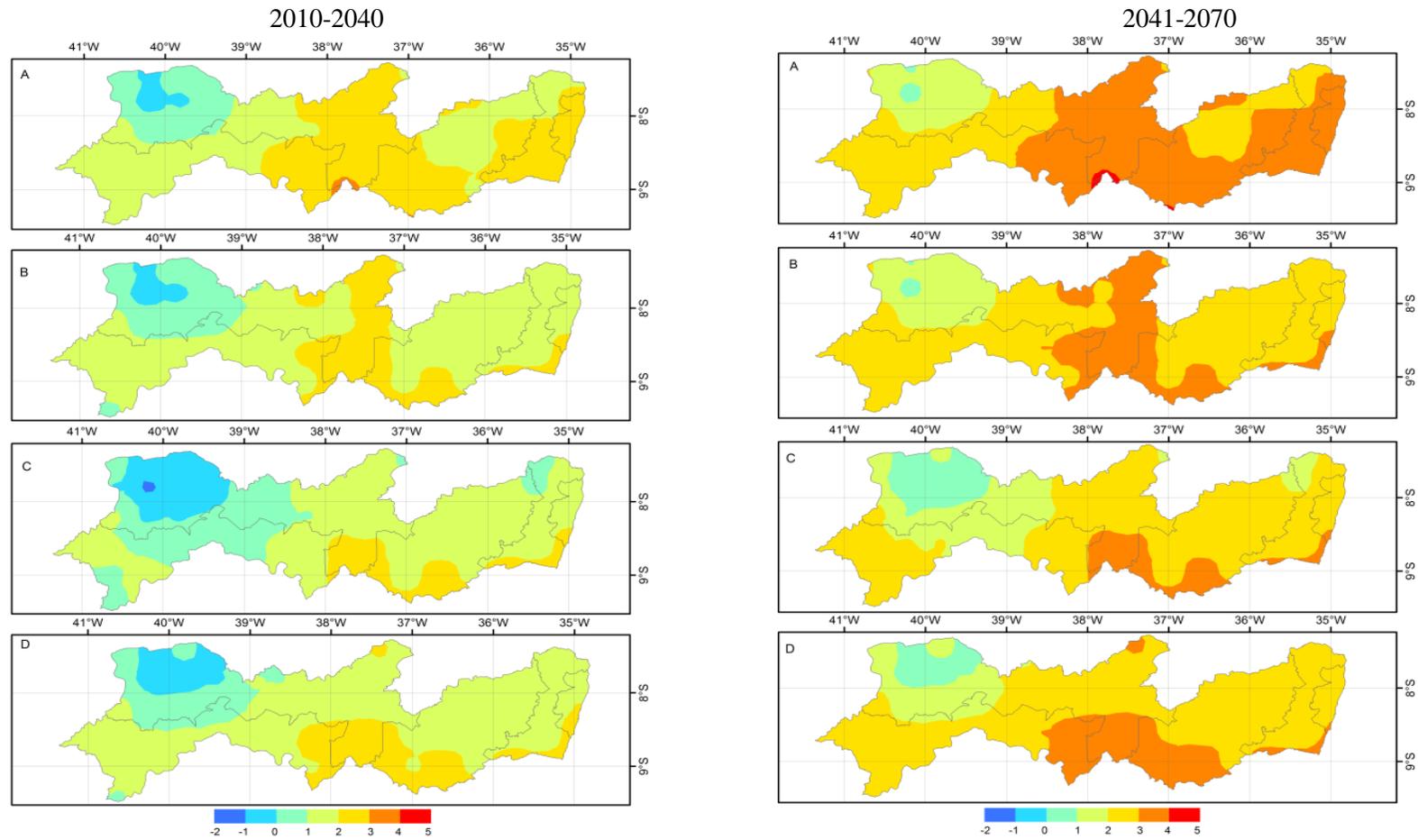
Efeitos de mudanças nos padrões climáticos já estão sendo identificados em Pernambuco. LACERDA et al. (2009) identificaram aumento de 4 °C na temperatura máxima diária no período de 1961 a 2009, na estação meteorológica de Araripina e diminuição média de 275 mm (correspondendo a 57%) dos totais pluviométricos anuais, no vale do rio Pajeú. Com aumento dos períodos máximos de estiagem e do aumento da frequência de eventos de

precipitação intensa. De forma semelhante, Soares e Nóbrega (2009), analisando a microrregião do Pajeú, no extremo norte de Pernambuco, identificaram que as chuvas em 40 anos de observações estão ficando mais concentradas e os períodos secos estão se tornando maiores. Na Zona da Mata de Pernambuco, Marengo et al. (2011b) analisaram a estação de Vitória de Santo Antão, e identificou aumento das temperaturas máximas durante o inverno (julho) de 1955 até 2005. Esses autores observaram que, em 48 anos, a máxima da temperatura máxima aumentou cerca de 2,7 °C e a mínima da temperatura máxima aumentou 3°C. No entanto, é oportuno avaliar quais são as reais causas do aumento da temperatura do ar, quando se trata de áreas menores, já que esses aumentos podem estar relacionados com a expansão e/ou adensamento urbano, assim como associados às mudanças no uso da terra e degradação ambiental.

Zona da Mata

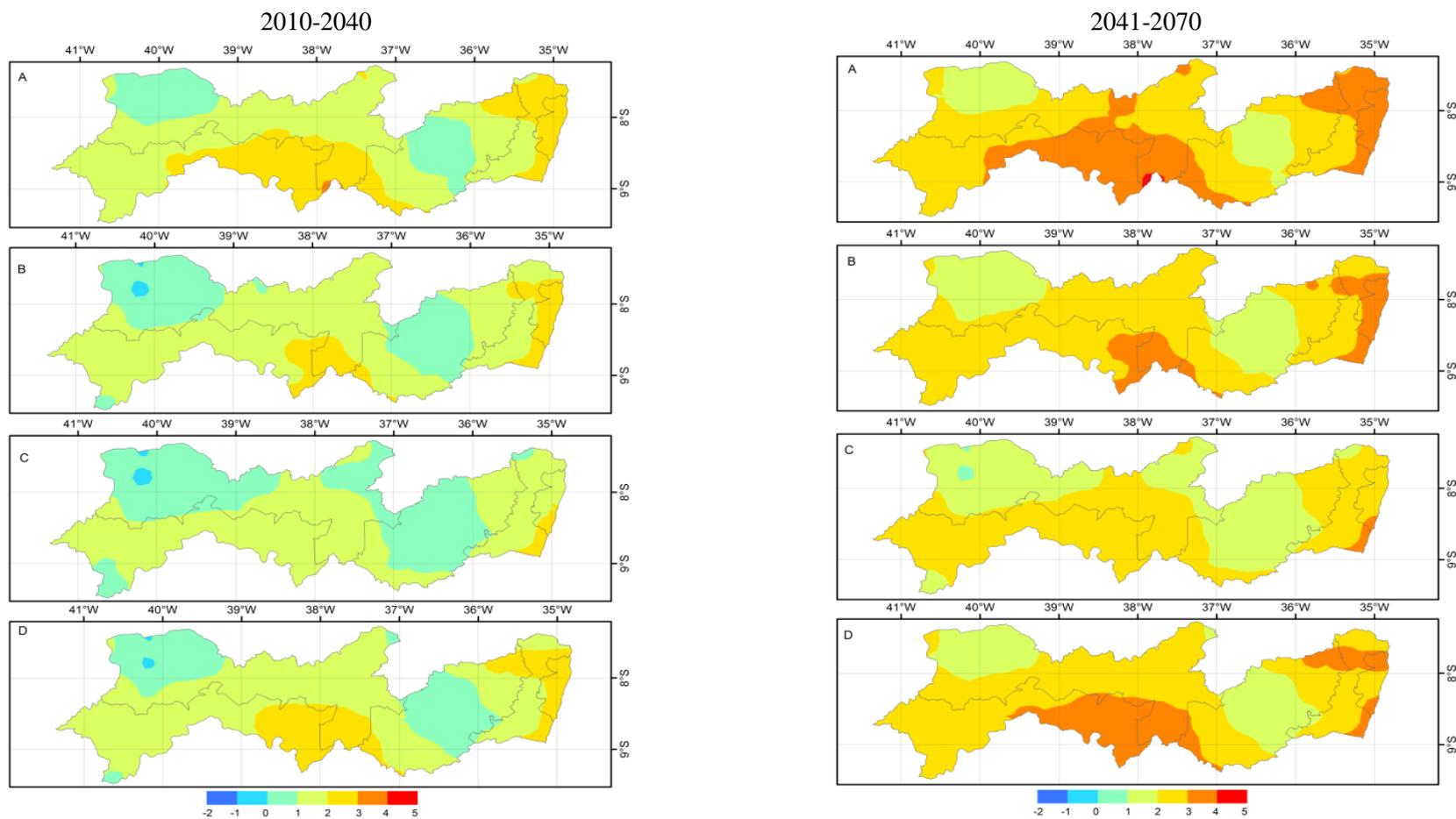
Com relação a Zona da Mata de Pernambuco, as projeções do modelo no primeiro período (2010-2040) mostraram aumento de 20% nos totais anuais de chuva em quase toda a mesorregião, no entanto mais expressivo na microrregião de Vitória de Santo Antão e na Mata Sul e aumento que varia de 1°C a 3°C nas temperaturas do ar. Enquanto que na projeção seguinte (2041-2070) os totais anuais foram semelhantes aos valores observados, mas como redução de até 20% na Mata Setentrional, com aumento de até 4°C nas temperaturas do ar. Evidencia-se dessa forma que as mudanças climáticas são de forma gradativa, podendo ser mais acentuada a medida que se aproxima do final do século. Dessa forma, espera-se aumento da deficiência hídrica o que consequentemente poderá impactar nos cultivos agrícolas e consequentemente na economia local.

Figura 21 - Espacialização da diferença dos dados observados e projetados da temperatura média do ar (°C), sobre o estado de Pernambuco para o cenário A1B. (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON. As projeções são para o período de 2010-2040 e 2041-2070 do modelo Eta-HadCM3.



Fonte: Autora (2014).

Figura 22 - Espacialização da diferença dos dados observados e projetados da temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), sobre o estado de Pernambuco para o cenário A1B. (A) DJF, (B) MAM, (C) JJA e (D) SON. As projeções são para o período de 2010-2040 e 2041-2070 do modelo Eta-HadCM3.



Fonte: Autora (2014).

4.3 Zoneamento de aptidão agroclimática futura para a cana-de-açúcar

Neste estudo, os zoneamentos para anos secos e chuvosos não serão utilizados para limitar a área de aptidão agroclimática para a cultura, devido ao seu ciclo vegetativo longo (superior a 12 meses), mas para fins de observar as condições em que a cultura pode estar submetida de ano para ano, seja no plantio, no manejo e, ou, na colheita (BARROS et al., 2012). Quando são comparadas as áreas do zoneamento de aptidão agroclimática da cultura da cana-de-açúcar de Pernambuco do clima presente, realizado pela Embrapa (VAREJÃO-SILVA e BARROS, 2002), com a das projeções do modelo Eta-HadCM3, observa-se que no segundo período (2041-2070), em anos de chuvas regulares, a cultura terá áreas com maiores restrições climáticas (Tabela 13), enquanto que no primeiro período (2010-2040) a situação é mais otimista.

No cenário regular, no período de 2010-2040, as áreas de aptidão plena são predominantes na mesorregião da Zona da Mata, com um cenário pouco favorável à produção da cana-de-açúcar do que foi observado no zoneamento com o clima atual, com uma diferença de 7%. Isso se deve possivelmente a um aumento de até 20% nos totais anuais de precipitação, projetados para esse período pelo modelo Eta-HadCM3 para Zona da Mata, como foi observado anteriormente.

No entanto, as áreas com aptidão agroclimática moderada e restrita por deficiência hídrica foram maiores do que as do clima atual, evidenciando que mesmo diante de um aumento na precipitação pluvial no período, a elevação da temperatura média de 1-3°C poderá aumentar a evapotranspiração potencial, e conseqüentemente a deficiência hídrica, limitando assim o desenvolvimento da cultura em algumas áreas. Silva et al. (2013), avaliando os impactos das mudanças climáticas no cultivo da cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil, identificaram que incremento de 1,5°C já reduzia sensivelmente as áreas com aptidões agrícolas.

Com relação às áreas inaptas ao cultivo da cana, ou seja, inviáveis economicamente, observa-se que no clima atual elas são 12% maiores do que as do período de 2010-2040. É possível que o aumento da precipitação pluvial neste período tenha provocado o deslocamento de áreas com aptidão climática inaptas para restrita e moderada.

Tabela 8 - Área das classes de aptidão climática para a cultura da cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco, em três cenários climáticos: secos, regulares e chuvosos, para os períodos de 2010-2040 e 2041-2070.

	Atual **					
	Seco		Regular		Chuvoso	
	Área* (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Moderada - excesso hídrico	-	-	53.790	6,39	233.283	27,73
Plena	59.130	7,03	425.830	50,61	525.283	62,43
Moderada - peq. def. hídrica	42.630	5,07	82.098	9,76	34.170	4,06
Restrita - deficiência hídrica	150.350	17,87	112.612	13,38	32.068	3,81
Inapto - def. híd. acentuada	589.300	70,04	167.030	19,85	16.610	1,97
2010-2040						
Moderada - excesso hídrico	-	-	-	-	91.969	10,93
Plena	96.312	11,45	485.631	57,72	634.081	75,36
Moderada - peq. def. hídrica	188.674	22,42	135.314	16,08	115.317	13,71
Restrita - deficiência hídrica	265.204	31,52	161.525	19,20	-	-
Inapto - def. híd. acentuada	291.173	34,61	58.894	7	-	-
2041-2070						
Moderada - excesso hídrico	-	-	-	-	-	-
Plena	-	-	84.778	10,08	512.363	60,90
Moderada - peq. def. hídrica	-	-	170.490	20,26	185.203	22,01
Restrita - deficiência hídrica	81.184	9,65	281.049	33,40	143.799	17,09
Inapto - def. híd. acentuada	760.180	90,35	305.047	36,26	-	-

**Área baseada no zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar realizado por Varejão-Silva e Barros (2002).

* Foi contabilizada toda a área da Zona da Mata (841.364 ha), incluindo áreas urbanas.

Fonte: Autora (2014).

Em ambos os cenários pluviométricos, seco e chuvoso, as condições climáticas projetadas para o primeiro período (2010-2040) são mais otimistas que as condições atuais. Neste período, em anos secos, cerca de 66% da área sofrerão restrições hídricas (aptidão restrita e inapta), enquanto que, nas condições atuais, cerca de 87% da área apresentam limitação restrita e inapta.

Em anos chuvosos, a projeção das condições ideais para a cultura no período de 2010-2040 alcança 75% da área, enquanto que nas condições climáticas atuais, apenas 62% são áreas com aptidão plena, com as maiores restrições devido ao excesso hídrico.

Nas projeções de 2041-2070, o quadro se inverte, e a situação é pouco favorável à cultura da cana-de-açúcar observada no primeiro período em relação ao zoneamento atual, não irá resistir às condições climáticas mais severas. Neste período, com redução de até 20% na precipitação pluvial e aumento médio de 2-4°C da temperatura média do ar em relação à observada hoje na Zona da Mata, a deficiência hídrica aumentará, o que limitará drasticamente as áreas com condições ideais para a cultura. Este comportamento foi observado por Ribeiro (1982), que encontrou uma correlação negativa (-0,69) entre a deficiência hídrica anual e a produção de cana-de-açúcar na zona úmida costeira de Pernambuco.

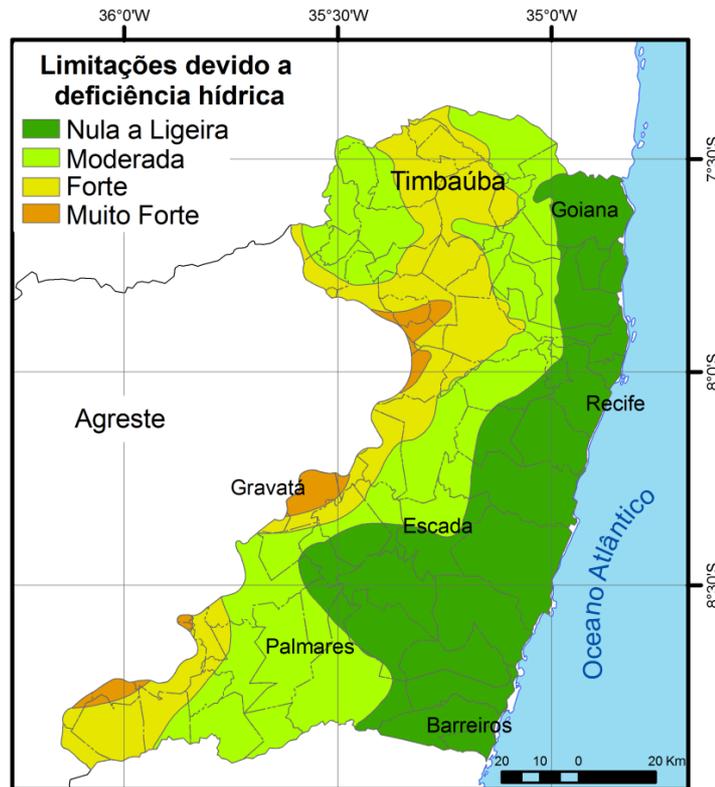
No cenário regular no período de 2041-2070 haverá uma acentuada redução das áreas de aptidão plena, de 40% em relação às condições atuais. Haverá também aumento das áreas com restrições hídricas, da ordem de 70%, dos quais, 36% com condições inaptas, consideradas como áreas inviáveis para exploração econômica, devido aos altos riscos de perda da produção. Esses resultados indicam que a cultura da cana-de-açúcar torna-se inviável economicamente em algumas áreas, mostrando-se patente o esforço para encontrar formas de adaptação às condições climáticas mais severas, como por exemplo, o uso de irrigação.

Em anos secos, quase a totalidade das áreas sofrerá deficiência hídrica acentuada, apresentando condições de inaptidão, o que poderá colocar a colheita em risco, sendo necessário investir em irrigação nos períodos de maiores deficiência hídricas. Por outro lado, em anos chuvosos, assim como no período anterior (2010-2040) mais da metade da Zona da Mata apresentará condições ideais ao cultivo, com apenas 17% da área apresentando restrições hídricas, o que sugere que serão anos de boa produção.

O zoneamento agroclimático futuro espacializado para o primeiro período (2010-2040), no cenário regular, tem semelhança com o mapa de limitação por deficiência hídrica elaborado por Ribeiro (1982) (Figura 22), no qual o município de Timbaúba apresenta forte limitação ao cultivo da cana devido a acentuada deficiência hídrica (RIBEIRO, 1982). No

período de 2010-2040, esse mesmo município apresenta aptidão restrita a inapta, devido a deficiência hídrica acentuada, mostrando que nessa região, e algumas áreas adjacentes poderão sofrer frequentes limitações climáticas para o cultivo da cana.

Figura 23- Limitações de deficiência hídrica na zona úmida costeira do estado de Pernambuco.



Fonte: Ribeiro (1982). Adaptado pela autora.

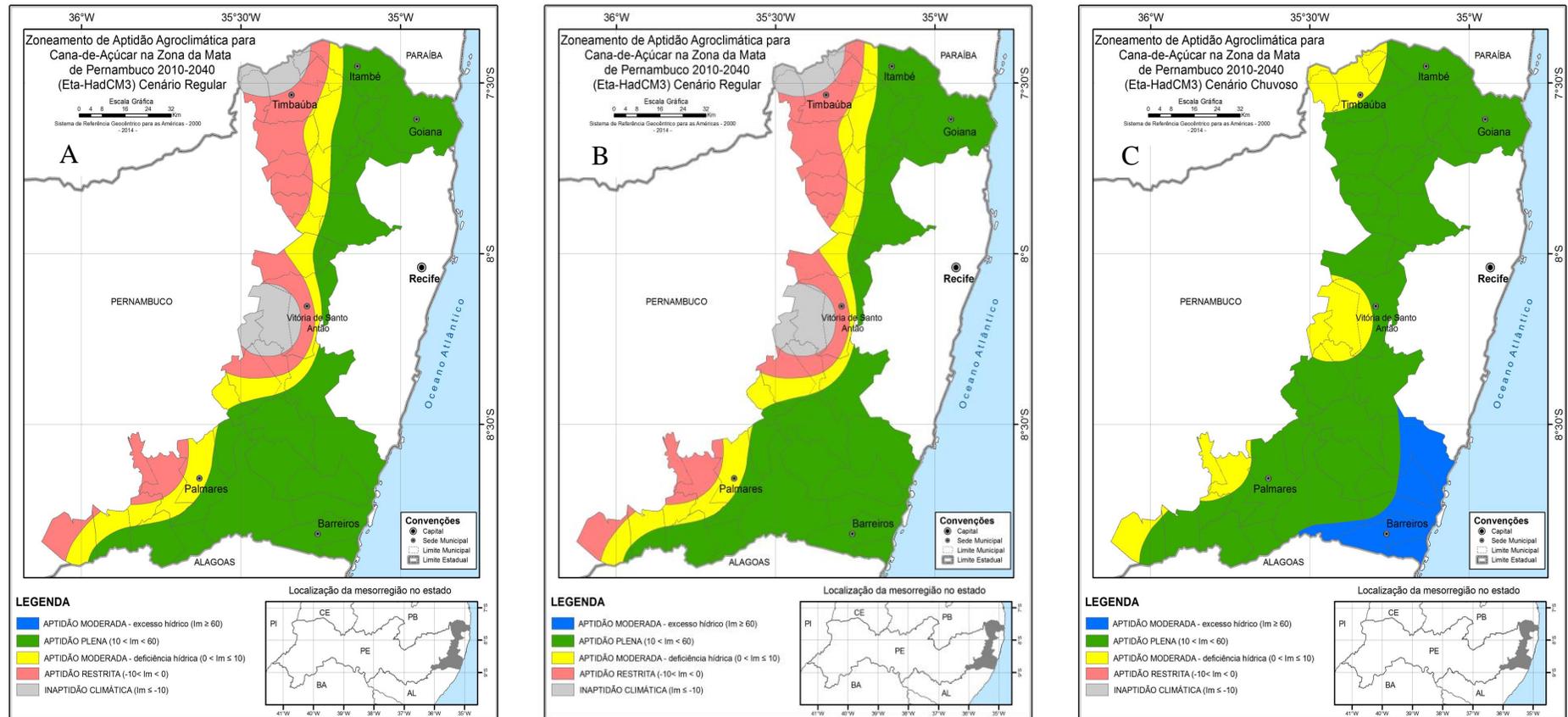
A região Oeste da Mata Norte e a microrregião de Vitória de Santo Antão são as áreas que mais sofrerão com as restrições hídricas, com apenas uma pequena faixa de aptidão moderada. Por outro lado, na Mata Sul, onde as condições atuais são favoráveis ao plantio da cana, como observou Ribeiro (1982), com o exemplo do município de Barreiros, as condições ideais no primeiro período, continuarão com aptidão plena, até os limites de Palmares, que, como observado anteriormente, já apresentava condições moderadas. Torna-se claro que as mudanças geográficas, nesse primeiro período (2010-2040) em anos regulares (Figura 23A) foram mais suaves, devido às mudanças menos acentuadas das projeções dos elementos climáticos.

Nos anos secos (Figura 23B), a cultura sofrerá restrições em quase toda a Zona da Mata, comprometendo a colheita. Nessas condições, serão necessários investimentos em irrigação para diminuir o impacto causado pela deficiência hídrica. Por outro lado, em anos

chuvosos (Figura 23C) observa-se o oposto, em que quase toda a mesorregião apresenta aptidão plena para o cultivo da cana, e uma pequena faixa de condições moderadas por deficiência hídrica, em áreas que, em condições regulares de chuva eram inaptas. Além disso, ainda apresenta uma pequena faixa com aptidão moderada por excesso hídrico, na região do município de Barreiros, devido ao aumento de precipitação pluvial nessa região em relação as condições atuais.

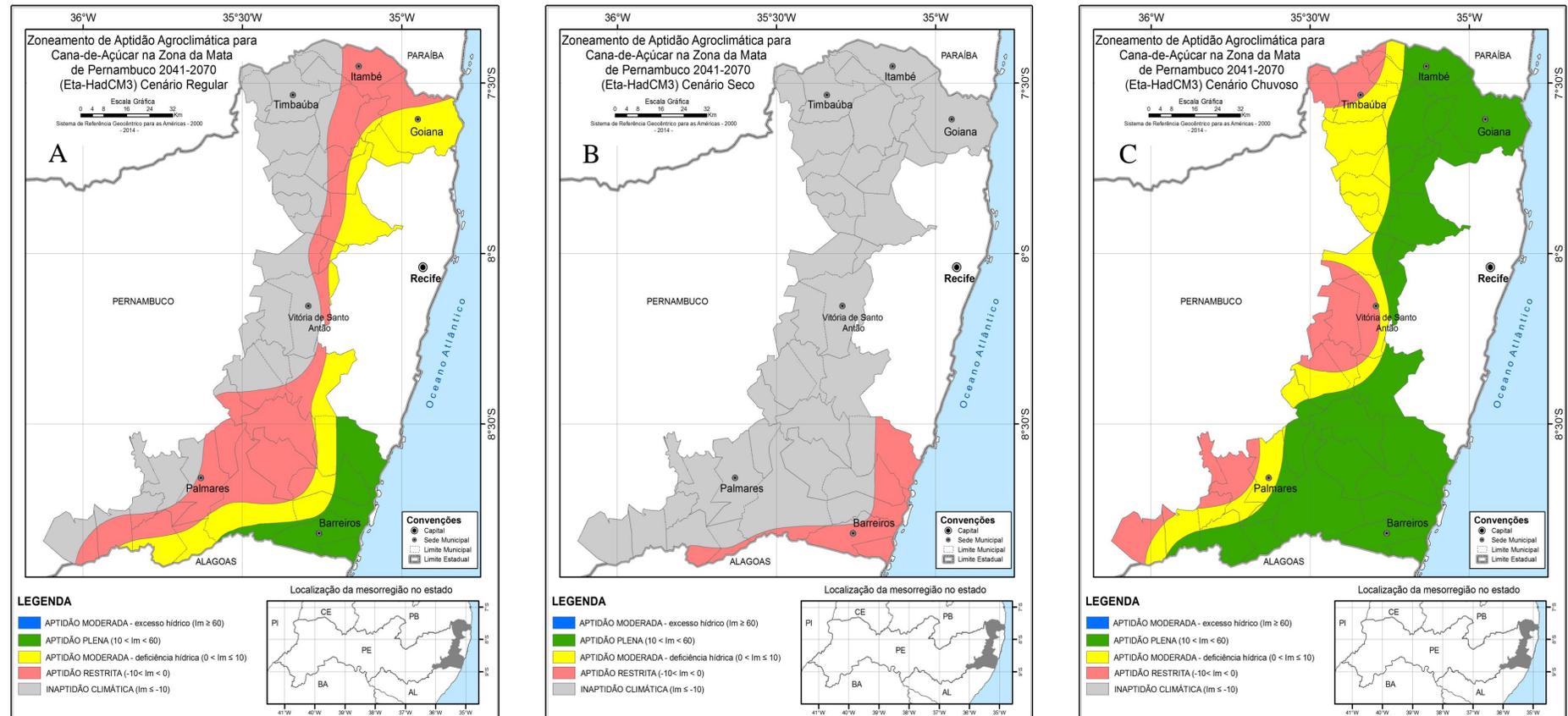
Em 2041-2070, em anos regulares (Figura 24A), a cultura sofrerá maiores restrições ao cultivo (aptidão plena), em que as partes Norte e central da Zona da Mata apresentarão as piores condições, com transição de aptidão moderada (por deficiência hídrica) até inaptas, no sentido leste-oeste, à medida que diminui a influência marítima. A Mata Sul que hoje é a área com condições mais favoráveis, também será fortemente influenciada pelas limitações hídricas somadas as altas temperaturas, apresentando apenas uma pequena faixa de área de aptidão plena no município de Barreiros e áreas vizinhas. Esta situação é agravada em anos secos (Figura 24B) em que quase a totalidade da mesorregião apresentará condições inaptas, enquanto que em anos chuvosos (Figura 24C), mesmo com altas temperaturas, a maior oferta hídrica dará condições ideais em todo o lado Leste da Mata Norte e em quase toda Mata Sul.

Figura 24 - Zoneamento de aptidão agroclimática futuro da cultura da cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco, com projeções do modelo regional Eta-HadCM3 no período de 2010-2040, A- Cenário Regular; B- Cenário Seco e C- Cenário Chuvoso.



Fonte: Autora (2014).

Figura 25- Zoneamento de aptidão agroclimática futuro da cultura da cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco, com projeções do modelo regional Eta-HadCM3 no período de 2041-2070, A- Cenário Regular; B- Cenário Seco e C- Cenário Chuvoso.



Fonte: Autora (2014).

5. CONCLUSÕES

1. As projeções do modelo da precipitação pluvial indicam um padrão geral de redução progressiva, com diminuição nos totais anuais de até 40% em 2010-2040 e até 60% em 2041-2070, com a situação mais crítica na mesorregião do Sertão e Sertão de São Francisco.
2. As projeções também indicam possíveis aumentos das temperaturas médias, máximas e mínimas em torno de 1 a 3°C, no período de 2010-2040, e de 1 a 4°C no período de 2041-2070, mais concentrados no verão austral. Esses aumentos poderão elevar os índices de evapotranspiração já que o aumento da temperatura do ar estará somado às reduções da precipitação pluvial.
3. O zoneamento agroclimático para os anos de 2010-2040 mostrou uma situação um pouco mais otimista para o cultivo da cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco, com aumento de 7% nas áreas de aptidão plena e redução das áreas inaptas, em relação ao zoneamento atual. O quadro se mantém favorável em anos secos e chuvosos, com mais áreas adequadas ao cultivo, no entanto, com mais áreas com aptidão moderada e restrita do que áreas com aptidão plena.
4. No período de 2041-2070, a cultura da cana-de-açúcar poderá sofrer maiores restrições hídricas, devido à redução da precipitação pluvial e ao aumento da temperatura. Poderá haver mais áreas com condições restritas à inaptas do que com condições ideais ao cultivo da cana, o que inviabilizará seu cultivo em boa parte da mesorregião até o fim do século, já que reduzirá o rendimento econômico.
5. Se as projeções estiverem corretas, fica evidente a necessidade de medidas de adaptação seja por manejo ou variedades mais resistentes da cana-de-açúcar, ou até mesmo estudos que possibilitem encontrar culturas que possam substituir a cana, considerando aspectos físicos e socioeconômicos, e que sejam mais resistentes a altas temperaturas e baixa precipitação nas áreas mais críticas na Zona da Mata.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a avaliação das simulações do modelo, com o propósito de diminuir os erros sistemáticos, ficou claro que a simulação da precipitação apresenta incertezas, sejam em valores totais ou na variabilidade sazonal. Em contrapartida, a temperatura do ar é melhor simulada pelo modelo, e apresenta ajustes satisfatórios depois das correções dos erros sistemáticos. No entanto, recomenda-se que as modelagens climáticas continuem se aperfeiçoando na geração dessas simulações, ainda mais quando se trata de projeções regionais da precipitação pluvial, já que a modelagem regional objetiva o entendimento dos impactos climáticos futuros, direcionados a avaliação de vulnerabilidade e estratégias de mitigação e adaptação às alterações climáticas. Da mesma forma, é importante o aperfeiçoamento de metodologias de avaliação e correção dos erros sistemáticos.

Com relação ao zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar na Zona da Mata, a partir de 2041 quase toda a mesorregião poderá apresentar condições climáticas inviáveis para a cultura da cana-de-açúcar, o que limitará o seu cultivo para fins econômicos. Provavelmente, a viabilidade futura dessa cultura irá depender da implantação de sistemas de irrigação e /ou melhorias genéticas com a finalidade de minimizar os impactos que as mudanças climáticas projetadas poderão acarretar.

Desta forma, espera-se que os resultados obtidos possam subsidiar novas pesquisas direcionadas a medidas de adaptação ou até mesmo de mitigação dos problemas que poderão ser causados à cana-de-açúcar pelas condições climáticas futuras mais severas, não se limitando apenas ao clima, mas levando em consideração também as condições pedológicas e a disponibilidade hídrica (CAD) dos diferentes tipos de solo da mesorregião. Sugerem-se que sejam priorizados estudos que visem o aprimoramento do conhecimento do potencial pedoclimático para a cultura da cana em condições ambientais futuras. Da mesma forma, é importante investigar outras culturas que poderiam ser adaptadas a tais condições pensando tanto no benefício econômico quanto no social, além de apontar outras culturas energéticas que poderiam ser implantadas na região afetada.

Esta pesquisa apresentou relevantes contribuições nos estudos de mudanças climáticas, uma vez que ao invés de generalizar para a escala do Nordeste do Brasil, centralizou seus estudos no Estado de Pernambuco. Outro fator importante é a relação destas mudanças no estudo de aplicações agrícolas na Zona da Mata com o objetivo de subsidiar pesquisas e/ou políticas agrícolas no estado de Pernambuco.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, L. P. de et al. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no Norte de Minas Gerais. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 5, p. 437-449, 2011.

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P.; MARENGO, J.A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L.A.; FERNANDEZ, J.P.R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI**: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 3. Brasília: CPTEC/INPE; IAG/ USP; FBDS. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Diretoria de Conservação da Biodiversidade, 2007. 108p.

ANNE- Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasília, DF). **Atlas de energia elétrica no Brasil**. 3 ed. Brasília, 2008. 236p. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap4.pdf > Acesso em: agosto de 2013.

ARAÚJO FILHO, J.C. et al. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco**: Boletim de Pesquisa, n. 11. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 378p. Disponível em: ≤ http://www.uep.cnps.embrapa.br/zape/Boletim_de_Pesquisa_Final.pdf > Acesso em: Setembro de 2013.

ASSAD, E.; PINTO, H. S. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. In: DECONTO, J. G. (Coord.). **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Embrapa Agropecuária: Unicamp, 2008. 83p. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/climaeagricultura/download.html>>. Acesso em: agosto de 2013.

BARBIERI, V.; BACCHI, O. O. S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979, Mossoró. **Anais ...** Mossoró: SBAgro, 1979. p. 192-197.

BARROS, A. H. C.; VAREJÃO-SILVA, M. A.; TABOSA, J. N. **Zoneamento agroecológico do estado de Alagoas**: aptidão climática do estado de Alagoas para culturas agrícolas: Relatório técnico. Recife: Embrapa Solos-UEP Recife, 2012. 81p.

BASALDI, O.V.; FARIA, C. A. C.; NOVAES FILHO, R. Considerações sobre a dinâmica recente do complexo sucroalcooleiro no estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 21-29, 1996.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: UFRGS, 2007. p. 177-241.

BEZERRA, B. G. et al. Zoneamento agroclimático da palma forrageira (*Opuntia* sp.) para o estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 7, p. 755-761, 2014.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, p. 265-278, 1994.

BNDES - Banco Nacional do Desenvolvimento (Rio de Janeiro, RJ). **Bioetanol de cana-de-açúcar**: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro, 2008. 314p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, 2007. 248p.

BRUNINI, O. Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: MIRANDA, L. L.D.; VASCONCELOS, A.C M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 205-218.

BRUNINI, O.; CARVALHO, J. P.; BRUNINI, P. C.; PADUA FILHO, A. L.; ADAMI, S.; ABRAMIDES, P. L. G. Agroclimatic zoning and climatic risks for sugar cane in Mexico - a preliminar study considering climate changes scenarios. In: XXVII ISSCT Congress, PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 27.,2010, Vera Cruz. **Proceedings...** Vera Cruz: ISSCT, 2010. p. 1-13.

CAMPAROTTO, L. B. et al. Validação de dados termopluviométricos obtidos via sensoriamento remoto para o estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 665–671, 2013.

CAMPOS, J. H. B. C.; SILVA, M. T.; SILVA, V. P. R. Impacto do aquecimento global no cultivo do feijão-caupi, no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 4, p. 396-404, 2010.

CANABRAVA, A. P. **História econômica**: estudos e pesquisas. São Paulo: Unesp, 2005. 320 p.

CARVALHO, S. A. D.; FURTADO, A. T. O melhoramento genético de cana-de-açúcar no Brasil e o desafio das mudanças climáticas globais. **Revista Gestão & Conexões**, Vitória, v. 2, p. 22-46, 2013.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 1991, 157 p.

CAVALCANTI, E. P.; SILVA, V. P. R.; SOUSA, F. A. S. Programa computacional para a estimativa da temperatura do ar para a região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 140-147, 2006.

CHOU S. C. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs, *Climate Dynamics*, v. 38, p. 635-65, 2011.

COLLINCHIO, E. **Zoneamento edafoclimático e ambiental para a cana-de-açúcar e as implicações das mudanças climáticas no estado de Tocantins**. 2008. 156 f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (Brasília, DF). **Acompanhamento da safra brasileira**: cana-de-açúcar, v.1 – Safra 2014/15, n.2 - Segundo Levantamento, Brasília, p. 1-20, ago. 2014.

DORRENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p.

EVANGELISTA, B. A. **Projeção de cenários climáticos atuais e futuros de produtividade de cana-de-açúcar em ambientes de cerrado**. 2011. 164f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2011.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. <<http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E>> Acesso em: Agosto de 2014.

FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, A. S.; TEBALDI, C. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. **International Journal Climatology**. v. 27, p. 1547-1578, 2007.

GARCIA, B.I.L.; SENTELHAS, P.C.; TAPIA, L.; SPAROVEK, G. Filling in missing rainfall data in the Andes region of Venezuela, based on a cluster analysis approach. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, p. 225-233, 2006.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e Meio Ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 07-20, 2007.

GUIMARÃES, U. V. **Adaptabilidade e estabilidade de variedades de cana-de-açúcar em Alagoas e Pernambuco**. 2010. 53f. Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada). Universidade Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

HEMPEL, S. et al. A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. **Earth System Dynamic Discussions**, v. 4, p. 49–92, 2013.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007: The physical science basis**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml> Acesso em: setembro de 2013.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Twelfth Session of Working Group I. Summary for Policymakers**, 2013. Disponível em: < [http:// www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep_2013 .pdf](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep_2013.pdf)> Acesso em: Agosto de 2014.

LACERDA, F.F.; NOBRE, P.; DIAS, H.; SANTOS, A. A.: Um Estudo de Detecção de Mudanças Climáticas no Semiárido de Pernambuco In: III Simpósio Internacional de Climatologia, Canela-RS, 2009

MACEDO JÚNIOR, C. **Agrupamento de Modelos de Mudanças Climáticas e Geração de Cenários de Impactos na Agricultura**. 2011. 146f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

MARENGO J. A. et al. 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 2007 (Relatório Técnico).

MARENGO J. A. et al. 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 Paraná river basins. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 1829-1848, 2011a.

MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, P. S. (Org.). Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande, PB: INSA, 2011. 443p. 2011b.

MARIN, F. R. et al. Efeito das mudanças climáticas sobre a aptidão climática para a cana-de-açúcar no estado de São Paulo. In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa, 2007.

MASSEY JR, F. J. The Kolmogorov-Smirnov test of goodness of fit. **Journal of American Statistical Association**, v. 46, p. 68-78, 1980.

MEDEIROS, S. R. R. et al. Potencial agroclimático para a *Alpinia purpurata*, no Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 165–169, 2009.

MEDEIROS, R. M. et al. Classificação climática e zoneamento agroclimático para o município de Amarante – PI. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.7, n. 2, p. 170-180, 2013.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, n. 1-4, p. 195-202, 1984.

MESINGER, F. et al. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclo genesis and for a case of Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, p. 1493-1518, 1988.

MIELKE, P. W. Simple iterative procedures for two-parameter gamma distribution maximum likely wood estimates. **Journal of Applied Meteorology**, v. 15, n. 12, p. 181-183, 1976.

MIRANDA, E. E. (Coord.). **Brasil em relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: abril 2013.

NOBRE, P. **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro** Editores, Ricardo da Cunha Correia Lima, Arnóbio de Mendonça Barreto Cavalcante, Aldrin Martin Perez-Marin.- Campina Grande: INSA-PB, 2011.

OLIVEIRA, S. D.; SILVA, V. P. R.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, M. T.; SOUSA, E. P. Os impactos das alterações climáticas na cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro na região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, p. 170-184, 2012.

OLIVETTE, M. P. et al. Análise comparativa da área plantada com cana-de-açúcar frente aos principais grupos de culturas nos municípios paulistas, 1996-2008. **Revista Informações Econômicas**, v. 40, n. 2, p. 42-59, 2010.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1981. 425 p.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2013: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; MARIN, F. R. Mudanças climáticas globais e a agricultura no Brasil. **Multiciência**, Campinas, v. 8, p. 139-162, 2007.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Ed. Agropecuária, 2002. 478 p.

PESQUERO, J.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. A.; MARENGO J. A. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, 2009. doi:10.1007/s00704-009-0123-z.

PICINNI, A. G. Agrometeorologia: desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 157-170, 1999.

POSSAS, J. M. C. et al. Zoneamento agroclimático para a cultura do pinhão-manso no Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 993-998, 2012.

RESENDE, N. C. et al. Ocorrência da doença ferrugem-do-café (*hemileia vastatrix*) em algumas regiões de São Paulo, baseada nas projeções climáticas do modelo ETA/CPTEC (cenário A1B-IPCC/SRES) In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2011, Guarapari. XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2011.

RIBEIRO, M. R. **Land suitability for sugarcane production in the coastal humid zone of Pernambuco state, Brazil**. 1982. 188f. Tese (Doutorado em Soil Science). University of Saskatchewan, Saskatoon, 1982.

RODRIGUES, J. D. **Apostila fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP-Universidade Estadual Paulista, 1995. 101 p.

RODRIGUES, D. C. et al. Estimativa da ocorrência de temperatura máxima maior que 34 C durante o florescimento e maturação do cafeeiro baseada no modelo Eta/CPTEC 40km (cenário A1B). In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2011, Guarapari. XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2011.

SANTOS, R. S. dos et al. Avaliação da relação seca/produktividade agrícola em cenário de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 2, p. 313 - 321, 2011.

SANTOS, K. S. et al. Análise espacial de dados de precipitação pluvial no agreste pernambucano. In: II Inovagri Internacional Meeting, 2013, Fortaleza. II Inovagri Internacional Meeting, 2013.

SATTERTHWAITE, D. **Climate change and urbanization: effects and implications for urban governance**. United Nations Expert Group Meeting on Population 17, 2007.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: **Proceedings** of the 1968 ACM 23rd National Conference, 1968. p. 517-524.

SILVA, M. T.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. O cultivo do algodão herbáceo no sistema de sequeiro no Nordeste do Brasil, no cenário de mudanças climática. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 80-91, 2012.

SILVA, V. P. R. et al. Risco climático da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 180-189, 2013.

SOARES, D. B.; NÓBREGA, R. S. Detecção de tendências na ocorrência de veranicos na microregião do Pajeú PE. **Revista de Geografia**, Recife, v. 26, p. 263-275, 2009.

THEODORO, A. D. **Expansão da cana-de-açúcar no Brasil: ocupação da cobertura vegetal do cerrado**. 2011. 60f. Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia em Biocombustíveis). Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, São Paulo, 2011.

THON, H. S. C. A note on the gamma distribution. **Monthly Weather Review**, v. 86, n. 4, p. 117-121, 1951.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance**. New Jersey: C. W. Thornthwaite associates. 1957. 311p.

ÚNICA - União da Indústria de Cana-de-açúcar (S). **A indústria da cana-de-açúcar**, 2009. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/documentos/publicacoes/pag=4>> Acesso em: Setembro de 2013.

VALVERDE, M. C.; 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**, São José dos Campos, v. 25, n. 1, p. 125-145, 2010.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; BARROS, A. H. C. **Zoneamento de aptidão climática do estado de Pernambuco para três distintos cenários pluviométricos**. Recife: Governo do Estado de Pernambuco - Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária, 2002, 51p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Versão digital 2. Recife, 2006. Disponível em <http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/livros/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf> Acesso em: Setembro de 2013.

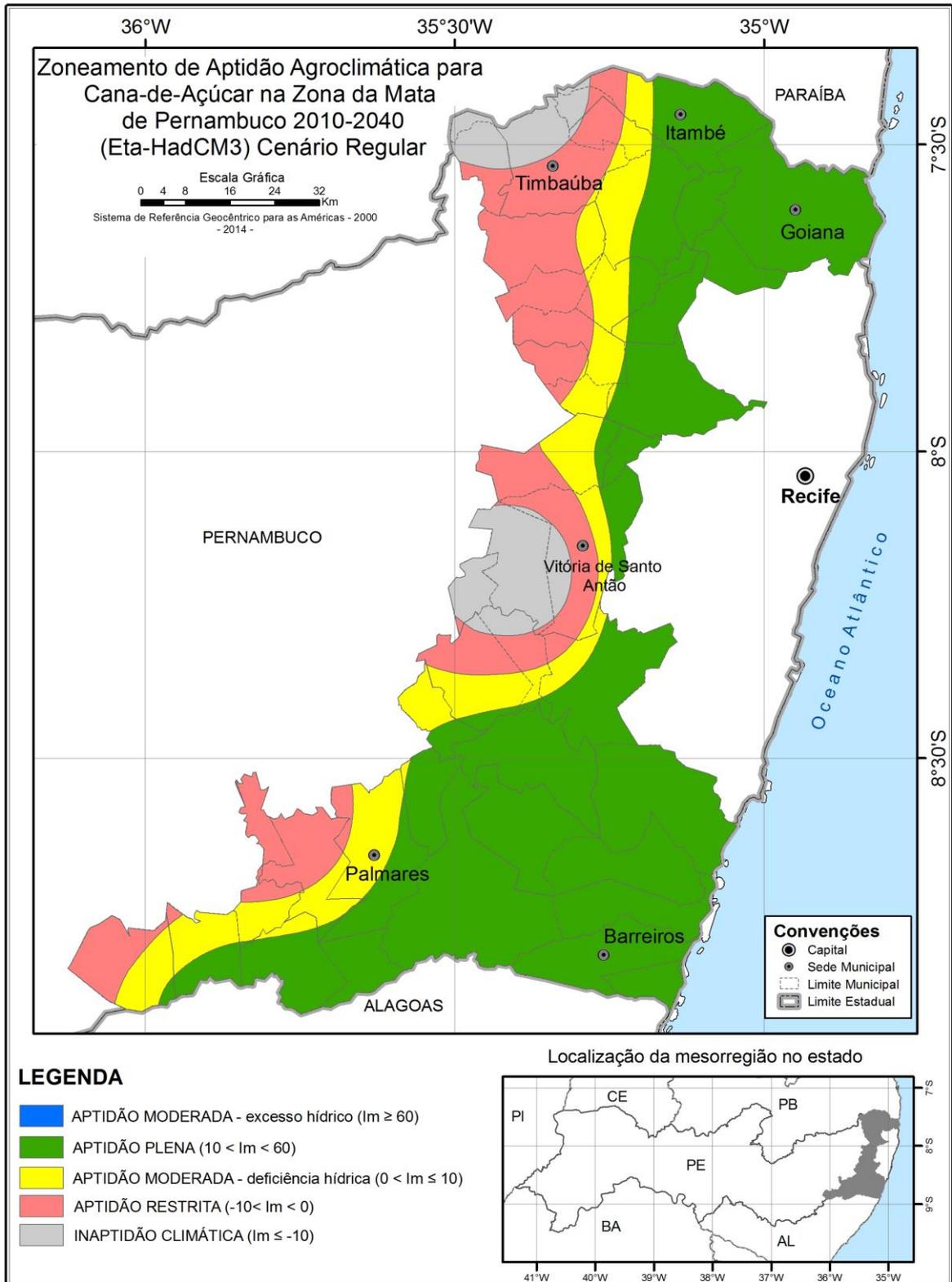
VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P. C. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 237-246, 2014.

WALDHEIM, P. V.; CARVALHO, V. S. B.; CORREA, E.; FRANÇA, J. R. A. Zoneamento climático da cana-de-açúcar, da laranja e do algodão herbáceo para a região Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, p. 28-41, 2006.

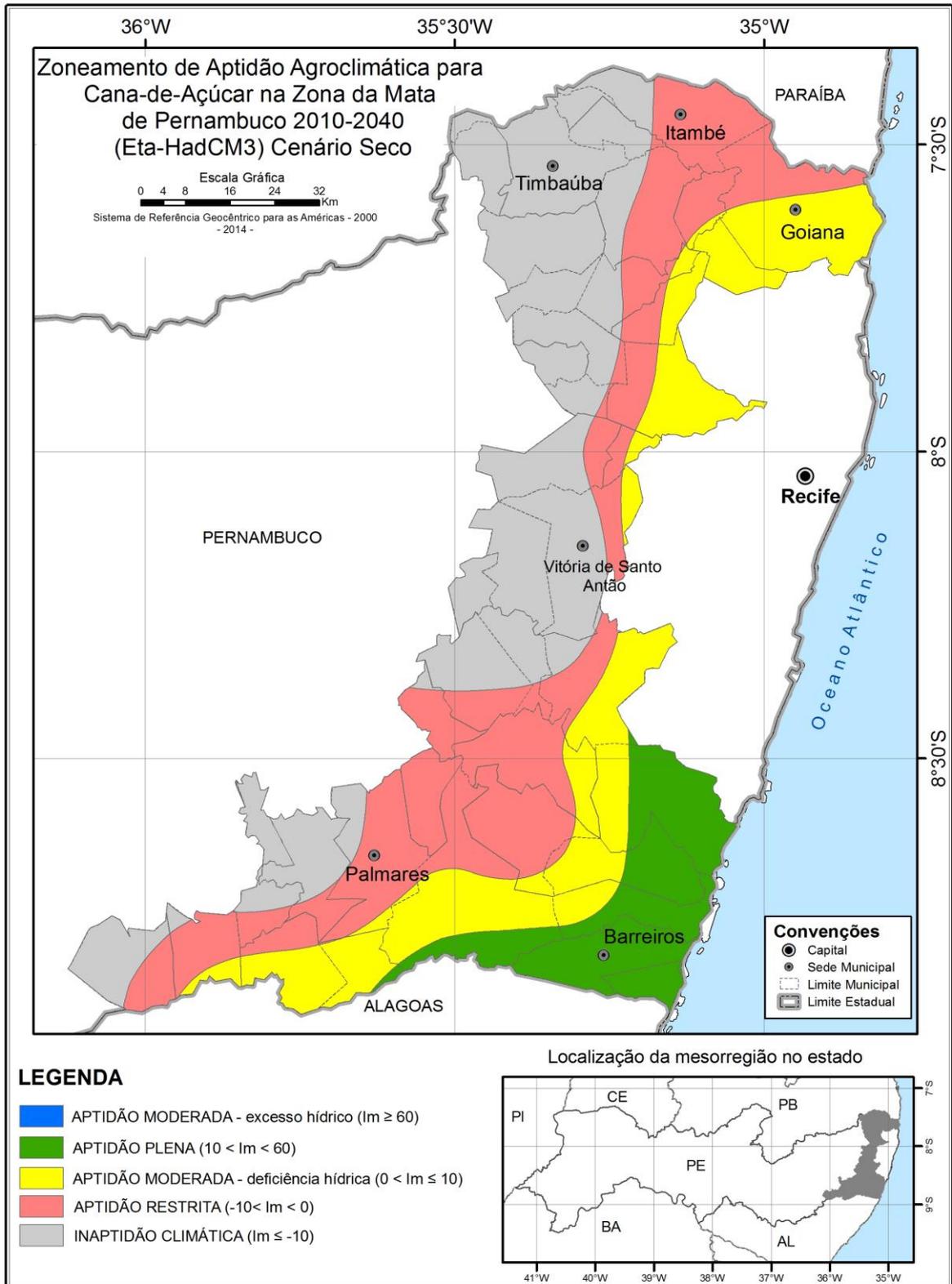
WILLMOTT, C. J. On the validation of models, **Physical Geography**, 2, p.184-194, 1981.

WREGGE, M. S. **Delimitação de regiões com potencial de cultivo econômico da cana de açúcar (*Saccharum spp.*), no estado do Paraná por meio da análise de riscos climáticos.** 2004. 98f. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

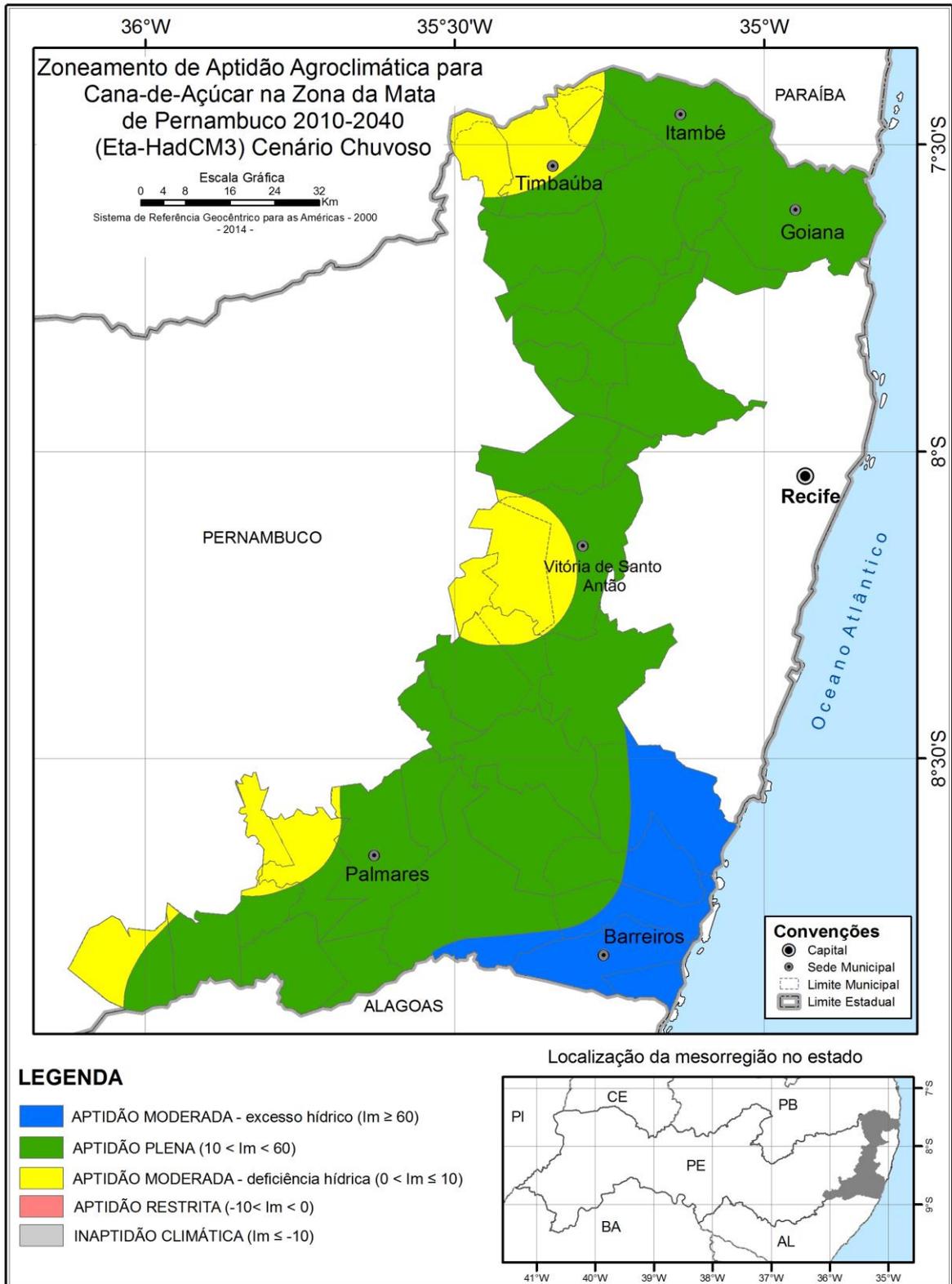
APÊNDICE A – MAPA DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO (2010-2040 CENÁRIO REGULAR)



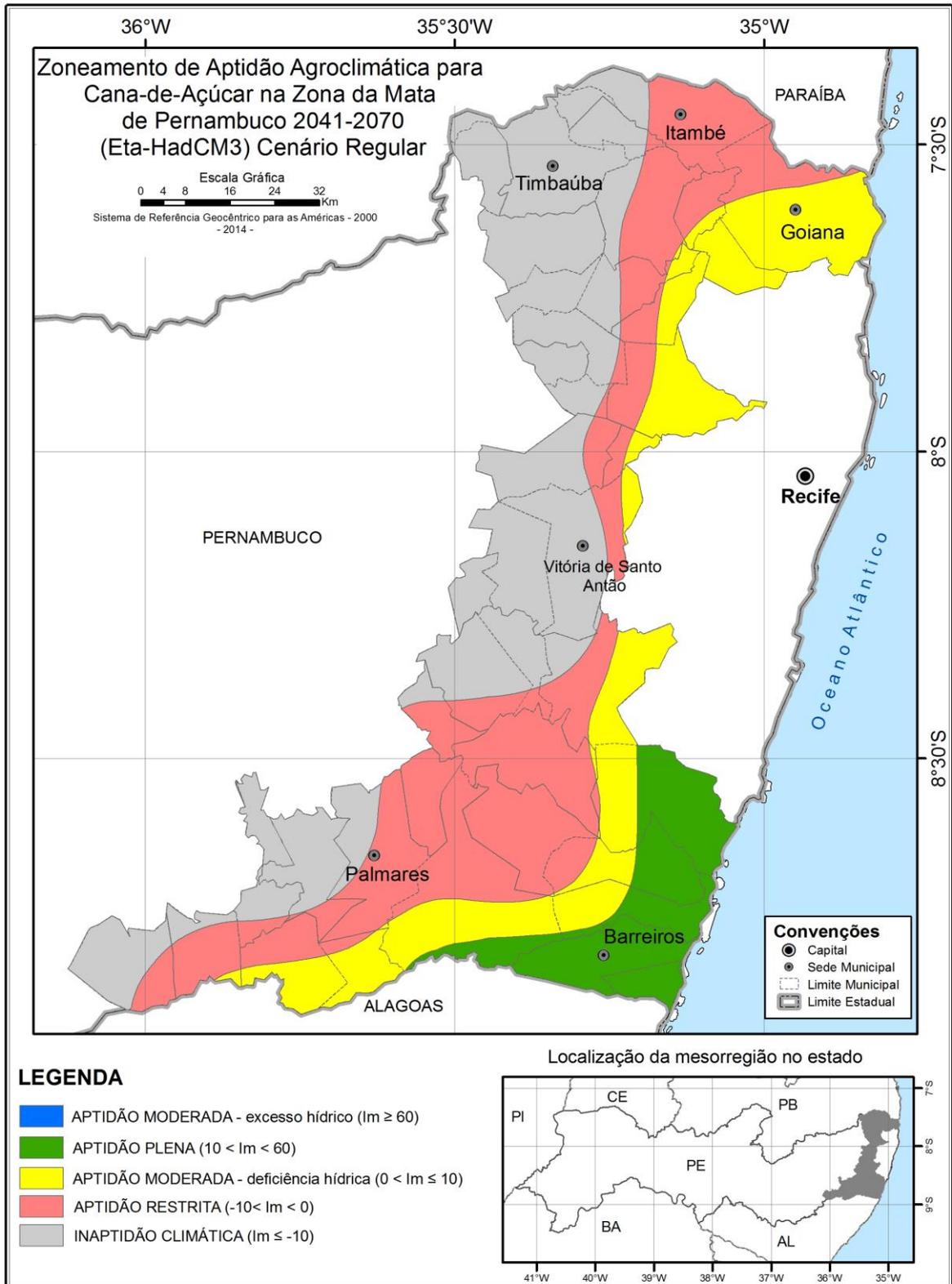
APÊNDICE B – MAPA DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO (2010-2040 CENÁRIO SECO)



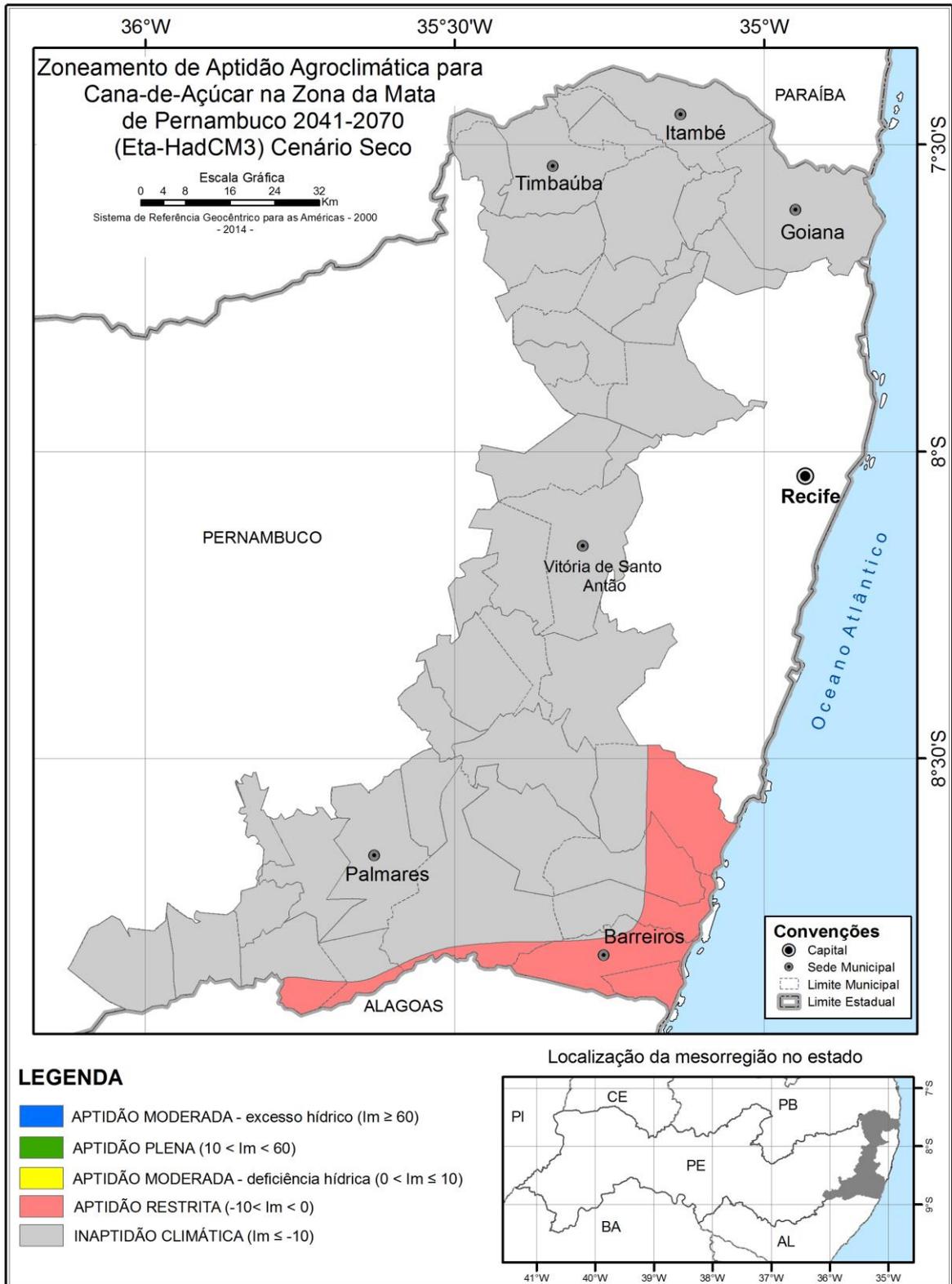
APÊNDICE C – MAPA DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO (2010-2040 CENÁRIO CHUVOSO)



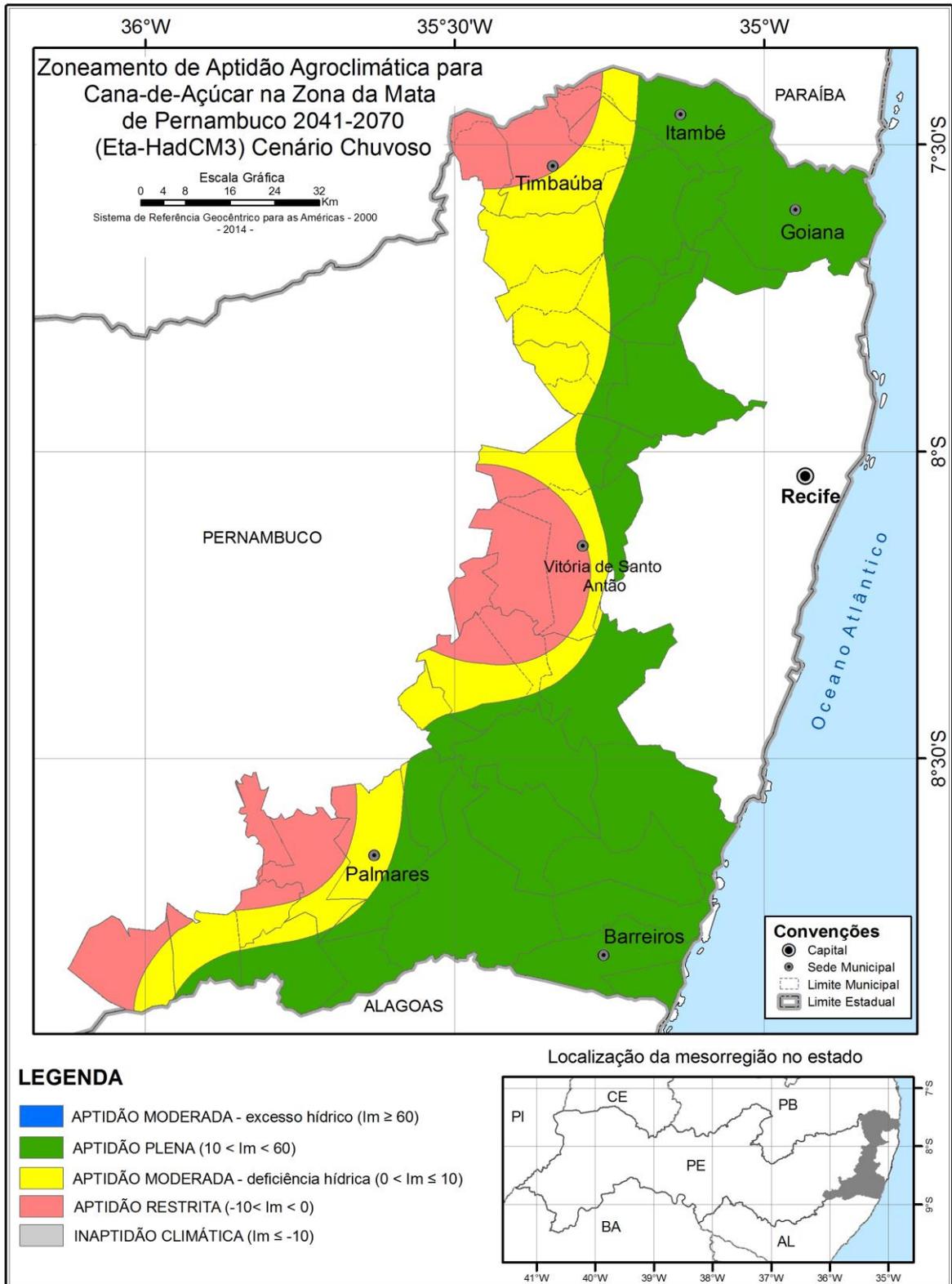
APÊNDICE D – MAPA DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO (2041-2070 CENÁRIO REGULAR)



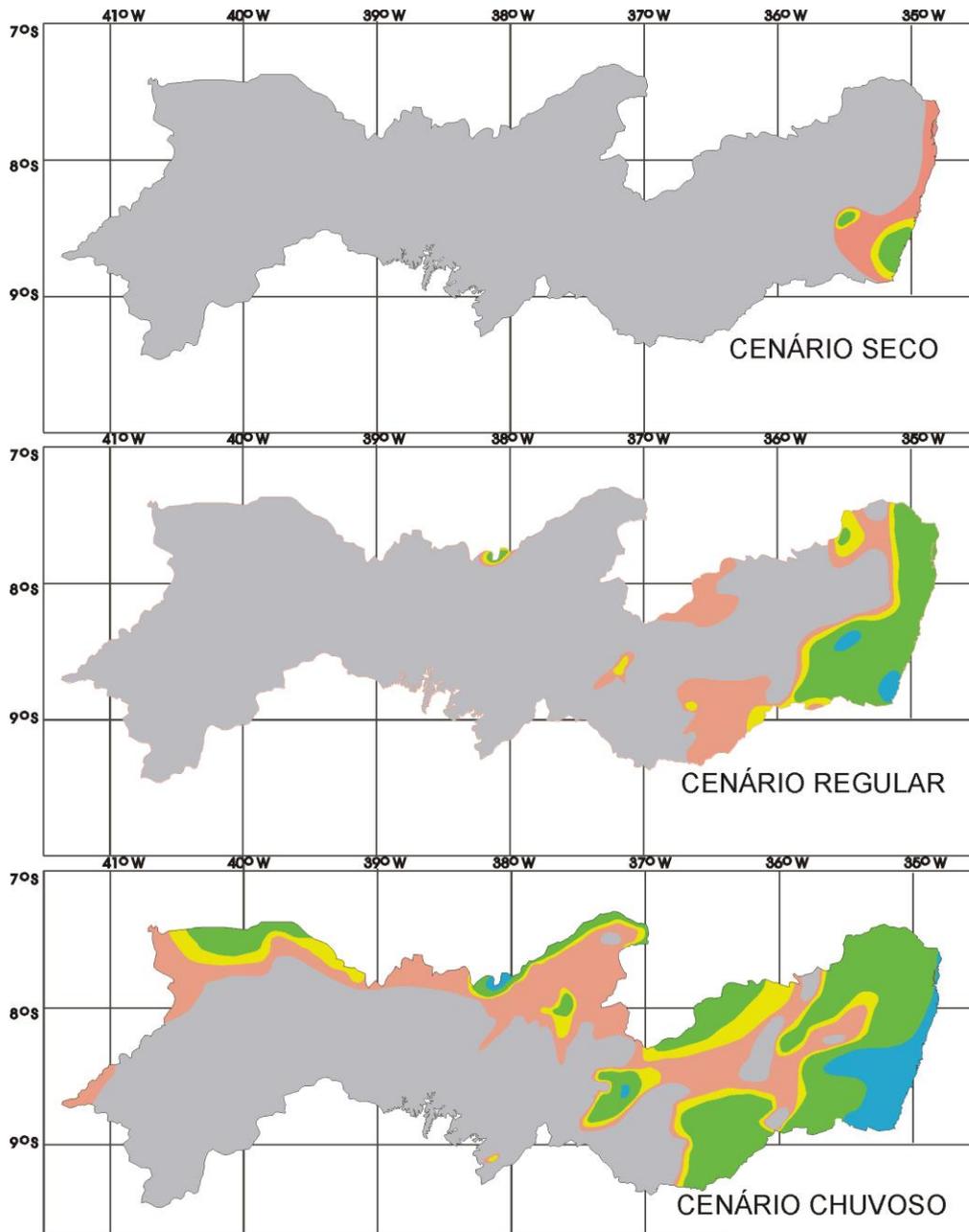
APÊNDICE E – MAPA DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO (2041-2070 CENÁRIO SECO)



APÊNDICE F – MAPA DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO (2041-2070 CENÁRIO CHUVOSO)



ANEXO A – MAPA DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DA CANA-DE-AÇÚCAR (ZAPE)



CLASSES DE APTIDÃO CLIMÁTICA	
	APTIDÃO MODERADA ($I_m \geq 60$) umidade excessiva ou período chuvoso muito longo.
	APTIDÃO PLENA ($10 < I_m < 60$)
	APTIDÃO MODERADA ($0 < I_m < 10$) pequena deficiência hídrica.
	APTIDÃO RESTRITA ($-10 < I_m < 0$) grande deficiência hídrica.
	INAPTIDÃO CLIMÁTICA ($I_m \leq -10$)

**CULTURA DA
CANHA-DE-AÇÚCAR**