

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A  
AMÉRICA DO SUL: IMPACTO NO ZONEAMENTO  
AGROCLIMÁTICO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**FÁBIO DA SILVEIRA CASTRO**

**ALEGRE  
ESPÍRITO SANTO - BRASIL  
FEVEREIRO – 2014**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A  
AMÉRICA DO SUL: IMPACTO NO ZONEAMENTO  
AGROCLIMÁTICO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**FÁBIO DA SILVEIRA CASTRO**

Tese apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, na linha de pesquisa Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio

**ALEGRE  
ESPÍRITO SANTO - BRASIL  
FEVEREIRO – 2014**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

C355c Castro, Fábio da Silveira, 1980-  
Cenários de mudanças climáticas para a América do Sul: impacto no zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar / Fábio da Silveira Castro. – 2014.  
100 f. : il.

Orientador: Alexandre Cândido Xavier.

Coorientador: Roberto Avelino Cecílio.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Aquecimento global. 2. Climatologia agrícola. 3. Balanço hídrico. 4. Diagrama de Taylor. I. Xavier, Alexandre Cândido. II. Cecílio, Roberto Avelino. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDU: 63

---

FÁBIO DA SILVEIRA CASTRO

**CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A AMÉRICA DO SUL:  
IMPACTO NO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

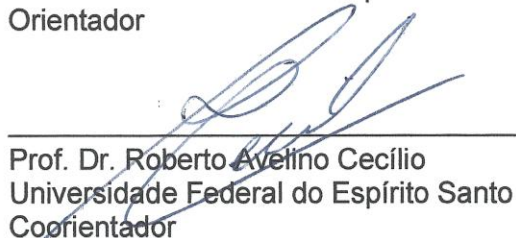
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, na linha de pesquisa Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2014

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Coorientador



Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane  
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Waldir Cintra de Jesus Júnior  
Universidade Federal de São Carlos



Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane  
EMBRAPA Sudeste

AO SOBERANO E PODEROSO DEUS

**AGRADEÇO**

A MINHA AMADA ESPOSA

ANDRESA SILVA BONFIM DE CASTRO

AOS MEUS PAIS

JOÃO BATISTA DE CASTRO

MARTA MARIA DA SILVEIRA CASTRO

E AOS MEUS QUERIDOS AVÓS

VÓ GERALDA (*in memoriam*)

VÔ ANTÔNIO (*in memoriam*)

VÓ ANTÔNIA (*in memoriam*)

VÔ PEDRINHO

**DEDICO**

AOS MEUS IRMÃOS

JEAN CARLOS DE CASTRO

JOÃO BATISTA DE CASTRO JÚNIOR

CUNHADAS

SUÊNIA EMERICH DE CASTRO

EGLALCIANE LYRIO TONGO DE CASTRO

E SOBRINHOS

DAVI EMERICH DE CASTRO

DANIEL EMERICH DE CASTRO

**OFEREÇO**

AO MEU AMADO FILHO

IGOR SILVEIRA BONFIM

**HOMENAGEIO**

***Como é bom render graças ao Senhor e cantar louvores  
ao teu nome, ó Altíssimo; anunciar de manhã o teu amor  
leal e de noite a tua fidelidade.***

**Salmos 92:1-2**

Muito obrigado Senhor Deus por mais esta grande vitória!

## **AGRADECIMENTOS**

Ao todo poderoso e soberano **DEUS** pela vida concedida, bondade e fidelidade em todas as situações enfrentadas.

Ao meu orientador professor Dr. Alexandre Cândido Xavier, pela convivência agradável, apoio, paciência, compreensão, incentivo, dedicação e pelos preciosos ensinamentos transmitidos durante a execução deste trabalho. O meu muito obrigado professor pela confiança e amizade adquirida durante todo este período.

Ao meu coorientador professor Dr. Roberto Avelino Cecílio pela amizade, convivência agradável, dedicação e pelas valiosas contribuições e orientações que foram indispensáveis neste trabalho de doutorado.

Aos Professores Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane e Waldir Cintra de Jesus Júnior e ao pesquisador da EMBRAPA Sudeste Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane pela participação na banca examinadora e pelas valiosas sugestões.

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-UFES), pela oportunidade concedida.

Agradeço a todos os mestres pelos ensinamentos ao longo de minha formação e aqueles que direto ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

A minha esposa, Andresa pelo amor, companheirismo, dedicação, paciência e compreensão em todos os momentos difíceis enfrentados. Agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado. Te amo!!!

Ao meu filho Igor que acabou de chegar ao mundo e nos trouxe muita alegria. Vou sempre me lembrar dos seus momentos de alegria (gritosss, rrrs!!) durante a elaboração da tese. Filho papai te ama!

Aos meus amados pais, João Batista de Castro e Marta Maria da Silveira Castro pelo exemplo de vida, dignidade, simplicidade, dedicação e pelos valiosos ensinamentos concebidos ao longo da vida. Pai e mãe, obrigado pela compreensão e apoio, sem vocês não teria conseguido alcançar esta vitória.

Aos meus irmãos, Jean Carlos de Castro e João Batista de Castro Júnior, pelo apoio incondicional em todas as horas que precisei e pelo incentivo durante todos esses anos. Não podia esquecer é claro das minhas queridas cunhadas Suênia Emerich e Eglalciane. Os meus sinceros agradecimentos.

Aos meus amados sogros, Dona Graça e Sr. João pelo exemplo de vida, pelas orações e incentivos em todos os momentos difíceis. Agradeço a Deus por ter conhecido vocês.

A todos os demais familiares pelo incentivo e apoio.

Aos meus irmãos em Cristo da Igreja Presbiteriana do Brasil em Porto Canoa (Serra) e Ibatiba, que me incentivaram e ajudaram nos momentos mais difíceis, creio que Deus ouviu as orações dos irmãos, pois os meus objetivos foram alcançados, em especial ao Pastor Elias Silva Santos, exemplo de vida, a minha gratidão.

Aos meus amigos e colegas do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) Campus Ibatiba e Colatina pelo apoio e incentivo, em especial ao Prof. José Maria de Souza pessoa que admiro muito.

Aos meus amigos e colegas de Pós-graduação pela convivência agradável e descontraída, em especial a Daiani, Lilianne, Luciano e Valéria.

A todos da república Katapulta em especial o líder Rafael Esteves.

A todos os meus amigos e amigas, mesmo que aqui não estejam citados, por me incentivar e contribuir para vencer mais esta etapa. Muito obrigado pelo carinho, atenção e por acreditarem em mim.



## **BIOGRAFIA**

**FÁBIO DA SILVEIRA CASTRO**, filho de João Batista de Castro e Marta Maria da Silveira Castro, nasceu em 13 de setembro de 1980 na cidade de Muriaé, estado de Minas Gerais.

Concluiu o segundo grau na escola de 1º e 2º graus Profª. Hilda Miranda do Nascimento, em Porto Canoa na cidade de Serra, estado do Espírito Santo.

Ingressou no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-UFES/Alegre - ES em 2001), graduando-se Engenheiro Agrônomo no mês de dezembro do ano de 2005.

Em março de 2006 iniciou o curso em nível de mestrado do Programa de Pós Graduação em Produção Vegetal - PPGPV, área de concentração Fitotecnia no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA - UFES/Alegre - ES), obtendo o título de mestre em abril de 2008.

Em março de 2010 iniciou no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA - UFES/Alegre - ES) o curso em nível de doutorado do Programa de Pós Graduação em Produção Vegetal - PPGPV, tendo como linha de pesquisa Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas, obtendo o título de doutor em fevereiro de 2014.

## RESUMO

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) através do seu Quarto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas Globais (IPCC-AR4), publicado em 2007, atribui as emissões de gases de efeito estufa como a principal causa do aumento médio das temperaturas e alerta para uma elevação entre 1,8 °C e 6,4 °C até 2100, podendo modificar assim a aptidão climática para as culturas agrícolas em diversas regiões do planeta. Diante disso, existe a necessidade de substituição dos combustíveis fósseis por fontes renováveis e limpas de energia, como o etanol. A cana-de-açúcar apresenta-se, portanto, como uma cultura estratégica na produção do etanol. O presente trabalho teve como objetivos: 1) avaliar o desempenho dos Modelos Climáticos Globais (MCGs) do IPCC-AR4 na simulação de dados climáticos de temperatura do ar e precipitação pluviométrica para o período anual e mensal; 2) elaborar o zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar para a América do Sul considerando o clima referência e o futuro para as décadas de 2020, 2050 e 2080 em função do cenário de emissão A1B considerado pessimista e que usa um equilíbrio entre todas as fontes de energia. Para a avaliação do desempenho dos MCGs, foram utilizados dados climáticos médios mensais observados de precipitação e temperatura do ar provenientes do *Climatic Research Unit* (CRU) e dados simulados oriundos dos 22 MCGs do IPCC (cenário *20c3m*) compreendidos entre o período de 1961-1990, além do Multimodel (*ensemble*) – MM que é a média da combinação dos dados de todos os modelos. O desempenho dos MCGs foi avaliado pelos índices estatísticos: desvio padrão, correlação, raiz quadrada da média do quadrado das diferenças centralizadas e o

“bias” dos dados simulados com os observados, que foram representados no diagrama de Taylor. Para a etapa da elaboração do zoneamento agroclimático procedeu-se o cálculo dos balanços hídricos (referência e futuros) da cultura, pelo método de Thornthwaite & Mather (1955). Para o cenário referência, utilizaram-se dados das médias mensais da precipitação e temperatura provenientes do CRU, enquanto que para as projeções futuras, dados provenientes das anomalias do Multimodel (*ensemble*) – MM para as décadas de 2020, 2050 e 2080, que foram ajustados, obtendo-se assim as projeções futuras para cada período analisado. Baseado nos mapas temáticos reclassificados de deficiência hídrica anual, temperatura média anual, excedente hídrico anual e no índice de satisfação das necessidades de água (ISNA), realizou-se uma sobreposição dessas informações obtendo assim, os mapas finais do zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar. Posteriormente ao zoneamento, realizou-se a análise das transições (ganhos, perdas e persistências) entre as classes de aptidão climática da cultura. Os resultados mostram que o Multimodel (*ensemble*) – MM para o período mensal apresenta o melhor desempenho entre os modelos analisados. As áreas inaptas correspondem a maior parte da América do Sul e uma expressiva transição entre as classes de aptidão climática da cultura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aquecimento global. Diagrama de Taylor. Balanço hídrico da cultura. Zoneamento agroclimático. Matriz de transição. Cana-de-açúcar.

## ABSTRACT

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) through its Fourth Assessment Report of Global Climate Change (IPCC-AR4), published in 2007, assign emissions of greenhouse gases as the main cause of the increase in average temperatures and alert an increase between 1.8 °C and 6.4 °C until 2100, thus being able to modify the climatic aptitude for crops in different regions of the planet. Therefore, a necessity exists to replace fossil fuels with renewable and clean energy sources such as ethanol. The cane sugar, therefore, presents itself as a strategic crop for ethanol production. The present study objective: 1) evaluate the performance of Global Climate Models (GCMs) IPCC-AR4 climate data to simulate air temperature and precipitation for the annual and monthly period; 2) elaborate the agroclimatic zoning of cane sugar to South America considering the climate for future reference and 2020, 2050 and 2080 in function to the emission scenario A1B considered pessimistic and using a balance between all energy sources. For the evaluate the performance of GCMs were used observed monthly mean precipitation and air temperature from the Climatic Research Unit (CRU) and simulated data deriving from the 22 GCMs from the IPCC (scenario 20c3m) between the period 1961 to 1990, beyond Multimodel (*ensemble*) - MM which is the average of the combination of data from all models. The performance of GCMs was evaluated by statistical indices: standard deviation, correlation, root-mean-square differences of the centralized and the "bias" of the simulated data with the observed, which were represented in the Taylor diagram. To the stage of development of agroclimatic zoning proceeded to calculate the water balance (reference and future) of culture by the method of

Thornthwaite & Mather (1955). For the reference scenario used data from monthly averages of precipitation and temperature from the CRU, while for future projections, data from the Multimodel anomalies (*ensemble*) - MM for the 2020, 2050 and 2080, which were adjusted, thus obtaining future projections for each analyzed period. Based on thematic maps reclassified on annual water deficit, annual mean temperature, annual water surplus and the Index Satisfaction of Water Requirements (ISNA) held an overlay of this information thus obtaining the final maps of agroclimatic zoning of cane sugar. Subsequently the zoning took place the analysis of transitions (gains, losses and persistence) between classes of climatic aptitude of culture. The results show that the Multimodel (*ensemble*) - MM for the monthly period show the best performance among the models analyzed. The unfit areas correspond to most of South America and a substantial transition between the classes of weather ability of culture.

**KEY WORDS:** Global warming. Taylor diagram. Water balance of culture. Zoning agroclimatic. Matrix transition. Sugarcane.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>15</b> |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>  | <b>18</b> |
| 2.1 – Mudanças climáticas globais.....   | 18        |
| 2.1.1 – O IPCC e as implicações dos relatórios das mudanças climáticas .....                               | 19        |
| 2.1.2 – Cenários de projeções climáticas do IPCC .....   | 20        |
| 2.1.3 – Modelos Climáticos Globais (MCGs).....   | 22        |
| 2.1.3.1 – Método do diagrama de Taylor na avaliação de desempenho de modelos de simulações climáticas..... | 23        |
| 2.2 – Regionalização ( <i>Downscaling</i> ) dos dados do IPCC .....  | 26        |
| 2.3 – A cultura da cana-de-açúcar .....  | 28        |
| 2.4 – Balanço hídrico da cultura .....   | 30        |
| 2.5 – Zoneamento agroclimático .....   | 31        |
| 2.6 – Matriz de tabulação cruzada .....  | 33        |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>   | <b>34</b> |
| 3.1 – Área de estudo .....   | 34        |
| 3.2 – Dados climatológicos para a avaliação do desempenho dos modelos de simulações climáticas .....       | 35        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3 – Normatização das resoluções e ponderação dos dados climatológicos temperatura do ar e precipitação pluviométrica do IPCC-AR4.....          | 38        |
| 3.4 – Método do diagrama de Taylor.....  | 39        |
| 3.5 – Aquisição e tratamento dos dados climatológicos para o zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar .....                         | 41        |
| 3.6 – Regionalização ( <i>Downscaling</i> ) dos dados do IPCC .....  | 42        |
| 3.7 – Elaboração do balanço hídrico da cultura .....   | 44        |
| 3.8 – Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar ( <i>Saccharum</i> spp.) .....  | 47        |
| 3.9 – Análise de transição entre as classes de aptidão climática da cana-de-açúcar considerando o período referência e futuro .....              | 52        |
| 3.9.1 – Elaboração da matriz de transição de classes de aptidão.....   | 52        |
| 3.9.2 – Elaboração dos mapas de transição entre classes de aptidão climática da cana-de-açúcar.....  | 56        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>57</b> |
| 4.1 – Avaliação do desempenho dos modelos climáticos globais do IPCC-AR4 através do método do diagrama de Taylor.....                            | 57        |
| 4.1.1 – Desempenho dos modelos climáticos para as simulações de dados de precipitação pluvial mensal e anual.....                                | 57        |
| 4.1.2 – Desempenho dos modelos climáticos globais para as simulações das médias anual e mensal da temperatura do ar.....                         | 62        |
| 4.2 – Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar para o clima referência e as projeções futuras de mudanças climáticas globais do IPCC-AR4 ..... | 71        |
| 4.3 – Espacialização dos dados da temperatura média anual do ar e deficiência hídrica anual para o cenário referência e projeções futuras .....  | 66        |
| 4.4 – Avaliação do impacto das mudanças climáticas no Brasil.....  | 81        |
| 4.5 – Matriz de transição entre classes de aptidão climática da cana-de-açúcar.....  | 83        |
| <b>5. CONCLUSÃO .....</b>  | <b>93</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>94</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Os riscos decorridos das mudanças climáticas globais, sejam naturais ou pela ação antrópica, têm levado grande preocupação à comunidade científica. Para estudar tais mudanças o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) fornece informações científicas através de relatórios sobre as mudanças do clima que já aconteceram e que podem vir a acontecer no mundo (IPCC, 2007).

De acordo com o IPCC (2007), as mudanças que estão correndo no clima do planeta são os maiores desafios enfrentados atualmente pela sociedade humana, uma vez que, a intensificação da emissão de gases do efeito estufa tem causado impactos que ameaçam os sistemas naturais.

Segundo BUCKERIDGE et al. (2008), a queima de combustíveis fósseis, a modificação do uso ou cobertura do solo e o crescimento populacional vêm colaborando para o aumento do aquecimento global e as alterações que estão ocorrendo no clima do planeta.

Para avaliar os impactos das mudanças que estão ocorrendo no clima, o IPCC trabalha com Modelos Climáticos Globais (MCGs), que são definidos como complexas representações entre os componentes e suas interações que afetam o clima, sendo comumente usados como ferramentas para projetar o clima futuro.

O IPCC disponibiliza dados climáticos provenientes de diferentes modelos, porém ainda existem poucos estudos avaliando o uso e o desempenho dos modelos climáticos, uma vez que muitos não são adequados para simular os dados de determinada região.



De acordo com os resultados das simulações das mudanças do clima projetados para o futuro pelos MCGs do IPCC-AR4, estão ocorrendo mudanças climáticas significativas no globo terrestre. Entre essas mudanças, observa-se o aquecimento médio global da superfície do planeta que é atribuído ao aumento da emissão de gases do efeito estufa - GEE, principalmente o CO<sub>2</sub> proveniente do uso expressivo de combustíveis fósseis (IPCC, 2007). Diante de tal situação, diversos países vêm discutindo a necessidade de diminuir as emissões de GEE. Uma das medidas adotadas é a busca por fontes de energias alternativas e limpas que não utilizem combustíveis fósseis na matriz energética mundial (BARBARISI et al., 2007).

Os biocombustíveis, especialmente o etanol proveniente da cana-de-açúcar, apresentam-se como uma fonte de energia limpa e renovável, e por isso o aumento de sua produção vem sendo mundialmente demandada (JANK & RODRIGUES, 2007). Os autores ainda afirmam que comparadas às matérias-primas para a produção de etanol, considerando o balanço energético, a produtividade e as emissões evitadas de GEE, o etanol derivado da cana-de-açúcar é superior ao etanol derivado do milho, da beterraba e de cereais.

Segundo Furtado et al. (2011), o etanol é uma fonte de energia renovável e limpa para o meio ambiente e que atenua o efeito das emissões de gases de efeito estufa, mitigando possíveis impactos ambientais decorrentes das mudanças climáticas, principalmente pelo setor de transportes que contribui com cerca de 50% das emissões de CO<sub>2</sub> proveniente da queima de combustíveis fósseis (GOLDEMBERG, 2011).

Mediante ao exposto, é justificado a expansão das áreas com a implantação da cultura da cana-de-açúcar para a produção de etanol, uma vez que poderia amenizar o efeito do aquecimento global, já que estaria relacionada à diminuição das emissões de combustíveis fósseis. Porém, para identificar as áreas potencialmente favoráveis à cultura da cana-de-açúcar, é importante observar as condições climáticas da região, afim de atender as exigências da cultura, tornando-se, portanto, relevante à elaboração de zoneamentos agroclimáticos.

O zoneamento agroclimático é considerado uma ferramenta fundamental na delimitação de áreas climaticamente favoráveis para diversas culturas agrícolas, auxiliando na organização, planejamento das atividades agrícolas e o uso dos recursos naturais de maneira racional, de modo a refletir na otimização dos investimentos. Como ferramenta de decisão o zoneamento agroclimático deve ser

constantemente atualizado, uma vez que é passível de inclusão de novas metodologias de estudo, visando maiores informações sobre as exigências climáticas da cultura e maior retorno dos investimentos (SEDIYAMA et al., 2001). Nesse sentido, diversos zoneamentos agroclimáticos vêm sendo realizados para a cultura da cana-de-açúcar (BARBARISI et al., 2007; MALUF et al., 2007; BRUNINI et al., 2008; MARIN et al., 2012; ASSAD et al., 2013).

Considerando o exposto, o presente trabalho teve como objetivos:

- avaliar o desempenho dos 22 modelos climáticos globais do IPCC-AR4 além do Multimodel (*ensemble*) – MM que é a média da combinação dos dados de todos os diferentes modelos na simulação dos dados climáticos das variáveis climatológicas, temperatura do ar e precipitação pluviométrica, para o período anual e mensal para a América do Sul;
- elaborar o zoneamento agroclimático para a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na América do Sul, considerando a condição do clima de referência 1961-1990 (década de 1980) e os cenários de mudanças climáticas projetadas para os períodos de 2010-2039 (década de 2020), 2040-2069 (década de 2050) e 2070-2099 (década de 2080).

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 – Mudanças climáticas globais

O termo mudanças climáticas globais pode ser entendido como a variação em escala global de elementos do clima da Terra tais como: a temperatura, a precipitação, a nebulosidade, a umidade do ar entre outras variáveis climáticas em relação às médias históricas. As alterações climáticas podem ser causadas por processos naturais ou decorrentes das atividades antropogênicas.

Segundo o IPCC (2007), as mudanças climáticas referem-se a uma variação estatisticamente significativa nas condições médias do clima por um longo período como décadas ou mais. As variações das alterações climáticas são averiguadas através de registros científicos nos valores médios ou desvios da média, apurados durante o passar dos anos. Atividades antrópicas como a emissão de poluentes na atmosfera e as mudanças no uso do solo são as principais causas das mudanças do clima.

As mudanças climáticas foram aceleradas nos períodos que sucedem a Revolução Industrial. Tal afirmação é baseada na utilização de energia proveniente da queima de combustíveis fósseis, gerando um aumento nos gases de efeito estufa (GEE) como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ). O aumento na  $\text{CO}_2$  pode ser proveniente principalmente da queima de combustíveis fósseis e a mudança do uso do solo, enquanto as do metano e o óxido nitroso são devidos na maior parte à agricultura (MARENGO, 2006; IPCC, 2007).

O IPCC (2007), através da divulgação dos resultados do seu quarto relatório de avaliação das mudanças climáticas (AR4), alerta para um aumento médio na temperatura global entre 1,8 °C e 4,0 °C até 2100 e, caso a população e a economia continuarem a crescer rapidamente e se for mantido o consumo intenso de combustíveis fósseis, esse aumento ainda pode ser maior chegando a 6,4 °C. O relatório ainda afirma que o regime de precipitação e a temperatura irá sofrer uma alteração significativa até o final do século XXI.

Marengo (2006) aponta as anomalias da temperatura do ar e a precipitação pluviométrica do planeta como uma das principais causas de vários fenômenos que estão ocorrendo no mundo, tais como: furacões, extremos de secas e enchentes em locais que normalmente esses fenômenos não aconteciam. As mudanças do clima ainda interferem na produtividade das culturas, trazendo consequências econômicas no agronegócio como um todo.

### **2.1.1 – O IPCC e as implicações dos relatórios das mudanças climáticas**

As mudanças climáticas vêm sendo estudadas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), criado em 1988, pela *United Nations Environment Programme* (UNEP) e a *World Meteorological Organization* (WMO). O IPCC é formado por uma equipe de cientistas de diversos países, que tem como finalidade fornecer informações científicas através de relatórios periódicos sobre as mudanças do clima que já aconteceram e podem vir a acontecer no mundo, além de propor medidas de mitigação e/ou adaptação às mudanças do clima (IPCC, 2007).

Desde sua criação, o IPCC elaborou e concluiu quatro relatórios completos com diretrizes e metodologias de avaliação das mudanças climáticas. O último relatório concluído (AR4) foi lançado em 2007, sendo que para sua elaboração os cientistas se dividiram em três grupos de trabalho, e elaboraram o AR4 em três volumes: Grupo de Trabalho I - responsável pela elaboração do volume intitulado como A Base da Ciência Física; Grupo de Trabalho II - Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade; e Grupo de Trabalho III - Mitigação e Mudanças Climáticas.

Atualmente, o IPCC está desenvolvendo o quinto relatório de avaliação das mudanças climáticas (AR5), iniciado em abril de 2008, e com previsão de finalização em outubro de 2014. Ele está sendo desenvolvido seguindo a mesma estrutura de trabalho do AR4.

O grupo de Trabalho I - A base da Ciência Física, responsável pela contribuição no AR5, concluiu os seus trabalhos em novembro de 2013 e já entregou o seu relatório. Abaixo estão relatados de forma resumida alguns resultados já encontrados (IPCC, 2013).

- O CO<sub>2</sub> influenciará em grande parte o aquecimento médio da superfície global até o final do século XXI, e mesmo se forem cessadas as emissões de CO<sub>2</sub>, os aspectos das alterações climáticas ainda persistirão por muitos séculos devido às emissões passadas e presente.
- A mudança climática irá afetar os processos do ciclo de carbono, de maneira a agravar o aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Além disso, a absorção do carbono pelos oceanos causará um aumento na sua acidificação.
- O nível do mar continuará a subir no século XXI, provavelmente isso ocorrerá devido ao aumento do aquecimento dos oceanos e o aumento das perdas de massa das geleiras.
- A temperatura média global continuará a subir, apresentando variabilidade interanual.

O AR5 do grupo de Trabalho I ressalta que o aquecimento da atmosfera e do oceano é influenciado pelas ações antrópicas, e que esta evidência tem crescido desde o AR4. Afirma ainda que a influência humana provavelmente tem sido a principal causa de parte do aquecimento global, observado desde meados do século XX (IPCC, 2013).

### **2.1.2 – Cenários de projeções climáticas do IPCC**

O IPCC trabalha com cenários de emissões que representam as projeções sobre o comportamento futuro das emissões globais de gases de efeito estufa. Os cenários climáticos levam em consideração a demografia, o desenvolvimento socioeconômico e as mudanças na tecnologia, assim como suas interações (IPCC, 2007).

Em 2000, o IPCC exibiu um conjunto de cenários climáticos denominados SRES (*Special Reports on Emission Scenarios*) que são baseados nas projeções de simulações de emissões GEE para o futuro, analisados em três épocas diferentes centrados nas décadas de 2020 (entre os anos de 2010 a 2039), 2050 (entre os anos de 2040 a 2069) e 2080 (entre os anos de 2070 a 2099). Esses cenários foram

utilizados como base para a elaboração do terceiro e do quarto relatório de avaliação das mudanças climáticas.

Os cenários foram divididos em famílias ou grupos considerando uma visão otimista (de baixas emissões de GEE) e uma visão pessimista (de altas emissões de GEE), com ênfase local ou regional, dividindo-se entre os eixos de economia e meio ambiente, para resolver as questões voltadas para os diversos segmentos. Abaixo é apresentada uma descrição resumida de cada cenário (NAKICENOVIC et al. 2000).

- Cenário de Emissões A1 – Cenário considerado pessimista. Este cenário descreve que no mundo futuro haverá um rápido crescimento econômico, a população global atinge o seu pico em meados do século XXI e declina em seguida. Também se caracteriza pela rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes que minimizam a emissão de GEE. A família de cenário A1 se subdivide em três grupos que descrevem direções alternativas de mudanças tecnológicas no sistema energético, enfatizando o uso intensivo de combustíveis fósseis (A1F1), fontes de energia não fóssil (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B).
- Cenário de Emissões A2 – Cenário considerado pessimista. Descreve um mundo muito heterogêneo, onde a regionalização é dominante, com um aumento contínuo da população mundial. O desenvolvimento econômico é essencialmente orientado para a região, e se tem crescimento econômico per capita e desenvolvimento tecnológico mais fragmentado e lento do que em outros cenários.
- Cenário de Emissões B1 – Cenário considerado otimista – Descreve um mundo convergente, com a população com o mesmo comportamento que no cenário A1. Mudanças rápidas na estrutura econômica, rumo a uma economia de informação e serviços com a introdução de tecnologias limpas e eficientes em relação ao uso dos recursos. A ênfase está em soluções globais, à sustentabilidade ambiental e social incluindo esforços combinados para o desenvolvimento de tecnologia rápida.
- Cenário de Emissões B2 – Cenário considerado otimista – Descreve um mundo no qual a ênfase está em soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. A população global aumenta continuamente, porém com taxa inferior a do cenário A2, com níveis intermediários de

desenvolvimento econômico e progresso tecnológico menos acelerado e mais diversificado do que nos cenários B1 e A1. O cenário também é orientado em direção à proteção ambiental e igualdade social.

As projeções climáticas futuras vêm de modelos que descrevem o que poderá acontecer com o clima do planeta, levando em consideração os cenários de emissões, porém ainda existem muitas incertezas na construção e aplicação desses modelos. As principais fontes de incertezas encontram-se nos pressupostos sobre o desenvolvimento econômico e social do mundo futuro, conduzindo para cenários alternativos de emissões de gases de efeito estufa, cuja probabilidade não pode ser facilmente avaliada (TEBALDI & KNUTTI 2007).

### **2.1.3 – Modelos Climáticos Globais (MCGs)**

Os modelos climáticos globais (MCGs) são definidos como complexas representações matemáticas do clima de uma região, provenientes das interações dos processos que afetam o clima do planeta, tais como: os processos físicos na atmosfera, no oceano e na superfície da terrestre, apresentando como dados de saídas os elementos do clima. A finalidade dos MCGs é a obtenção das projeções futuras do clima, para isto, são utilizados dados dos cenários de emissões e concentrações de gases de efeito estufa e de aerossóis na atmosfera como forçantes climáticas (IPCC, 2007).

Os estudos com MCGs são de fundamental importância, uma vez que eles são utilizados como ferramentas para a obtenção de informações futuras de diversas variáveis climáticas, tais como: umidade, precipitação, pressão do ar, temperatura do ar, vento, entre outras, a fim de avaliar as mudanças climáticas que estão ocorrendo ou virão a ocorrer no planeta. Os dados climáticos das projeções futuras provenientes dos MCGs estão disponibilizados gratuitamente no endereço eletrônico <http://www.ipcc-data.org/> sobre responsabilidade do *Data Distribution Centre* (DDC) do IPCC.

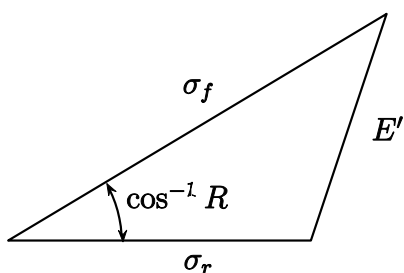
### 2.1.3.1 – Método do diagrama de Taylor na avaliação de desempenho de modelos de simulações climáticas

A metodologia do diagrama de Taylor ainda é pouco conhecida, porém permite visualizar e analisar as informações com mais facilidade quando comparadas às tabelas (TAYLOR, 2001). Taylor ainda ressalta que a avaliação de desempenho de modelos na simulação de dados climáticos é essencial em estudos de mudanças climáticas. A comparação entre os modelos é baseada na similaridade entre dados estatísticos observados e simulados pelos modelos.

Para qualificar e avaliar o desempenho de modelos climáticos, lança-se mão de índices estatísticos, tais como: média, desvio padrão, correlação, “bias” e raiz quadrada da média do quadrado das diferenças centralizadas ( $E'$ ), comparando os resultados dos dados simulados com os observados (GLECKLER et al., 2008; PIERCE et al., 2009).

Taylor propõe uma metodologia que permite visualizar quatro índices estatísticos ao mesmo tempo em apenas um diagrama, facilitando a análise dos resultados e a escolha do modelo que apresentar o melhor desempenho (TAYLOR, 2001). Esses diagramas vêm sendo utilizados por diversos trabalhos que visam à avaliação de modelos (PIERCE et al., 2009; STEVENS et al., 2013; MENDICINO & SENATORE, 2013).

À construção do diagrama de Taylor, parte-se da similaridade da Equação  $E' = \sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_r R}$  com a equação da lei dos cossenos, que relaciona um ângulo interno de um triângulo com seus lados  $a = \sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \cos \theta}$ , conforme mostra a Figura 1.

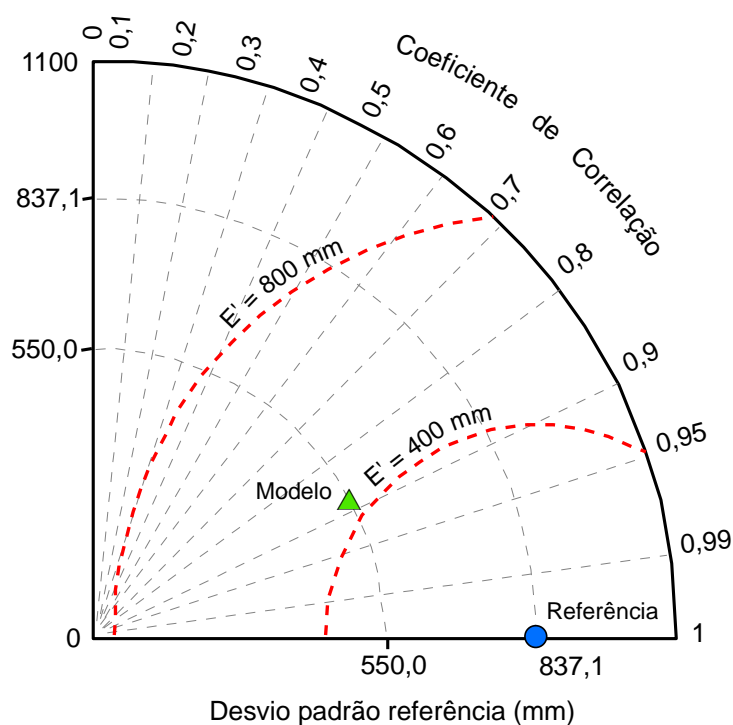


**Figura 1** – Esquema para construção do diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001).



Observa-se que quanto mais os lados  $\sigma_f$  e  $\sigma_r$  forem semelhantes e quanto menor for o valor de  $E'$ , melhor será a metodologia utilizada.

As estatísticas foram representadas pelo diagrama de Taylor (Figura 2) construído pela representação de  $\frac{1}{4}$  de círculo. Os eixos x e y foram utilizados para representar o desvio padrão, sendo que sobre o eixo x é colocado o valor do desvio padrão da referência ( $\sigma_r$ ) e sobre o eixo y o desvio padrão dos valores simulados pelos modelos ( $\sigma_f$ ). A distância radial da origem à posição representando o outro modelo é proporcional ao  $\sigma_f$  e o azimute é dado pela correlação ( $R$ ).



**Figura 2** – Diagrama de Taylor para a exibição das estatísticas através de  $\frac{1}{4}$  do círculo.

Fonte: Próprio autor.

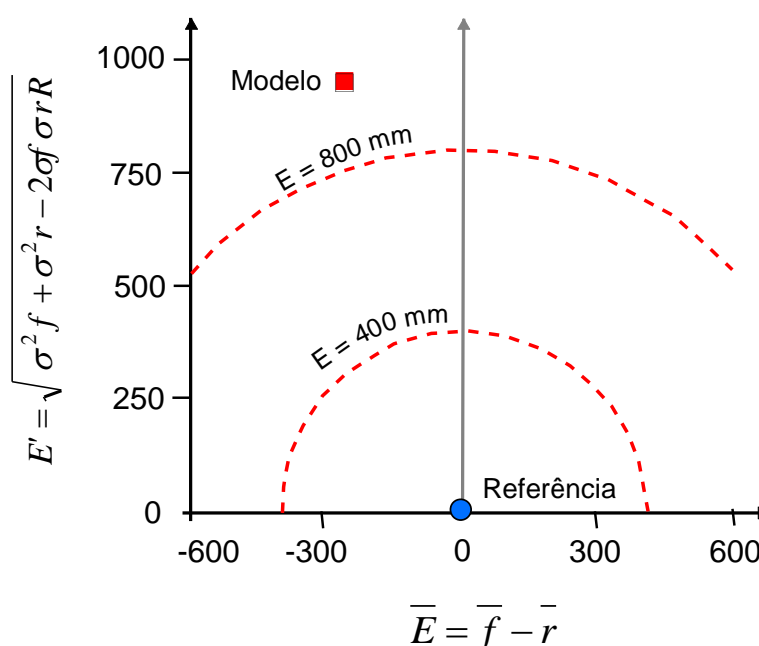
A Figura 2 exemplifica o diagrama de Taylor aplicado para a variável precipitação pluviométrica anual onde é possível observar os índices estatísticos dos dados de referência (observados) e os dados de um determinado modelo (simulados). O valor do desvio padrão da referência é colocado ao longo do eixo x e

equivale a 837,1, já o modelo mostra um desvio padrão de 550,0. A correlação entre os dados de referência e simulados é de aproximadamente 0,9, enquanto o  $E'$  é um pouco maior que 400 (TAYLOR 2001).

A correlação entre os dados observados e simulados nunca pode ser maior do que 1, sendo que quanto mais próximo eles estiverem de 1 mais bem correlacionados estarão, já uma correlação próxima a zero indica que os dados das duas variáveis não estão correlacionadas.

As quatro estatísticas analisadas juntas pelo diagrama de Taylor permite observar o grau de similaridade entre os dados observados e os dados simulados pelo modelo, auxiliando, portanto, na escolha do modelo que apresentar o melhor desempenho.

Segundo Gleckler, et al. (2008), quanto mais próximo o modelo estiver do ponto de referência (observação) menor é o valor de  $E'$ . Os autores ainda afirmam que o “bias” ( $\bar{E}$ ) é outro índice importante na avaliação do desempenho de modelos, sendo definido como a diferença entre a média dos dados do modelo (simulados) e os dados de referência (observados), porém ele não é mostrado no diagrama de Taylor, sendo necessária a elaboração de outro gráfico conforme mostrado na Figura 3.



**Figura 3** – Gráfico do “bias” ( $\bar{E}$ ) para a variável precipitação pluviométrica anual.

Fonte: Próprio autor.

No exemplo da Figura 3, observa-se que o modelo subestimou a precipitação anual em quase 300 mm, apresentando o valor de  $E'$  próximo a 1000.

## 2.2 – Regionalização (*Downscaling*) dos dados do IPCC

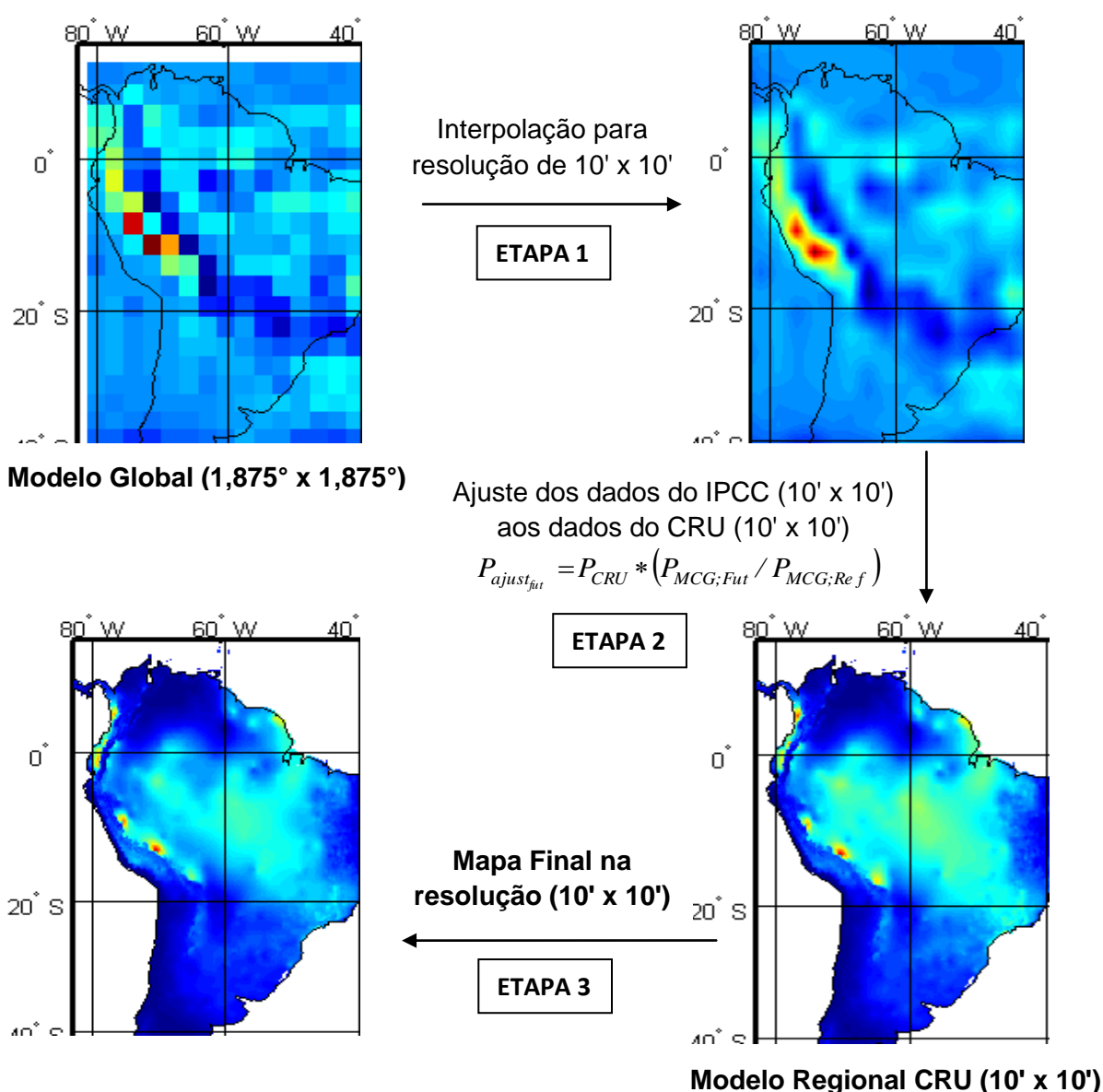
Os MCGs apresentam dificuldades em captar a variação da topografia, a cobertura da superfície terrestre e a curvatura da costa dos continentes com maiores detalhes, uma vez que os modelos apresentam resolução espacial de centenas de quilômetros, sendo, portanto, uma limitação quanto à utilização deste em estudos de mudanças climáticas devido a sua baixa resolução espacial (MISRA et al., 2003; WILBY & FOWLER, 2010). Os autores ainda afirmam que a projeção do clima através de MCGs com resolução espacial acima de 200 km não é suficiente para estudar detalhadamente a distribuição espacial da precipitação pluviométrica, portanto, torna-se essencial o estudo de técnicas que aperfeiçoem o conhecimento da variável na escala temporal e espacial.

Mediante ao exposto, lança-se mão da técnica de regionalização ou também denominada de *downscaling*, a qual consiste na transferência de informações climatológica para uma grade com resolução espacial maior, através do acoplamento dos resultados dos modelos de baixa resolução espacial com um de alta resolução espacial. Portanto, o modelo de baixa resolução (modelos globais) servirá para alimentar o de alta resolução (modelos regionais) (DICKINSON et al., 1989; LIU et al., 1994).

Segundo Moncunill et al. (2002), a combinação de um modelo regional com um modelo global através da técnica de regionalização, permite obter resultados de projeções climáticas de boa resolução, em um nível temporal e espacial mais compatível com o processo de tomada de decisão. A regionalização, portanto, torna-se uma importante ferramenta para os usuários. Diversos estudos têm sido realizados utilizando a técnica da regionalização (ALVES et al., 2005; CHRISTENSEN et al., 2007; FAN, 2009).

De acordo com Marengo et al. (2009), avanços significativos têm sido observados na aplicação da técnica de regionalização. Os autores ainda afirmam que a aplicação da técnica de regionalização permite detalhar, de forma mais expressiva, as variações locais através de simulações em uma escala mais refinada.

Segundo Chen et al. (2012), os métodos de regionalização são muito utilizados devido à facilidade de sua implementação, sendo que os autores ainda ressaltam que para os estudos de impactos das mudanças climáticas, o aumento da resolução espacial dos dados de saída dos MCGs torna-se essencial. A Figura 4 exemplifica o método de regionalização (*downscaling*) dos dados de anomalia da variável climática precipitação obtida por um modelo global com resolução espacial de  $1,875^\circ \times 1,875^\circ$  com um modelo regional com resolução espacial de  $10' \times 10'$ .



**Figura 4** – Etapas da técnica de regionalização (*downscaling*) usando dados da média anual da precipitação pluviométrica provenientes de um modelo climático global ( $1,875^\circ \times 1,875^\circ$ ) com o modelo regional (CRU) ( $10' \times 10'$ ).

Fonte: próprio autor.

### 2.3 – A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é originária do sudeste Asiático, na região da Nova Guiné e Indonésia (DOORENBOS & KASSAM, 1994; FIGUEIREDO, 2008). É uma planta própria de climas tropicais e subtropicais, pertencendo à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, sendo cultivada sob condições de sequeiro ou sob irrigação, sendo encontradas entre as latitudes de 35°N e 35°S (ALFONSI et al., 1987; DOORENBOS & KASSAM, 1994). No Brasil, a cana-de-açúcar foi trazida em 1532 por Martim Afonso de Sousa, e passou a ter importância significativa para o País (SZMRECSÁNYI, 1979).

Segundo Figueiredo et al. (1995), a extensa amplitude de áreas de cultivo pelo mundo, deve-se à variedades mais resistentes a patógenos e a adaptação da cultura às diversas condições ambientais provenientes de programas de melhoramento genético.

Porém, é sabido que a cana-de-açúcar está sujeita as influências de diversos fatores ambientais que ocorrem ao longo de seu ciclo, afetando diretamente sua produtividade. Alguns desses fatores não são passíveis de manejo, enquanto outros como o solo e a disponibilidade de água podem ser gerenciados visando à alta produtividade. Sendo assim, o conhecimento dos fatores climáticos da região onde a cultura está inserida torna-se de fundamental importância no sucesso da produção.

De acordo com Barbieri et al. (1982), as exigências climáticas da cana-de-açúcar dependem da finalidade do cultivo. Fatores limitantes ao cultivo estão mais relacionados com a temperatura e a precipitação pluvial do que com os fatores edáficos, uma vez que a cultura se adapta bem aos diferentes tipos de textura do solo, desde a arenosa até a muito argilosa, inclusive em solos com alto teor de matéria orgânica (KOFFLER & DONZELI, 1987).

Para Crispim (2006), o clima ideal para a cultura é aquele que apresenta duas estações distintas, sendo uma quente e úmida para as fases de germinação, perfilhamento e desenvolvimento vegetativo, seguida de uma estação fria e seca para favorecer a maturação.

Segundo Mello et al. (2009), a cultura da cana-de-açúcar vem se destacando cada vez mais no cenário mundial por ser uma cultura de grande eficiência na produção de energia limpa (etanol), mitigando a intensidade do efeito estufa.

No Brasil, as lavouras canavieiras são encontradas em quase todo o seu território apesar da grande diversidade climática que existe no país, no entanto, independente da região, a cultura exige chuvas nas fases de crescimento e desenvolvimento, e um período de restrição hídrica ou térmica na fase de maturação (MACHADO, 2008).

De acordo com estimativas da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a cultura da cana-de-açúcar está em expansão e a previsão é que o Brasil tenha um acréscimo de 3,7% em relação à safra de 2012/13. A área de cana ocupada destinada ao setor sucroalcooleiro e outros fins, na safra de 2013/14, está estimada em 8,79 milhões de hectares. Desse total, o Estado de São Paulo se destaca como o maior produtor com 51,31% da área plantada, seguido por Goiás (9,3%), Minas Gerais (8,0%), Mato Grosso do Sul (7,09%), Paraná (7,04%), Alagoas (5,02%) e Pernambuco com 3,25%. Nos demais estados produtores, as áreas são menores com representações abaixo de 3,0% (CONAB, 2013).

O principal produto de valor comercial da cana-de-açúcar é a sacarose, que é utilizado na indústria como matéria-prima para a produção de açúcar e etanol, porém, ainda pode ser utilizada na fabricação de aguardente e para forragem (SEGATO et al., 2006).

Com relação aos aspectos ecofisiológicos da cana-de-açúcar, esta é considerada altamente eficiente na conversão de energia solar em energia química (carboidratos) devido ao seu metabolismo C4 (TAIZ & ZEIGER, 2004). Segundo Casagrande & Vasconcelos (2008), a cultura apresenta taxa de crescimento duas a três vezes maior que uma planta do tipo C3, e mesmo em situação de estresse hídrico consegue fazer fotossíntese com eficiência.

De acordo com Machado (1982), a cana-de-açúcar apresenta quatro fases fenológicas diferentes:

- fase de brotação e emergência dos brotos ou colmos primários: nesta fase acontecerá o desenvolvimento do broto a partir do rompimento das folhas lignificadas da gema;
- fase de perfilhamento e estabelecimento da cultura: fase caracterizada pela formação dos perfilhos, sendo que sua associação ao início do acúmulo de sacarose nos colmos determina a produtividade futura da cultura;

- fase de desenvolvimento vegetativo: esta vai do final do perfilhamento até antes da intensa atividade de acúmulo de sacarose;
- fase de maturação: é a fase onde ocorre o intenso acúmulo de sacarose no colmo da planta, é nesta fase que a qualidade da matéria-prima é determinada.

Dependendo do sistema de cultivo e da época de plantio, a cana-de-açúcar pode apresentar ciclo de 12 meses (cana de ano) ou de 18 meses (cana de ano e meio). A cana proveniente da muda é denominada de cana-planta, sendo que após seu corte ocorrerá o início de um novo ciclo através da rebrota que é denominando de cana-soca com duração média de 12 meses. Ciclos contínuos de corte/rebrota podem ser realizados cinco ou mais vezes, dependendo do manejo e da viabilidade econômica (SEGATO, et al., 2006).

## **2.4 – Balanço hídrico da cultura**

O balanço hídrico tem sido largamente utilizado, visando o conhecimento das condições de balanço de água no solo, uma vez que, a estimativa de vários parâmetros provenientes do balanço hídrico é fundamental em estudos de zoneamentos agroclimáticos.

Pereira et al. (2002) definem balanço hídrico como sendo a contabilização sistemática até a profundidade explorada pelas raízes de todos os ganhos e perdas hídricas em um terreno com vegetação, de modo a estabelecer a quantidade de água disponível às plantas em um dado momento. No balanço hídrico são considerados fluxos hídricos positivos (entrada de água no solo) e negativos (saída de água no solo), sendo tais fluxos decorrentes da precipitação, condensação, evaporação e transpiração, escoamento e percolação da água.

O cálculo do balanço hídrico da cultura é uma ferramenta imprescindível em zoneamentos agroclimáticos, uma vez que monitora a variação do armazenamento de água no solo, tornando, portanto, um importante indicador climatológico da disponibilidade hídrica em uma região.

O balanço hídrico pode ser climatológico ou da cultura. O balanço hídrico climatológico consiste na contabilização das quantidades de água que entram e saem de um volume de solo em um dado intervalo de tempo. É baseado no princípio de conservação de massa em um volume de solo coberto por uma vegetação

padrão (grama batatais). No caso do balanço hídrico da cultura, o cálculo do armazenamento de água no solo é realizado levando-se em consideração as fases de crescimento e desenvolvimento de uma cultura específica (PEREIRA et al., 2002; REICHARDT & TIMM, 2004).

No cálculo do balanço hídrico da cultura, a evapotranspiração estimada é a evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>), que depende de um coeficiente de cultura (k<sub>c</sub>), este por sua vez, está em função do índice de área foliar (IAF) da cultura, e tende a variar em função das fases fenológicas da cultura, sendo que em culturas anuais, como a cana-de-açúcar, à medida que ela vai se desenvolvendo o valor de IAF também aumenta até atingir um valor máximo, decrescendo no período de senescência das folhas (PEREIRA, et al., 2002). Segundo Jensen (1968), o k<sub>c</sub> expressa a demanda de água pelas plantas em cada fase de seu desenvolvimento, sendo obtido através da relação entre a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração potencial ou de referência (ET<sub>p</sub> ou ET<sub>o</sub>).

A partir de informações obtidas pelos balanços hídricos confeccionados com os dados meteorológicos médios de uma série histórica de uma região, é possível em uma primeira avaliação conhecer a sua disponibilidade hídrica, fornecendo informações importantes para contornar as limitações existentes, bem como estabelecer estratégias de desenvolvimento a curto e longo prazo (ARAYA et al., 2010).

## **2.5 – Zoneamento agroclimático**

O planejamento agrícola é de fundamental importância na escolha da cultura adequada para um determinado ambiente, sendo o primeiro a ser considerado na implantação de qualquer empreendimento. Dentro das informações climáticas empregadas no planejamento agrícola está o zoneamento agroclimático.

Segundo Brunini (2008), para conhecer regiões que sejam favoráveis ao desenvolvimento de qualquer cultura, a avaliação climática da região torna-se indispensável, uma vez que é preciso conhecer e avaliar se as condições do clima atendem as necessidades da cultura a ser implantada na região.

Pereira et al. (2002) ressaltam que quanto maior for o conhecimento do ambiente, mais hábil se estará para escolher a cultura mais adequada, a fim de se implantar uma atividade agrícola viável.



Devido a grande influência do clima na produção agrícola, a obtenção de informações e pesquisas do clima local é fundamental, uma vez que pode ajudar na tomada de decisões, resultando em menores impactos ambientais e no sucesso da produção (SENTELHAS & MONTEIRO, 2009).

O zoneamento agroclimático pode ser caracterizado como uma importante ferramenta na organização dos programas de trabalhos, no planejamento de implantação das culturas, no uso racional dos recursos naturais, e na otimização dos investimentos, sendo utilizado para delimitar regiões climaticamente homogêneas que sejam favoráveis (aptas) à implantação da cultura, de forma que ela alcance o seu máximo desenvolvimento e produtividade de acordo com o seu potencial genético (SEDIYAMA, 2001; PEREIRA et al., 2002; WALDHEIM et al., 2006).

De acordo com Ometto (1981) e Pereira et al. (2002), o zoneamento agroclimático consiste em uma ferramenta essencial na delimitação de regiões climaticamente homogêneas, que sejam favoráveis ao cultivo de determinada cultura, na qual são estabelecidas as condições climáticas ideais para o seu desenvolvimento e produtividade. Sabe-se que quando as condições de manejo e ambientais são favoráveis à cultura, esta apresentará pleno desenvolvimento alcançando seu máximo em produtividade conforme seu potencial genético.

Estudos desenvolvidos pela Embrapa (2009); Oliveira et al. (2012) e Assad et al. (2013), entre outros, mostram que os resultados obtidos pelo zoneamento agroclimático, permitem determinar áreas com aptidão climática para o plantio e desenvolvimento de determinadas culturas agrícola; avaliar impactos de mudanças climáticas; propor épocas de semeadura; e simular a perda de produtividade potencial devido ao não atendimento das necessidades hídricas e térmicas da cultura.

O zoneamento agroclimático é obtido através da sobreposição de vários planos de informações que caracterizam as necessidades térmicas e hídricas da cultura, tendo como etapas importantes o levantamento das informações climáticas da região estudada com confecção de cartas climáticas básicas e o preparo das cartas finais de zoneamentos (PEREIRA, et al., 2002).

## **2.6 – Matriz de tabulação cruzada**

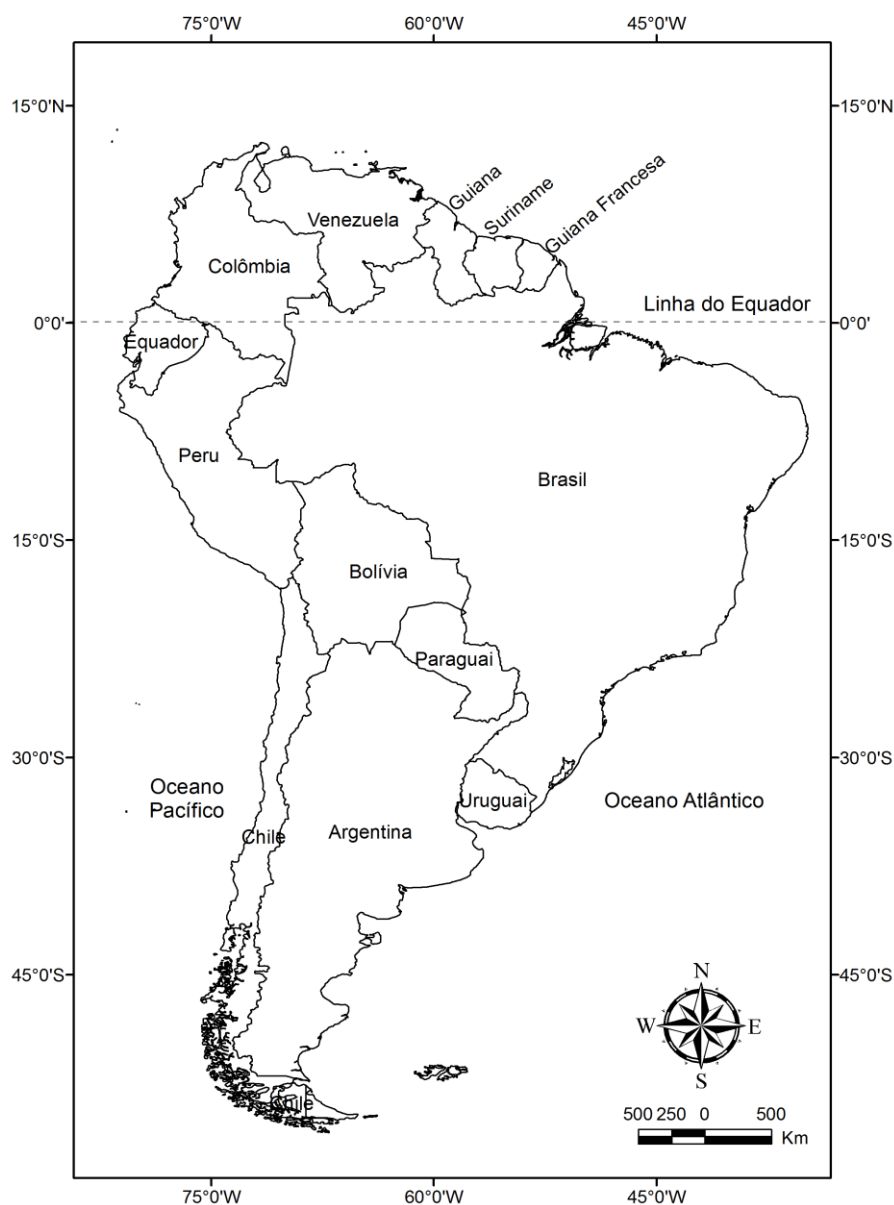
Estudos complementares ao zoneamento agroclimático realizado por Pontius Jr., 2004; Tavares et al., 2012; Scharlau et al., 2013 têm sido empregados como análise de transições ocorridas entre as classes de aptidão climática da cultura entre dois períodos distintos no tempo, sendo, portanto, considerado um diferencial entre trabalhos de zoneamentos.

Para a obtenção de mapas de transições (ganhos, perdas e persistências) entre as classes de aptidão climática correspondente a dois períodos distintos Pontius, et al. (2004) propõem o uso da tabulação cruzada das informações, obtendo como produto uma matriz de transição utilizada para registrar a contabilização e o registro das mudanças das classes. Os dados da matriz possibilitam o conhecimento das áreas ocupadas por cada classe de aptidão, assim como as suas alterações e persistência.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 – Área de estudo**

A região de estudo corresponde ao território da América do Sul, com área total de 17.632.900 km<sup>2</sup>. Situa-se geograficamente entre os meridianos 83° e 33° de longitude oeste e entre os paralelos 58° de latitude Sul e 15° de latitude Norte, compreendendo os países da Argentina, Bolívia, Brasil, Colômbia, Chile, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Paraguai, Peru, Suriname, Uruguai e Venezuela, conforme apresentado na Figura 5.



**Figura 5** – Localização da área de estudo.

### **3.2 – Dados climatológicos para a avaliação do desempenho dos modelos de simulações climáticas**

A base de dados climatológicos observacionais utilizada como referência para a comparação com os dados simulados foi proveniente da “*University of East Anglia*”/“*Climate Research Unit*” (CRU) disponibilizada gratuitamente no endereço eletrônico <http://www.cru.uea.ac.uk/data>, correspondendo as média mensais de

precipitação e temperatura do ar para o período de referência, compreendido entre o período de 1961-1990, com resolução de 10'x10' (New et al., 2002).

Os dados das variáveis climatológicas temperatura do ar e precipitação pluviométrica para o período referência (1961-1990) do IPCC-AR4 são provenientes dos resultados das simulações dos modelos climáticos globais (Tabela 1) realizados por alguns centros de pesquisas, levando em consideração as concentrações observadas de gases de efeito estufa considerando o século XX e sendo representadas pelo cenário de simulação conhecido por *Climate of the 20th Century (20c3m)*.

**Tabela 1** – Identificação, origem e resolução espacial dos modelos climáticos globais do IPCC-AR4

| <b>Modelo</b>     | <b>Origem</b>  | <b>Resolução espacial (X,Y)</b> |
|-------------------|--|---------------------------------|
| BCCR-BCM2.0       | Bjerknes Centre for Climate Research (Noruega)   | 2,8125° x 2,7893°               |
| CGCM3.1(T47)      | Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (Canadá)   | 2,8125° x 2,7893°               |
| CGCM3.1(T63)      | Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (Canadá)   | 3,7500° x 3,7089°               |
| CNRM-CM3          | Centre National de Recherches Meteorologiques (França)   | 2,8125° x 2,7893°               |
| ECHO-G            | Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, and Model and Data Group (Alemanha e Coréia) | 3,7500° x 3,7089°               |
| CSIRO Mark 3.0    | Atmospheric Research (Austrália)   | 1,8750° x 1,8647°               |
| GFDL-CM2.0        | Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Nova Jersey)  | 2,5000° x 2,0000°               |
| GFDL-CM2.1        | Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Nova Jersey)  | 2,5000° x 2,0111°               |
| INM-CM3.0         | Institute for Numerical Mathematics (Rússia)   | 5,0000° x 4,0000°               |
| IPSL-CM4          | Institute Pierre Simon Laplace (França)  | 3,7500° x 2,5352°               |
| FGOALS1.0-g       | LASG/ Institute of Atmospheric Physics (China)   | 2,8125° x 3,0508°               |
| ECHAM5-MPI-OM     | Max Planck Institute for Meteorology (Alemanha)  | 1,8750° x 1,8647°               |
| MRI-CGCM2.3.2     | Meteorological Research Institute (Japão)  | 2,8125° x 2,7893°               |
| GISS-AOM          | NASA Goddard Institute for Space Studies (Estados Unidos)  | 4,0000° x 3,0000°               |
| GISS-EH           | NASA Goddard Institute for Space Studies (Estados Unidos)  | 5,0000° x 3,9556°               |
| GISS-ER           | NASA Goddard Institute for Space Studies (Estados Unidos)  | 5,0000° x 4,0000°               |
| NCAR-CCSM3        | National Center for Atmospheric Research (Estados Unidos)  | 1,4063° x 1,4004°               |
| NCAR-PCM          | National Center for Atmospheric Research (Estados Unidos)  | 2,8125° x 2,7893°               |
| MIROC3.2 (hires)  | Center for Climate System Research (Tóquio)  | 1,1250° x 1,1213°               |
| MIROC3.2 (medres) | Center for Climate System Research (Tóquio)  | 2,8125° x 2,7893°               |
| HADCM3            | Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office (Reino Unido)  | 3,7500° x 2,5000°               |
| HadGEM1           | Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office (Reino Unido)  | 1,8750° x 1,2500°               |

Fonte: IPCC (2007).

### 3.3 – Normalização das resoluções e ponderação dos dados climatológicos temperatura do ar e precipitação pluviométrica do IPCC-AR4

A 1ª etapa consistiu na obtenção de uma grade com o valor de resolução espacial em comum para todos os 22 MCGs do IPCC-AR4, uma vez que os modelos encontravam-se com diferentes resoluções. Para isso, procedeu-se o cálculo da média da resolução espacial de todos os modelos, realizando posteriormente a interpolação de todas as células para o valor proveniente do resultado da média da resolução dos 22 MCGs do IPCC-AR4 (3,0384° longitude x 2,6685° latitude).

A 2ª etapa foi ajustar a resolução dos dados climáticos do CRU para a mesma resolução da grade encontrada para os MCGs (3,0384°x2,6685°), no entanto, como a resolução do CRU era de 10'x10', foi necessário considerar a média dos valores das variáveis climáticas das células que estavam compreendidas dentro da nova resolução, porém para o período anual da variável climática precipitação, realizou-se a soma dos valores dentro das células. A metodologia acima descrita foi adotada em trabalhos realizados por LAMBERT & BOER, 2001; RADIC & CLARKE, 2011.

A 3ª etapa foi a realização da ponderação dos valores de cada célula em função de sua área, uma vez que células próximas ao Equador possuem valores diferentes de uma célula mais afastada.

Por exemplo, uma célula que se encontre na linha do equador com a resolução espacial de 3,0384°x2,6685°, corresponderá a uma área de aproximadamente 95567 km<sup>2</sup>. Já outra célula com essa mesma resolução, na latitude de -50°, terá uma área de aproximadamente 64000 km<sup>2</sup>. A média ponderada ( $\bar{\mu}$ ) do desvio padrão tanto dos dados observados quanto dos simulados de uma variável ( $x$ ) pela área de cada célula ( $w$ ) é dada pela Equação 1.

$$\bar{\mu}(x; w) = \frac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i} \quad (1)$$

Já a correlação ( $R$ ) ponderada pela área de cada célula entre duas variáveis,  $x$  (observado) e  $y$  (simulado) é dada conforme a Equação 2.

$$R(x, y; w) = \frac{cov(x, y; w)}{\sqrt{cov(x, x; w)cov(y, y; w)}} \quad (2)$$

em que:

cov = covariância dos dados, dado pela Equação 3.

$$cov(x, y; w) = \frac{\sum_i w_i (x_i - \bar{\mu}(x; w))(y_i - \bar{\mu}(y; w))}{\sum_i w_i} \quad (3)$$

Desta forma o desvio padrão será dado conforme Equação 4.

$$\sigma(x; w) = \frac{\sum_i w_i (x_i - \bar{\mu}(x; w))^2}{\sum_i w_i} \quad (4)$$

Além das estatísticas descritas acima, adotou-se também o “bias” ( $\bar{E}$ ), que é a diferença entre a média dos valores simulados ( $\bar{f}$ ) e observados ( $\bar{r}$ ) dos dados ponderados, definido pela Equação 5.

$$\bar{E} = \bar{f} - \bar{r} \quad (5)$$

A avaliação do desempenho dos modelos foi realizada através da comparação dos índices estatísticos ponderados dos dados do CRU (observados) e dos simulados pelos modelos do IPCC-AR4, sendo que quanto mais semelhantes os dados simulados forem dos dados observados, melhor é a desempenho do modelo.

### 3.4 – Método do diagrama de Taylor

O método do diagrama de Taylor pode ser aplicado com dados de diversas áreas. No presente estudo ele é utilizado com dados climatológicos simulados e observados para o período anual e mensal das variáveis temperatura do ar e precipitação pluviométrica. Assim, para o uso de dados climatológicos futuros simulados por modelos, deve-se observar o desempenho e a capacidade do modelo em simular os dados das variáveis climáticas de interesse. Parte-se do pressuposto



que o modelo que apresentar o melhor desempenho na simulação do clima referência, também será o melhor para a simulação das projeções do clima futuro.

Através do diagrama de Taylor, foi possível visualizar quatro índices estatísticos juntos em um único gráfico, estes índices foram utilizados como critérios na avaliação do desempenho dos modelos. Para a construção do diagrama de Taylor, foram considerados duas variáveis, uma com os dados observados ( $r$ ) utilizados como referência e outra com os dados simulados ( $f$ ), segundo algum modelo matemático qualquer. Uma das estatísticas mais utilizadas para observar o desempenho de modelos é através da comparação entre  $f$  e  $r$  pela raiz quadrada da média do quadrado das diferenças ( $E$ ) dado pela Equação 6:

$$E = \sqrt{(\bar{f} - \bar{r})^2 + \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_r R} \quad (6)$$

em que:

$\bar{f}$  = média dos dados simulados;

$\bar{r}$  = média dos dados observados;

$\sigma_f$  = desvios padrão dos dados simulados;

$\sigma_r$  = desvios padrão dos dados observados; e

$R$  = o coeficiente de correlação.

A raiz quadrada da média do quadrado das diferenças centralizadas ( $E'$ ) descrito na Equação 7 também é um índice estatístico muito utilizado na avaliação do desempenho de modelos climáticos do IPCC.

$$E' = \sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_r R} \quad (7)$$

Na Equação 7, são encontradas quatro estatísticas ( $E', \sigma_f, \sigma_r, R$ ) que foram utilizadas para estudar o padrão da relação entre  $f$  e  $r$  de forma a orientar se o modelo é um bom estimador. Essas estatísticas analisadas juntas permitiram observar o grau de similaridade dos modelos com os dados de referência.

A avaliação do desempenho dos MCGs do IPCC-AR4 foi realizada para o período anual e mensal, sendo que para analisar o período anual da variável

climática precipitação, procedeu-se o somatório dos valores mensais obtendo como resultado o valor anual de precipitação, enquanto que para a variável climática temperatura do ar foi realizada a média dos valores anuais. Para o período mensal, realizou-se o somatório dos índices estatísticos correspondentes aos meses do ano para cada modelo estudado, posteriormente tirou-se a média desses índices, assim foi possível avaliar o seu desempenho através da comparação com os dados de referência (CRU), sendo que quanto menor o  $E'$ , melhor o desempenho do modelo em simular os dados climáticos da variável estudada.

A organização dos dados climáticos do CRU e do IPCC-AR4, os cálculos dos índices estatísticos e a geração dos diagramas de Taylor foram realizados por meio da construção de funções em linguagem de programação desenvolvidos no *software* Matlab 6.5®.

### **3.5 – Aquisição e tratamento dos dados climatológicos para o zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar**

Para elaborar o zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar representando o clima referência do globo terrestre, utilizaram-se as normais climatológicas da base de dados observacionais proveniente da “*University of East Anglia*”/“*Climate Research Unit*” (CRU), disponibilizada gratuitamente no endereço eletrônico <http://www.cru.uea.ac.uk/data>. Foram considerados os dados médios das variáveis climáticas temperatura do ar e precipitação pluviométrica em escala mensal compreendidos no período de 1961-1990 (década de 1980), oriundos de diversas estações meteorológicas distribuídas ao longo da superfície terrestre disponível no formato matricial (grid) com resolução espacial 10' x 10' (NEW et al., 2002).

Para realizar as simulações das projeções futuras, utilizaram-se as médias das anomalias de temperatura do ar e precipitação pluviométrica de todos os diferentes modelos climáticos globais provenientes do IPCC-AR4, conforme mostrado na Tabela 1, com exceção do modelo *NASA Goddard Institute for Space Studies* (GISS-ER), uma vez que este não apresentava dados simulados para o cenário A1B. O resultado da combinação das médias de todos os modelos do IPCC-AR4 foi denominado de Multimodel (*ensemble*) – MM. Todos os dados de simulações climáticas utilizados no presente estudo foram adquiridos gratuitamente

no *site* do IPCC no endereço eletrônico [http://www.ipcc-data.org/sim/gcm\\_clim/SRES\\_AR4/index.html](http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_clim/SRES_AR4/index.html).

Os períodos futuros projetados analisados estão centrados nas décadas de 2020 (entre os anos de 2010 a 2039), 2050 (entre os anos de 2040 a 2069) e 2080 (entre os anos de 2070 a 2099), para o cenário de emissão A1B (SRA1B-30b compatível com o quarto relatório de avaliação de mudanças climáticas) que descreve um uso equilibrado e eficiente de fontes de energia.

O cenário A1B é considerado um cenário “pessimista” com maior emissão de gases se efeito estufa, porém com uso equilibrado entre todas as fontes de energia. Pertence à família de cenários A1 que descreve um mundo futuro com rápido crescimento econômico, população global que atinge seu pico na metade do século XXI e então passa a declinar, e a introdução de tecnologias novas e mais eficientes (IPCC, 2007). Adotou-se o cenário A1B pelo fato de poder avaliar os impactos mais pessimistas que as mudanças climáticas poderão ocasionar sobre o zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar na América do Sul, além do uso equilibrado de todas as fontes de energia.

Atualmente, os MCGs são as principais ferramentas utilizadas para simular o clima presente e projetar as mudanças climáticas futuras. Entretanto, a resolução de saída dos MCGs é demasiadamente grosseira e está condicionado para ser utilizado diretamente em estudos de avaliação de mudanças do clima. Devido a isso, utiliza-se a técnica de regionalização para produzir resultados de maior resolução espacial (CAYA & LAPRISE, 1999). Modelos com maior resolução espacial proporcionam uma maior descrição de limites de contornos, contraste entre terra e mar e uma descrição das características da superfície terrestre (BUONOMO et al., 2007; TEUTSCHBEIN & SEIBERT, 2010).

### **3.6 – Regionalização (*Downscaling*) dos dados do IPCC**

Como os dados dos MCGs do IPCC-AR4 encontravam-se disponíveis em grades com diferentes resoluções espaciais quando comparado aos dados do CRU, procedeu-se a regionalização dos dados, ou seja, a redução da escala dos dados do Multimodel (*ensemble*) – MM, para a mesma resolução do CRU (10' x 10') de latitude e longitude. Para realizar tal procedimento, utilizou-se o método de interpolação do tipo linear devido a sua simplicidade (BURDEN & FAIRES, 2008), construída por

meio de funções em linguagem de programação que foram implementadas no *software* Matlab 6.5®.

Posteriormente à interpolação, os ajustes dos dados de temperatura do ar e precipitação pluviométrica foram realizados conforme metodologia proposta por Mpelasoka & Chiew (2009) e Chen et al. (2011), através da aplicação da Equação 8.

$$T_{ajust.fut} = T_{obs(CRU)} + \left( \bar{T}_{MCG(Fut)} - \bar{T}_{MCG(Ref)} \right) \quad (8)$$

em que:

$T_{ajust.fut}$  = temperatura do ar ajustada para o futuro (°C);

$T_{obs(CRU)}$  = dados de temperatura (°C) observados do CRU; e

$\left( \bar{T}_{MCG(Fut)} - \bar{T}_{MCG(Ref)} \right)$  = diferença entre a temperatura mensal (°C) dos dados projetados para o futuro e os dados do período de referência, ambos projetados pelos MCGs, ou seja, é a anomalia dos dados dos modelos.

Os ajustes dos dados de precipitação pluviométrica foram realizados conforme a Equação 9, que permitiu que obtivéssemos valores absolutos de precipitação sempre positivos.

$$P_{ajust.fut} = P_{obs(CRU)} \times \left( \bar{P}_{MCG(Fut)} / \bar{P}_{MCG(Ref)} \right) \quad (9)$$

em que:

$P_{ajust.fut}$  = precipitação ajustada para o período futuro (mm);

$P_{obs(CRU)}$  = dados de precipitação (mm) observados do CRU; e

$\left( \bar{P}_{MCG(Fut)} / \bar{P}_{MCG(Ref)} \right)$  = relação dos dados mensais de precipitação (mm) projetados para o futuro pelos dados de referência do período referência projetados pelos MCGs.

### 3.7 – Elaboração do balanço hídrico da cultura

De posse dos dados de temperatura média do ar e da precipitação pluvial mensal proveniente do CRU e do IPCA-R4 ajustados para o futuro, realizaram-se as simulações dos balanços hídricos da cultura pelo método proposto por Thornthwaite & Mather (1955) para o clima referência (1961-1990) e para as projeções futuras centrados nas décadas de 2020 (2010 a 2039), 2050 (2040 a 2069) e 2080 (2070 a 2099) para o cenário A1B. Iniciou-se o balanço hídrico no fim do período chuvoso conforme indicado por (PEREIRA, et al., 2002).

A evapotranspiração potencial (ETp) foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948) caso  $T_n < 26,5$  °C, conforme descritas nas Equações 10, 11 e 12 e, ainda, pelo método proposto por (Willmott et al., 1985), para  $T_n \geq 26,5$  °C (Equação 13), conforme PEREIRA et al. (2002). Os métodos utilizados são empíricos e se baseiam apenas na temperatura média do ar e nas coordenadas geográficas do local.

$$ETp = 16(10 * T_n / I)^a \quad (10)$$

em que:

$T_n$  = temperatura média do mês n, °C; e

$I$  e  $a$  = índices térmicos regionais, sendo calculado pelas Equações 11 e 12 respectivamente:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 * T_n)^{1,514} \quad (11)$$

O expoente  $a$  é em função de  $I$ , sendo calculado pela função que segue:

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,7912 * 10^{-2} * I + 0,49239 \quad (12)$$

A Equação 13 descreve o método de estimativa da evapotranspiração potencial proposto por Willmott et al. (1985).

$$ETp = -415,85 + 32,24 * T_n - 0,43 * T_n^2 \quad (13)$$

O valor da  $ETp$  calculado representa o total mensal de evapotranspiração para um mês padrão de 30 dias, em que cada dia teria 12 horas de fotoperíodo, portanto, para se obter a evapotranspiração potencial corrigida ( $ETP_c$ ) do mês correspondente deve se fazer uma correção em função do número real de dias e do fotoperíodo do mês, conforme Equação 14.

$$ETP_c = ETp * \frac{ND}{30} * \frac{N}{12} \quad (14)$$

em que:

$ETP_c$  = evapotranspiração potencial corrigida;

$ND$  = número de dias do mês em questão; e

$N$  = fotoperíodo médio daquele mês.

Outro parâmetro necessário para o cálculo do balanço hídrico é a evapotranspiração da cultura ( $ETc$ ), que expressa a demanda de água utilizada por uma cultura em qualquer fase de seu desenvolvimento, desde o plantio/semeadura até a colheita, quando não houver restrição hídrica.

O cálculo da estimativa da  $ETc$ , foi desenvolvido em duas etapas. Na primeira, estimou-se a evapotranspiração de uma cultura de referência, (grama batatais) utilizando métodos empíricos (Equações 10 a 14). Na segunda etapa, a  $ETc$  foi obtida multiplicando-se  $ETp_c$  pelo valor de  $Kc$  específico para cada fase de cultivo (Tabela 2), conforme mostra a Equação 15, proposta por Jensen (1968).

$$ETc = Kc * ETp_c \quad (15)$$

em que:

$ETc$  = evapotranspiração da cultura (mm);

$ETp_c$  = evapotranspiração potencial corrigida ou de referência (mm); e

$Kc$  = coeficiente de cultura, este varia em função dos diferentes períodos de crescimento e desenvolvimento da cultura (adimensional).

As fases fenológicas e a duração dos períodos para a cultura da cana-de-açúcar com ciclo de 1 ano foram adaptados de Barbieri et al. (1982) e Allen et al. (1998). O  $Kc$  expressa a demanda de água pela planta em cada fase de seu

desenvolvimento, sendo utilizado para calcular a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em cada uma dessas fases.

Como existem ainda poucos trabalhos e informações sobre os dados de kc para as fases da cultura da cana-de-açúcar, utilizou-se o kc recomendado no boletim da *Food and Agriculture Organization* FAO-56 (Allen et al., 1998), conforme mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2** – Duração média das fases fenológicas e o coeficiente de cultura (kc) da cultura da cana-de-açúcar com ciclo de 1 ano

| <b>*Fases Fenológicas</b>  | <b>*Duração em meses</b> | <b>**Coeficiente Kc</b> |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Brotação e Emergência      | 1                        | 0,4                     |
| Perfilhamento              | 2                        | 1,25                    |
| Desenvolvimento Vegetativo | 7                        | 1,25                    |
| Maturação                  | 2                        | 0,75                    |

Fonte: \*Adaptado de Barbieri, 1982.

\*\*Baseado em Doorenbos e Pruitt (1977) - FAO n.24 e Allen et al. (1998) - FAO n.56.

O índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) da cultura reflete a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, sendo definido como a razão entre a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) e evapotranspiração máxima de cultura ou simplesmente evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>). Esse índice foi desenvolvido, originalmente pela FAO, a fim de avaliar o rendimento das culturas com limitações hídricas durante o período de crescimento (DOORENBOS & PRUITT, 1977).

O ISNA corresponde a um a valor adimensional variando de zero (0) a um (1), sendo que valores próximos a 1 indicam suprimento hídrico ideal. Esse parâmetro foi de fundamental importância para delimitar áreas com baixos riscos de ocorrência de estresses hídricos no território da América do Sul. Assim, o ISNA da cana-de-açúcar foi definido pela Equação 16.

$$ISNA = ETr / ETc \quad (16)$$

em que;

*ISNA* = índice de satisfação das necessidades de água;

*ETr* = evapotranspiração real da cultura (mm); e

*ETc* = evapotranspiração da cultura (mm).

Os valores médios anuais de *ISNA* obtidos para o período referência e projeções futuras, posteriormente foram importados para o ambiente de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e espacializados para a resolução de 10'x10' para toda área de estudo.

A Capacidade de Armazenamento Disponível (CAD), que é o máximo de água que o solo pode reter adotada neste estudo foi de 100 mm, assim como é indicada para a maioria das culturas agrícolas anuais (PEREIRA et al., 2002).

As etapas de organização, ajustes, interpolações e acoplamento dos dados das projeções futuras do IPCC aos dados do CRU, além dos cálculos dos parâmetros do balanço hídrico da cultura, foram realizados por meio da implementação de funções em linguagem de programação no *software* Matlab 6.5®.

Com os dados calculados, foi possível gerar os mapas de evapotranspiração potencial (*ETp*), evapotranspiração real (*ETr*), armazenamento de água no solo (*ARM*), deficiência hídrica anual (*Da*) e excedente hídrico anual (*Ea*), espacializados para a resolução do CRU (10' x 10').

É importante ressaltar que o balanço hídrico foi realizado célula a célula, considerando as diferenças regionais projetadas pelos modelos do IPCC para o clima futuro, onde cada célula possui seu valor correspondente à variável em estudo de acordo com seu posicionamento geográfico.

### **3.8 – Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)**

A partir dos mapas de temperatura média, deficiência hídrica anual, excedente hídrico anual e do índice de satisfação da necessidade de água anual, delimitou-se as zonas de aptidão climática para definir as áreas de exploração da cana-de-açúcar, considerando o cenário referência e projeções futuras para a



América do Sul, classificando-as em: aptas, restritas por (Da), restritas por (Ta) e inaptas ao cultivo (Tabela 3).

O zoneamento agroclimático consistiu essencialmente na delimitação das zonas de aptidão para o cultivo da cultura estudada, na qual foram estabelecidas as condições hídrico-termais ideais para o seu desenvolvimento e produtividade. Assim, Waldheim (2006) afirma que através do zoneamento agroclimático é possível conhecer as áreas com potencial agrícola de uma região estabelecendo o regime de uso para diversos fins, além de, proporcionar ao produtor a escolha das culturas e das técnicas de manejos adequadas.

É importante ressaltar que a cultura contemplada no presente estudo foi a cana-de-açúcar oriunda de muda (cana planta) com ciclo de 12 meses e tendo como início de plantio o mês de julho, uma vez que o plantio para a maioria das regiões ocorrem entre os meses de julho a setembro.

Os parâmetros térmicos e hídricos estabelecidos para avaliar as áreas com aptidão para a implantação e desenvolvimento da cultura foram baseados nos trabalhos realizados por Brunini et al. (2008) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2009), conforme mostrado na Tabela 3.

**Tabela 3** – Classificação de riscos e faixas de aptidões térmicas e hídricas para a cultura da cana-de-açúcar

| Regiões          | Risco | Classificação | *Ta (°C)     | Da (mm)        | Ea (mm) | ISNA  |
|------------------|-------|---------------|--------------|----------------|---------|-------|
| Aptas            | Baixo | Indicada      | > 20         | < 200          | < 800   | > 0,6 |
| Restritas por Da | Baixo | Indicada      | > 20         | 200 ≤ Da < 400 | < 800   | > 0,6 |
| Restritas por Ta | Alto  | Não indicada  | 18 < Ta < 20 | < 200          | < 800   | > 0,6 |
| Inaptas          | Alto  | Não indicada  | < 18         | Da ≥ 400       | > 800   | < 0,6 |

Ta = temperatura média anual; Da = deficiência hídrica anual; Ea = excedente hídrico anual; e ISNA = índices de satisfação das necessidades de água.

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2009).

\*Brunini et al. (2008).

As classes de aptidão climática estabelecidas para a cultura da cana-de-açúcar são descritas abaixo.

- Regiões Aptas: são regiões consideradas de aptidão plena, apresentando condições térmicas e hídricas favoráveis para o bom desenvolvimento e produção da cultura em escala econômica.
- Regiões restritas por deficiência hídrica anual (Da): nestas regiões o regime hídrico apresenta-se como fator limitante no desenvolvimento da cultura, repercutindo negativamente na produção. Para a plantação da cana-de-açúcar nessas áreas torna-se necessário o uso de irrigação para a produção da cultura.
- Áreas restritas por temperatura média anual (Ta): regiões que não são recomendadas para o cultivo da cana-de-açúcar, pois apresentam carência térmica. Nessas áreas o desenvolvimento da cultura é prejudicado por temperaturas abaixo da zona favorável para o seu pleno desenvolvimento.
- Áreas Inaptas: São aquelas regiões caracterizadas por apresentar limitações severas dos fatores hídricos e/ou térmicos, prejudicando as fases de desenvolvimento da cultura com marcante repercussão em sua produção. As características normais do clima não são adequadas à exploração econômica da cultura, exigindo práticas agrícolas dispendiosas para a produção.

Os mapas finais do zoneamento agroclimático para o cenário referência e projeções futuras para a cultura da cana-de-açúcar foram gerados através da sobreposição de mapas que caracterizavam a aptidão térmica e hídrica satisfatórias ao desenvolvimento da cultura para a área estudada.

Uma vez selecionada a cultura e definido seus índices de aptidão climática, procedeu-se a reclassificação dos mapas de temperatura média anual (Ta), deficiência hídrica anual (Da), excedente hídrico anual (Ea) e índices de satisfação das necessidades de água (ISNA) da cultura, para isso utilizou-se o *software* ArcGis 10.0® através do módulo “*ArcToolbox - Spatial Analyst Tools - Reclass - Reclassify*” considerando as faixas de aptidão, conforme mostrado na Tabela 3.

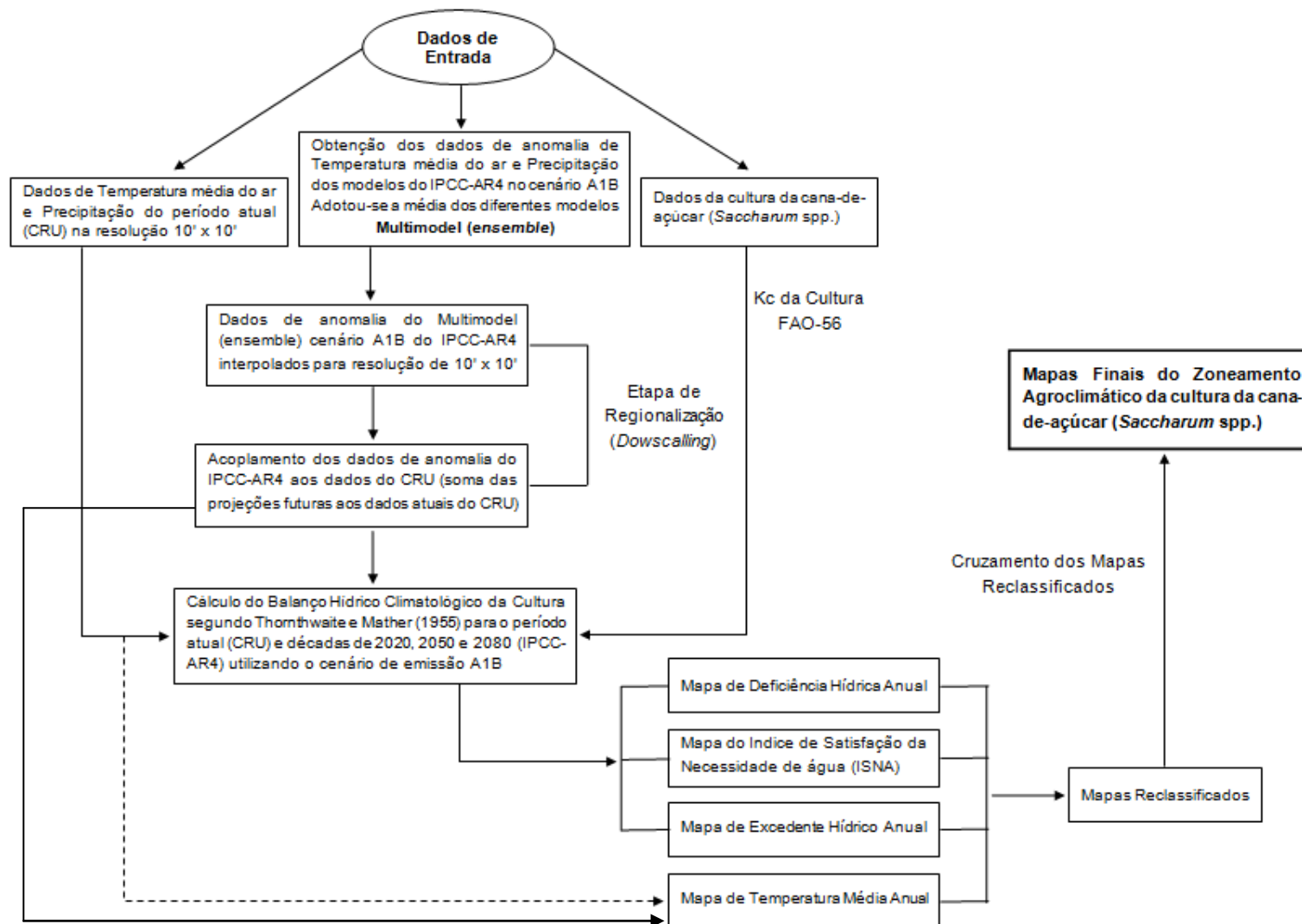
A última etapa do trabalho para a elaboração dos mapas de zoneamentos foram os cruzamentos dos mapas reclassificados, onde utilizou-se o módulo “*ArcToolbox - Spatial Analyst - Raster Calculator*”. O resultado final foram os mapas

de zoneamento agroclimático para o cenário referência e projeções futuras para as décadas de 2020, 2050 e 2080.

As etapas de reclassificação e cruzamentos dos mapas que culminaram nos mapas finais de zoneamentos agroclimáticos, assim como as operações dos cálculos das áreas em percentual de cada classe de aptidão dos mapas finais de zoneamento agroclimático, foram realizadas em um *software* de SIG (ArcGis 10.0®).

Para o cálculo das áreas, foi preciso converter os dados que se encontravam no formato matricial (*raster*) para polígonos (vetorial) através do módulo “*ArcToolbox - Convercion Tools - From Raster - Raster to Polygon*”. Utilizou-se a projeção equivalente (*Albers Equal Area Conic*), uma vez que ela mantém a verdadeira grandeza das áreas, ou seja, uma relação constante com as áreas originais na superfície da Terra, apresentando, portanto, poucas deformações. Mediante essas etapas concluídas, procedeu-se o cálculo das áreas utilizando o módulo “*ArcToolbox - Spatial Statistics Tools - Utilities - Calculate Areas*”.

O fluxograma apresentado na Figura 6 mostra o esquema de todas as operações envolvidas no processo de manipulação e execução das diversas etapas que foram realizadas para a obtenção dos mapas finais do zoneamento agroclimático para a cultura da cana-de-açúcar.



**Figura 6** – Fluxograma mostrando as etapas necessárias para obtenção dos mapas finais de zoneamento agroclimático para o período referência e futuro da cultura da cana-de-açúcar na América do Sul.

### **3.9 – Análise de transição entre as classes de aptidão climática da cana-de-açúcar considerando o período referência e futuro**

A avaliação da flutuação espacial entre as classes de aptidão climática da cana-de-açúcar foram baseadas em mapas de transição entre classes elaboradas através da álgebra de mapas em um ambiente de SIG.

A tabulação cruzada obtida dos mapas de transição entre classes resultou em uma matriz de transição que permitiu analisar ganhos, perdas e persistências entre classes de aptidão climática da cultura, considerando o período referência e as projeções futuras de mudanças climáticas globais do IPCC para a América do Sul.

#### **3.9.1 – Elaboração da matriz de transição de classes de aptidão**

Os procedimentos para realizar a transição de mudanças entre as classes de aptidão foram baseados no método analítico proposto por Pontius Jr. et al. (2004), que recomenda a obtenção de mapas correspondentes entre dois momentos distintos no tempo, seguida da contabilização e registro das mudanças em matrizes de transição para a identificação das alterações ocorridas.

A matriz de transição entre as classes de aptidão para a cultura da cana-de-açúcar foi obtida através da tabulação cruzada dos dados do zoneamento agroclimático do período referência (CRU) e futuro (décadas de 2020, 2050 e 2080). Sua elaboração foi realizada com base nos cálculos das proporções das áreas correspondente às classes analisadas nos mapas de transição. Em seguida, distribuíram-se os dados percentuais das classes do período referência na linha, e do período futuro na coluna, de forma a confrontá-los, uma vez que o resultado da análise desta comparação detecta as transições entre as classes.

A construção da matriz foi baseada no zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar, no qual foram adotadas cinco classes de aptidão climática: classe apta (1); classe inapta (2); classe restrita (Da) (3); restrita (Ta) (4); e restrita (Da) e (Ta) (5).

O esquema do método da matriz de transição proposto por Pontius Jr. et al. (2004) que foi utilizado no presente estudo é apresentado na Tabela 4.

As notações  $A_{11}$ ,  $A_{22}$ ,  $A_{33}$ ,  $A_{44}$ , e  $A_{55}$  registradas no campo sombreado da diagonal descendente da matriz correspondem à proporção da área que não sofreu mudanças entre as classes 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente para a cultura, as outras

notações indicam as transições que ocorrem entre as classes. Os valores das classes que estão registrados na linha da tabela 4 correspondem ao cenário referência (CRU), enquanto os da coluna, ao período futuro (IPCC). Exemplo: seja a classe  $A_{21}$ , esta indica a proporção da área que transitou da classe inapta para a classe apta. A notação  $T1_{Ref}$  corresponde ao total da área da classe 1, obtido através da soma ao longo da linha de todos os valores das notações ( $A_{11}$ ;  $A_{12}$ ;  $A_{13}$ ;  $A_{14}$ ;  $A_{15}$ ) para o período referência (CRU), realizou-se o mesmo procedimento para as classes 2, 3, 4 e 5.

Para o cálculo da área total das classes referentes ao clima futuro ( $T_{Fut}$ ), adotou-se o mesmo procedimento utilizado no clima referência, porém realizou-se a soma das notações ( $A_{11}$ ;  $A_{21}$ ;  $A_{31}$ ;  $A_{41}$ ;  $A_{51}$ ) ao longo da coluna da tabela 4. O método foi utilizado para as classes 1, 2, 3, 4 e 5 do clima futuro.

A linha “Ganhos” corresponde ao total de ganhos de áreas de uma dada classe entre o período referência (CRU) e os períodos futuros analisados. O valor do ganho foi calculado efetuando a diferença entre o total da classe da coluna (período futuro) e a persistência desta classe. O cálculo do ganho foi realizado aplicando a Equação 17, tomando como exemplo a classe 1.

$$Ganhos = T1_{Fut} - A_{11} \quad (17)$$

em que:

$T1_{Fut}$  = total da classe 1 apta (clima futuro) e

$A_{11}$  = proporção da área da classe 1 que permaneceu apta entre os períodos referência e futuro.

A coluna “Perdas” apresentada na matriz corresponde ao total das perdas relativas a uma dada classe entre o período referência e futuro. O valor da perda para uma dada classe foi calculado através da diferença entre o total da linha e a persistência para a classe correspondente. A Equação 18 apresenta o cálculo da perda para a classe 2.

$$Perdas = T2_{Atual} - A_{22} \quad (18)$$

em que:

$T2_{Atual}$  = total da classe 2 apta (clima futuro); e

$A_{22}$  = proporção da área da classe 2 que permaneceu apta entre os períodos referência e futuro.

**Tabela 4** – Esquema da matriz de transição entre as classes de aptidão climática da cana-de-açúcar comparando o clima referência (CRU) e o futuro (décadas de 2020, 2050 e 2080), cenário A1B utilizado no presente trabalho

|                          |                        | Futuro              |                     |                     |                     |                        | Total (Referência) % | Perdas %            |
|--------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|----------------------|---------------------|
|                          |                        | Apta 1              | Inapta 2            | Restrita (Da) 3     | Restrita (Ta) 4     | Restrita (Da) e (Ta) 5 |                      |                     |
| Cenário Referência (CRU) | Apta 1                 | $A_{11}$            | $A_{12}$            | $A_{13}$            | $A_{14}$            | $A_{15}$               | $T1_{Ref}$           | $T1_{Ref} - A_{11}$ |
|                          | Inapta 2               | $A_{21}$            | $A_{22}$            | $A_{23}$            | $A_{24}$            | $A_{25}$               | $T2_{Ref}$           | $T2_{Ref} - A_{22}$ |
|                          | Restrita (Da) 3        | $A_{31}$            | $A_{32}$            | $A_{33}$            | $A_{34}$            | $A_{35}$               | $T3_{Ref}$           | $T3_{Ref} - A_{33}$ |
|                          | Restrita (Ta) 4        | $A_{41}$            | $A_{42}$            | $A_{43}$            | $A_{44}$            | $A_{45}$               | $T4_{Ref}$           | $T4_{Ref} - A_{44}$ |
|                          | Restrita (Da) e (Ta) 5 | $A_{51}$            | $A_{52}$            | $A_{53}$            | $A_{54}$            | $A_{55}$               | $T5_{Ref}$           | $T5_{Ref} - A_{55}$ |
| Total (Futuro) %         |                        | $T1_{Fut}$          | $T2_{Fut}$          | $T3_{Fut}$          | $T4_{Fut}$          | $T5_{Fut}$             | $\sum_{T1}^{T5}$     |                     |
| Ganhos %                 |                        | $T1_{Fut} - A_{11}$ | $T1_{Fut} - A_{22}$ | $T1_{Fut} - A_{33}$ | $T1_{Fut} - A_{44}$ | $T1_{Fut} - A_{55}$    |                      |                     |



### 3.9.2 – Elaboração dos mapas de transição entre classes de aptidão climática da cana-de-açúcar

Para a obtenção das vinte e cinco possíveis transições entre classes de aptidão climática da cultura considerando o período referência e as projeções futuras, foi necessário reclassificar os mapas de zoneamentos agroclimáticos futuros que se encontravam no formato matricial (*raster*), atribuindo códigos de classes diferentes aos do período referência. Esse procedimento foi implementado através do módulo “*ArcToolbox - Spatial Analyst Tools - Reclass - Reclassify*” do ArcGis10.0®, com o intuito de identificar e fazer distinção entre as transições das classes analisadas.

Para obter os mapas de mudanças de classes e as matrizes com os valores correspondentes às mudanças entre as classes de aptidão, realizaram-se a sobreposição e a soma dos mapas de aptidão do clima referência e do clima futuro reclassificados com os novos códigos. Esse procedimento foi realizado através do módulo “*ArcToolbox - Spatial Analyst - Raster Calculator*”, uma vez que cada célula possuía um valor de atributo de acordo com sua aptidão climática. As funções de manipulação envolvendo álgebra com mapas foram executadas célula a célula, haja vista que, a técnica contempla preferencialmente o uso da representação matricial. Os resultados das operações foram os mapas de transição entre as classes de aptidão climática entre o período referência e as décadas de 2020, 2050 e 2080.

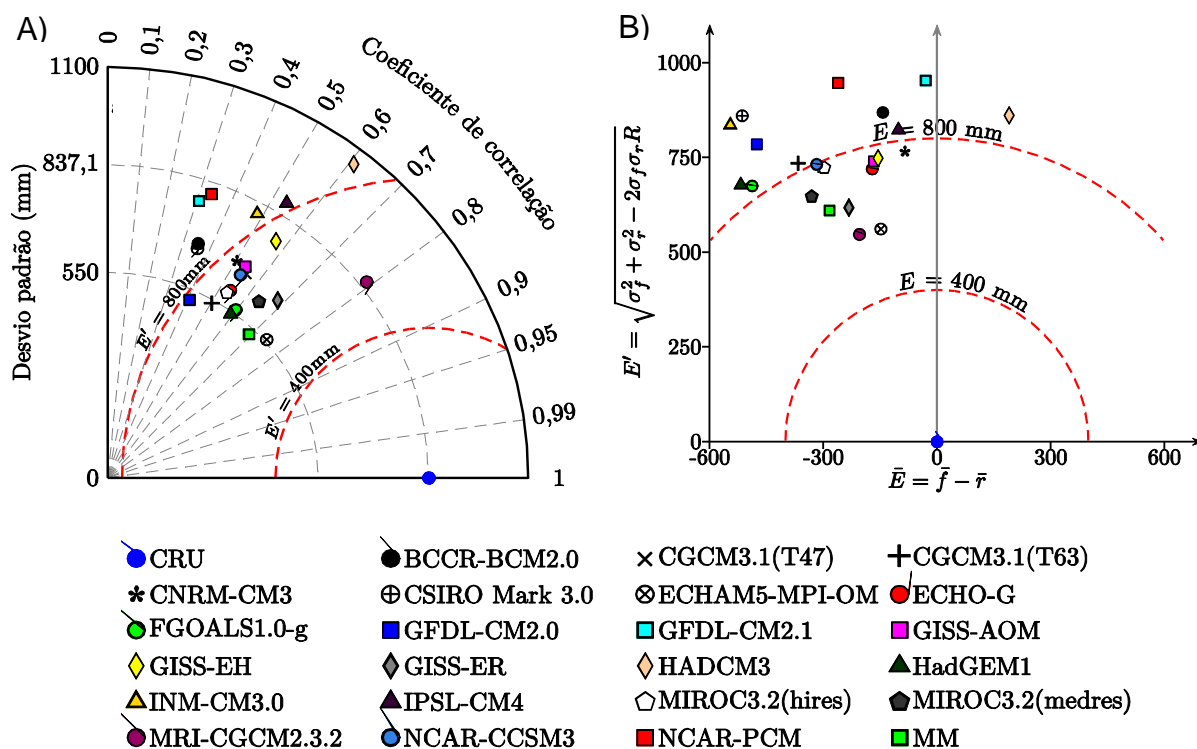
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 – Avaliação do desempenho dos modelos climáticos globais do IPCC-AR4 através do método do diagrama de Taylor

Pelo diagrama de Taylor, foi possível visualizar juntos quatro índices estatísticos de fundamental importância na avaliação do desempenho dos modelos, tais como: o desvio padrão dos dados observados e dos modelos do IPCC-AR4 ( $\sigma_r$  e  $\sigma_f$ ), respectivamente, a média da raiz quadrada do quadrado das diferenças centralizadas ( $E'$ ) e o coeficiente de correlação ( $R$ ) ao mesmo tempo, facilitando a análise dos resultados (Figuras 7 a 10).

#### 4.1.1 – Desempenho dos modelos climáticos para as simulações de dados de precipitação pluvial mensal e anual

A Figura 7 apresenta o diagrama de Taylor com os índices estatísticos da média anual da precipitação e os erros individualizados dos modelos através de informações estatísticas complementares, tais como: o “bias” ( $\bar{E}$ ), que é a diferença entre as médias dos valores simulados e observados e o ( $E$ ) definido como a média da raiz quadrada do quadrado das diferenças.



**Figura 7** – Diagrama de Taylor exibindo a comparação dos índices estatísticos dos dados observados (CRU) e dos modelos de simulações climáticas do IPCC-AR4 **(A)**, e o gráfico do “bias” mostrando os erros individualizados dos modelos climáticos **(B)**, considerando o período de 1961-1990 (20c3m) para a precipitação anual.

Um modelo é considerado de alto desempenho quando apresenta o valor de desvio padrão simulado o mais próximo do observado, alta correlação e um baixo valor de  $E'$ . Adotando como critério o menor valor de  $E'$  junto com os outros índices estatísticos na avaliação do desempenho dos modelos, observa-se que o modelo MRI-CGCM 2.3.2 é o que apresenta o melhor desempenho quando comparado aos outros para a média anual da precipitação (Figura 7A).

Ainda de acordo com a Figura 7A, é possível observar que os modelos GFDL-CM2.1 e o NCAR-PCM obtiveram os piores resultados de  $E'$  e de  $R$ , apresentando portanto, baixo desempenho. A correlação ( $R$ ) dos dados simulados pelos 22 modelos do IPCC e pelo Multimodel (*ensemble*) – MM varia entre 0,3 a 0,8, sendo que quanto mais próximo de 1 mais bem correlacionado os dados simulados estão com os dados observados.

Pela Figura 7B é possível analisar o “bias” ( $\bar{E}$ ), nota-se que aqueles modelos que estão representados do lado esquerdo do eixo x a partir do valor 0 subestimaram a precipitação, enquanto o HADCM3 que está representado do lado direito foi o único que superestimou a precipitação, chegando em quase 200 mm quando comparado aos dados do CRU. Todos os outros modelos subestimaram os valores de precipitação, destacando o modelo INM-CM 3.0 é o que apresenta maior amplitude da simulação com quase 550 mm. É observado ainda que o MRI-CGCM 2.3.2 apresenta o menor valor de  $\bar{E}$  confirmando o seu bom desempenho.

Ainda na Figura 7B, é possível observar que todos os modelos apresentam diferenças significativas entre eles na simulação dos valores de precipitação anual, e também quando comparados ao observado. Marengo (2007) ressalta que as incertezas apresentadas pelos modelos nas projeções da precipitação pluviométrica ainda são elevadas.

A Figura 8 apresenta o diagrama de Taylor com os resultados dos índices estatísticos dos valores médios mensais da precipitação pluvial compreendidos entre o período de 1961 -1990 (20c3m), para os 10 melhores MCGs do IPCC-AR4 e do Multimodel (*ensemble*) – MM, além dos dados observados pelo CRU. Os resultados do desempenho dos modelos para os meses do ano foram obtidos mediante a média mensal de todos os índices estatísticos ponderados da variável precipitação pluviométrica. Adotou-se 10 melhores modelos para fins de facilitar a visualização dos mesmos no diagrama.



De acordo com a Figura 8, o Multimodel (*ensemble*) – MM é o que apresenta o melhor desempenho quando comparado aos modelos individualizados, apresentando valor de ( $R$ ) de 0,76 e ( $E'$ ) 62,75, sendo este último índice, o critério adotado para a escolha do melhor modelo.

Gleckler et al. (2008); Reichler & Kim (2008); Pierce et al. (2009) avaliaram a simulação dos GCM's do IPCC-AR4 para variáveis climáticas e concluíram que o desempenho do conjunto Multimodel (*ensemble*) – MM foi superior em relação ao desempenho dos modelos individualizados. Pierce et al. (2009) ainda atribuem os resultados à distribuição dos erros quando é realizada a média entre os modelos.

As combinações de diferentes modelos podem ser utilizadas em diversos trabalhos, não se limitando apenas em trabalhos de mudanças climáticas, demonstrando que o Multimodel (*ensemble*) – MM aumenta a consistência e a confiabilidade dos dados simulados. Entre as suas aplicações estão o setor da saúde pública que utilizou as projeções climáticas do Multimodel (*ensemble*) – MM em alertas de malária (Thomson et al., 2006) e a agricultura que utilizou a combinação de vários modelos para fazer as previsões de rendimentos de culturas, os resultados foram relatados como superiores quando comparados a apenas um único modelo (CANTELAUBE & TERRES, 2005).

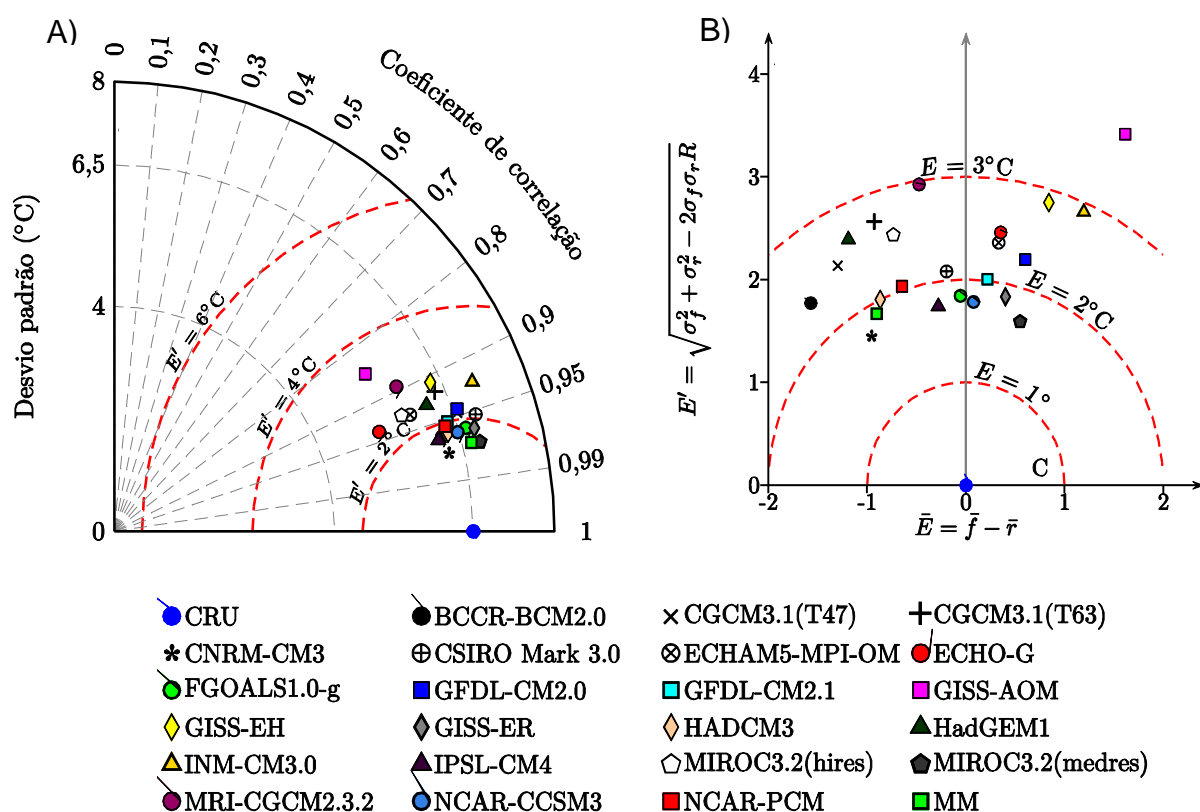
Brekke et al. (2007) avaliaram a importância dos modelos climáticos globais do IPCC-AR4 na estimativa das projeções de mudanças climática para análise de eventuais riscos hidroclimatológicos durante as estações chuvosas e secas, e observaram que o Multimodel (*ensemble*) – MM também foi o que apresentou melhores resultados na simulação de dados quando comparado aos dados dos modelos individualizados.

Estudos realizados por Silveira et al. (2011), avaliando o desempenho dos MCGs do IPCC-AR4, quanto a variabilidade interanual de precipitação pluviométrica sobre o Nordeste do Brasil, Amazônia e a Bacia do Prata localizado no Sul do Brasil, apontaram o modelo GISS-ER como o melhor na simulação dos dados para a região da Amazônia, o CSIRO Mark 3.0 para a região do Nordeste do Brasil e os modelos CGCM3.1 (T47) e o CGCM3.1 (T63) para a Bacia do Prata, porém o estudo não contempla a combinação dos dados dos diferentes modelos do IPCC (Multimodel (*ensemble*) – MM). Os autores afirmam que esses modelos podem ser considerados como uma boa opção para estudos dos efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos na América Sul.

Na Figura 8, ainda é observado que nos meses de janeiro a março o modelo GISS-ER é o que apresenta o melhor desempenho quando comparado aos outros, porém o mesmo comportamento não se repetiu para os outros meses. Já o modelo CNRM-CN3 apresenta um desempenho inferior aos outros modelos no período de janeiro a abril, melhorando seu desempenho ao longo dos outros meses.

#### 4.1.2 – Desempenho dos modelos climáticos globais para as simulações das médias anual e mensal da temperatura do ar

A Figura 9 apresenta o diagrama de Taylor com os índices estatísticos da média anual dos dados observados e simulados para a variável climática temperatura média anual e os erros individualizados dos modelos através do “bias” ( $\bar{E}$ ). Considerou-se os dados simulados pelos modelos do IPCC-AR4 além do Multimodel (*ensemble*) – MM no período de dados de 1961-1990 (20c3m).



**Figura 9** – Diagrama de Taylor exibindo a comparação dos índices estatísticos dos dados observados (CRU) e dos modelos de simulações climáticas do IPCC-AR4 **(A)**, e o gráfico do “bias” mostrando os erros individualizados dos modelos climáticos **(B)**, considerando o período de 1961-1990 (20c3m) para a temperatura média anual.

De acordo com a Figura 9A, observa-se que o valor do desvio padrão dos dados do CRU é de 6,5, enquanto que o modelo ECHO-G é o que apresenta a maior diferença entre o valor de desvio padrão dos dados simulados e observados, que é de aproximadamente 1,4.

Analisando a correlação dos dados simulados com os dados observados, nota-se que o modelo GISS-AOM é o que apresenta o pior grau de correlação entre todos os outros (0,85), enquanto a maioria obteve correlação acima de 0,9 (Figura 9A).

Para a média anual dos dados, o modelo CNRM-CM3 é o que apresenta o melhor desempenho quando comparado aos demais com ( $E'$ ) de 1,49 e ( $R$ ) de 0,97 seguido pelo Multimodel (*ensemble*) – MM que apresenta resultados semelhantes ( $E'$ ) de 1,65 e ( $R$ ) de 0,97.

Pela Figura 9B é possível concluir que os modelos tiveram comportamentos diferentes na simulação dos dados de temperatura do ar, uma vez que eles estão representados bem distantes uns dos outros. Aqueles que estão representados do lado esquerdo do eixo x, a partir do valor 0, estão subestimando a temperatura, enquanto os que estão do lado direito acabaram superestimando. Essa análise só foi possível através do “bias” ( $\bar{E}$ ), que demonstrou que os modelos poderão superestimar ou subestimar a temperatura em até 2 °C quando comparado aos dados observados. Dentre os valores superestimados, o modelo GISS-AOM é o que obteve o maior valor de amplitude, aproximadamente 1,6 °C da temperatura do ar observada, e para os valores subestimados o modelo BCCR-BCM2.0, com o valor de 1,5 °C aproximadamente.

A Figura 10 apresenta o diagrama de Taylor com os resultados dos índices estatísticos dos valores médios mensais da temperatura do ar compreendidos entre o período de 1961 -1990 (20c3m), para os 10 melhores MCGs do IPCC-AR4 e do Multimodel (*ensemble*) – MM, além dos dados observados pelo CRU. Os resultados do comportamento dos modelos para os meses do ano foram obtidos mediante a média mensal de todos os índices estatísticos ponderados.





Na Figura 10, é observado que nos meses de novembro a maio os modelos se comportaram de maneira semelhante na simulação dos valores de temperatura, o mesmo não ocorrendo para os outros meses do ano, onde houve uma amplitude maior na simulação dos dados, pois eles se encontram mais distantes uns dos outros. Os dados de temperatura do ar simulados pelos modelos ficaram bem correlacionados com os dados observados, obtendo valores superiores a 0,9.

De modo geral, o Multimodel (*ensemble*) – MM é o modelo que apresenta o melhor desempenho na simulação dos dados de temperatura quando comparado aos demais modelos. Este resultado também pode ser confirmado no trabalho realizado por Pierce et al. (2009), que ressalta a superioridade do Multimodel (*ensemble*) – MM quando comparado aos modelos individualizados.

Resultados concordantes foram encontrados por Radic & Clarke (2011), que analisaram o desempenho de 22 MCGs do IPCC-AR4 e a combinação destes na simulação de dados de diversas variáveis climáticas, entre elas a precipitação e a temperatura do ar para a América do Norte. Os resultados encontrados demonstraram que o Multimodel (*ensemble*) – MM foi superior a qualquer modelo individual na simulação dos dados das variáveis climáticas analisadas.

Lambert & Boer (2001) realizaram trabalhos de avaliação e comparação da simulação de dados climáticos entre 15 modelos climáticos globais do IPCC e concluíram que a média da combinação de vários modelos Multimodel (*ensemble*) – MM apresentou resultados melhorados, ou seja, bem mais semelhantes à média dos dados observados, quando comparado com a média de apenas um único modelo. Os autores ainda ressaltam que diferentes variáveis climáticas são simuladas com diferentes níveis de sucesso por diferentes modelos e que um modelo pode não ser melhor para todas as variáveis climáticas.

Gillett et al. (2002), ressaltam a superioridade do Multimodel (*ensemble*) – MM em relação aos modelos individuais nos estudos de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global. Palmer et al. (2005) também destacaram a relevância do Multimodel (*ensemble*) – MM em estudos de mudanças climáticas, relatando que as projeções simuladas pela combinação de diferentes modelos mostram melhor confiabilidade e consistência dos dados quando comparado aos dados de apenas um modelo, isso pode ser justificado devido à distribuição dos erros quando é realizada a média entre os modelos.

Comparando as Figuras 8 e 10, é possível observar que os modelos possuem comportamento muito mais semelhante entre si na simulação dos dados da variável climática temperatura do ar do que na de precipitação pluviométrica. Isso pode ser notado através da posição dos modelos no diagrama de Taylor, sendo que quanto mais próximos eles estiverem uns dos outros mais semelhantes serão os resultados simulados por eles. Tal fato é justificado devido à precipitação pluviométrica ser mais influenciada por variações sazonais ao longo do ano e por características regionais como, por exemplo, as chuvas orográficas que ocorrem muitas vezes por influência do relevo. A principal causa dos erros nos MCGs é que eles não conseguem simular as chuvas orográficas uma vez que não captam a variação do relevo.

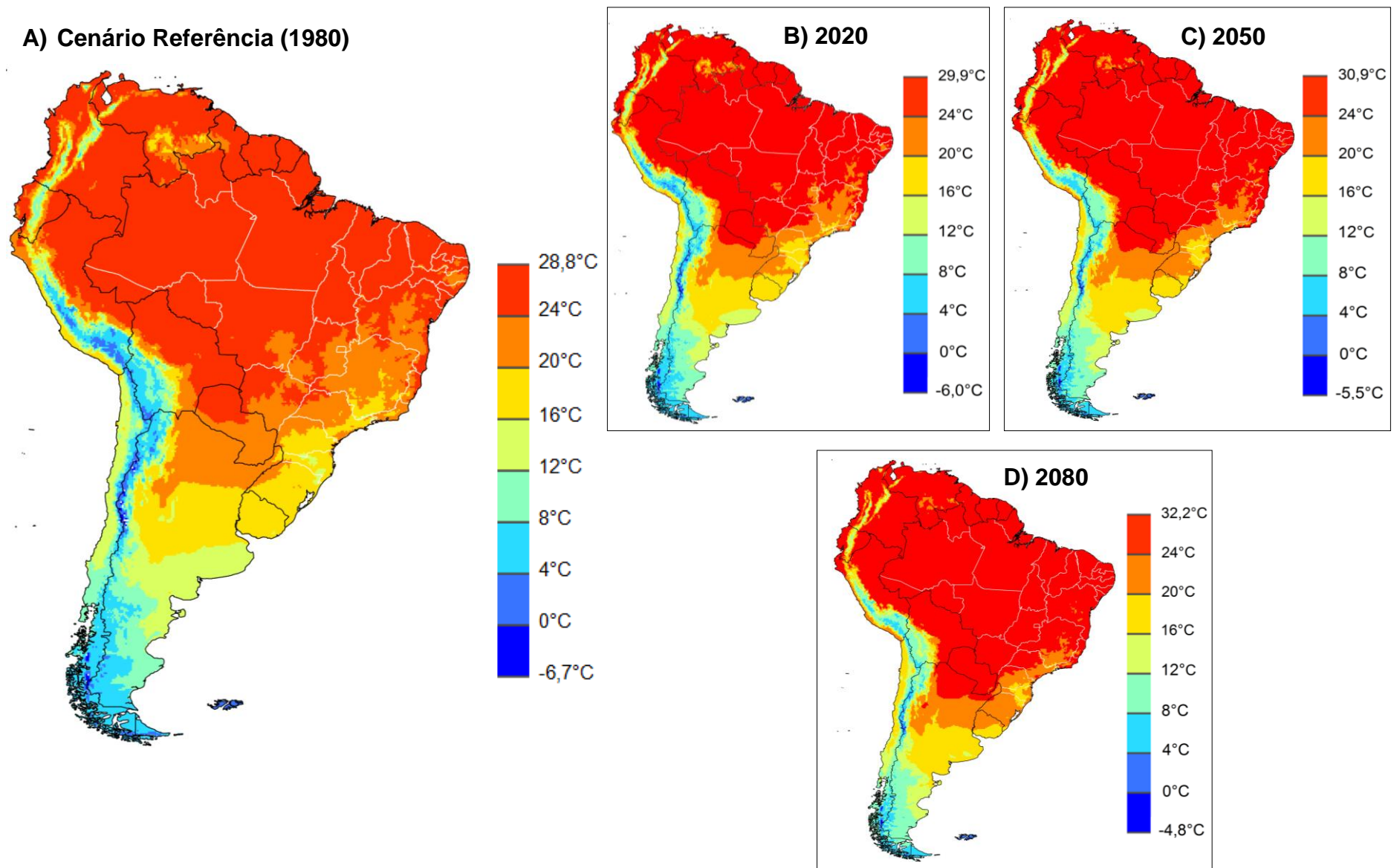
#### **4.2 – Espacialização dos dados da temperatura média anual do ar e deficiência hídrica anual para o cenário referência e projeções futuras**

A Figura 12 apresenta a distribuição espacial da temperatura média anual do ar na América do Sul para o cenário referência (1980), utilizando dados do CRU, e os valores absolutos das temperaturas nas décadas de 2020, 2050 e 2080, obtidos através da diferença entre os dados do Multimodel (*ensemble*) – MM do IPCC (simulados) e os dados atuais do CRU (observados).

Analisando o cenário referência (Figura 12A), é possível notar que a Região Norte e Nordeste do Brasil são as regiões mais quentes, apresentando valores de temperatura média anual entre 24,0 °C a 28,8 °C. Esses níveis elevados de temperatura também podem ser verificados em grande parte do Suriname, Guiana, Guiana Francesa, Venezuela, Colômbia, Equador, Peru, Bolívia e Paraguai. Já as zonas mais frias estão localizadas principalmente na região da cordilheira dos Andes que atravessa todo o continente Sul-Americano abrangendo o território do Chile, Argentina, Peru, Bolívia, Equador e Colômbia (Figura 12A).

Na Figura 12B, é mostrado que para o futuro (década de 2020) haverá um incremento da temperatura média anual no cenário referência de 0,5 °C a 1,4 °C. Já na década de 2050 (Figura 12C), o incremento da temperatura aumentará, alcançando valores entre 1,0 °C a 2,7 °C, aumentando ainda mais na década de 2080 (Figura 12D) alcançando níveis elevados entre 1,6 °C a 4,0 °C.

É importante ressaltar que como o estudo foi realizado célula a célula, considerando a localização geográfica de cada local, o incremento da temperatura variou de região para região. Isso pode ser observado na década de 2020, onde as regiões apresentam aumentos entre 0,5 °C a 1,4 °C. Porém, isso não é levado em consideração na maioria dos estudos de mudanças climáticas, um exemplo é o trabalho realizado por Assad et al. (2004) para a cultura do café (*coffea arábica* L.) onde utilizaram três simulações diferentes com aumento de 1 °C, 3 °C e 5,8 °C na temperatura média do ar. Para o primeiro cenário somou-se 1 °C em todas as células da área de estudo, logo após, foi realizado o mesmo procedimento para 3 °C e 5,8 °C sem ter levado em consideração a variabilidade espacial que existe nas mudanças climáticas projetadas pelo IPCC.



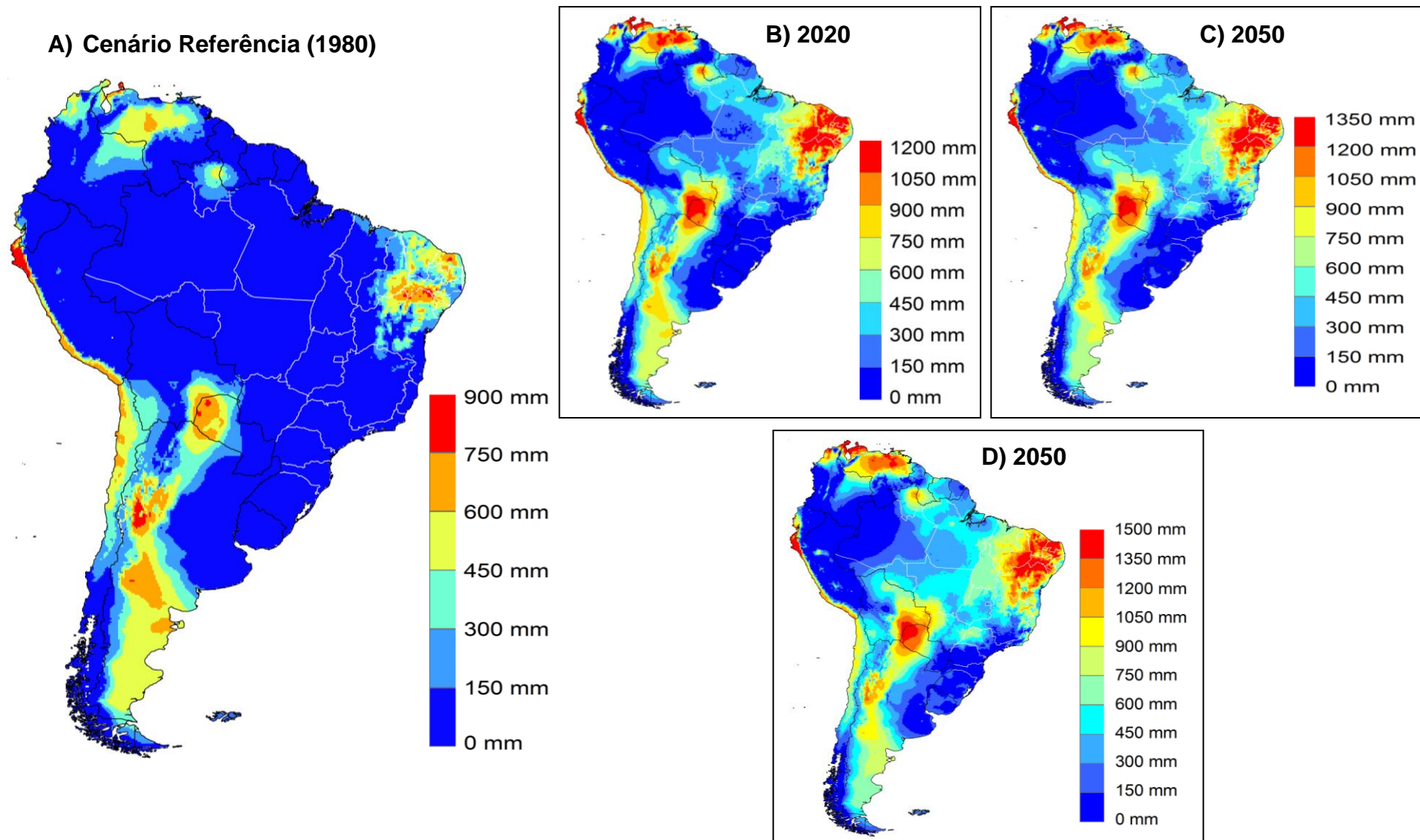
**Figura 12** – Distribuição espacial da temperatura média anual para o cenário referência (década de 1980) (A) e para as projeções futuras para as décadas de 2020 (B), 2050 (C) e 2080 (D) considerando o cenário A1B.

A Figura 13 é mostrado a espacialização dos dados de deficiência hídrica anual no cenário referência e os valores absolutos projetados para o clima futuro centrados nas décadas de 2020, 2050 e 2080 para a América do Sul. Os mapas de projeções futuras para os períodos analisados foram obtidos através do balanço hídrico da cultura.

De acordo com a Figura 13A, a maior parte da América do Sul apresenta deficiência hídrica entre 0 a 150 mm, principalmente no Brasil, com exceção da região Nordeste, onde os valores de deficiência são bem acentuados. Esse fato pode ser atribuído às altas temperaturas (Figura 12A) e a escassez de chuvas nesta região. Oliveira et al. (2012), estudando os impactos das alterações climáticas no zoneamento agrícola da cana-de-açúcar para a região Nordeste do Brasil, encontraram uma redução considerável das áreas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar, afetando assim, as áreas de produção da cultura.

Avaliando o incremento da deficiência hídrica para as projeções ao longo das décadas de 2020, 2050 e 2080, nota-se um acréscimo de até 850 mm para alguns locais (Figura 13B). Para a década de 2050 (Figura 13C), as deficiências hídricas aumentam podendo chegar a 1000 mm, enquanto que para a projeção da década de 2080 (Figura 13D) os resultados podem alcançar os 1200 mm em algumas regiões, que é o caso da região do Nordeste do Brasil, parte da Venezuela, Bolívia e Paraguai.

O aumento contínuo da temperatura do ar ao longo das décadas projetadas (Figura 12) para o futuro implicará no balanço hídrico da cultura, ocasionando, portanto um acréscimo na deficiência hídrica (Figura 13), tornando muitas áreas inaptas ou mesmo necessitando de irrigação para suavizar os déficits hídricos. Segundo Farias et al. (2008), a irrigação da cultura é uma das alternativas mais utilizadas pelos produtores do Nordeste do Brasil, porém ela é utilizada muitas vezes sem nenhum planejamento ou manejo adequado, uma vez que para muitos produtores faltam informações e conhecimentos da parte fisiológica da cultura da cana-de-açúcar.



**Figura 13** – Distribuição espacial da deficiência hídrica anual para o cenário referência (década de 1980) (A) e para as projeções futuras para as décadas de 2020 (B), 2050 (C) e 2080 (D) considerando o cenário A1B.

### 4.3 – Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar para o clima referência e as projeções futuras de mudanças climáticas do IPCC-AR4

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados do impacto das projeções de mudanças climáticas globais do IPCC-AR4 para a cana-de-açúcar.

As Figuras 14, 15, 16 e 17 apresentam os mapas temáticos do zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar para a América do Sul considerando o cenário referência (década de 1980) e as projeções climáticas futuras do cenário A1B para as décadas de 2020, 2050 e 2080. A quantificação em percentagem das áreas correspondente às classes de aptidão climática para a cultura é mostrado na Tabela 5.

**Tabela 5** – Distribuição em percentagem das áreas correspondente as classes de aptidão climática para a cultura da cana-de-açúcar na América do Sul em função das projeções de mudanças climáticas para as décadas de 1980, 2020, 2050 e 2080

| Décadas | Área da América do Sul por classe de aptidão climática <sup>1</sup> (%) |                   |                   |                          |        |
|---------|---|-------------------|-------------------|--------------------------|--------|
|         | Apta  | Restrita por (Da) | Restrita por (Ta) | Restrita por (Da) e (Ta) | Inapta |
| 1980    | 24,8  | 4,2               | 3,0               | 0,1                      | 68,2   |
| 2020    | 20,3  | 16,8              | 3,0               | 0,4                      | 59,5   |
| 2050    | 15,7  | 15,6              | 2,5               | 0,7                      | 65,5   |
| 2080    | 13,9  | 11,8              | 1,8               | 0,5                      | 72,0   |

<sup>1</sup> Área aproximada estimada pelo SIG.

De acordo com a Tabela 5, observa-se que para o clima referência as zonas climatologicamente aptas para o cultivo da cana-de-açúcar correspondem a 24,8% da área de estudo, reduzindo significativamente para 13,9% na década de 2080. Esses resultados podem ser atribuídos ao aumento na média da temperatura global e o aumento da deficiência hídrica em muitos locais da área estudada. Já as áreas restritas por (Da) aumentarão, passando de 4,2% na década de 1980 para 16,8% em 2020, reduzindo para 15,6% e 11,8% para as décadas de 2050 e 2080 respectivamente. Nas áreas restritas por (Da), a cultura poderá ser cultivada, porém o uso da irrigação tornará necessário.

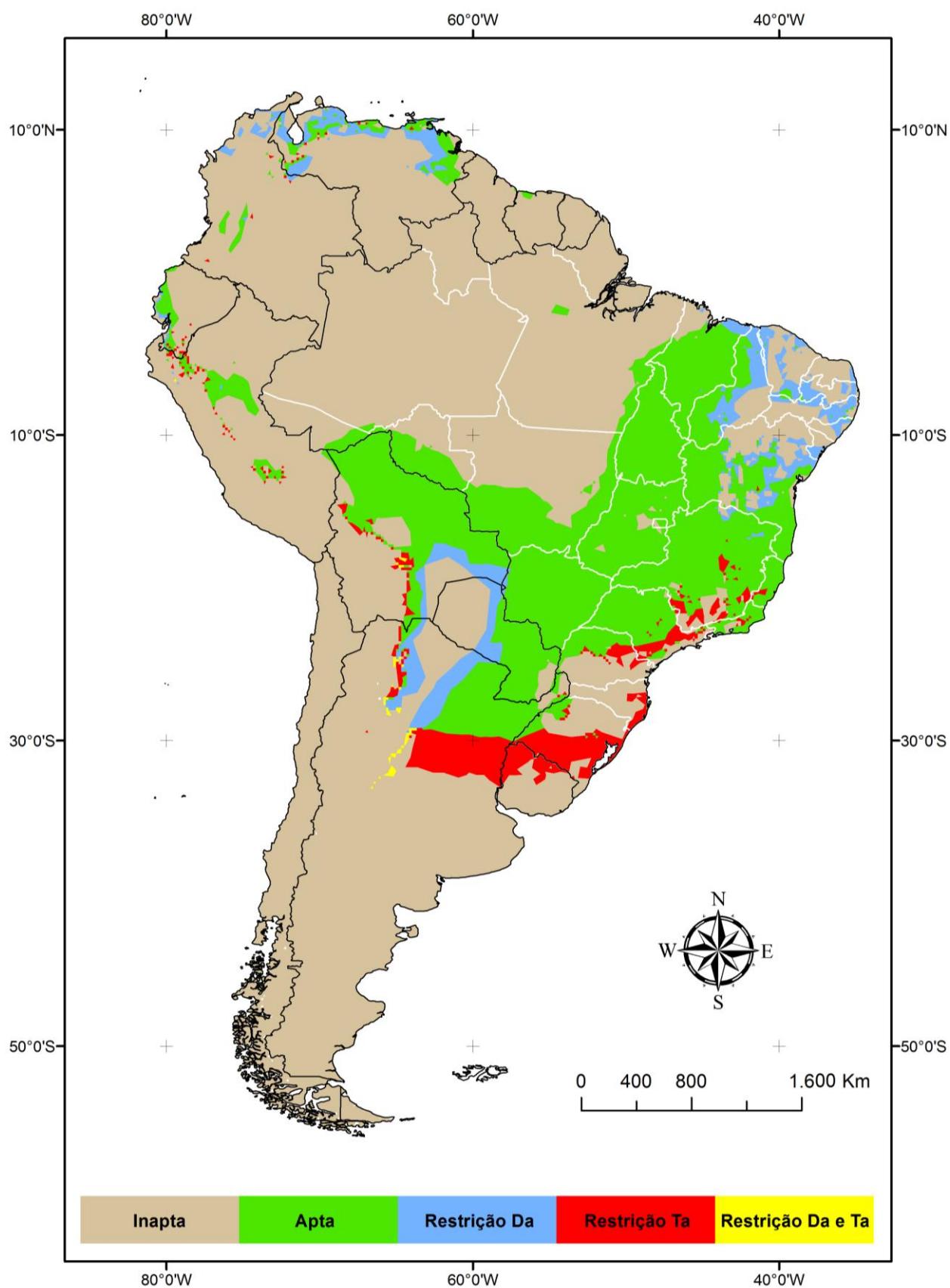


Analisando a classe inapta para o cultivo da cultura, observa-se que esta tende a expandir nas décadas de 2050 e 2080 chegando a 72% (Tabela 5) de todo o território estudado. As áreas restritas por (Da) e (Ta) na década de 1980 representam uma pequena porção (0,1%) da América do Sul, passando para 0,7% e 0,5% para as décadas de 2050 e 2080 respectivamente.

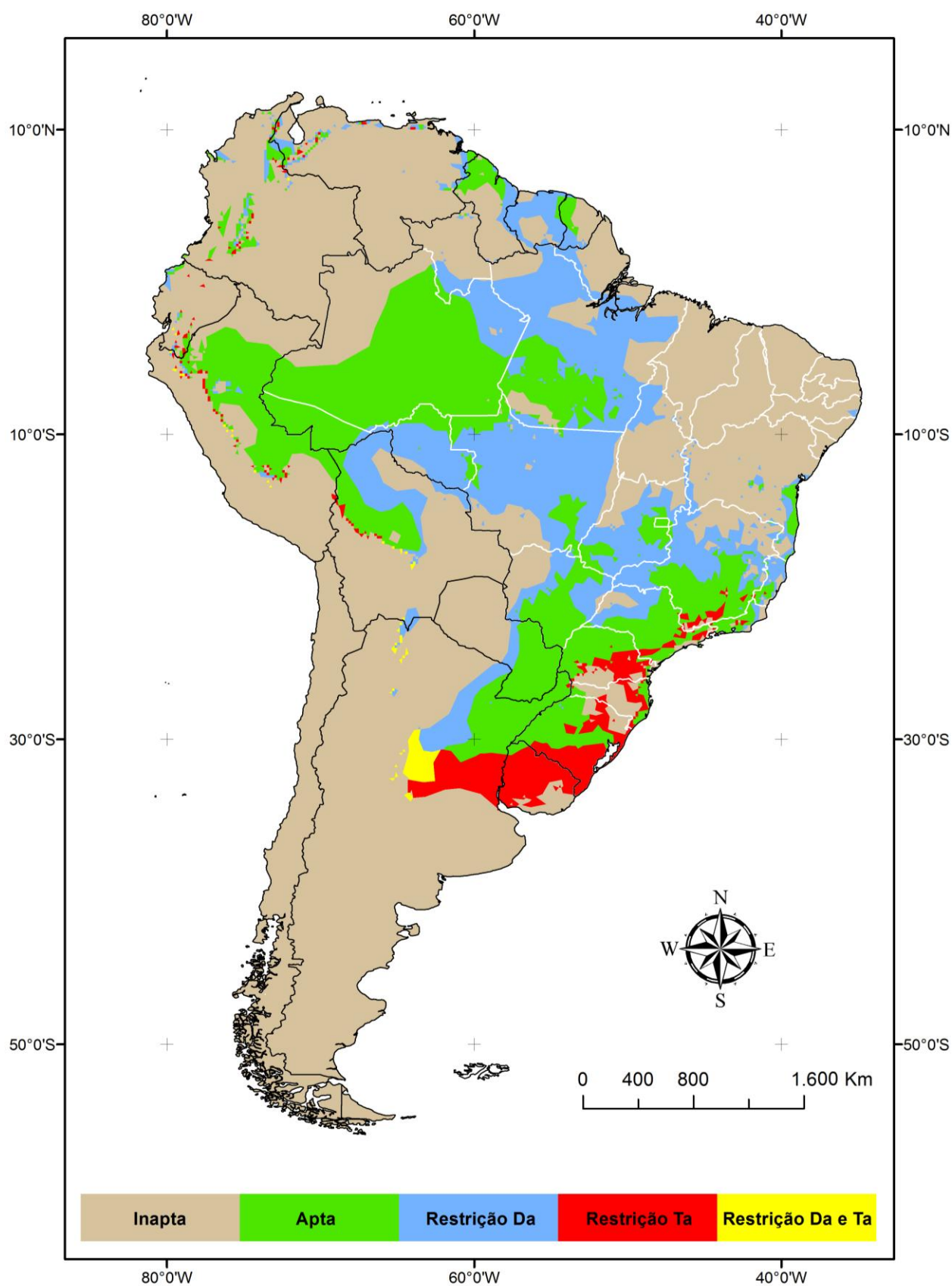
Para todo o período analisado (Tabela 5), observa-se que a percentagem da classe restrita por (Ta) é sempre menor que a restrita por (Da). Provavelmente, como a cultura é de clima tropical e subtropical (Doorenbos & Kassam, 1994), tolera bem temperaturas elevadas (Tabela 3), o que não ocorre com a demanda hídrica.

Segundo estudos realizados por Magalhães (1987), a temperatura do ar provavelmente é um dos fatores climáticos de maior relevância no desenvolvimento e produção da cana-de-açúcar, porém muitas vezes o desenvolvimento da cultura acaba sendo limitada pela demanda hídrica, por isso é importante que haja irrigação ou umidade no solo. Sodré (2010) mostra que em algumas áreas o aumento da temperatura para as décadas futuras beneficiar  a implanta o da cana-de-a o, desde que tenha demanda hídrica satisfatória para a cultura.

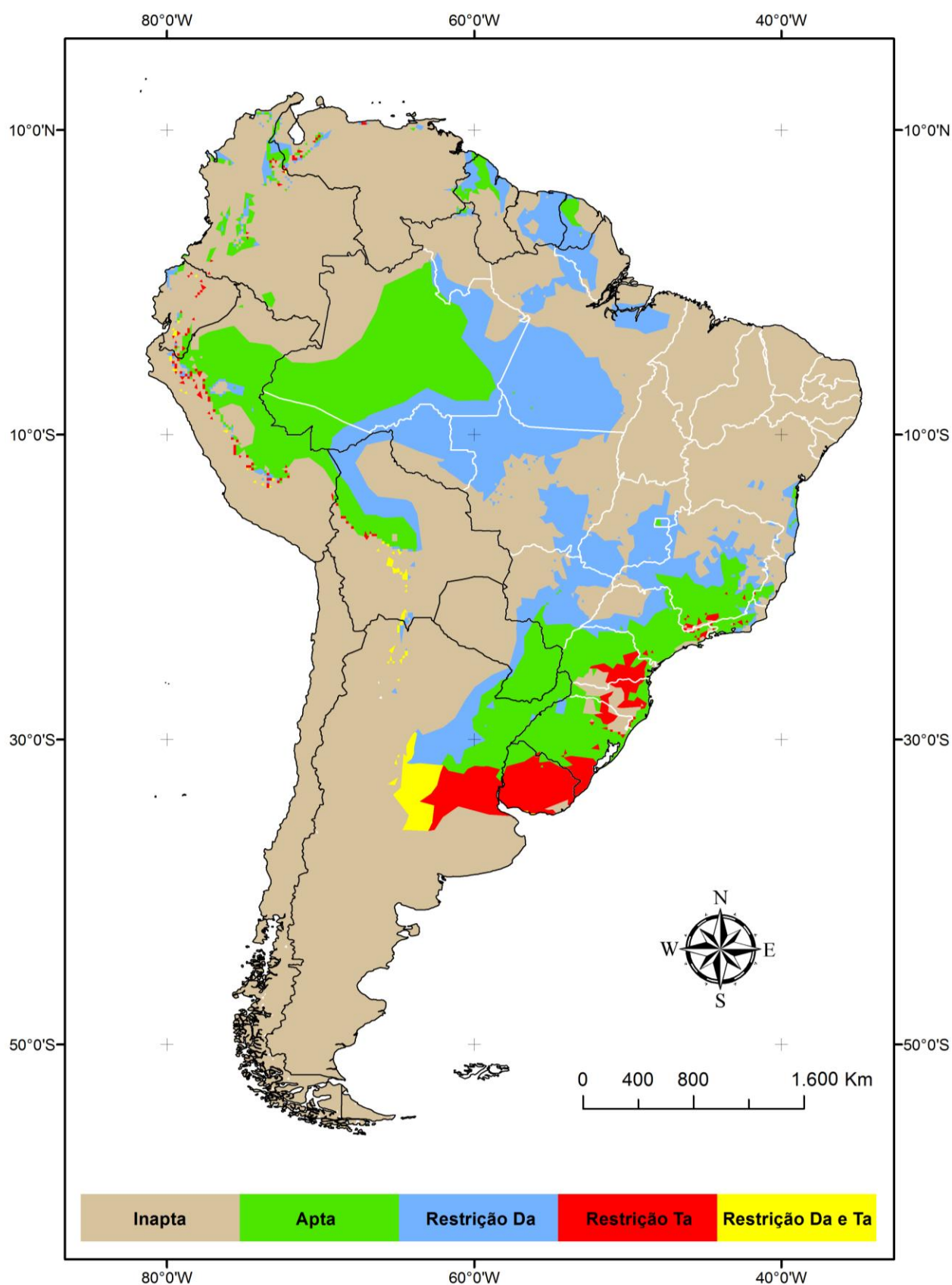
Nas Figuras 14 a 17,   observado que a maior parte do território da América do Sul   considerado climatologicamente inapto para a implanta o da cultura da cana-de-a o, alcançando 72% (Tabela 5) para a década de 2080. Este resultado pode ser justificado pela combina o do aumento da temperatura do ar (Figura 12) e da deficiência hídrica anual (Figura 13), ocasionado pela redu o da precipita o pluviométrica em algumas regiões (IPCC, 2007). A eleva o da temperatura aumenta a capacidade do ar em reter vapor d'água e, conseqüentemente, há uma maior demanda hídrica, uma vez que implica na eleva o das taxas de evapotranspira o (PEREIRA et al., 2002).



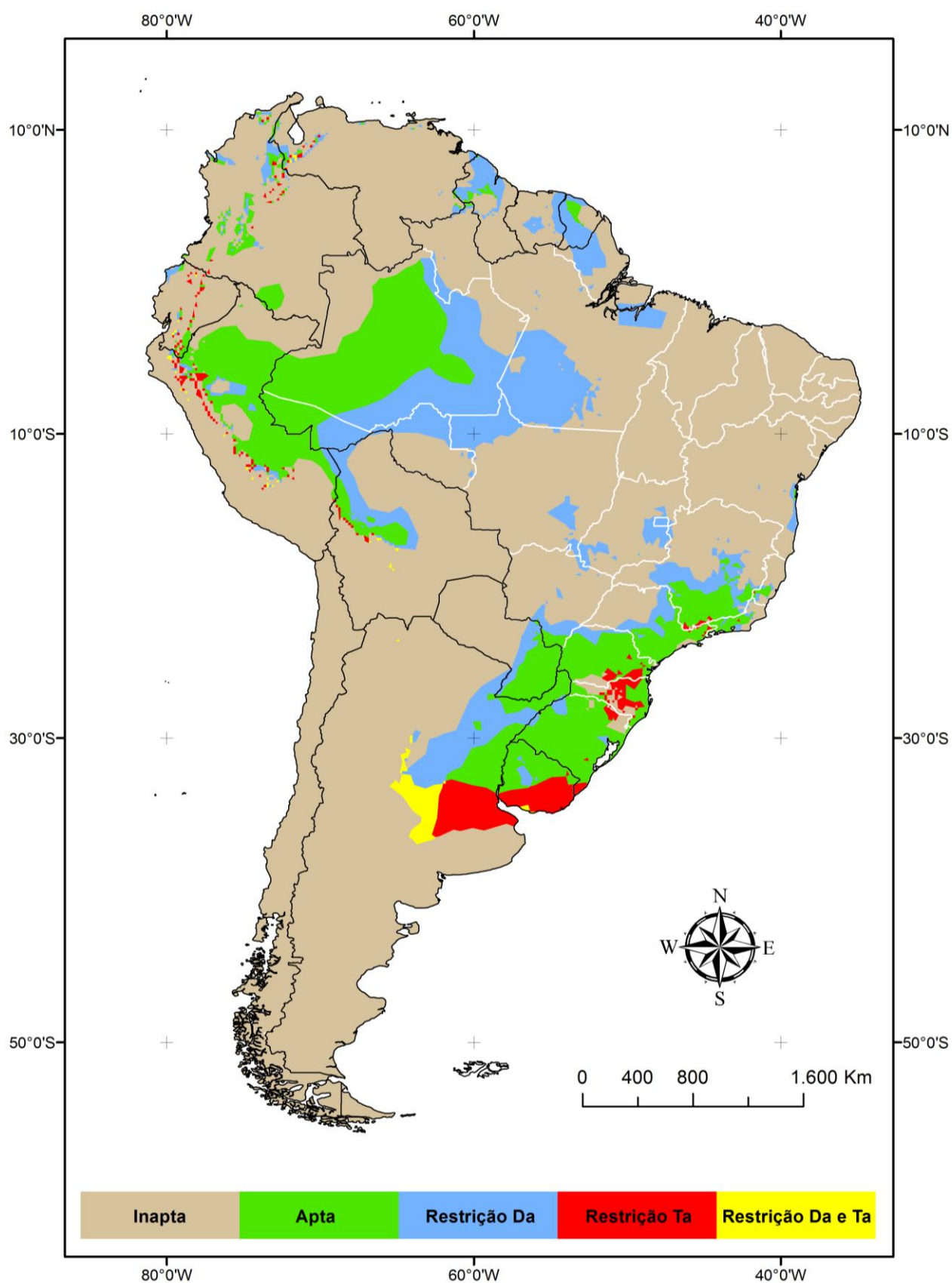
**Figura 14** – Zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar na América do Sul para o cenário referência (década de 1980) utilizando dados do CRU.



**Figura 15** – Zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar na América do Sul para a década de 2020, cenário A1B.



**Figura 16** – Zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar na América do Sul para a década de 2050, cenário A1B.



**Figura 17** – Zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar na América do Sul para a década de 2080, cenário A1B.

As Figuras 14 a 17 mostram que o Chile, tanto para o cenário referência, quanto para as projeções climáticas futuras apresentam 100% da área de seu território inapta para o cultivo da cultura (Tabelas 6 a 9). Isso ocorre, pelo fato da região apresentar temperaturas muito baixas (Figura 12A), o que não é tolerado pela cultura (Tabela 3).

No Peru, observa-se uma expansão nas áreas aptas para o cultivo da cultura para as décadas de 2020, 2050 e 2080 (Figura 14 a 17), essas regiões provavelmente serão beneficiadas pelo aumento da temperatura.

A classe restrita por (Ta) não sofrerá grandes mudanças para as projeções futuras do IPCC. As regiões com essa característica estão localizadas no Brasil, Uruguai e Argentina, enquanto a classe restrita por (Da) e (Ta) se concentrarão mais na Argentina (Figura 14 a 17).

Outro aspecto importante a ser avaliado é a distribuição espacial das classes de aptidão da cana-de-açúcar (Figura 14 a 17), regiões que no cenário referência apresentam áreas aptas para o cultivo da cultura passarão a ser inaptas ou restritas por (Da), e outras que não possuíam aptidão se tornarão aptas, mediante ao efeito das projeções futuras de mudanças climáticas. Isso pode ser observado em diversos países, ficando bem evidenciado no Estado do Amazonas pertencente à região Norte do Brasil, que para o cenário referência não apresenta áreas favoráveis para a cultura, porém com as projeções climáticas centradas nas décadas de 2020, 2050 e 2080, o Estado passará a possuir zonas aptas e Restritas por (Da), portanto, sendo beneficiado com o incremento da temperatura, já que apresenta baixa deficiência hídrica (Figura 13).

Se forem mantidas as características genéticas da cultura e as projeções de mudanças do clima pelo IPCC, é possível observar que na década de 2080 (Figura 17) haverá uma expansão das zonas inaptas para o cultivo da cultura.

As Tabelas 6 a 9 mostram a distribuição em percentagem das áreas com aptidão climática para a cultura da cana-de-açúcar para os países que compõem a América do Sul.

**Tabela 6** – Distribuição em percentagem das áreas com aptidão climática para a cultura da cana-de-açúcar por países para a década de 1980 (CRU) na América do Sul

| Países          | Área dos Países da América do Sul por classe de aptidão climática <sup>1</sup> (%) |                   |                   |                          |        |
|-----------------|--|-------------------|-------------------|--------------------------|--------|
|                 | Apta   | Restrita por (Da) | Restrita por (Ta) | Restrita por (Da) e (Ta) | Inapta |
| Brasil          | 36,10  | 3,90              | 2,90              | 0,00                     | 57,10  |
| Argentina       | 9,30   | 4,90              | 7,00              | 0,50                     | 78,30  |
| Bolívia         | 51,50  | 6,70              | 2,50              | 0,20                     | 39,10  |
| Colômbia        | 1,90   | 2,10              | 0,20              | 0,00                     | 95,80  |
| Chile           | 0,00   | 0,00              | 0,00              | 0,00                     | 100,00 |
| Equador         | 13,10  | 3,00              | 1,40              | 0,00                     | 82,50  |
| Guiana          | 0,30   | 0,00              | 0,00              | 0,00                     | 99,70  |
| Guiana Francesa | 0,00   | 0,00              | 0,00              | 0,00                     | 100,00 |
| Paraguai        | 44,1   | 13,20             | 0,00              | 0,00                     | 42,70  |
| Peru            | 7,26   | 0,09              | 1,13              | 0,02                     | 91,50  |
| Suriname        | 2,40   | 0,00              | 0,00              | 0,00                     | 97,60  |
| Uruguai         | 0,00   | 0,00              | 30,10             | 0,00                     | 69,90  |
| Venezuela       | 9,90   | 13,58             | 0,42              | 0,00                     | 76,10  |

<sup>1</sup> Área aproximada estimada pelo SIG.

**Tabela 7** – Distribuição em percentagem das áreas com aptidão climática para a cultura da cana-de-açúcar por países para a década de 2020 na América do Sul, cenário A1B

| Países          | Área dos Países da América do Sul por classe de aptidão climática <sup>1</sup> (%) |                   |                   |                          |        |
|-----------------|--|-------------------|-------------------|--------------------------|--------|
|                 | Apta   | Restrita por (Da) | Restrita por (Ta) | Restrita por (Da) e (Ta) | Inapta |
| Brasil          | 29,75  | 28,48             | 2,74              | 0,00                     | 39,03  |
| Argentina       | 7,24   | 4,29              | 4,87              | 2,09                     | 81,51  |
| Bolívia         | 14,19  | 18,17             | 0,64              | 0,26                     | 66,74  |
| Colômbia        | 4,88   | 2,06              | 0,57              | 0,03                     | 92,46  |
| Chile           | 0,00   | 0,00              | 0,00              | 0,00                     | 100,00 |
| Equador         | 4,09   | 2,73              | 2,02              | 0,18                     | 90,98  |
| Guiana          | 25,08  | 13,39             | 0,00              | 0,00                     | 61,53  |
| Guiana Francesa | 26,28  | 20,04             | 0,00              | 0,00                     | 53,68  |
| Paraguai        | 36,75  | 5,85              | 0,00              | 0,00                     | 57,40  |
| Peru            | 31,03  | 0,83              | 1,14              | 0,26                     | 66,74  |
| Suriname        | 3,98   | 62,53             | 0,00              | 0,00                     | 33,49  |
| Uruguai         | 4,35   | 0,00              | 71,62             | 0,00                     | 24,03  |
| Venezuela       | 2,22   | 4,47              | 0,64              | 0,00                     | 92,67  |

<sup>1</sup> Área aproximada estimada pelo SIG.

**Tabela 8** – Distribuição em percentagem das áreas com aptidão climática para a cultura da cana-de-açúcar por países para a década de 2050 na América do Sul, cenário A1B

| Países          | Área dos Países da América do Sul por classe de aptidão climática <sup>1</sup> (%) |                   |                   |                          |        |
|-----------------|--|-------------------|-------------------|--------------------------|--------|
|                 | Apta   | Restrita por (Da) | Restrita por (Ta) | Restrita por (Da) e (Ta) | Inapta |
| Brasil          | 20,57  | 25,92             | 1,55              | 0,00                     | 51,96  |
| Argentina       | 7,23   | 5,16              | 4,72              | 3,98                     | 78,91  |
| Bolívia         | 10,04  | 13,00             | 0,33              | 0,95                     | 75,68  |
| Colômbia        | 5,78   | 2,73              | 0,24              | 0,03                     | 91,22  |
| Chile           | 0,00   | 0,00              | 0,00              | 0,00                     | 100,00 |
| Equador         | 5,78   | 2,73              | 0,24              | 0,03                     | 91,22  |
| Guiana          | 15,19  | 19,76             | 0,00              | 0,00                     | 65,05  |
| Guiana Francesa | 21,33  | 43,49             | 0,00              | 0,00                     | 35,18  |
| Paraguai        | 32,64  | 6,27              | 0,00              | 0,00                     | 61,09  |
| Peru            | 33,09  | 1,94              | 1,51              | 0,26                     | 63,20  |
| Suriname        | 0,15   | 59,52             | 0,00              | 0,00                     | 40,33  |
| Uruguai         | 15,36  | 0,00              | 80,74             | 0,27                     | 3,63   |
| Venezuela       | 1,56   | 2,31              | 0,44              | 0,00                     | 95,69  |

<sup>1</sup> Área aproximada estimada pelo SIG.

**Tabela 9** – Distribuição em percentagem das áreas com aptidão climática para a cultura da cana-de-açúcar por países para a década de 2080 na América do Sul, cenário A1B

| Países          | Área dos Países da América do Sul por classe de aptidão climática <sup>1</sup> (%) |                   |                   |                          |        |
|-----------------|--|-------------------|-------------------|--------------------------|--------|
|                 | Apta   | Restrita por (Da) | Restrita por (Ta) | Restrita por (Da) e (Ta) | Inapta |
| Brasil          | 17,71  | 17,32             | 0,71              | 0,00                     | 64,26  |
| Argentina       | 5,54   | 7,81              | 4,65              | 2,90                     | 79,10  |
| Bolívia         | 5,70   | 9,99              | 0,45              | 0,18                     | 83,68  |
| Colômbia        | 7,32   | 3,21              | 0,56              | 0,00                     | 88,91  |
| Chile           | 0,00   | 0,00              | 0,00              | 0,00                     | 100,00 |
| Equador         | 5,59   | 2,81              | 3,58              | 0,45                     | 87,57  |
| Guiana          | 4,26   | 28,39             | 0,00              | 0,00                     | 67,35  |
| Guiana Francesa | 12,54  | 56,35             | 0,00              | 0,00                     | 31,11  |
| Paraguai        | 26,28  | 8,89              | 0,00              | 0,00                     | 64,83  |
| Peru            | 33,26  | 3,22              | 2,18              | 0,30                     | 61,04  |
| Suriname        | 0,00   | 21,92             | 0,00              | 0,00                     | 78,08  |
| Uruguai         | 49,45  | 5,86              | 43,57             | 1,12                     | 0,00   |
| Venezuela       | 0,89   | 2,22              | 0,34              | 0,15                     | 96,40  |

<sup>1</sup> Área aproximada estimada pelo SIG.



Analisando as Tabelas 6 a 9, é possível observar que as projeções climáticas promoverão alterações significativas nos países da Guiana Francesa e Uruguai. No cenário referência, esses países que não possuíam áreas aptas para o cultivo da cultura, com as projeções futuras de mudanças climáticas ao longo das décadas de 2020, 2050 e 2080 passarão a apresentar zonas aptas para o cultivo da cultura. A Guiana Francesa alcançará 26,28% de seu território de áreas favoráveis ao cultivo da cultura na década 2020, reduzindo para 21,33% e 12,54% nas décadas de 2050 e 2080, respectivamente.

O Uruguai passará a ter 4,35% de áreas aptas para a cultura na década de 2020, 15,36% na década de 2050 e um aumento acentuado na década de 2080 chegando a 49,45% de áreas aptas.

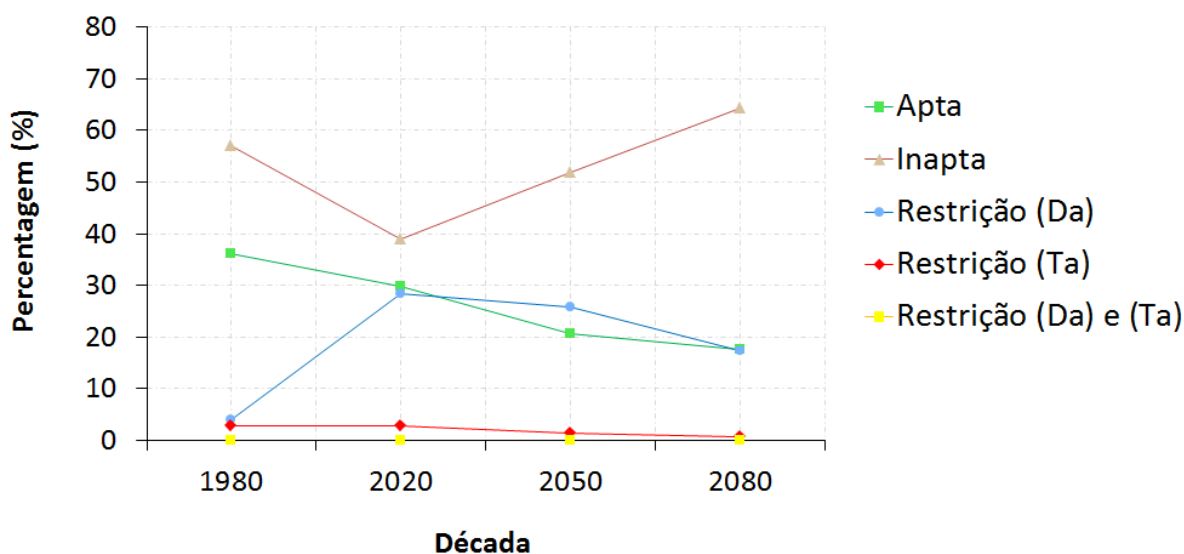
Comparando os dados do cenário referência (Tabela 6) com os dados da simulação futura para a década de 2020 (Tabelas 7), foi possível observar que alguns países da América do Sul serão favorecidos com as mudanças do clima expandindo suas áreas aptas para a produção canavieira, é o caso da Colômbia, Peru, Suriname, Guiana e o Uruguai. Dentre esses países, o Peru passará de 7,26% para 31,03% de áreas aptas, enquanto, a Guiana que no cenário referência possui 0,30% chegará a 25,08%.

A Argentina, país com a segunda maior extensão territorial da América do Sul, não apresenta mudanças significativas entre as classes de aptidão, porém é o país que apresenta a maior concentração das áreas da classe restrita por (Da) e (Ta) (Figura 14 a 17), aumentando sensivelmente de 0,5% (cenário referência) para 3,98% na década de 2050, conforme mostrado nas Tabelas 6 e 8. A Bolívia é outro país que apresenta mudanças na aptidão climática da cultura da cana-de-açúcar com as simulações futuras do clima, sofrendo uma redução drástica da classe apta para a cultura, passando de 51,5% no cenário referência para 5,7% para a projeção futura da década de 2080 (Tabelas 6 e 9).

No geral, analisando a América do Sul, verifica-se que a maior parte do território não é indicada para a implantação da cultura, porém haverá uma expansão das regiões da classe restrita por (Da), isso fica bem evidenciado ao comparar o cenário referência (Figura 14) com os períodos futuros (Figuras 15 a 17). É importante salientar que a cultura poderá ser cultivada nessas áreas, porém a utilização de sistemas de irrigação tornará necessário.

#### 4.4 – Avaliação do impacto das mudanças climáticas no Brasil

A Figura 18 mostra o comportamento das classes de aptidão climática para a cana-de-açúcar no Brasil, país com maior extensão territorial da América do Sul, considerando o cenário referência (década de 1980) e projeções futuras de mudanças climáticas para as décadas de 2020, 2050 e 2080.



**Figura 18** – Distribuição em porcentagem das áreas de aptidão climática para a cultura da cana-de-açúcar no Brasil para as décadas de 1980, 2020, 2050 e 2080, cenário A1B.

De acordo com a Figura 18, é possível observar o comportamento da classe inapta para o cultivo da cana-de-açúcar para os períodos analisados, que sofrerá uma redução de 57,1% (cenário referência) para 39,03% (década de 2020) (Tabelas 6 e 7). Isso ocorre, porque muitas áreas inaptas passarão a ser restritas por (Da), principalmente nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste (Figuras 14 e 15). Porém, para as décadas de 2050 e 2080 haverá uma expansão das zonas inaptas.

Considerando o cenário referência, é possível observar que a região do Nordeste apresenta zonas favoráveis ao cultivo da cultura (Figura 14), porém, caso seja mantida as projeções futuras do IPCC, essas zonas serão minimizadas permanecendo quase que totalmente inaptas na década de 2080 (Figura 17). Tal situação é constatada por Oliveira et al. (2011), que verificaram que diante das

condições de aumento da temperatura do ar associado à demanda hídrica, as áreas com alto risco climático representarão quase que 100% da região Nordeste do Brasil. Os autores ainda ressaltam que esses fatores climáticos combinados podem trazer graves consequências para a economia da região.

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a seca que atinge a região do Nordeste acentuou a deficiência hídrica na região prejudicando consideravelmente o ciclo produtivo da cultura, uma vez que a umidade do solo apresenta-se abaixo do necessário para o desenvolvimento da cultura. Na Figura 14, é observado que a maior parte da região estudada apresenta áreas inaptas ou restritas por deficiência hídrica, se agravando para as projeções futuras principalmente para a década de 2080, onde praticamente quase toda região ficará inapta para a implantação e produção da cana-de-açúcar (Figura 17).

Analisando a região Centro-Oeste, observa-se que no Estado do Mato Grosso do Sul haverá uma mudança de classes de aptidão, passando de apta (cenário referência) para a classe restrita por (Da) e inapta, ao longo do período das projeções futuras (Figura 14 a 17).

É importante ressaltar que se as projeções futuras de mudanças climáticas para a década de 2080 forem mantidas muitos estados da Região Nordeste ficarão totalmente inaptos climatologicamente para o cultivo da cultura, é o caso do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe. Já na região Centro-Oeste, a cultura só poderá ser cultivada mediante ao uso de irrigação (Figura 17).

Analisando a região Sul, é possível observar que o aumento da temperatura irá causar um impacto positivo para a implantação da cana-de-açúcar, uma vez que essa região é caracterizada por apresentar temperaturas abaixo da exigida pela cultura (Figura 12). É o caso do Rio Grande do Sul, que para o cenário referência apresenta somente zonas inaptas e restritas por temperatura, no entanto, para a década de 2080, o Estado será praticamente todo favorável ao cultivo da cultura (Figura 17).

Na região Sudeste, as áreas que estão localizadas mais ao sul do Estado de São Paulo (Figura 14) apresentam restrições por (Ta) para o cultivo da cultura, no entanto, com as projeções das mudanças climáticas, tais áreas perderão essas características e se tornarão em áreas favoráveis ao desenvolvimento da cultura (Figura 16 e 17). Resultados concordantes forma obtidos por Sodré (2010), que

aponta que até 2040 as áreas ao sul do Estado de São Paulo que apresentavam limitações por baixas temperaturas, passarão a ser aptas para o cultivo da cana-de-açúcar. Porém, o autor ressalta que o aumento da temperatura não é o único fator determinante para inferir sobre o zoneamento agroclimático de uma cultura, outros fatores como a umidade disponível no solo, devem ser levando em consideração.

Marin, et al. (2012), através de estudos realizados para o Estado de São Paulo, concluiu que o efeito decorrente da elevação da [CO<sub>2</sub>] na cultura pode aumentar a eficiência do uso da água, tornando o cenário um pouco mais favorável à produtividade da cultura.

#### **4.5 – Matriz de transição entre classes de aptidão climática da cana-de-açúcar**

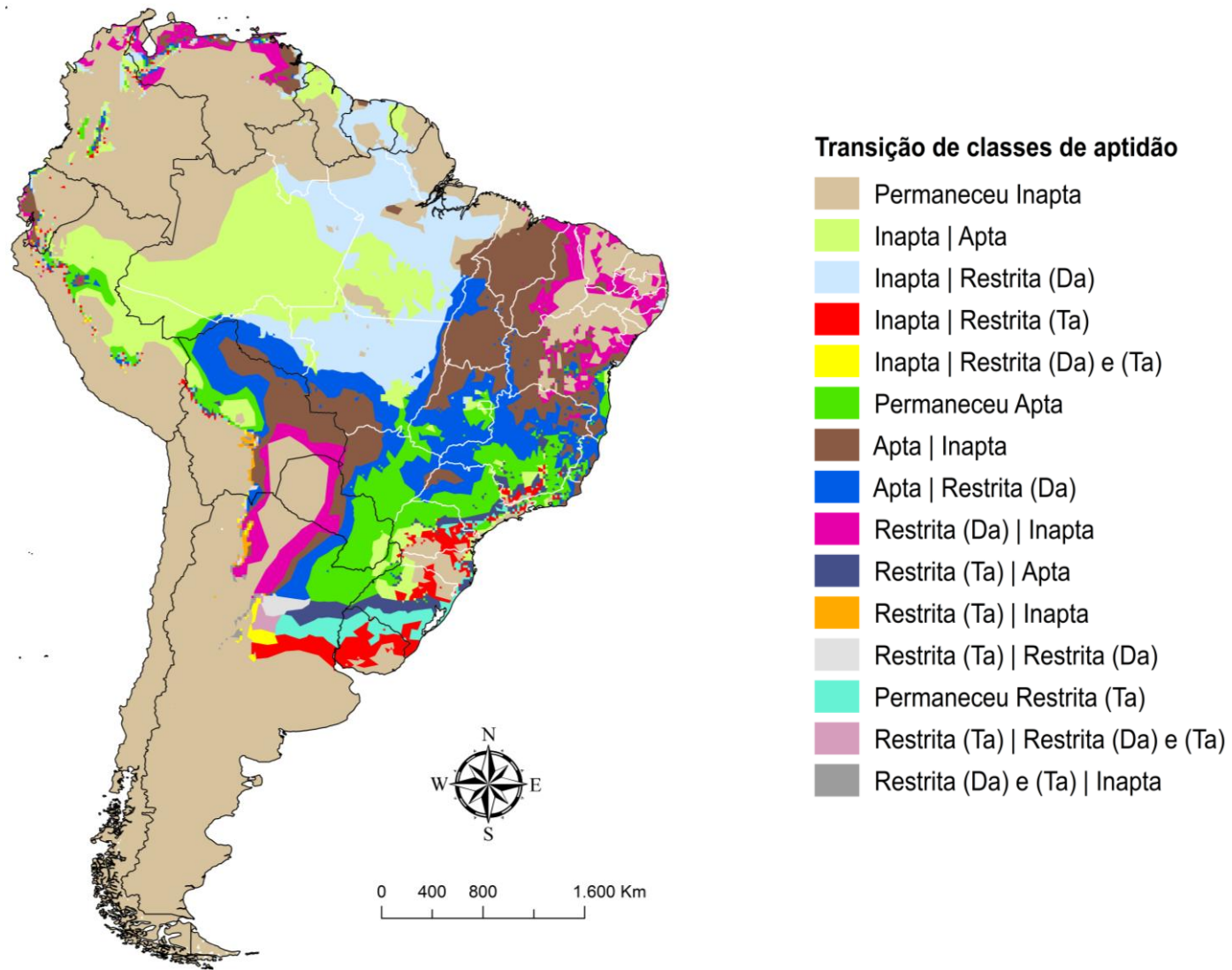
As Figuras 19, 20 e 21 apresentam os mapas das transições entre as classes de aptidão climática do zoneamento agroclimático para a cultura da cana-de-açúcar para a América do Sul, decorrentes da comparação do período referência (década de 1980) com as projeções climáticas futuras do cenário A1B para as décadas de 2020, 2050 e 2080. É possível notar nos mapas a distinção das mudanças das classes ocorridas em diferentes épocas. Pontius Jr. et al. (2004) realizando estudos de cobertura vegetal, mostraram através de mapas de análise de transição de classes que houve mudanças significativas.

Analisando a Figura 19, observa-se que a transição entre as classes apresentam alterações expressivas de mudanças de classes principalmente na região Norte do Brasil, que passou de inapta para apta e em outras áreas de inapta para restrito por (Da), o mesmo acontecendo para as décadas de 2050 e 2080 mostrados nas Figuras 20 e 21 respectivamente.

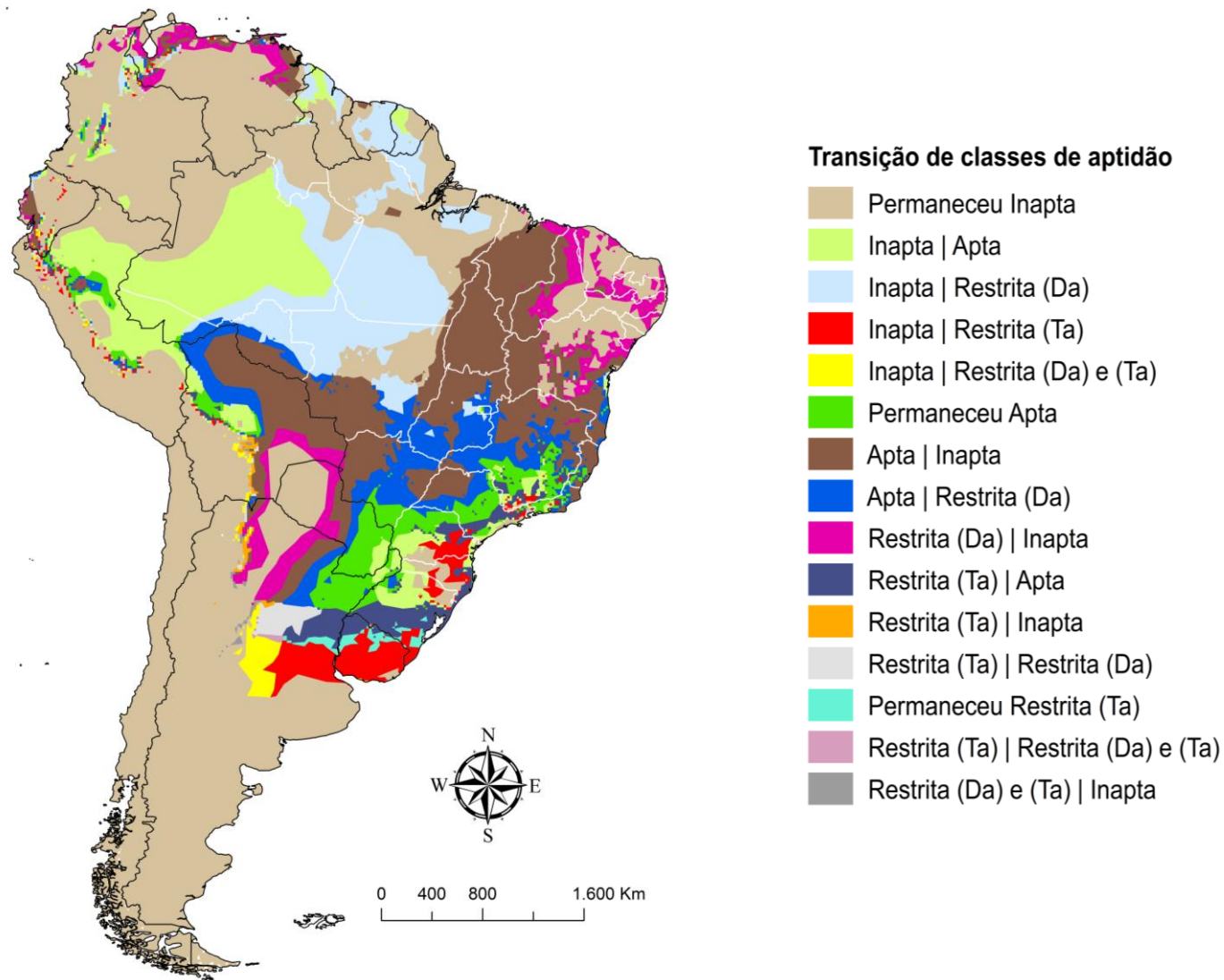
As Figuras 19, 20 e 21 mostram que em grande parte da Argentina, Colômbia e Venezuela não há mudanças de classes, estas permanecem inaptas para o cultivo da cana-de-açúcar quando comparado o período referência com o futuro. O Chile não apresenta alteração das classes diante das simulações de mudanças do clima, o país permanece com todo o seu território inapto para todos os períodos analisados.

O Brasil apresenta grandes perdas de áreas aptas para o cultivo da cultura, essas áreas em sua grande parte transitam para inapta, principalmente na região Nordeste (Figura 19 a 21). Resultados concordantes foram encontrados nos estudos

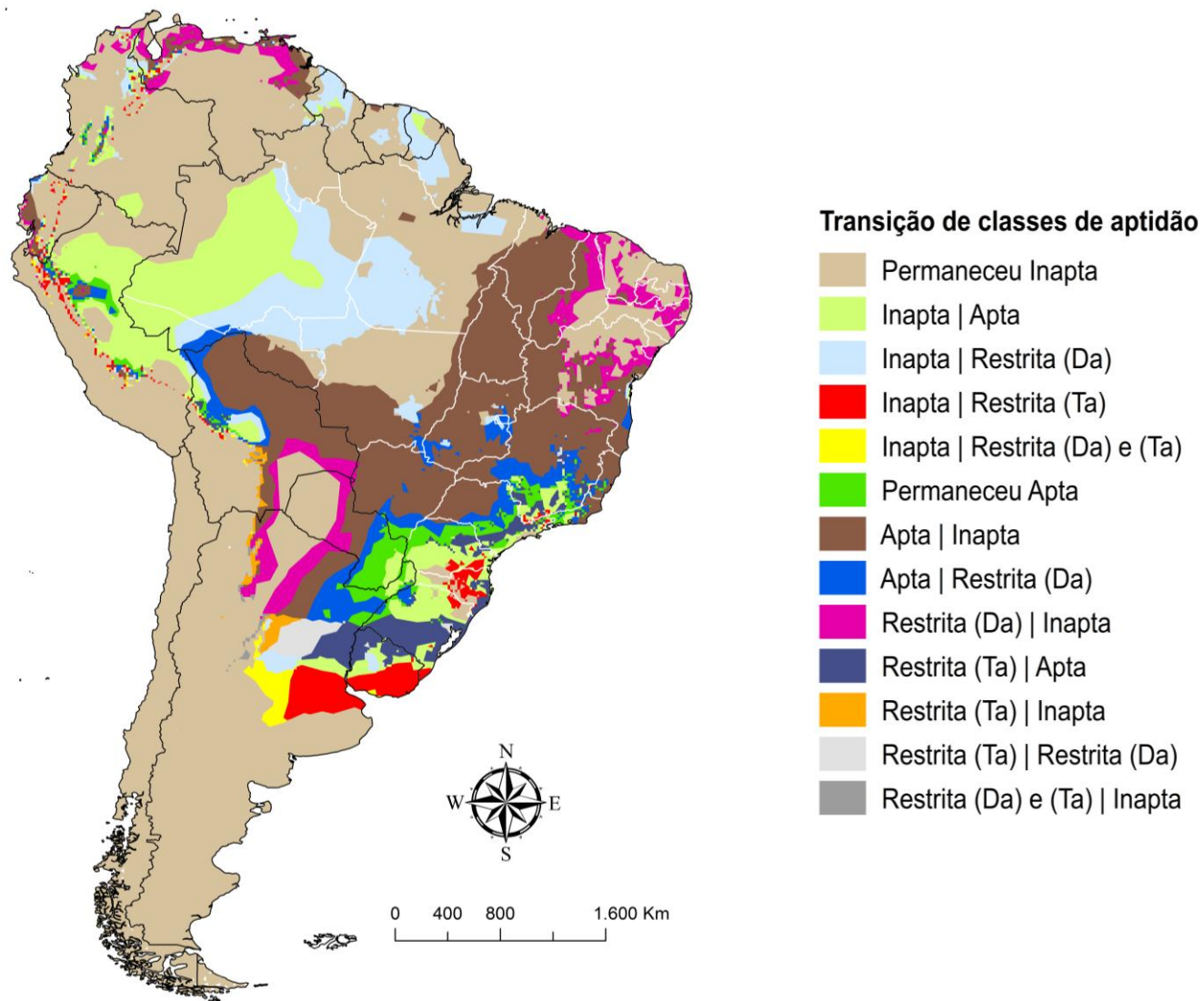
realizados por Oliveira et al. (2012) que apontou alto risco climático para a cultura mediante as mudanças climáticas, porém em alguns locais do Brasil observa-se o surgimento de novas áreas aptas para o cultivo, como por exemplo o Estado do Amazonas.



**Figura 19** – Mapa de transição entre classes de aptidão climática da cana-de-açúcar na América do Sul considerando o período referênciada e a projeção futura da década de 2020, cenário A1B.



**Figura 20** – Mapa de transição entre classes de aptidão climática da cana-de-açúcar na América do Sul considerando o período referênci e a projeção futura da década de 2050, cenário A1B.



**Figura 21** – Mapa de transição entre classes de aptidão climática da cana-de-açúcar na América do Sul considerando o período referênci e a projeção futura da década de 2080, cenário A1B.



As Tabelas 10, 11 e 12 apresentam as matrizes de tabulação cruzada, onde é possível verificar a proporção das áreas em percentagem (%) da transição entre classes de aptidão climática comparando o período referência com as projeções de mudanças climáticas para o futuro centrado nas décadas de 2020, 2050 e 2080 respectivamente. As tabelas também apresentam campos de perdas e ganhos de áreas das classes analisadas. A área que cada classe perdeu no período referência está representada nas linhas da matriz, enquanto ao longo das colunas a área que cada classe ganhou no período analisado, além de mostrar também as classes que contribuíram para esse aumento. As áreas de cada classe que persistiu comparando o período referência com o futuro estão representadas nas células sombreadas na diagonal descendente da matriz.

Analisando a Tabela 10, observa-se que 44,47% das áreas pertencentes à classe inapta no período referência permanecem sem mudanças no futuro. A classe apta sofreu alteração com os impactos das mudanças climáticas, perdendo 18,12% entre o período referência e a projeção futura da década de 2020.

Ainda verificando a Tabela 10, nota-se que a classe inapta é a que apresenta maiores perdas (23,77%) para outras classes entre o período referência e a projeção futura para a década de 2020, isso pode ser explicado pelo fato dessas áreas estarem transitando para restrita (Da), já que esta apresenta o maior ganho (16,87%) entre as classes analisadas.

Analisando a Tabela 11, percebe-se que do total da área considerada inapta (68,23%) do período referência, 45,70% persistirá no período futuro da década de 2050. Observa-se ainda que apenas 0,10% das áreas da classe restrita por (Da) e (Ta) transitará para inapta, enquanto 10,12% da classe inapta passarão para apta, as novas áreas aptas podem ser verificadas principalmente na região do Norte do Brasil. Observa-se ainda que 9,54% das áreas inaptas passarão a ser restritas por (Da). Nessas áreas, a cultura poderá ser cultivada, porém o uso da irrigação será necessário. Ainda de acordo com os resultados da Tabela 11, a classe restrita por (Da) e (Ta) será a que sofrerá menor impacto das mudanças do clima para o período da década de 2050, com o total de 0,73% de mudanças.

A Tabela 12 mostra que a classe apta é a que apresenta maiores perdas de áreas (22,29%) entre o período referência e a projeção futura para a década de 2080, seguida da inapta (20,05%). Verifica-se ainda que 18,96% das áreas correspondentes à classe apta passaram para a classe inapta, esse percentual se

caracteriza como uma redução expressiva das áreas favoráveis para o cultivo da cana-de-açúcar na América do Sul. A área total, portanto da classe inapta corresponde a aproximadamente 72% da área de estudo, apresentando um ganho de 23,71% das outras classes. Esse resultado pode ser atribuído ao aumento da temperatura (Figura 12) e da deficiência hídrica para algumas regiões (Figura 13). Oliveira et al. (2012) encontraram uma expansão considerável das áreas inaptas para o cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil mediante as alterações climáticas.

Analisando os ganhos de cada classe, observa-se que a classe inapta é a que obteve maiores ganhos de áreas (23,71%) entre o período referência e a década de 2080, seguida da classe apta (11,93%) e da restrita por (Da) que apresenta 11,83% oriundas de outras classes, as outras classes foram pouco expressivas.

Em geral, para os períodos analisados (década de 2020, 2050 e 2080), as classes apta, inapta e restrita por (Da) são as que mais apresentam transições entre classes de aptidão climática, porém a classe inapta se mostra mais expressiva quanto à persistência das mesmas ao longo de todos os períodos avaliados.

A dificuldade da análise não foi na identificação e quantificação do grau de persistência das classes, mas sim na detecção correta das alterações das classes de aptidão climática da cana-de-açúcar. É importante ressaltar que ainda são encontrados poucos relatos e trabalhos que avaliem as transições entre classes de aptidão climática comparando o cenário referência com o futuro decorrente das mudanças climáticas globais do IPCC-A4, principalmente para a América do Sul, área escolhida para a realização do presente trabalho.

**Tabela 10** – Matriz de transição entre classes de aptidão climática da cana-de-açúcar na América do Sul após a sobreposição dos mapas de zoneamento agroclimático para os períodos de referência e futuro para a década de 2020, cenário A1B

|                          |                        | Cenário Futuro (Década de 2020) |              |                 |                 |                        | Total (Referência) % | Perdas %     |
|--------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|--------------|
|                          |                        | Apta %                          | Inapta %     | Restrita (Da) % | Restrita (Ta) % | Restrita (Da) e (Ta) % |                      |              |
| Cenário Referência (CRU) | Apta %                 | 6,19                            | 10,34        | 7,78            | 0,00            | 0,00                   | 24,31                | <b>18,12</b> |
|                          | Inapta %               | 12,92                           | 44,47        | 8,83            | 1,81            | 0,21                   | 68,23                | <b>23,77</b> |
|                          | Restrita (Da) %        | 0,00                            | 4,27         | 0,00            | 0,00            | 0,00                   | 4,27                 | <b>4,27</b>  |
|                          | Restrita (Ta) %        | 1,26                            | 0,16         | 0,26            | 1,23            | 0,18                   | 3,08                 | <b>1,86</b>  |
|                          | Restrita (Da) e (Ta) % | 0,00                            | 0,10         | 0,00            | 0,00            | 0,00                   | 0,10                 | <b>0,10</b>  |
| <b>Total (Futuro) %</b>  |                        | 20,37                           | 59,34        | 16,87           | 3,04            | 0,38                   | 100,00               |              |
| <b>Ganhos %</b>          |                        | <b>14,18</b>                    | <b>14,87</b> | <b>16,87</b>    | <b>1,81</b>     | <b>0,38</b>            |                      |              |

Ta = temperatura média anual; e Da = deficiência hídrica anual.

**Tabela 11** – Matriz de transição entre classes de aptidão climática da cana-de-açúcar na América do Sul após a sobreposição dos mapas de zoneamento agroclimático para os períodos de referência e futuro para a década de 2050, cenário A1B

|                          |                        | Cenário Futuro (Década de 2050) |              |                 |                 |                        | Total (Referência) % | Perdas %     |
|--------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|--------------|
|                          |                        | Apta %                          | Inapta %     | Restrita (Da) % | Restrita (Ta) % | Restrita (Da) e (Ta) % |                      |              |
| Cenário Referência (CRU) | Apta %                 | 3,60                            | 15,14        | 5,57            | 0,00            | 0,00                   | 24,31                | <b>20,71</b> |
|                          | Inapta %               | 10,12                           | 45,70        | 9,54            | 2,19            | 0,68                   | 68,23                | <b>22,53</b> |
|                          | Restrita (Da) %        | 0,00                            | 4,27         | 0,00            | 0,00            | 0,00                   | 4,27                 | <b>4,27</b>  |
|                          | Restrita (Ta) %        | 2,00                            | 0,20         | 0,51            | 0,33            | 0,04                   | 3,10                 | <b>2,77</b>  |
|                          | Restrita (Da) e (Ta) % | 0,00                            | 0,10         | 0,00            | 0,00            | 0,00                   | 0,10                 | <b>0,10</b>  |
| Total (Futuro) %         |                        | 15,73                           | 65,40        | 15,62           | 2,52            | 0,73                   | 100,00               |              |
| Ganhos %                 |                        | <b>12,12</b>                    | <b>19,70</b> | <b>15,11</b>    | <b>2,52</b>     | <b>0,73</b>            |                      |              |

Ta = temperatura média anual; e Da = deficiência hídrica anual.

**Tabela 12** – Matriz de transições entre classes de aptidão climática da cana-de-açúcar na América do Sul após a sobreposição dos mapas de zoneamento agroclimático para os períodos referência e futuro para a década de 2080, cenário A1B

|                          |                        | Cenário Futuro (Década de 2080) |              |                 |                 |                        | Total (Referência) % | Perdas %     |
|--------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|--------------|
|                          |                        | Apta %                          | Inapta %     | Restrita (Da) % | Restrita (Ta) % | Restrita (Da) e (Ta) % |                      |              |
| Cenário Referência (CRU) | Apta %                 | 2,01                            | 18,96        | 3,33            | 0,00            | 0,00                   | 24,30                | <b>22,29</b> |
|                          | Inapta %               | 9,78                            | 48,18        | 7,93            | 1,82            | 0,52                   | 68,23                | <b>20,05</b> |
|                          | Restrita (Da) %        | 0,00                            | 4,27         | 0,00            | 0,00            | 0,00                   | 4,27                 | <b>4,27</b>  |
|                          | Restrita (Ta) %        | 2,15                            | 0,39         | 0,57            | 0,00            | 0,00                   | 3,10                 | <b>3,10</b>  |
|                          | Restrita (Da) e (Ta) % | 0,00                            | 0,10         | 0,00            | 0,00            | 0,00                   | 0,10                 | <b>0,10</b>  |
| Total (Futuro) %         |                        | 13,94                           | 71,89        | 11,83           | 1,82            | 0,52                   | 100,00               |              |
| Ganhos %                 |                        | <b>11,93</b>                    | <b>23,71</b> | <b>11,83</b>    | <b>1,82</b>     | <b>0,52</b>            |                      |              |

Ta = temperatura média anual; e Da = deficiência hídrica anual.

## 5. CONCLUSÃO

De acordo com a análise dos dados e a interpretação dos resultados obtidos dentro das condições específicas do presente trabalho, conclui-se que:

- o Multimodel (*ensemble*) – MM é o que obteve melhor desempenho na simulação dos dados das médias mensais das variáveis climáticas precipitação pluviométrica e temperatura do ar;
- se ocorrerem as mudanças climáticas globais projetadas pelos modelos do IPCC-AR4 ao longo das décadas de 2020, 2050 e 2080 considerando o cenário A1B e mantidas as características genéticas da cultura, ocorrerá uma expansão das regiões inaptas para a implantação da cana-de-açúcar na América do Sul. As áreas restritas por deficiência hídrica também aumentarão, sendo estas passíveis de cultivo, porém o uso da irrigação torna-se imprescindível nessas regiões;
- a matriz de transição de classes permitiu conhecer os locais onde houve ganhos, perdas e trocas entre as classes de aptidão climática para a cana-de-açúcar, ocasionada pelas mudanças climáticas globais, auxiliando, portanto no planejamento agrícola e nas tomadas de decisões.

## 6. REFERÊNCIAS

ALFONSI, R. R.; PEDRO JR, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, v.1, n.135, p.42-81, set. 1987.

ALLEN, R.A.; PEREIRA, S.L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements**. Roma: FAO, 1998. 328p. (Irrigation and Drainage, n.56).

ALVES, J.M. B.; CAMPOS, J.N.B.; FILHO, F.de A.; MONCUNNIL, D.F.; SILVA, E.M. da; BARBOSA, W.L.; FERREIRA, A.G.; SUN, L.; MOURA, A.D. Uma avaliação preliminar de simulações climáticas de um modelo regional espectral aninhado em um modelo global (ECHAM4.5) sobre o setor Norte da região Nordeste do Brasil (1971- 2000). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p.191-206, 2005.

ARAYA, A.; KEESSTRA, S.D.; STROOSNIJDER, L.A. New agro-climatic classification for crop suitability zoning in northern semi-arid Ethiopia. **Agricultural and Forest Meteorology**, n.150. p1057-1064, 2010.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JR, J.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1057-1064, 2004.

ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; BELTRÃO, N. E. M.; PINTO, H. S. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.1, p.1-8, 2013.

BARBARISI, B.F.; MARIN, F.R.; PILAU, F.G.; PACHECO, L.R.F. Efeito das mudanças climáticas sobre a aptidão climática para a cana-de-açúcar no Estado de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBA, 2007, p.15.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: PLANALSUCAR, Coordenadoria Regional Sul, 1982. p.36.

BREKKE, L.D.; DETTINGER, M.D.; MAURER, E.P.; Anderson, M. Significance of model credibility in estimating climate projection distributions for regional hydroclimatological risk assessments. **Climatic Change**, n.89, p.371–394, 2007.

BRUNINI, O; PRADO,H.do; LANDELL, M.G.A.; CARVALHO, J.P. de; BRUNINI, A.; MORAIS, J.F.L. **Zoneamento de culturas bioenergéticas no Estado de São Paulo: aptidão edafoclimática da cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 2008. 31p. 1 CD\_ROM.

BUCKERIDGE, M.S.; AIDAR, M.P.M.; SILVA,E.A.; MARTINEZ,C.A. **Respostas de Plantas às Mudanças Climáticas Globais**. In: BUCKERIDGE, M.S. (Org.). *Biologia e Mudanças Climáticas no Brasil*. 1.ed. São Carlos: Rima Editora, v. 1, p.77-91, 2008.

BUONOMO, E.; JONES, R.G.; HUNTINGFORD, C.; HANNAFORD, J. On the robustness of changes in extreme precipitation over Europe from two high resolution climate change simulations. *American Meteorological Society*, v.133, p.65-81, 2007.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Análise numérica**. Cengage Learning, 8ª Ed., 2008, 721p.

CANTELAUBE, P.; TERRES, J.M. Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe. **Tellus**, n.57, p.476–487, 2005.

CASAGRANDE, A.A. e VASCONCELOS, A.C.M. Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Eds.) **cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, p.57-78, 2008.

CAYA, D.; LAPRISE, R. A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: the Canadian RCM. *Mon. Weather Rev.* 127, 341-362, 1999.

CHEN, J.; BRISSETTE, F. P.; CHAUMONT, D.; BRAUN, M. Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. **Journal of Hydrology**, v.479, p.200-214, 2012.

CHEN, J.; BRISSETTE, F.P.; LCONTE, R. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. **Journal of Hydrology**. v.401, p.190-202, 2011.

CHRISTENSEN, J.H.; HEWITSON, B.; BUSUIOC, A.**Regional Climate Projections**. In: SOLOMON, S.; QUIN, D.; MANNING, M. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, UK. 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter11.pdf>. Acesso em 04/10/2013.



CONAB- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar**, segundo levantamento, agosto de 2013. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, p.19, 2013.

CRISPIM, J.E. Manejo correto da cana é essencial para alta produtividade. **Revista Campo & Negócios**, Uberlândia, n.37, p.16-18, 2006.

DICKINSON, R.E.; ERRICO, R.M. et al. A regional climate model for the western U.S. **Climate Change**, Berlim, v.15, 383-422. 1989.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. (Traduzido por GHEYI, H. R.; SOUZA, A.A.; DAMASCENO, F.A.V.; MEDEIROS, J.F. Campina Grande: FAO, 1994. 306 p. (Irrigação e Drenagem, n.33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. 1977. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma: FAO, 1977. 179p. (Irrigation and Drainage, n.24).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. In: Manzatto, C.V. Embrapa Solos, Rio de Janeiro-RJ, 2009. 55p.

FARIAS, C.H.A. et al. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.

FAN, L.J. Statistically downscaled temperature scenarios over China, **Atmospheric and Oceanic Science Letters**, p.208–213, 2009.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G. de A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. IAC, p.31-44, 2008.

FIGUEIREDO, P.; LANDELL, M.G.A; CAMPANA, M.P. **Cana-de-açúcar**. 6.ed. Campinas: IAC, 1995. IAC. 1 CD-ROM. (Boletim 200).

FURTADO, A.T.; SCANDIFFIO, M.I.G.; CORTEZ, L.A.B. The Brazilian sugarcane innovation system. **Energy Policy**, v.39, p.156–166, 2011.

GILLET, N.P.; ZWIERS, F.W.; WEAVER, A.J.; HEGERL, G.C.; ALLEN, M.R.; STOTT, P.A. Detecting anthropogenic influence with a multi-model ensemble. **Geophysical Research Letters**. v.29, 2002.

GLECKLER, P.J.; TAYLOR, K.E.; DOUTRIAUX, C. Performance metrics for climate models. **Journal of Geophysical Research**, v.113, D06104, p.1-20, 2008.

GOLDEMBERG, J. The role of biomass in the world's energy system. In: Routes to cellulosic ethanol. BUCKERIDGE, M. S.; GOLDMAN, G. H. (eds.). **Springer**, New York, p.3-14, 2011.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: **Synthesis Report: Working Group contributions to the Fourth Assessment Report**. [Bernstein, L.; Bosch, P.; Canziani, O.; Chen Z.; Christ, R.; Davidson, O.; Hare, W.; Huq, S.; Karoly, D.; Kattsov, V.; Kundzewicz, Z.; Liu, J.; Lohmann, U.; Manning, M.; Matsuno, T.; Menne, B.; Metz, B.; Mirza, M.; Nicholls, N.; Nurse, L.; Pachauri, R.; Palutikof, J.; Parry, M.; Qin, D.; Ravindranath, N.; Reisinger, A.; Ren, J.; Riahi, K.; Rosenzweig, C.; Rusticucci, M.; Schneider, S.; Sokona, Y.; Solomon, S.; Stott, P.; Stouffer, R.; Sugiyama, T.; Swart, R.; Tirpak, D.; Vogel, C.; Yohe, G. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf). Acesso em 05/08/2013.

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: [http://www.climate2013.org/images/report/WG1AR5\\_SPM\\_FINAL.pdf](http://www.climate2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf). Acesso em 05/01/2014.

JANK, M.S.; RODRIGUES, L. Dinâmica e agenda do setor sucroalcooleiro na próxima década. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, n.4, p.86-96, 2007.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: Kozlowski, T.T. Water deficits and plant growth, v.2, Academic Press, New York, 1968.

KOFFLER, N.F.; DONZELI, P.L. Avaliação dos solos brasileiros para cultura da cana-de-açúcar. In: Paranhos, S.B. (coord.) **Cana-de-açúcar. Cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.19-41.

LAMBERT, S.J.; BOER, G.J. CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. **Climate Dynamics**, v.17, p.83-106, 2001.

LIU, Y.Q.; GIORGI, F.; WASHINGTON, W.M. Simulation of summer monsoon climate over east Asia with an NCAR regional Climate Model. **Mon. Wea. Rev.** Boston, v.122, n.10, p.2331-2348, 1994.

MACHADO, E. C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de material seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 115 f. Dissertação (Mestrado em Biologia) - Faculdade de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1982.

MACHADO, R.S.; RAMOS, R.A.; MACHADO, D.F.S.P.; RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C. Fotossíntese e conteúdo foliar de carboidratos em cana-de-açúcar. In: Simpósio Brasileiro Sobre Ecofisiologia, Maturação e Maturadores em cana-de-açúcar, 2008, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP/FCA, p.11-15.

MAGALHÃES, A.C.N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Potafós, 1987. p.113-118.

MALUF, J.R.T.; WESTPHALEN, S.L.; MATZENAUER, R.; MALUF, D.E. Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar no Estado do Rio Grande do Sul, visando a produção de açúcar e álcool. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBA, 2007.

MARENGO J.A. Cenários de Mudanças Climáticas para o Brasil em 2100. **Ciência & Ambiente**, v.34, p.100-125, 2007.

MARENGO, J.A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MARENGO, J.A.; AMBRIZZI, T. ; ROCHA, R.P. ; ALVES, L.M. ; CUADRA, S.V.; VALVERDE, M.C. ; TORRES, R.R. ; SANTOS, D.C. ; FERRAZ, S.E.T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v.35, n.6, p.1073-1097, 2009.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E.D.; PELLEGRINO, G.Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, v.1, p.1-13, 2012.

MELLO, M.P.; VIEIRA, C.A.O.; AGUIAR, A.D.; RUDORFF, B.F.T. (2009). Classificação da Colheita da Cana-de-açúcar por Meio de Imagens de Satélite Utilizando Superfícies de Resposta Espectro-temporais. **Anais...** XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, INPE, p. 279-286.

MENDICINO, G.; SENATORE, A. Evaluation of parametric and statistical approaches for the regionalization of flow duration curves in intermittent regimes. **Journal of Hydrology**, v.480, p.19-32, 2013.

MISRA, V. et al. Dynamic Downscaling of Seasonal Simulation over South American. **Journal of Climate**, Boston, v.16, p.103-117, 2003.

MONCUNILL, D.F.; DA SILVA, E.M.; SILVA FILHO, V. de P.; MELCIADES, W.L.B.; COSTA, A.A.; SUN,L.; MOURA, A.D.; NOBRE, P. Uma breve descrição do sistema de previsão climática regionalizada (*downscaling* dinâmico) implantado na FUNCEME. **Anais...**XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002.

MPELASOKA, F.S.; CHIEW, F.H.S. Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections. **Journal of Hydrometeorological**. v10, p.1168-1183, 2009.

NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, v.21, p.1-25, 2002.

NAKICENOVIC, N. et al. (2000). **Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. 599 p. Disponível em: <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>. Acesso jul. 2013.

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**, Brasília, n.11, p.170-184, 2012.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981. 435 p.

PALMER, T.; SHUTTS, G.; HAGEDORN, R.; DOBLAS-REYES, F.; JUNG, T.; LEUTBECHER, M. Representing model uncertainty in weather and climate prediction. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 33, p.163-193, 2005.

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

PIERCE, D.W.; T.P. BARNETT.; B.D. SANTER.; P.J. GLECKLER. Selecting global climate models for regional climate change studies. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, USA, v.106, n. 21, p.8441–8446, 2009.

PONTIUS JR., R.G.; SHUSAS, E.; McEACHERN, M. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. **Agriculture, Ecosystems and Environment** , n.101: p.251–268, 2004.

RADIC, V.; CLARKE, G.K.C. Evaluation of IPCC Models' Performance in Simulating Late-Twentieth-Century Climatologies and Weather Patterns over North America. **Journal of Climate**, v. 24, p.5227-5274, 2011.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478p.

REICHLER, T.; KIM, J. How well do coupled models simulate today's climate? **American Meteorological Society**, v.89, p.303-311, 2008.

SCHARLAU, L.A.T.; DISPERATI, A.A.; MALDONADO, F.D.; ARAUJO, A.J. Detecção de mudanças na cobertura vegetal orientada à atualização de mapas de uso e cobertura das terras. **Anais... XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, INPE, Foz do Iguaçu, PR, 2013. 1 CD-ROM.

SEDIYAMA, G.C.; MELO JUNIOR, J.C.F. de; SANTOS, A.R. dos; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; HAMAKAWA, P.J.; COSTA, J.M.N. da; COSTA, L.C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, p.501-509, 2001.

SEGATO, S.V.; ALONSO, O.; LAROSA, G. Terminologias no setor sucroalcooleiro. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E. NÓBREGA, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p.397-405.

SENTELHAS, P. C; MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivares - O fator meteorológico na produção agrícola**. INMET, 2009. Disponível em: <[http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce630/EC\\_1\\_2010\\_ImpAgromet.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce630/EC_1_2010_ImpAgromet.pdf)> Acesso em: 20 nov. 2013.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; LÁZARO, Y.M. C.; COSTA, A. C.; SALES, D. C.; COUTINHO, M.M. Avaliação do desempenho dos modelos de mudanças climáticas do IPCC-AR4 quanto a sazonalidade e o padrões de variabilidade interanual da precipitação sobre o nordeste setentrional brasileiro nas simulações do IPCC-AR4. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.18, n.1, p.177-194, 2013.

SODRÉ, G. de A. **2040 - o aquecimento global gerando impacto econômico na produção de cana no Estado de São Paulo**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Fundação Getúlio Vargas, Escola de Economia de São Paulo, São Paulo, 2010.

STEVENS, B.; GIORGETTA, M.; ESCH, M.; MAURITSEN, T. CRUEGER, T.; RAST, S.; SALZMANN, M.; SCHMIDT, H.; BADER, J.; BLOCK, K.; BROKOPF, R.; FAST, I.; KINNE, S.; KORNBLUEH, L.; LOHMANN, U.; PINCUS, R.; REICHLER, T.; ROECKNER, E. Atmospheric component of the MPI-M earth system model: ECHAM6. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v.5, p.146-172, 2013.

SZMRECSÁNYI, T. **O planejamento da agroindústria canavieira do Brasil (1930 - 1975)** - Universidade Estadual de Campinas, HUCITEC, São Paulo. 1979.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TAVARES, A.O.; PATO, R.L.; MAGALHÃES, M.C. Spatial and temporal land use change and occupation over the last half century in a peri-urban area. **Applied Geography**, 34: 432 – 444, 2012.

TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research**, v.106, n.(D7), p.7183-7192, 2001.

TEBALDI, C.; KNUTTI, R. The use of the Multimodel ensemble in probabilistic climate projections. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, London, n. 365, p. 2053–2075, 2007.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies. **Geography Compass** 4 (7), p.834-860, 2010

THOMSON, M.C.; DOBLAS-REYES, F.J.; MASON, S.J.; HAGEDORN, R.; CONNOR, S. J.; PHINDELA, T.; MORSE, A.P.; PALMER, T.N. Malaria early warnings based on seasonal climate forecasts from multi-model ensembles. **Nature** 439, p.576-579, 2006.

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

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, Centerton, New Jersey, v.8, n.1, 104p., 1955.

WALDHEIM, P.V.; CARVALHO, V.S.B.; CORREA, E.; FRANÇA, J.R. de. A. **Zoneamento Climático da Cana-de-Açúcar, da Laranja e do Algodão Herbáceo para a Região Nordeste do Brasil**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, v.29, n.2, p.30-43, 2006.

WILBY R.L.; FOWLER H.J. Regional Climate Downscaling. In: **Modelling the Impact of Climate Change and Water Resources**, 200p., 2010.

WILLMOTT, C.J.; ROWE, C.M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v.5, p.589-606, 1985.