

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

DAIANI BERNARDO PIROVANI

**CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTO NO ZONEAMENTO
AGROCLIMÁTICO DE ESPÉCIES FLORESTAIS NO ESTADO DO ESPÍRITO
SANTO**

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

DAIANI BERNARDO PIROVANI

**CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTO NO ZONEAMENTO
AGROCLIMÁTICO DE ESPÉCIES FLORESTAIS NO ESTADO DO ESPÍRITO
SANTO**

Tese de doutorado apresentada ao Centro de Ciências Agrárias da 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. Dsc. José Eduardo Macedo Pezzopane

Coorientador: Prof. Dsc. Alexandre Cândido Xavier

**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)

P672c Pirovani, Daiani Bernardo, 1985-
Cenários de mudanças climáticas e impacto no zoneamento
agroclimático de espécies florestais no estado do Espírito Santo /
Daiani Bernardo Pirovani. – 2014.
136 f. : il.

Orientador: José Eduardo Macedo Pezzopane.
Coorientadores: Alexandre Cândido Xavier.
Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Mudanças climáticas – impacto. 2. IPCC. 3. Modelos climáticos
globais. 4. Downscaling. I. Pezzopane, José Eduardo Macedo. II.
Xavier, Alexandre Cândido. III. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDU: 63

DAIANI BERNARDO PIROVANI

**CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTO NO ZONEAMENTO
AGROCLIMÁTICO DE ESPÉCIES FLORESTAIS NO ESTADO DO ESPÍRITO
SANTO**

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 Doutora em Produção Vegetal, na linha de pesquisa Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2014

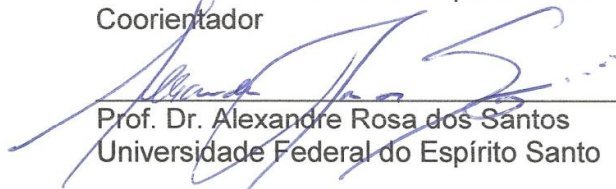
COMISSÃO EXAMINADORA:



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



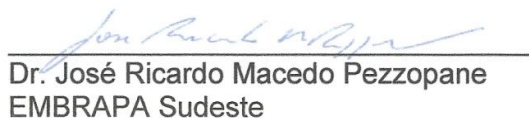
Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador



Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo



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



Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane
EMBRAPA Sudeste

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pelas graças concedidas, por me dar saúde, força e coragem para lutar.

Aos meus pais, Geraldo e Neuza, eterna gratidão, pela criação e pelos ensinamentos da vida que não se aprendem em sala de aula.

Ao meu marido Leandro, pelo amor, incentivo, paciência, compreensão e concessões realizadas, por estar ao meu lado sempre.

À toda minha família, a aqueles que mesmo de longe demonstraram interesse, preocupação e curiosidade por este estudo. Em especial aos meus irmãos Danilo, José Geraldo e Daniele.

A todos os meus amigos e parceiros da Universidade, por compartilharem as dúvidas e as respostas, pelo aprendizado juntos na convivência diária, em especial Fábio Castro e Lilianne Gomes e os companheiros de laboratório Talita Miranda, Sanderléia Oliveira e Alcides.

À Flávia Pirovani por estar sempre disposta a ouvir, oferecendo além de um ombro amigo, muita paciência e apoio moral.

Ao Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane, por me orientar com seus ensinamentos, pela confiança, atenção e oportunidade de realização deste estudo.

Ao Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier, pela ajuda em minha orientação, pelos ensinamentos, dedicação e colaborações.

Ao Prof. Dr. Waldir Cintra de Jesus Júnior e a José Ricardo Macedo Pezzopane, pela importante ajuda com suas sugestões durante o processo de qualificação.

Ao Centro de Ciências Agrárias, em particular aos professores do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo, por todo aprendizado durante o doutorado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES *Campus* Ibatiba representado pela pessoa do Diretor Geral Flávio Pena, pelo apoio e concessão do horário especial de estudante necessário na realização desta capacitação tão importante no caminho profissional que decidi seguir: o de ensinar e aprender.

BIOGRAFIA

DAIANI BERNARDO PIROVANI, filha de Geraldo Alberto Pirovani e Neuza Maria Bernardo Pirovani, nasceu em 09 de abril de 1985 na cidade de Alegre, Estado do Espírito Santo. Concluiu o segundo grau na Escola Estadual de 1° e 2° graus Aristeu Aguiar, em Alegre. Ingressou no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-UFES/Alegre – ES) em 2003, graduando-se Engenheira Florestal no mês de fevereiro do ano de 2008. Em março de 2008 iniciou o curso em nível de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais - PPGCF, do CCA -UFES/Alegre - ES, concluindo o mesmo em março de 2010. Em 2011, iniciou o doutorado no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal – PPGPV do CCA-UFES/ Alegre – ES, submetendo-se a defesa em fevereiro de 2014.

"Todo o futuro da nossa espécie, todo o governo das sociedades, toda a prosperidade moral e material das nações dependem da ciência, como a vida do homem depende do ar. Ora, a ciência é toda observação, toda exatidão, toda verificação experimental. Perceber os fenômenos, discernir as relações, comparar as analogias e as dessemelhanças, classificar as realidades, e induzir as leis, eis a ciência; eis, portanto, o alvo que a educação deve ter em mira. Despertar na inteligência nascente as faculdades cujo concurso se requer nesses processos de descobrir e assimilar a verdade."

Rui Barbosa

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto das mudanças climáticas nas zonas aptas ao cultivo das espécies florestais: Teca, Pupunha, Nim Indiano, Cedro Australiano, *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea*, *Pinus oocarpa* e *Pinus taeda* no estado do Espírito Santo (ES). O modelo de circulação global (MCG) do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) com melhor desempenho em simular o clima no ES foi selecionado, tendo como base critérios estatísticos considerando os dados observados para o século XX no estado (1971-1999 para precipitação e 1977-1999 para temperatura) e os resultados da simulação pelos modelos para o mesmo período de referência, no cenário 20C3M. Para a caracterização climática atual, foram utilizados dados da série de 1982-2011. Após a seleção dos MCG's, foi aplicada a técnica de *downscaling* dos dados obtendo as anomalias de cada variável para o ano de 2050 no cenário pessimista A2, sendo estas anomalias acopladas aos dados observados para o século XX no ES na resolução espacial de 1 km. Para precipitação anual, o menor erro obtido foi do Multimodel realizado entre os cinco melhores modelos (GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI-CGCM2.3.2, MIROC3.2 medres). Para temperatura média do ar, o modelo MRI-CGCM2.3.2 foi selecionado como o de melhor desempenho com menor valor de bias e menor valor da raiz do erro médio quadrático (RMSE). As projeções geradas por esses MCG's apontam redução na precipitação mensal, e aumento da temperatura média do ar de até 2,1°C. Com isso, a deficiência hídrica anual no estado tende a aumentar na maioria das regiões. Nesse cenário, todas as oito espécies florestais sofrerão redução de área apta ao seu cultivo no estado, sendo que a Teca é a espécie a sofrer menor impacto, e Pupunha e Cedro são as que mais sofrerão alteração na aptidão agroclimática. As espécies Pupunha, Cedro, Teca, Nim e o *Pinus caribaea* apresentam maior percentual de troca entre classes, indicando o surgimento de novas áreas aptas com as mudanças climáticas globais.

Palavras - chave: IPCC. Modelos Climáticos Globais. *Downscaling*. Aptidão agroclimática.

ABSTRACT

This work objective to evaluate the impact of climate change on suitable to the cultivation of teak forest species, peach palm, Neem Indian, Australian cedar, *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea*, *Pinus taeda* and *Pinus oocarpa* in the state of Espírito Santo (ES) areas. The global circulation model (GCM) of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) with better performance in simulating the climate in ES was selected, based on statistical criteria considering the observed data for the state in the 20th century (from 1971 to 1999 for rainfall and 1977-1999 for temperature), and the simulation results from models for the same period, the scenario 20C3M. Data were used from the series of 1982-2011 to the current climate characterization. After selecting the MCG's the technique of downscaling data was applied obtaining the anomalies of each variable for the year 2050 in the pessimistic scenario A2, these anomalies were coupled to the observed data for the 20th century in the ES, the spatial resolution of 1 km. For annual precipitation, the lowest error was obtained from the Multimodel held among the top five models (GISS ER, ECHO -G, ECHAM5 -OM, MRI - CGCM2.3.2, MIROC3.2 medres). For mean air temperature MRI - CGCM2.3.2 model was selected as the best performance with lower value bias and a lower root mean square error (RMSE). The forecasts generated by these MCG's point reduction in monthly precipitation and increased mean air temperature of up to 2.1 °C. Thus, the annual water deficit in the state tends to increase in most regions. In this scenario, all eight tree species able to undergo reduction state in the cultivation area, and the Teak is the species suffer less impact and Pupunha and cedar are those suffer most change in agro-climatic suitability. The Pupunha, Cedar, Teak, Neem and *Pinus caribaea* species showed the highest percentage of exchange between classes, indicating the emergence of new suitable areas with global climate change.

Keywords: IPCC. Global Climate Models. Downscaling. Agro-climatic suitability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Mapa da mudança de temperatura da superfície observada de 1901 a 2012.....	21
Figura 2-	Precipitação anual observada nos períodos de 1901 a 2010 e 1951 a 2010.....	22
Figura 3-	Localização dos postos com dados meteorológicos utilizados para o Espírito Santo e estados vizinhos.....	42
Figura 4-	Fluxogramas das etapas de obtenção de <i>downscaling</i> para dados climáticos de temperatura e precipitação no estado do Espírito Santo.....	54
Figura 5-	Fluxograma das etapas realizadas para obtenção dos zoneamentos agroclimáticos de espécies florestais no estado do Espírito Santo, para o clima atual.....	59
Figura 6-	Fluxograma das etapas realizadas para obtenção dos zoneamentos agroclimáticos de espécies florestais no estado do Espírito Santo, considerando as mudanças climáticas globais para o ano de 2050, no cenário A2.....	60
Figura 7-	Precipitação pluviométrica mensal para o período de 1982 a 2011 no estado do Espírito Santo.....	64
Figura 8-	Temperatura média mensal do ar para o estado do Espírito Santo, estimada por meio de equações de regressão.....	66
Figura 9	Dispersão dos pares de dados de precipitação média anual observada e simulada pelos cinco modelos do IPCC AR4 com melhores desempenhos e Multimodel no estado do Espírito Santo.....	69
Figura 10-	Dispersão dos pares de dados de temperatura média do ar observada e simulada pelos cinco modelos do IPCC AR4 com melhor desempenho e Multimodel no estado do Espírito Santo.....	72
Figura 11-	Mapas das anomalias de precipitação mensal no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o Multimodel, entre os modelos GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI -CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres.....	74
Figura 12-	Precipitação mensal no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o Multimodel, entre os modelos GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI -CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres.....	75
Figura 13-	Anomalia da precipitação média anual no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o Multimodel, entre os modelos GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI -CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres.....	76

Figura 14-	Precipitação anual no estado do Espírito Santo no período atual e no ano de 2050 no cenário A2, segundo o Multimodelentre, os modelos GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI -CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres.....	77
Figura 15-	Mapas das anomalias de temperatura média mensal no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o modelo MRI -CGCM2.3.2.....	79
Figura 16-	Temperatura média mensal no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o modelo MRI -CGCM2.3.2.....	80
Figura 17-	Anomalia da temperatura média anual no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o modelo MRI-CGCM2.3.2.....	81
Figura 18-	Temperatura média anual no estado do Espírito Santo no período atual e no ano de 2050 no cenário A2, segundo o modelo MRI-CGCM2.3.2.....	82
Figura 19-	Déficit Hídrico anual no estado do Espírito Santo no período atual e no ano de 2050 no cenário A2.....	83
Figura 20-	Zoneamento agroclimático da espécie <i>Tectona grandis</i> no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2 do IPCC.....	85
Figura 21-	Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de <i>Tectona grandis</i> no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.....	86
Figura 22-	Zoneamento agroclimático da espécie <i>Bactris gasipaes</i> no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no A2.....	88
Figura 23-	Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de <i>Bactris gasipaes</i> no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.....	89
Figura 24-	Zoneamento agroclimático da espécie <i>Azadirachta indica</i> no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2.....	91
Figura 25-	Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de <i>Azadirachta indica</i> no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.....	92
Figura 26-	Zoneamento agroclimático da espécie <i>Toona ciliata</i> no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2..	94

Figura 27-	Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de <i>Toona ciliata</i> no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.....	95
Figura 28-	Zoneamento agroclimático da espécie <i>Pinus elliottii var. elliottii</i> no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2.....	97
Figura 29-	Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de <i>Pinus elliottii var. elliottii</i> no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.....	98
Figura 30-	Zoneamento agroclimático da espécie <i>Pinus caribaea var hondurensis</i> no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2.....	100
Figura 31-	Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de <i>Pinus caribaea var hondurensis</i> no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.....	101
Figura 32-	Zoneamento agroclimático da espécie <i>Pinus oocarpa</i> no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2..	103
Figura 33-	Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de <i>Pinus oocarpa</i> no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.....	104
Figura 34-	Zoneamento agroclimático da espécie <i>Pinus taeda</i> no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2..	106
Figura 35-	Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de <i>Pinus taeda</i> no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.....	107
Figura 36-	Porcentagem de variação líquida e troca entre classes de aptidão agroclimática de espécies florestais no estado do Espírito Santo, entre o clima atual e as mudanças climáticas previstas para 2050 no cenário A2.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Descrição dos cenários de previsão climática (SRES) considerados pelo IPCC.....	23
Tabela 2-	Análise do desempenho do modelo geoestatístico com base no índice de confiança.....	46
Tabela 3-	Modelos Climáticos Globais do IPCC AR4 avaliados em simular o clima do Espírito Santo, e suas respectivas instituições de origem e resolução (Graus de Latitude x graus de longitude).....	49
Tabela 4-	Temperatura média anual (Ta) recomendada para as espécies florestais, utilizadas na delimitação de zonas aptas e inaptas no estado do Espírito Santo.....	58
Tabela 5-	Déficit hídrico anual recomendado para as espécies florestais, utilizados na delimitação de zonas aptas e inaptas no estado do Espírito Santo.....	58
Tabela 6-	Matriz de Comparação Pareada para dois mapas de aptidão agroclimática em duas condições climáticas distintas (atual e futuro), mostrando a proporção entre as combinações de mudanças de classe possíveis.....	61
Tabela 7-	Índices estatísticos calculados para análise do desempenho dos interpoladores pelo método da krigagem para estimativa da precipitação média mensal e anual no estado do Espírito Santo.....	62
Tabela 8-	Coefficientes das equações de regressão para estimativa dos valores mensais e anual de temperatura média do ar, para o século XX e para o período atual, com seus respectivos coeficientes de determinação ajustados (R^2) para o Espírito Santo.....	65
Tabela 9-	Índices estatísticos da precipitação média anual dos modelos globais do IPCC AR4 em relação aos dados climatológicos observados no estado do Espírito Santo para o período de 1971 a 1999.....	67
Tabela 10-	Índices estatísticos mensais da temperatura média do ar dos modelos globais do IPCC AR4 em relação aos dados climatológicos observados no estado do Espírito Santo para o período de 1977 a 1999: coeficiente de correlação (R), média dos valores simulados pelo modelo global, viés (Bias), erro médio quadrático (RMSE) e erro médio absoluto (MAE).....	70
Tabela 11-	Áreas aptas ao cultivo de espécies florestais no estado do Espírito Santo para as condições climáticas atuais e segundo dados dos modelos do IPCC para 2050 no cenário A2.....	84

Tabela 12-	Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km ²) de <i>Tectona grandis</i> em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo.....	87
Tabela 13-	Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km ²) de <i>Bactris gasipaes</i> em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo.....	90
Tabela 14-	Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km ²) de <i>Azadirachta indica</i> em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo.....	93
Tabela 15-	Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km ²) de <i>Toona ciliata</i> em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo.....	96
Tabela 16-	Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km ²) de <i>Pinus elliotii var. elliotii</i> em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo.....	99
Tabela 17-	Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km ²) de <i>Pinus caribaea var hondurensis</i> em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo.....	102
Tabela 18-	Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km ²) de <i>Pinus oocarpa</i> em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo...	105
Tabela 19-	Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km ²) de <i>Pinus taeda</i> em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo...	108

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1-	Preenchimento de falhas de precipitação.....	43
Equação 2-	Raiz do Erro Médio Quadrático.....	44
Equação 3-	Índice de Concordância.....	45
Equação 4-	Coeficiente de eficiência ajustado.....	46
Equação 5-	Erro médio absoluto.....	46
Equação 6-	Erro médio percentual.....	46
Equação 7-	Estimadores da temperatura média do ar.....	47
Equação 8-	Coeficiente de Correlação.....	51
Equação 9-	Viés ou Bias	52
Equação 10-	Erro Médio Absoluto.....	52
Equação 11-	Raiz do Erro Médio Quadrático.....	52
Equação 12-	Evapotranspiração potencial.....	56
Equação 13-	Índice térmico regional (I).....	56
Equação 14-	Índice térmico regional (a).....	56
Equação 15-	Variação líquida das classes de aptidão agroclimática.....	61
Equação 16-	Troca entre as classes de aptidão agroclimática.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS	20
3.1.1	Cenários de previsão climática (SRES) do IPCC AR4	22
3.1.2	Modelos climáticos globais de Circulação Geral Atmosférica (MCGA's)	24
3.2	<i>DOWNSCALING</i> DE DADOS CLIMÁTICOS	25
3.3	POTENCIAL IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM CULTIVOS FLORESTAIS	29
3.3.1	Efeitos da Concentração de CO ₂	29
3.3.2	Efeitos da temperatura	32
3.3.3	Efeitos da demanda hídrica	33
3.3.4	Impactos na Produtividade de Cultivos Florestais	34
3.3.5	Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático de espécies florestais	35
3.4	FLUTUAÇÃO ESPACIAL DE CLASSES DE APTIDÃO AGROCLIMÁTICA DIANTE DOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	38
4	MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E PREPARAÇÃO DA BASE DE DADOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS	41
4.1.1	Preenchimento das falhas de precipitação	43
4.1.2	Avaliação do desempenho de métodos interpoladores de precipitação	44
4.1.3	Espacialização da temperatura média do ar no estado do Espírito Santo por meio de equações de regressão múltipla	46
4.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS (MCG'S) DO IPCC AR4 EM SIMULAR O CLIMA DO ESPÍRITO SANTO	48
4.3	<i>DOWNSCALING</i> DOS DADOS CLIMÁTICOS	53
4.4	ZONEAMENTOS DE APTIDÃO CLIMÁTICA ATUAL E FUTURA DAS ESPÉCIES FLORESTAIS NO ESPÍRITO SANTO	54

4.4.1	Balanço Hídrico Climatológico Normal	54
4.4.2	Aptidão agroclimática das espécies florestais	56
4.4.3	Procedimentos para geração dos mapas de zoneamento agroclimático para as espécies florestais	58
4.5	ANÁLISE DA FLUTUAÇÃO ESPACIAL DAS MUDANÇAS DE CLASSES DE APTIDÃO	60
5	RESULTADOS	62
5.1	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA ATUAL DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO.....	62
5.1.1	Avaliação do desempenho de métodos interpoladores.....	62
5.1.2	Espacialização da temperatura média do ar no Estado do Espírito Santo por meio de equações de regressão múltipla.....	65
5.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS (MCG'S) DO IPCC AR4 EM SIMULAR O CLIMA DO ESPÍRITO SANTO	67
5.3	MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO ...	73
5.4	IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ZONEAMENTO DAS ESPÉCIES FLORESTAIS.....	84
5.4.1	<i>Tectona grandis</i>.....	85
5.4.2	<i>Bactris gasipaes</i>	88
5.4.3	<i>Azadirachta indica</i>	90
5.4.4	<i>Toona ciliata</i>.....	93
5.4.5	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>.....	96
5.4.6	<i>Pinus caribaea</i> var <i>hondurensis</i>.....	99
5.4.7	<i>Pinus oocarpa</i>.....	102
5.4.8	<i>Pinus taeda</i>.....	105
6	DISCUSSÃO	110
6.1	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS (MCG'S) DO IPCC AR4 EM SIMULAR O CLIMA DO ESPÍRITO SANTO....	110
6.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO DE ACORDO COM OS MCG'S SELECIONADOS	113
6.3	IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ZONEAMENTO DAS ESPÉCIES FLORESTAIS.....	115
6.3.1	Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática das espécies florestais no Espírito Santo com as mudanças climáticas globais ...	120
7	CONCLUSÃO	122
8	REFERÊNCIAS	123

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global é inequívoco e, desde a década de 1950, muitas das mudanças observadas são sem precedentes ao longo de vários anos a milênios. Estudos apontam o aumento de temperatura da atmosfera e do oceano, a diminuição da quantidade de neve e gelo, a elevação do nível do mar, além das concentrações de gases de efeito estufa terem aumentado (IPCC, 2007; IPCC, 2013).

As mudanças climáticas influenciam direta e indiretamente todo tipo de vida existente na terra, afetando as florestas, tanto naturais quanto plantadas, além de causar catástrofes, como estiagens intensas e enchentes em regiões onde antes não era comum a ocorrência das mesmas (IPCC, 2007).

Nesse contexto, é importante se destacar os impactos que as mudanças climáticas globais podem causar no setor agrícola. Entre os diversos setores da economia, este pode ser o mais afetado pelas mudanças climáticas, pois espécies agrícolas e florestais são altamente dependentes das condições climáticas. Segundo Sentelhas e Monteiro (2009), os elementos meteorológicos afetam não só os processos metabólicos das plantas, diretamente relacionados à produção vegetal, como também as mais diversas atividades no campo.

Estudos avaliando os impactos globais da mudança do clima e a variabilidade climática em florestas e produtos florestais podem indicar como as mudanças climáticas poderão afetar o crescimento e produtividade de florestas, com consequente impacto no mercado e no suprimento sustentável de madeira para a indústria de processamento (KRUG, 2008). Portanto, quando diz respeito à floresta plantada e/ou manejada devem ser ponderados os riscos e incertezas futuros que estão aumentando com as mudanças climáticas globais (FEREZ, 2006), pois a mudança do clima pode também influenciar as espécies que podem ser cultivadas produtivamente em diferentes regiões, impactando o retorno financeiro.

O Brasil, com sua dimensão continental, possui uma relevante heterogeneidade climática, considerando-se os prognósticos de aumento das temperaturas, pode-se admitir que as regiões climaticamente limítrofes àquelas de delimitação de cultivo adequado de plantas se tornarão desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal. Culturas tolerantes a altas temperaturas provavelmente serão beneficiadas até o seu

limite próprio de tolerância ao estresse térmico. No caso de baixas temperaturas, regiões que atualmente são limitantes ao desenvolvimento de culturas suscetíveis a geadas, com o aumento do nível térmico decorrente do aquecimento global, passarão a apresentar condições favoráveis ao desenvolvimento de vegetações (ASSAD et al., 2008). Além disso, a alteração na distribuição das chuvas ao longo do ano, com excesso em alguns meses e falta em outros, como verificado por Marengo et al. (2009), tende a aumentar o estresse hídrico sofrido pelas plantas.

O zoneamento agrícola é uma importante ferramenta na tomada de decisões para a implantação de cultivos, destacando-se o zoneamento de aptidão agroclimática. Krug (2009) considera de grande importância o fato de que o zoneamento pode também ser empregado para cenários futuros, avaliando o impacto que as mudanças climáticas globais podem causar aos setores agrícolas e florestais brasileiro. Nesse caso, são considerados os desvios dos elementos climáticos provocados pelas mudanças climáticas globais, disponibilizados pelos diferentes modelos de circulação geral atmosférica (MCGA's) nos cenários de emissões previstos pelo IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*. No entanto, esses dados são apresentados em escala global, portanto para a utilização em regiões específicas é importante a aplicação da técnica de regionalização descrita como *downscaling* (DICKINSON et al., 1989; GIORGI e BATES, 1989; LIU et al., 1994), além da quantificação do viés estatístico de cada modelo, afim de selecionar os dados mais precisos.

Diversos trabalhos avaliam o impacto das mudanças climáticas globais no zoneamento agroclimático de espécies florestais (OLIVEIRA et al., 2011a; CAMPANHARO et al., 2011), no seu desenvolvimento e fisiologia (BROADMEADOW e RAY, 2005), na susceptibilidade a doenças (TUBBY e WEBBER, 2010; DUKES et al., 2009; MAFIA et al. 2011) e na produtividade dos principais cultivos florestais (BAESSO et al., 2010).

O Espírito Santo é um estado de vocação florestal por suas condições agroclimáticas, topográficas e logísticas, e com isso é de suma importância a escolha de áreas adequadas para a implantação de cada uma das espécies florestais cultivadas no estado, de acordo com suas exigências climáticas, de forma a se planejar para os possíveis impactos que as mudanças climáticas poderão ocasionar neste setor.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o potencial impacto das mudanças climáticas na delimitação de zonas aptas ao cultivo das espécies florestais *Tectona grandis*, *Bactris gasipaes*, *Azadirachta indica*, *Toona ciliata*, *Pinus elliottii* var. *elliottii*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus oocarpa* e *Pinus taeda* no estado do Espírito Santo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar o Modelo de Circulação Global (MCG) do quarto relatório (AR4) do IPCC com melhor desempenho em simular as mudanças climáticas no estado do Espírito Santo.
- Realizar a análise espacial das mudanças entre as classes de aptidão agroclimática das espécies, ocorrida entre o período atual e o ano de 2050 (cenário A2 do IPCC), obtendo as perdas, ganhos, variação líquida e troca entre as classes.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS

Com a Revolução Industrial aumentou significativamente as emissões de dióxido de carbono na atmosfera devido à necessidade de queima de combustíveis fósseis e sua exploração sistemática em todos os países. Esse processo vem acarretando o aumento da temperatura global devido ao excesso de concentração de CO₂ na atmosfera (RIBAS, 2008).

O primeiro alerta de fenômenos de aquecimento global causados pela ação humana ocorreu na década de 1950. No fim do século XIX, foi levantada a possibilidade do aumento da temperatura devido a emissões de dióxido de carbono. Já na década de 1990, foram criados modelos que permitiram estimar as mudanças climáticas, através das mudanças nas variáveis climáticas, tanto naturais quanto antropogênicas (BARCELLOS, 2008).

De acordo com Marengo (2006), as alterações na temperatura do planeta são o principal motivo de várias catástrofes que ocorreram no mundo, como por exemplo, furacões em locais onde não ocorriam naturalmente, extremos de secas e enchentes em locais onde não é comum. Apesar do conhecimento de que desde a Idade Média ocorreram fenômenos de glaciação e aquecimento no planeta, atualmente a ação humana tem acelerado esses processos (BARCELLOS, 2008).

Segundo o Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007), o aquecimento global dos últimos 50 anos é de natureza antrópica. Caso os cenários de aquecimento global se confirmem, espera-se, além de um aumento dos eventos extremos de precipitação tanto em termos de volume quanto de intensidade de precipitação, que o ciclo hidrológico tenha uma grande variabilidade em várias escalas de tempo. Ainda segundo IPCC (2013) as emissões acumuladas de CO₂ irão determinar em grande parte o aquecimento da superfície média global até o final do século 21, pois a maioria dos aspectos das alterações climáticas vai persistir por muitos séculos, mesmo se as emissões de CO₂ pararem, isso representa uma responsabilidade substancial da mudança climática multissecular criada pelas emissões passadas, presentes e futuras de CO₂.

É um grande desafio da climatologia global prever as mudanças climáticas com detalhe adequado e antecedência suficiente para permitir à humanidade ajustar seu comportamento e evitar as piores consequências de tais mudanças (CORDEIRO et al.,2008).

A Figura 1 é apresentada no mais recente relatório sobre mudanças climáticas (IPCC, 2013) e contém o mapa da mudança de temperatura da superfície observada de 1901 a 2012. Foi obtido de tendências de temperatura determinada por regressão linear a partir de um conjunto de dados, sendo que os *pixels* onde a tendência é significativa ao nível de 10% são indicados por um sinal (+). Segundo este último relatório, a temperatura global da terra teve um aumento de aproximadamente 0,89°C durante o período 1901-2012 e de cerca de 0,72 °C no período 1951-2012.

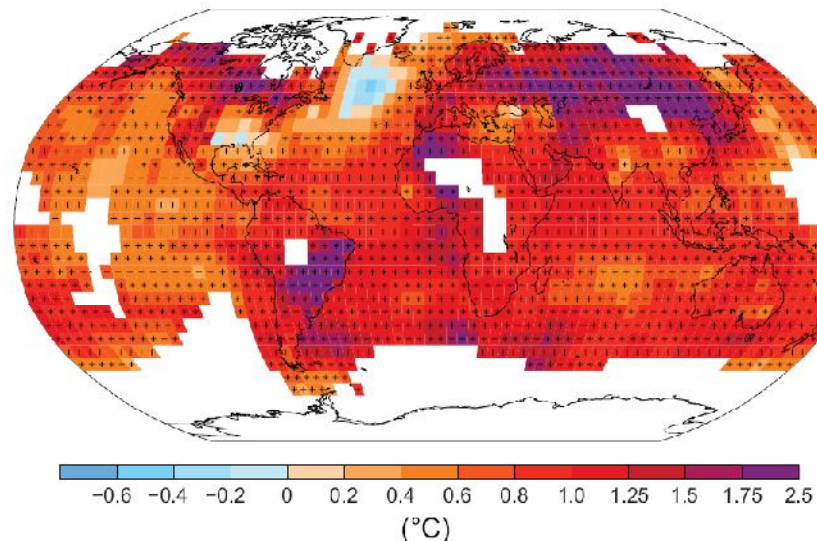


Figura 1 – Mapa da mudança de temperatura da superfície observada de 1901 a 2012. Fonte: IPCC (2013).

Em relação à precipitação, segundo as previsões e considerando-se as precipitações atuais como referência, foi apresentado no quarto relatório (IPCC, 2007) que em 2099 poderá haver uma variação entre -5% a 5% no período do verão e entre -20% a -10% no inverno, para a região Sudeste do Brasil.

A Figura 2 contém os mapas das mudanças na precipitação anual observadas em dois períodos, entre 1901 e 2010 e 1951 e 2010 (IPCC, 2013), sendo que as tendências em acumulação anual foram calculadas segundo os mesmos critérios da Figura 1. Há regiões da Terra onde o número de eventos de precipitação intensa

aumentou e outras onde diminuiu, a frequência ou intensidade de eventos de precipitação intensa provavelmente aumentou na América do Norte e Europa, sendo que em outros continentes como a América do Sul, principalmente na região Amazônica, não houve alto nível de confiança dos dados de mudanças nos eventos de precipitação intensa.

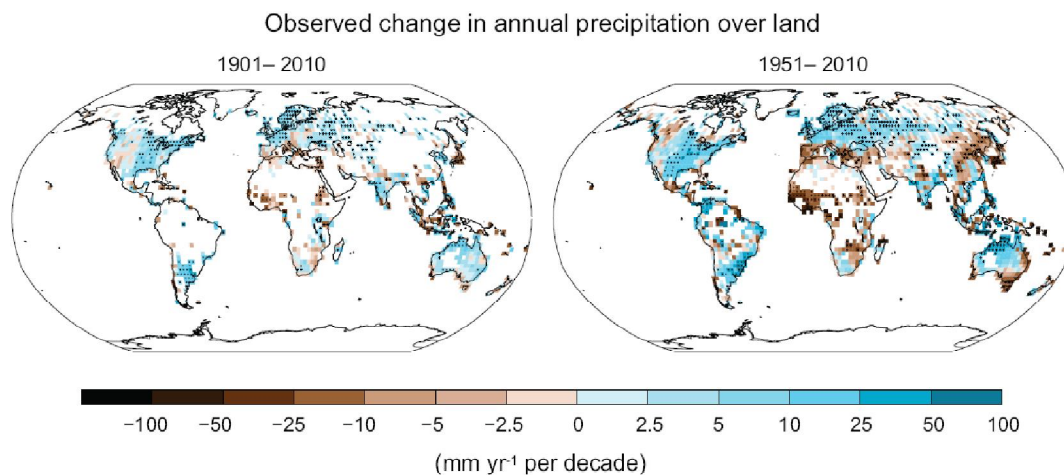


Figura 2 - Precipitação anual observada nos períodos de 1901 a 2010 e 1951 a 2010, Fonte: IPCC (2013).

3.1.1 Cenários de previsão climática (SRES) do IPCC AR4

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) é formado por uma equipe de cientistas de diversos países que emite relatórios periódicos. O penúltimo relatório, denominado AR4 (Quarto Relatório), foi lançado em 2007 em três volumes: A Base da Ciência Física (Grupo de Trabalho I); Impactos, adaptação e vulnerabilidade (Grupo de Trabalho II); e Mitigação e Mudanças Climáticas (Grupo de Trabalho III). A contribuição do Grupo de Trabalho I (IPCC, 2013) ao Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5), que se encontra em fase de elaboração pelos demais grupos, considera novas evidências das mudanças climáticas com base em muitas análises científicas independentes a partir de observações do sistema climático, arquivos paleoclimáticos, estudos teóricos de processos climáticos e simulações usando modelos climáticos se baseando na contribuição do Grupo de Trabalho I ao AR4, e incorporando novas descobertas posteriores de pesquisa.

Esses relatórios são considerados como a síntese do mais atual estado do conhecimento e influenciam a tomada de decisões nas negociações internacionais e políticas públicas dos países. O IPCC exhibe a projeção de diversos cenários chamados SRES (*Special reports on Emission Scenarios*) simulando as possibilidades de aumento da temperatura caso as emissões de gases de efeito estufa sejam mantidas ou aumentadas. Estes cenários (Tabela 1) são divididos em diferentes grupos ou famílias que consideram uma visão otimista (de baixas emissões) e uma visão pessimista (de altas emissões), com ênfase local ou regional, dividindo-se entre os eixos de economia e meio ambiente, para resolver as questões voltadas para os diversos segmentos.

Tabela 1 – Descrição dos cenários de previsão climática (SRES) considerados pelo IPCC. Fonte: IPCC (2007)

Cenário	Característica
A1	A família do cenário A1 descreve um mundo futuro com rápido crescimento econômico, população global que atinge seu pico na metade do século e, a partir de então, passa a declinar, e com a introdução de tecnologias novas e mais eficientes. Subdivide-se em três grupos que descrevem direções alternativas de mudança tecnológica no sistema de energia. Os três grupos A1 são diferenciados por sua ênfase tecnológica: uso intensivo de fontes fósseis (A1FI), fontes de energia não fóssil (AIT), ou um equilíbrio entre todas as fontes (AIB) (no qual equilíbrio é definido como não dependente excessivamente de um tipo em especial de fonte de energia, com base na suposição de que taxas de aprimoramento similares se aplicam a todo o fornecimento de energia e tecnologias de consumo final).
A2	O argumento da família do cenário A2 descreve um mundo muito heterogêneo. O fundamento é a autoconfiança e a manutenção de identidades locais. Padrões de fertilidade através das regiões convergem muito lentamente, o que resulta em crescimento contínuo da população. O desenvolvimento econômico é essencialmente orientado para a região e o crescimento econômico per capita e desenvolvimento tecnológico mais fragmentado e lento do que em outros enredos.
B1	O enredo do cenário B1 descreve um mundo convergente com a mesma população global, que atinge o pico em meados do século e declina em seguida, como no enredo A1, mas com rápida mudança nas estruturas econômicas em direção a um serviço e economia da informação, com reduções da intensidade material ea introdução de energia limpa e de recursos tecnológicos eficientes. A ênfase está em soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, incluindo a melhoria da equidade, mas sem iniciativas climáticas adicionais.

3.1.2 Modelos climáticos globais de Circulação Geral Atmosférica (MCGA's)

A maioria das informações e conhecimentos sobre mudanças climáticas vem de estudos com modelos climáticos globais (MCG's). Os resultados gerados por esses MCG's fornecem a base para projeções de futuras mudanças climáticas e o aumento do número e heterogeneidade de modelos dão com uma crescente ênfase em estimativas de incerteza que levantam questões sobre a melhor forma de avaliar e combinar os resultados do modelo, a fim de melhorar a confiabilidade das projeções (IPCC, 2010).

Os dados climáticos utilizados nas projeções futuras do clima são disponibilizados atualmente pelo *Data Distribution Centre* (DDC) do IPCC, estando disponíveis em <http://www.ipcc-data.org/>. O DDC fornece um grande conjunto de modelos e cenários futuros de clima. São mais de 20 modelos para oito cenários referentes aos dados de umidade, precipitação, pressão atmosférica do ar, temperatura do ar (máximas, médias e mínimas), vento, entre outras.

Os cenários de emissões e concentrações de gases de efeito estufa e de aerossóis na atmosfera são usados como forçantes de modelos climáticos globais (MCG's) com a finalidade de se obter projeções futuras do clima. Os modelos climáticos são complexas representações matemáticas de muitos dos processos conhecidos como responsáveis por afetar o clima. Esses processos incluem as interações entre superfícies e atmosfera terrestre para atingir efeitos topográficos, correntes oceânicas e geleiras (IPCC, 2010).

Os modelos globais de clima projetam que as possíveis mudanças ocorrerão nos extremos climáticos: ondas de calor, ondas de frio, chuvas intensas e enchentes, secas, maior frequência e/ou intensidade de furações e ciclones tropicais e extratropicais – mas ainda há incertezas (MARENGO, 2006).

Essas incertezas vindas das projeções dos MCG's são devido a sérias limitações dos mesmos, uma delas é a capacidade de resolução dos modelos climáticos globais, que é bastante limitada, podendo-se perder informações importantes. Quanto ao problema da resolução, está sendo parcialmente resolvido pelo

desenvolvimento de procedimentos estatísticos ou semimecanicistas, de menor escala (KERR, 2001).

3.2 *DOWNSCALING* DE DADOS CLIMÁTICOS

Os resultados das previsões meteorológicas, considerando os pressupostos das mudanças climáticas globais, têm sido utilizados na tomada de decisão em diversos segmentos, com isso, tem-se exigido a qualidade dessas previsões tanto na escala temporal quanto na escala espacial.

Os Modelos de Circulação Geral Atmosférica (MCGA's) são capazes de calcular os processos atmosféricos em uma resolução espacial de centenas de quilômetros, no entanto, uma das limitações quanto à utilização desses modelos em previsões de estudos de mudanças climáticas diz respeito a sua baixa resolução espacial, sendo que, conseqüentemente, a variabilidade atmosférica relacionada à forçantes locais não é bem representada.

Os modelos globais climáticos (MCG) são usados como ferramentas para projeções de futuras mudanças do clima, no entanto o nível de detalhamento fornecido por esses métodos ainda não está consolidado, ainda que, os MCG's forneçam simulações adequadas da circulação atmosférica em escala global (WILBY e FOWLER, 2010).

Segundo Moriondo e Bindi (2006), forçantes de mesoescala (topografias complexas, cobertura vegetal, grandes lagos e rios) e uma gama de processos físicos com escala espacial inferior à resolução espacial da "grade" do modelo acarretam erros no decorrer da integração e, assim, limitam a possibilidade de simular ou prever com exatidão satisfatória alguma variação, por exemplo, da temperatura ou precipitação, em escala regional.

A necessidade de se diminuir a escala espacial e temporal da informação climática tem concentrado nos últimos anos esforços de pesquisas, a previsão climática de larga escala, utilizando modelos com resolução acima de 200 km, ainda não atende, por exemplo, um prognóstico mais detalhado espacialmente da distribuição de

chuva, tornando-se necessário o desenvolvimento de técnicas ou métodos que aprimorem o prognóstico de variáveis nas escalas temporal e espacial.

Uma técnica de transferência de informações climatológicas para escalas menores que tem sido utilizada é o *downscaling*, também chamada de *downscale*. Essa técnica consiste, basicamente, do aninhamento dos resultados de uma modelagem de grande escala servindo de entrada para alimentar um modelo regional de área limitada, com uma resolução da ordem de dezenas de quilômetros (DICKINSON et al. 1989; GIORGI e BATES, 1989; LIU et al., 1994).

Como os modelos regionais apresentam resolução espacial de dezenas de quilômetros, são capazes de simular circulações locais forçadas pela topografia. Assim, a técnica de *downscaling* permite combinar as habilidades de um modelo regional, com as de um modelo global, prevendo o comportamento estatístico da atmosfera em resposta a uma forçante de grande escala com a simulação de circulações locais. Sendo assim, segundo Moncunill et al. (2002), essa técnica é uma ferramenta importante para o usuário poder utilizar a previsão climática em um nível temporal e escala espacial mais compatível com o seu processo de tomada de decisão.

O *downscaling* também pode ser empregado como uma ferramenta de interpolação, onde variáveis de escala espacial são transferidas para a escala pontual, relacionando os dados do modelo de circulação global com os dados de uma estação meteorológica, de forma a se obter o cenário futuro sobre esta estação.

Diversas metodologias de *downscaling* vêm sendo utilizadas (HEWITSON e CRANE, 1996; WILBY e WIGLEY, 2000; ZORITA e STORCH, 1999; XU, 1999; MEARNNS et al., 2003; WILBY et al., 2006; CARTER, 2007; CHRISTENSEN et al. 2007; FOWLER et al., 2007). Simulações aplicando essa técnica têm sido executadas em diferentes regiões do planeta, como por exemplo, por Alves et al. (2003) e Alves et al. (2005) no Nordeste brasileiro, aninhando um Modelo Regional Espectral (MRE) com o modelo de circulação geral ECHAM 4.5, para um ano seco e um ano úmido e para 30 anos de simulação climática, respectivamente. Ramírez-Villegas e Jarvis (2010) demonstram a aplicação de um *downscaling* de dados de temperatura e precipitação por meio de interpolação espacial na região da Cordilheira dos Andes. Hanssen-Bauer et al. (2005) utilizaram um *downscaling* estatístico na Escandinávia e compararam com resultados de modelos climáticos globais e regionais indicando

que tanto a modelagem regional quanto o *downscaling* estatístico agregam valor aos resultados dos modelos globais. Fan (2009) utilizou *downscaling* empírico em dados de temperatura na China e encontrou valores próximos ao observado.

Moncunill et al. (2002) apresentam uma breve descrição do sistema de previsão climática regionalizada obtida por *downscaling* dinâmico implantado na FUNCEME, e destacam que esta tem se mostrado uma ferramenta de grande importância, por fornecer maior detalhamento sobre as características climática encontradas no Nordeste brasileiro.

As técnicas de *downscaling* classificam-se em dois grupos (HEWISTON E CRANE, 1996): (1) Métodos Dinâmicos, que são baseados em modelos numéricos semelhantes aos MCG's, mas com resolução mais fina, usando como dados iniciais as condições de contorno advindas de um MCG (GIORGI, 1990) e (2) Métodos Empíricos, que transferem a previsão meteorológica fornecida pelo MCG estatisticamente.

As simulações dos modelos regionais do clima para um período de referência (simulação de controle) apresentam desvios sistemáticos ou viés (*bias*) relativamente às séries históricas correspondentes ao mesmo período. Assim, os resultados fornecidos pelos modelos regionais devem ser corrigidos do viés (*bias correction*) para evitar interpretações incorretas dos cenários de clima futuro. Sendo assim, o uso das saídas de resolução grosseira dos MCG's para estudos de impactos regionais e locais requer dois passos: *downscaling* e retirada do viés, ou erros sistemáticos dos modelos (CCSP, 2008).

Em estudo desenvolvido por Marengo et al. (2009), foram usadas as saídas do modelo HadAM3P com cenário A2 para alimentar dados do sistema integrado de modelagem regional PRECIS (*Providing Regional Climates for Impact Studies*) para comparar o clima do período base (1961-2000) com a projeção futura advinda do *downscaling* dinâmico para o período 2070-2100. Os resultados mostraram para o clima do período de referência, que os modelos conseguiram representar as características da circulação, precipitação e temperatura sobre a América do Sul.

Segundo Carvalho (2010), os métodos empíricos de *downscaling* são uma abordagem que oferece soluções em curto espaço de tempo, e que não necessitam de grande poder computacional, constituindo uma solução viável para os

pesquisadores da área, porém sua principal limitação é que o modelo de *downscaling* fica restrito a uma região e às séries de dados utilizados, mas por ser um método de baixo custo computacional, tem sido largamente utilizado. CCSP (2008) também enfatiza que a técnica de *downscaling* empírico pode ser muito barata em comparação com a simulação numérica, quando aplicada a apenas alguns locais, ou quando são usados procedimentos estatísticos simples. Essa redução de custos, juntamente com a flexibilidade das variáveis direcionadas, levou a uma ampla variedade de aplicações para avaliar os impactos das mudanças climáticas.

Conforme já mencionado, os métodos de *downscaling* empíricos são os mais comumente utilizados, devido à sua facilidade de implementação. Várias abordagens de *downscaling* estatístico vêm sendo citadas e precisam ser avaliadas, no intuito de verificar se o método contribui (ou não) para a incerteza da mudança climática global.

Chen et al. (2013) fizeram a avaliação do desempenho e da incerteza dos métodos de *downscaling* empíricos em quantificar os impactos das mudanças climáticas sobre duas bacias hidrográficas da América do Norte em diferentes condições climáticas. Os autores avaliaram seis métodos de *downscaling* com abordagem empírica, sendo dois baseados em mudanças do fator e quatro com correção de viés. Os resultados mostraram uma grande incerteza associada com a escolha de um determinado método de *downscaling* empírico, bem como para a escolha de um modelo regional para simulação, no entanto, as estatísticas relacionadas à simulação com modelo regional demonstram maiores incertezas que as técnicas de *downscaling*, enfatizando a importância do uso de várias projeções climáticas e abordagens de *downscaling* empíricos para delinear a incerteza na avaliação dos impactos das mudanças climáticas.

Outra forma de se obter os desvios futuros do clima em uma escala regional é por meio da interpolação das anomalias climáticas, obtidas pela diferença entre os dados gerados pelo cenário do modelo global, e os valores observados nas estações climatológicas da região de interesse, obtendo-se assim um mapa dos desvios futuros do clima.

Ramírez-Villegas e Jarvis (2010) apresentam as etapas necessárias para a obtenção de um *downscaling* via interpolação espacial. Os autores reconhecem essa metodologia como método Delta, apresentando os passos a seguir:

- 1 - Levantamento dos dados de referência (*Base line*);
- 2 - Levantamento das séries temporais do modelo climático global (MCG);
- 3 - Cálculo da média de 30 anos para representar a simulação do período de referência e cálculo das médias para o clima futuro;
- 4 - Cálculo das anomalias como a diferença absoluta entre os valores futuros e do período de referência de cada variável climática;
- 5 - Interpolação dessas anomalias usando centróides das células do MCG como pontos de interpolação;
- 6 - Adição das superfícies das anomalias interpoladas aos dados observados do período de referência que se encontra em menor escala.

3.3 POTENCIAL IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM CULTIVOS FLORESTAIS

As árvores plantadas no futuro crescerão em um ambiente diferente, e suas respostas à mudança do clima podem surpreender em termos do crescimento em volume, produtividade e qualidade (KRUG, 2008).

O aumento da radiação solar, da temperatura média e da velocidade do vento, bem como a diminuição da umidade relativa do ar e da precipitação pluviométrica, intensifica a evapotranspiração, o que altera a atividade estomática da planta, podendo afetar seu crescimento, especialmente em áreas com menor capacidade de armazenamento de água no solo.

3.3.1 Efeitos da Concentração de CO₂

Entre os gases de efeito estufa, o dióxido de carbono (CO₂) é o mais difundido e comentado, uma vez que, este é um dos gases de maior importância lançado por ações antrópicas, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis e

desmatamento (IPCC, 2007). Um dos aspectos analisados no contexto das mudanças climáticas nos últimos anos refere-se ao efeito direto do aumento da concentração de dióxido de carbono e temperatura na atmosfera para as plantas.

A importância de pesquisas envolvendo o CO₂ e as plantas está vinculada a necessidade de obter respostas sobre o potencial impacto da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, sobre a fisiologia das plantas (KERBAUY, 2008).

No geral, os efeitos diretos do aumento na concentração de CO₂ atmosférico nas plantas são: i) aumento de atividade da Rubisco, via estímulo da carboxilação e inibição da oxigenação da RuBP; ii) redução da abertura estomática; iii) alteração da respiração mitocondrial; e iv) possível redução da transcrição de genes relacionados às trocas gasosas (Rubisco ativase e anidrase carbônica) ou ao crescimento (ciclinas e XET); indiretamente, ocorre uma alteração no balanço de água e carbono nas plantas, com efeitos secundários sobre o crescimento, partição de recursos e síntese de compostos de defesa (BUCKERIDGE et al., 2007).

Segundo Larcher (2000), muitos experimentos têm demonstrado que a taxa fotossintética pode aumentar em função de um aumento de concentração de CO₂ até o equivalente a três vezes a concentração atual, acarretando um aumento significativo no crescimento e um incremento na produção de biomassas. Além disso, em condições de elevadas concentrações de CO₂, os estômatos apresentam uma menor abertura e, dessa forma, menos água é perdida por evapotranspiração. Outro aspecto ressaltado por Larcher (2000) são os efeitos negativos do aumento da concentração de CO₂, que incluem: o carregamento excessivo dos cloroplastos com amido ou hipertrofia dos tecidos foliares; a alteração da relação entre a parte aérea e subterrânea; o aumento da respiração nas raízes e, portanto, perda de produtos fotossintéticos via sistema radicular; a baixa produção de flores e frutos pelas plantas; e a perda do balanço dos bioelementos, podendo acarretar um crescimento sem vigor com efeitos negativos sobre a resistência.

Tem-se atribuído ao cultivo em alta concentração de CO₂ efeitos como aumento de área foliar (como resultado do aumento tanto do tamanho como do número de células), da biomassa, da massa seca, da extensibilidade da parede celular, da capacidade de crescimento em plântulas e da rebrota em indivíduos podados (KLIEJUNAS et al., 2009).

Experimentos em ambiente controlado com árvores jovens mostram tipicamente que aumenta a produção de biomassa em 30-50% quando a concentração de CO₂ é dobrada (BROADMEADOW e RAY, 2005). No entanto, as árvores maduras não são susceptíveis de responder tanto em um ambiente de campo (OREN et al., 2001), algum aumento na produtividade é provável, sendo acompanhado por uma gama de outros efeitos, incluindo menor condutância estomática levando ao uso reduzido de água por área foliar.

Em estudo sobre o estabelecimento de cinco espécies arbóreas de leguminosas da mata atlântica descrito por Godoy (2007), em atmosfera ambiente e enriquecida com CO₂, a parte aérea das plantas crescidas sob as concentrações de CO₂ previstas para o final do século, mostrou maiores valores para altura, área foliar, taxa de crescimento relativo inicial, assimilação líquida de CO₂, eficiência de uso da água, e capacidade fotossintética.

Apesar desses resultados, se o aumento da concentração de CO₂ for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver incremento do crescimento e do rendimento das culturas, principalmente em razão do encurtamento do seu ciclo de desenvolvimento e aumento da respiração do tecido vegetal. Para Streck e Alberto (2006), o aumento na temperatura do ar de 2, 3 e 6°C pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO₂ no rendimento de diversas culturas florestais, como pinus e eucalipto.

As espécies de crescimento lento apresentam geralmente menos acúmulo de biomassa do que espécies de crescimento rápido, uma vez que o CO₂ não é o único fator que influencia o crescimento, pois outros fatores ambientais como luz, nutrientes e água, contribuem na assimilação de carbono (BUCKERIDGE e AIDAR, 2002).

Como proposto por Buckeridge et al. (2007), os ciclos de vida mais curtos, e as madeiras de menor densidade indicaram que os diferentes grupos funcionais podem, em longo prazo, garantir maior estabilidade ao sequestro de carbono em relação às espécies isoladamente, pois com o passar do tempo o carbono deixa de ser assimilado e transformado em biomassa pelas plantas pioneiras com maior rapidez e intensidade, e passa a ser captado de forma mais lenta, porém mais duradoura e com maior potencial de resposta às mudanças climáticas que estão por vir, pelas espécies secundárias tardias

3.3.2 Efeitos da temperatura

Segundo Taiz e Zeiger (2008), todas as plantas têm faixas de temperatura ideais sobre os quais suas atividades de sequestro de carbono são máximas, sendo que as temperaturas afetam todas as reações bioquímicas da fotossíntese.

O calor é essencial para a manutenção da vida nas plantas, mas deve ocorrer em faixa suficiente e não excessiva. Cada processo metabólico é ajustado dentro de uma faixa de temperatura – que varia entre um pouco menos 0°C até um pouco mais dos 40°C, limite da funcionalidade das enzimas – mas o ótimo crescimento só é alcançado se os diversos processos envolvidos no metabolismo e no desenvolvimento estiverem em harmonia uns com os outros (CHMURA et al., 2011). No entanto, altas temperaturas provocam aumento nos processos de evapotranspiração e evaporação (TAIZ e ZEIGER, 2008) alterando, assim, o metabolismo celular e, conseqüentemente, da planta como um todo.

Temperaturas maiores que as consideradas adequadas para a espécie podem provocar problemas para o crescimento das plantas, inativando ou acelerando os sistemas enzimáticos, promovendo a coagulação e a desnaturação das proteínas, a desintegração citoplasmática e outros distúrbios bioquímicos expressos, normalmente, como injúrias nos tecidos (AGRIOS, 2005).

Lloyd e Farquhar (2008) produziram um modelo sobre os efeitos do aumento da temperatura e das concentrações de CO₂ na fisiologia de espécies arbóreas tropicais. Os autores sugeriram que embora possam ocorrer reduções nas taxas fotossintéticas com um aumento na temperatura da folha acima de 30 °C, essas reduções são causadas principalmente pelo aumento na respiração, redução da condutância estomática em resposta ao alto déficit de pressão de vapor das folhas. Eles ainda estimaram que o aumento na fotossíntese associado ao aumento do CO₂ nas próximas décadas deverá compensar qualquer redução na produtividade da fotossíntese.

3.3.3 Efeitos da demanda hídrica

Mudanças climáticas no Brasil ameaçam intensificar as dificuldades de acesso à água e a combinação das alterações dos elementos do clima, na forma de falta de chuva ou pouca chuva acompanhada de altas temperaturas e altas taxas de evaporação e, com a competição por recursos hídricos, podem levar a uma potencial crise (MARENGO, 2008), principalmente para aqueles produtores ou em cultivos, onde a irrigação é inviável, como nas plantações florestais de maior porte.

Tonello e Teixeira Filho (2012) apontam o potencial hídrico foliar como um dos fatores mais importantes que afetam o funcionamento dos estômatos. Dessa forma, a disponibilidade hídrica afeta diretamente as trocas gasosas. Avaliando mudas de eucalipto com 203 dias de idade, esses autores verificaram que as mudas com menores potenciais hídricos apresentaram menores taxas de transpiração, indicando que quanto maior a restrição de água disponível no solo para atender suas necessidades fisiológicas, a planta exercerá restrições na abertura de seus estômatos para liberação de água para a atmosfera, e com isso a absorção de CO₂. A disponibilidade hídrica alterou as taxas de fotossíntese de eucalipto no estudo de Tatagiba et al. (2007), havendo uma redução da fotossíntese quanto maior o período de restrição hídrica.

A perda de água via transpiração em plantas irrigadas é grande, pois uma vez que o suprimento hídrico é abundante, é vantajoso para a planta intercambiar a água por CO₂ para realizar a fotossíntese. Nesse caso, a perda de água seria compensada pela entrada de CO₂ (TAIZ e ZEIGER, 2008). Por outro lado, quando a disponibilidade hídrica no solo é reduzida, a planta tende fechar os estômatos parcialmente para evitar a perda excessiva de água, reduzindo assim a transpiração mesmo sob demais condições ambientais favoráveis, como radiação e temperatura.

Gondim et al. (2008) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do rio Jaguaribe, no Estado do Ceará, considerando os efeitos das mudanças climáticas projetados pelo modelo regional HadRM3, e concluíram que a mudança do clima impacta na demanda de água para irrigação das culturas perenes, como consequência do balanço hídrico, determinado pela evapotranspiração e pela precipitação, pois em temperaturas mais

elevadas ocorre maior demanda para evapotranspiração das plantas, que agrava maior déficit hídrico em função da redução da precipitação, aumentando a necessidade de expansão da área irrigada.

Verifica-se o fato de que, possivelmente, a demanda hídrica pelas culturas irá aumentar devido ao aumento de temperatura, no entanto as previsões sobre as mudanças na precipitação apresentam algumas divergências entre os modelos. No trabalho de Marengo et al (2007), as anomalias de chuva geradas por 5 modelos climáticos globais do IPCC AR4 para os cenários otimista (B2) e pessimista (A2) na região Nordeste do Brasil, demonstraram resultados distintos entre as diferentes simulações. Para o cenário B2, os modelos climáticos CSIRO, GFDL, CCMA e CCSR/NIES mostram anomalias positivas de chuva, que chegam a 2 mm/dia. No cenário A2, o modelo CCSR/NIES apresenta anomalias positivas que são menos intensas que no cenário B2, sendo que no cenário A2, a maior diferença com B2 está no modelo GFDL, que apresenta tendências positivas de chuva chegando a 4-5 mm/dia em 2100, comparado com 2 mm/dia-1 no cenário B2. Nos dois cenários, o modelo HadCM3 apresenta anomalias de chuva negativas chegando a 1.5 mm/dia em 2100.

3.3.4 Impactos na Produtividade de Cultivos Florestais

As previsões de alterações quanto à temperatura média, intensidade de precipitação pluviométrica e concentração de CO₂ atmosférico podem afetar a produtividade de florestas plantadas. De acordo com vários estudos, incrementos na concentração de CO₂, independentemente de modificações de outras variáveis, podem aumentar a produtividade por meio do chamado efeito de “fertilização de carbono” (MAFIA et al., 2011).

Para verificar os efeitos das mudanças climáticas têm sido empregados modelos de predição de crescimento baseados em processos, associados com os cenários previstos de mudanças climáticas controladas. Tais predições possuem o objetivo de avaliar os possíveis impactos na produtividade futura dos plantios florestais. Relacionando aumento de biomassa, o uso de modelos de crescimento permite a

avaliação dos riscos da variação climática e a identificação de novas áreas aptas ao plantio florestal (BAESSO et al., 2010).

Em um estudo para eucalipto empregando o modelo de crescimento 3-PG, verificou-se que as variações futuras da temperatura e precipitação poderão provocar redução da produtividade (EVANGELISTA, 2006). Todavia, em outro estudo conduzido mais tarde por Baesso et al. (2010) no qual se considerou também o efeito do aumento da concentração de CO₂, esses autores analisaram os impactos das mudanças climáticas na produtividade futura do eucalipto na região norte do Espírito Santo e Sul da Bahia, utilizando os cenários de mudanças climáticas (A2 e B2) do modelo global CCSR/NIES, para três períodos futuros: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, e concluíram que as mudanças futuras no clima provocariam decréscimos na produtividade, chegando a apresentar uma redução de até 40% no cenário A2 para o período de 2071-2100 e 24% para o cenário B2.

3.3.5 Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático de espécies florestais

O zoneamento agroclimático é uma importante ferramenta na tomada de decisões para o aumento da eficiência de plantações florestais, possuindo grande importância, para a projeção da delimitação de áreas de cultivo, quanto ao impacto das mudanças climáticas globais que podem atingir o setor florestal brasileiro, pois as mudanças do clima podem afetar as espécies a serem cultivadas produtivamente em diferentes regiões, impactando o retorno financeiro do setor.

O zoneamento de aptidão climática, segundo Pereira et al. (2002), é a identificação de áreas com alto potencial de produção, isto é, áreas onde o clima e o solo sejam adequados para a cultura, devendo ser adequadamente avaliados antes de se implantar uma atividade agrícola. Castro et al. (2010) enfatizam que, nesse tipo de zoneamento, estão estabelecidas as condições hídricas e térmicas ideais para o desenvolvimento da espécie e conseqüente produtividade.

A partir da caracterização dos elementos climáticos de determinada região por meio de séries de dados históricos, a fim de se conhecer as zonas mais favoráveis à implantação em escala produtiva de determinada cultura para as condições

climáticas diversas, é possível realizar o zoneamento agroclimático para o clima futuro, considerando os desvios dos elementos climáticos provocados pelas mudanças climáticas globais, disponibilizados pelos modelos (MCGA's) para os diferentes cenários, e assim comparar a migração ou não, entre zonas aptas e inaptas de determinado cultivo.

Conhecendo-se as condições climáticas consideradas ótimas para o desenvolvimento da cultura, por meio da sobreposição dos mapas contendo os índices climáticos para a espécie, são definidas as seguintes classes de aptidão, de acordo com Pereira et al. (2002):

- Apta – áreas sem restrições térmicas e hídricas, onde a cultura atinge o seu potencial de produção.
- Inapta – áreas que não atendem às exigências térmicas ou hídricas da espécie.
- Restritas – áreas em que as restrições não são totalmente limitantes ao cultivo, podendo ser utilizadas se a irrigação for economicamente viável, no caso de deficiência hídrica (Restrição hídrica), ou se houver variedades resistentes ou adaptadas no caso da limitação térmica (Restrição Térmica).

Normalmente, para a maioria dos cultivos florestais, a classe restrita não se encaixa devido à impossibilidade de implantação de irrigação em plantios comerciais de espécies perenes.

Segundo Assad et al. (2004), com as mudanças climáticas globais, as regiões climaticamente limítrofes de delimitação de cultivo adequado de plantas poderão se tornar desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal, sendo que quanto maior a anomalia, menor a aptidão da região. Até o limite máximo de tolerância biológica ao calor, culturas tolerantes a altas temperaturas provavelmente serão beneficiadas até o seu limite próprio de tolerância ao estresse térmico, no caso de baixas temperaturas, regiões que atualmente são limitantes ao desenvolvimento de culturas suscetíveis a geadas, com o aumento do nível térmico decorrente do aquecimento global, passarão a apresentar condições favoráveis ao desenvolvimento de vegetações.

Assim sendo, o zoneamento agroclimático considerando as mudanças climáticas, é uma ferramenta de grande utilidade no planejamento das plantações do setor florestal, visto que em geral, a maioria das espécies apresenta ciclos de desenvolvimento por vários anos.

Vários estudos mostram a influência das mudanças climáticas globais no zoneamento de aptidão das culturas (MOURA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2011a; CAMPANHARO et al., 2011; ANDRADE et al., 2012) e na espacialização dos riscos climáticos (ASSAD et al., 2004; CAMPOS et al., 2010; ASSAD et al., 2013; SILVA et al., 2013a).

Oliveira et al. (2011a), avaliaram os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre o zoneamento climático de quatro espécies de *Pinus* (*Pinus elliottii* var. *elliottii*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus taeda* e *Pinus oocarpa*) no Estado do Espírito Santo, com base no modelo HadCM3 para a realização do balanço hídrico atual e futuro, e verificaram a existência de 100% de áreas inaptas na década de 2050 para as espécies *Pinus elliotti* e *Pinus taeda*, sendo que na década de 2080, o Espírito Santo só apresentaria área apta ao cultivo de *Pinus caribaea*, e ainda apenas no cenário otimista (B2), por ser entre as quatro espécies avaliadas, a que apresenta maior faixa de temperatura para aptidão climática (até 27°C), além do fato de ser menos afetada pela maior demanda de evapotranspiração e redução da precipitação com as mudanças climáticas, em relação às outras espécies de *Pinus*, tolerando até 200 mm de déficit hídrico.

Campanharo et al. (2011) avaliaram os possíveis impactos das mudanças climáticas globais sobre o zoneamento agroclimático da seringueira no Estado do Espírito Santo, considerando também as áreas de escape ao mal-das-folhas. Os autores utilizaram dados climáticos atuais de 110 estações para realização do balanço hídrico necessário ao zoneamento. Para a caracterização do clima e balanço hídrico futuro, foram obtidos dados com base no modelo HadCM3 nos cenários A2 e B2, e constataram que atualmente o Espírito Santo possui boa aptidão para a heveicultura, com predomínio de áreas com pouca probabilidade de ocorrência do mal-das-folhas, mas que nos cenários futuros a tendência é de que o estado esteja predominantemente ocupado por áreas inaptas, devido ao incremento excessivo da temperatura.

3.4 FLUTUAÇÃO ESPACIAL DE CLASSES DE APTIDÃO AGROCLIMÁTICA DIANTE DOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A complexidade da análise espacial baseada na detecção de mudanças tem sido destacada por muitos pesquisadores, que sugerem que os dados e técnicas de abordagens sejam embasados (ERENER e DÜZGÜN de 2009; GALANTE et al., 2009).

No zoneamento de uma área, de acordo com os impactos ocasionados pelas mudanças climáticas, são divididas as zonas aptas agroclimaticamente para determinada cultura, após os efeitos da alteração do clima, de forma que possa se obter a comparação de áreas aptas e inaptas, para o clima atual e futuro. No entanto, somente a avaliação quantitativa do percentual de mudança em uma área não fornece informação suficiente para o planejamento ambiental ou locação de culturas, de forma que a análise espaço temporal da mudança ocorrida ou a avaliação da flutuação das classes de aptidão surge como um diferencial importante em mapas de zoneamento.

Para obter essa flutuação espacial das classes, Pontius Jr. et al. (2004) recomendam a obtenção de mapas correspondentes a dois momentos distintos no tempo, seguida da contabilização e registro das mudanças em matrizes de transição para a identificação das alterações mais significativas e, posteriormente, a pesquisa dos processos que estiveram na origem dessas variações.

Na literatura, são encontrados diversos trabalhos, utilizando essa metodologia em estudos de ecologia da paisagem e análise de mudanças de uso da terra (DORNELLES, 2003; PONTIUS Jr. et al., 2004; LOURENÇO et al., 2008; GALANTE et al., 2009; MANANDHAR et al., 2010; PÉREZ-HUGALDE et al., 2011; NAGABHATLA et al., 2012; ALDWAIK e PONTIUS JR., 2012; TAVARES et al., 2012; ROMERO-RUIZ et al., 2012; SCHARLAU et al., 2013), a fim de detectar alterações com o tempo, porém não foram encontrados relatos e trabalhos que avaliem as mudanças climáticas globais, mostrando as transições entre as classes atuais e futuras pela análise da flutuação espacial das classes geradas pelo zoneamento. Com base nisso, a seguinte metodologia é apresentada com o propósito de avaliar a flutuação espacial de classes de aptidão agroclimática diante dos cenários de mudanças climáticas.

Segundo Pontius Jr. et al. (2004), a matriz de tabulação cruzada é a maneira mais prática para analisar a mudança da terra, de forma a identificar as transições mais importantes.

A abordagem da análise de transição de classes por matriz de comparação parte do princípio de que se têm mapas de um único local para o mesmo conjunto de categorias ou classes, para duas ou mais datas, e as sobreposições desses mapas entre quaisquer dois pontos no tempo gera uma matriz de tabulação cruzada, onde as linhas mostram as classes a partir de uma data inicial, as colunas mostram as classes de um momento posterior (data futura), e as entradas de valores apontam o tamanho da área em que houve a transição de uma classe inicial para uma classe subsequente, e as entradas na diagonal indicam a persistência das classes no intervalo de tempo (ALDWAIK e PONTIUS Jr., 2012).

Lourenço et al. (2008) também aplicaram essa metodologia para quantificar as mudanças no uso da terra no Vale do Douro, e ressaltaram que essa permitiu uma análise mais aprofundada da informação registrada na matriz, por meio da qual se pode inferir quanto ao tipo e à “quantidade” de alteração do uso, pela manipulação algébrica dos valores registrados em combinação com dados adicionais, tais como, por exemplo, o conhecimento da superfície total sob análise e quais as dinâmicas de desenvolvimento que têm sido observadas ao longo do tempo.

Pontius Jr. et al. (2004) ressaltam que a falta de mudança líquida não indica necessariamente a falta de mudança na paisagem. Pode ser que a mudança ocorra de tal forma que modifique a localização das classes entre as datas, mas a quantidade ou percentual de área continue o mesmo, por exemplo, um percentual de perda de área apta pode ser acompanhado pelo mesmo percentual de ganho de área apta, porém em outra localização, denominando-se que houve uma “troca” entre as classes. Troca (*swap*) é o total da área de uma classe que se perdeu em um local e foi compensado por um ganho de área desta mesma classe em outro local. Pontius Jr. et al. (2004) a definem como o dobro da porcentagem mínima de ganho ou perda para uma dada classe de ocupação do solo. Manandhar et al. (2010) ressaltam que ao avaliar a mudança líquida isoladamente, pode se estar subestimando drasticamente a mudança total, uma vez que anula o ganho bruto de uma categoria em um local, com uma mesma perda bruta da mesma categoria em outro local.

Segundo Pontius Jr. et al. (2008), na detecção de mudanças na cobertura vegetal, é importante observar a resolução dos *pixels* dos mapas, pois a especificação do local torna-se menos precisa à medida que a resolução se torna mais grossa, apesar da proporção de cada categoria permanecer constante na paisagem. A alteração líquida, não varia com a resolução, porém a resolução em que os estudos são conduzidos pode influenciar as conclusões de como a quantidade de troca diminui à medida que células da grade tornam-se maiores (PONTIUS Jr. et al., 2004; MANANDHAR et al., 2010).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E PREPARAÇÃO DA BASE DE DADOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS

O estado do Espírito Santo está localizado na Região Sudeste do território Brasileiro, tendo como limites o Oceano Atlântico a Leste, a 0- a Norte, Minas Gerais a Oeste e o estado do Rio de Janeiro ao Sul. Possui uma área total de 46.184,1 km², está compreendido geograficamente entre os meridianos 39° 38' e 41° 50' de Longitude Oeste e entre os paralelos 17° 52' e 21°19' de Latitude Sul, estando dividido em 78 municípios apresentando três grandes regiões de relevo – Litoral, Tabuleiros e Área Elevada do Interior – que determinam, juntamente com outros fatores, a diversidade de solos do estado (SEAG, 2007). Apresenta áreas planas e onduladas, sendo que o clima é influenciado de maneira marcante pela variação da altitude. Conforme o sistema de classificação de Köppen, a região enquadra-se nas zonas climáticas A e C, que identificam climas úmidos. No estado, são encontrados os subtipos climáticos Aw, Am, Cf e Cw, e também as variações Cfa, Cfb, Cwa e Cwb (SIQUEIRA et al., 2004).

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram obtidos em duas épocas distintas, para o século passado a fim de desenhar o cenário climático futuro, e para o período atual. As séries 1971-1999 e 1977-1999 foram obtidas para o período utilizado como referência para o século XX de precipitação e temperatura, respectivamente, e a série 1982 – 2011 (30 anos) para caracterização do clima atual de ambas as variáveis.

Essas séries foram obtidas de 94 pontos de medição, sendo 11 pertencentes à rede de estações meteorológicas do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), 3 pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que medem temperatura do ar e precipitação e outros 80 pertencentes à Agência Nacional de Águas (ANA), que mede somente a precipitação. Foram utilizados ainda, outros 16 postos pluviométricos também pertencentes à ANA, localizados nos Estados de Minas Gerais, Bahia e Rio de Janeiro, tendo como objetivo minimizar o efeito de borda no processo de interpolação, assim como

realizado por Andrade (1998) e Castro (2010), totalizando assim 110 pontos de medição (Figura 3).

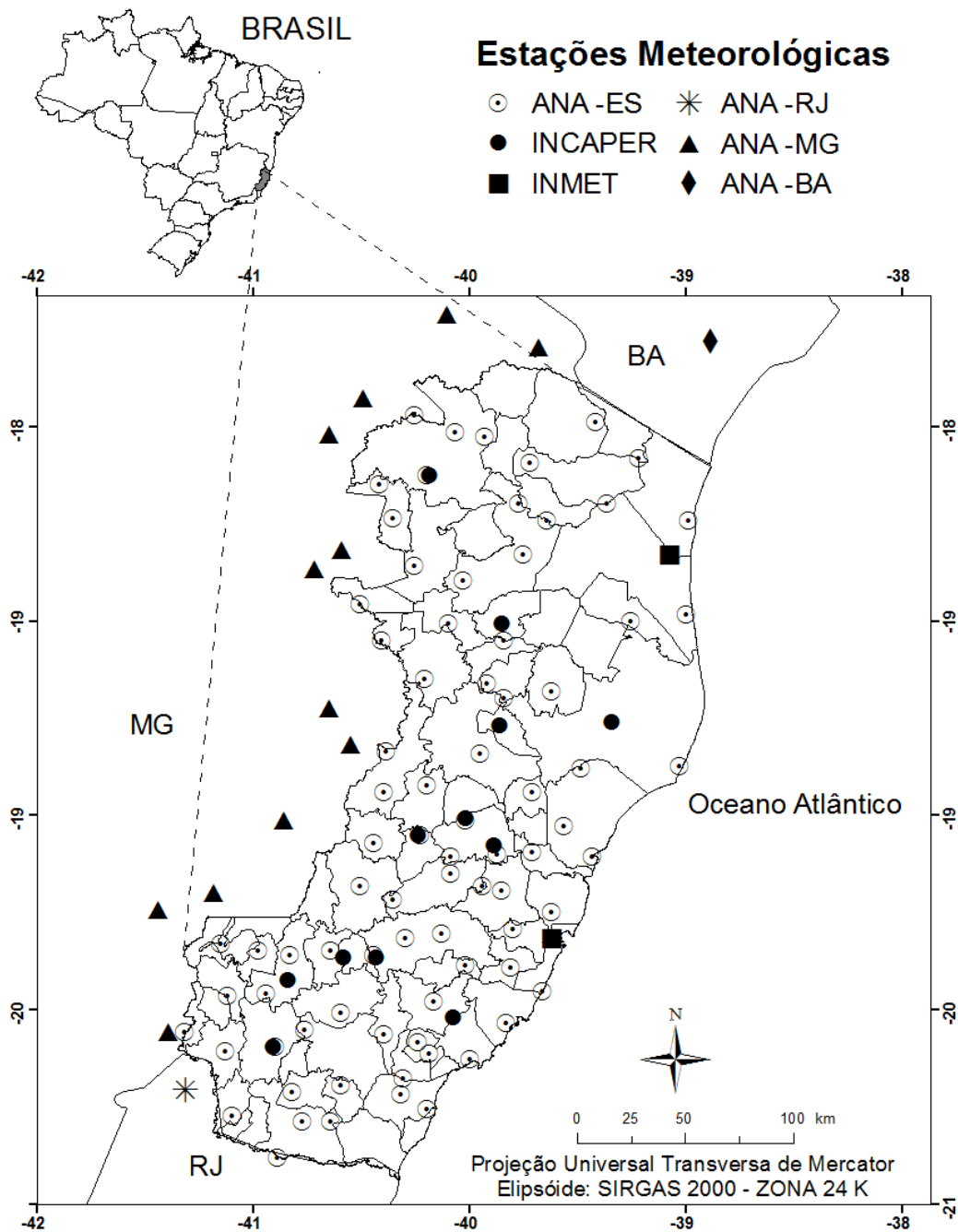


Figura 3 – Localização dos postos com dados meteorológicos utilizados para o Espírito Santo e estados vizinhos pertencentes à Agência Nacional de Água (ANA), ao Instituto Capixaba de Pesquisa Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os mapas de precipitação mensal utilizados na caracterização do clima atual foram gerados a partir da interpolação das médias das normais climatológicas obtidas dos postos, enquanto os mapas de temperatura média do ar mensal foram espacializados utilizando equações de regressão e dados de altitude. Apesar desses procedimentos já terem sido realizados por outros autores, pois Castro (2008) estimou equações de regressão para a série 1977-2006 e Silva et al. (2011) analisaram o desempenho de interpoladores para a mesma série de dados, convencionou-se importante nova análise com os dados climáticos da série atualizada (1982-2011), tendo em vista que este estudo se refere às alterações climáticas com o tempo.

Após a realização das etapas e cálculos descritos a seguir, as saídas finais de todos os mapas foram elaboradas no ArcGIS 10.2 e projetadas para o sistema de coordenadas UTM, Datum SIRGAS 2000 zona 24S.

4.1.1 Preenchimento das falhas de precipitação

Para o preenchimento das falhas de precipitação nas séries mensais, foi utilizado o método da ponderação regional. Este método de preenchimento de falhas é simplificado, e normalmente, o mais utilizado para o preenchimento de séries mensais ou anuais de precipitações (BERTONI, 2002).

De posse dos dados de todos os postos meteorológicos, foram selecionados três, tomando como critério aqueles mais próximos e que estavam numa região climatológica semelhante ao posto a ser estimado, sendo as falhas preenchidas utilizando-se a Equação 1.

$$Yc = \frac{1}{3} \left[\frac{X_1}{Xm_1} + \frac{X_2}{Xm_2} + \frac{X_3}{Xm_3} \right] * Ym \quad (1)$$

em que:

Yc = Precipitação do posto a ser estimada;

X_1, X_2 e X_3 = Precipitações correspondentes ao mês (ou ano) que se deseja preencher, observadas nos três postos vizinhos;

Xm_1, Xm_2 e Xm_3 = Precipitação média nas três estações circunvizinhas;

Ym = Precipitação média do posto a ser estimado.

4.1.2 Avaliação do desempenho de métodos interpoladores de precipitação

Para espacialização dos dados de precipitação da série histórica 1982 - 2011, a fim de gerar os mapas que caracterizam o clima atual, foi realizado o estudo da variabilidade e da dependência espacial dos valores de precipitação, associados à sua respectiva posição relativa ou coordenada espacial.

A análise espacial da dependência dos dados foi realizada por meio de módulos de programação desenvolvida no *software* Matlab® apresentados em Xavier et al. (2010), utilizando os valores de precipitação mensal e anual com suas respectivas coordenadas de campo para a construção do semivariograma experimental. As coordenadas de campo (x e y) utilizadas foram as coordenadas UTM - “Universal Transversa de Mercator”, de cada ponto de medida, representados pelas estações meteorológicas e postos pluviométricos e o valor da variável (z) foram os valores de precipitação.

O ajuste automático foi obtido para os modelos teóricos –exponencial, esférico e linear com patamar ao semivariograma experimental, para os métodos da krigagem e inverso de uma potência da distância (IPD) para os níveis de potência de 1 a 5, de modo que a curva que melhor se ajustar aos pontos obtidos represente a magnitude, alcance e intensidade da variabilidade espacial da precipitação.

Foi realizada a validação cruzada dos dados de todos os interpoladores, por meio da metodologia proposta por Caruso & Quarta (1998) e Robinson & Metternicht (2006), na qual, sucessivamente um posto específico é descartado na realização da interpolação. Assim, foi possível obter o valor estimado (E) relativo ao posto retirado e, posteriormente compará-lo com o valor real da variável (O).

Com os índices estatísticos fornecidos pela validação cruzada dos dados, foi possível realizar a avaliação do desempenho dos interpoladores e a seleção do modelo geoestatístico, utilizando como um dos critérios de decisão o menor valor da raiz do erro médio quadrático (REMQ), conforme Phillips et al. (1992), Addink & Stein, (1999) e Legates & McCabe Jr. (1999) definido pela Equação 2.

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{J}} \quad (2)$$

em que:

J =Número de observações;

O =Valor observado experimentalmente;

E =Valor estimado pelo método.

Foram considerados ainda, segundo proposto por Camargo & Sentelhas (1997), o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d) apresentado por (WILLMOTT,1981). Segundo os autores, a precisão do modelo é dada pelo coeficiente de correlação (r) e a exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, essa aproximação é dada pelo índice de concordância (d), onde seus valores variam de zero para nenhuma concordância a 1 para a concordância perfeita. O valor de (d) é definido pela Equação 3.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^J (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

em que,

\bar{O} = Média dos valores observados experimentalmente.

O índice de confiança (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997) permitiu analisar conjuntamente a precisão e a exatidão dos resultados obtidos, sendo calculado por meio do produto do coeficiente de correlação (r) pelo índice de concordância (d). Os critérios de avaliação do desempenho de modelos quanto ao seu índice de confiança estão apresentados na Tabela 2.

Também foi utilizado o coeficiente de eficiência ajustado (E') definido por Legates & McCabe Jr. (1999), que varia de $-\infty$ a 1, com os maiores valores indicando melhor performance, calculado por intermédio da Equação 4.

Tabela 2 – Análise do desempenho do modelo geoestatístico com base no índice de confiança (c) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997)

Valor de c	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J |O_i - E_i|}{\sum_{i=1}^J |O_i - \bar{O}|} \quad (4)$$

Além disso, os mesmos autores indicam que, como informação adicional, deve ser incluído o erro médio absoluto (EMA), definido pela Equação 5.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^J |O_i - E_i|}{J} \quad (5)$$

Finalmente, foi utilizado o erro médio percentual (EMP), descrito por Chong et al. (1982), expresso pela Equação 6.

$$EMP = \frac{\sum_{i=1}^J \frac{|O_i - E_i|}{O_i}}{J} * 100 \quad (6)$$

4.1.3 Espacialização da temperatura média do ar no estado do Espírito Santo por meio de equações de regressão múltipla

Devido ao reduzido número de dados de temperatura do ar disponíveis para o estado do Espírito Santo, pois somente os postos meteorológicos do INCAPER e do INMET (Figura 3) coletam esta variável climática, para se obter os mapas de temperatura referente ao clima atual, optou-se por estimar os valores de temperatura do ar a partir de modelos estatísticos desenvolvidos para o Espírito Santo, por meio de equações de regressão múltipla com ajuste linear.

Castro (2008) ajustou equações de regressão múltipla para estimar a temperatura do ar em todo o estado, utilizando a série histórica de 1977 – 2006, porém essas equações não foram adotadas, tendo em vista a necessidade de construir uma base de dados atualizada para caracterização do clima atual, e também equações com coeficientes ajustados para a simulação do clima do século XX. Sendo assim, para determinar os coeficientes das equações, foram utilizadas as bases de dados mensais de temperatura média, coletados em abrigos termométricos padrões, observados nas 14 estações meteorológicas pertencentes ao INCAPER e ao INMET no Espírito Santo, utilizando duas séries climáticas distintas, uma referente ao período de 1982 a 2011, e outra referente ao período de dados de 1977 a 1999, caracterizando a temperatura do ar no século XX. Diferindo da série de dados de precipitação, a série de dados de temperatura se inicia em 1977, porque antes dessa data ainda não haviam sido instaladas as estações meteorológicas do INCAPER e INMET utilizadas neste estudo.

As equações foram desenvolvidas por meio de análises de regressão linear múltipla, adotando-se o modelo linear (Equação 7), tendo como variáveis independentes a altitude, a latitude e a longitude das estações e a temperatura do ar das referidas séries históricas como variável dependente.

$$\gamma_i = \beta_0 + \beta_1 \text{Alt} + \beta_2 \text{Lat} + \beta_3 \text{Long} + \varepsilon_i \quad (7)$$

em que:

γ_i = temperaturas médias mensais ($i=1, 2, \dots, 12$) e anual ($i=13$) estimadas em °C;

Alt = altitude (m);

Lat = latitude, em graus e décimos (entrada com valores negativos);

Long = longitude em graus e décimos (entrada com valores negativos);

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ e β_3 : parâmetros de regressão;

ε_i = erro aleatório.

Foi avaliado o coeficiente de determinação ajustado (R^2) e a significância dos coeficientes de regressão por meio do teste “t” de Student em nível de 5 % de probabilidade.

Todos os mapas representativos de temperaturas média do ar mensal e média anual, utilizados nas demais etapas do trabalho, foram elaborados utilizando-se as equações de regressão linear múltipla. As temperaturas do ar foram espacializadas na forma de mapas temáticos, aplicando-se as equações de regressão à imagem digital de latitude, longitude e altitude do Espírito Santo.

Para os dados de altitude, foram utilizadas as informações contidas no projeto GTOPO30, tendo sido desenvolvido em escala mundial pelo *United States Geological Survey* (USGS) com resolução espacial de 0,0090009 graus (1 km).

4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS (MCG'S) DO IPCC AR4 EM SIMULAR O CLIMA DO ESPÍRITO SANTO

Esta etapa consistiu em comparar os resultados da simulação gerada pelos modelos climáticos globais com os dados observados nas estações climatológicas do Estado do Espírito Santo, sendo que quanto mais próximo o valor da variável climática simulado pelo modelo for do valor observado na estação meteorológica, melhor seu desempenho. Os modelos climáticos globais (MCG's) disponíveis na base de dados (*Data Distribution Centre*) do *Intergovernmental Panel on Climate Change*- IPCC em seu quarto relatório (AR4), utilizados neste estudo encontram-se na Tabela 3.

Os modelos foram avaliados, buscando selecionar aquele com menor erro estatístico em simular o clima no Estado do Espírito Santo. Foram comparados os dados referentes ao século XX, obtidos em cada modelo pelo cenário *20C3M* (*Climate of the 20th Century*), que representam as projeções do modelo para o século XX, e encontram-se disponível no *Data Distribution Centre* (<http://www.ipcc-data.org/>) do IPCC, com os dados observados para o mesmo período, obtidos dos postos meteorológicos do Estado do Espírito Santo.

Tabela 3 – Modelos Climáticos Globais do IPCC AR4 avaliados em simular o clima do Espírito Santo, e suas respectivas instituições de origem e resolução (Graus de Latitude x graus de longitude). Fonte: *Data Distribution Centre* – (IPCC, 2013)

Modelo	Origem	Resolução
--------	--------	-----------

BCCR-BCM2.0	<i>Bjerknes Centre for Climate Research (Noruega)</i>	1,5° x 1 5°
CGCM3.1(T47)	<i>Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (Canadá)</i>	1,9° x 1,9°
CNRM-CM3	<i>Centre National de Recherches Meteorologiques (França)</i>	2° x 2°
ECHO-G	<i>Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, and Model and Data Group (Alemanha e Coréia)</i>	2,8° x 2,8°
CSIRO Mark 3.0	<i>Atmospheric Research (Austrália)</i>	0,8° x 1,9°
GFDL-CM2.0	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Nova Jersey)</i>	2,0° x 2,5°
GFDL-CM2.1		2,0° x 2,5°
INM-CM3.0	<i>Institute for Numerical Mathematics (Rússia)</i>	4,0° x 5,0°
ECHAM5-MPI-OM	<i>Max Planck Institute for Meteorology (Alemanha)</i>	1,9° x 1,9°
MRI-CGCM2.3.2	<i>Meteorological Research Institute (Japão)</i>	2,8° x 2,8°
GISS-ER	<i>NASA Goddard Institute for Space Studies (Estados Unidos)</i>	4,0° x 5,0°
CCSM3	<i>National Center for Atmospheric Research (Estados Unidos)</i>	1,4° x 1,4°
PCM		2,8° x 2,8°
MIROC3.2 (medres)	<i>Center for Climate System Research (Tóquio)</i>	2,8° x 2,8°
HadCM3	<i>Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office (Reino Unido)</i>	2,5° x 3,75°
HadGEM1		1,3° x 1,9°
IPSL-CM4	<i>Institute Pierre Simon Laplace (França)</i>	2,5° x 3,75°

As variáveis climáticas analisadas para cada modelo em comparação com os dados observados do Estado do Espírito Santo foram temperatura média mensal e precipitação mensal.

Para a variável climática temperatura, os dados observados foram referentes à série histórica do período de 1977 a 1999, obtidos por meio das equações de regressão desenvolvidas com base neste período, os dados simulados foram obtidos para cada MCG, no cenário *20C3M* para o mesmo intervalo de tempo da série de dados observados.

Os dados observados de precipitação mensal utilizados como referência para o século XX foram provenientes da série histórica de 1971 a 1999, obtidos dos 96 postos meteorológicos da ANA, 80 localizados no Espírito Santo e 16 postos meteorológicos localizados nos estados vizinhos. Assim como para temperatura, os dados de precipitação simulados para o século XX foram obtidos para cada MCG, no cenário *20C3M*, para o mesmo período da série de dados observados de precipitação.

Como os dados dos MCG's do IPCC-AR4 estão em diferentes resoluções (Tabela 3), procedeu-se então, o cálculo da média das suas resoluções para obter um valor em comum, então os MCG's foram interpolados (linear) para uma grade de resolução comum a todos os modelos avaliados ($2,1^{\circ} \times 2,2^{\circ}$), conforme metodologia descrita em trabalhos realizados por Lambert & Boer (2001) e Radic & Clarke (2010). Como os dados observados foram interpolados em uma resolução de 1 km, que possui um grau de detalhamento bem maior que os dados dos MCG's, foi preciso determinar um ponto de referência no mapa, tornando possível obter a comparação dos valores provenientes de uma mesma localização espacial apesar de estarem em resoluções distintas. Assim, foram selecionados dois pontos no Estado do Espírito Santo, localizados na mesma longitude ($40^{\circ}W$), a latitude que passa pelo ponto central do estado ($-19^{\circ}S$) foi utilizada como referência para a seleção de um ponto a 75% acima na área do estado, denominado ponto Norte, e outro 25% abaixo na área do estado, denominando de ponto Sul.

Após os procedimentos de normatização das resoluções, e seleção dos pontos utilizados para a comparação dos valores observados e simulados, foi realizado o processamento dos dados para geração das medidas estatísticas. Devido à grande quantidade de dados de temperatura do ar e precipitação, oriundos das estações meteorológicas e das 19 rodadas dos modelos do IPCC (17 MCG's e *2Multimodels*), estes foram analisados por meio da construção de funções em linguagem de programação desenvolvidas no *software* Matlab® (MATHWORKS, 2011), sendo

calculados os seguintes parâmetros estatísticos para estudar o padrão da relação entre os dados observados (estações meteorológicas) e dados estimados (MCG's), conforme o trabalho de Duan e Bastiaanssem (2013):

a) Coeficiente de Correlação (R)

O Coeficiente de correlação foi calculado buscando medir o grau de correlação entre as variáveis climáticas observadas e simuladas, de acordo com a Equação 8, sendo que quanto mais próximo de 1 o valor do coeficiente, mais forte é a correlação entre os dados.

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_n - \bar{y})(O_n - \bar{O})}{\sigma_y \cdot \sigma_O} \quad (8)$$

em que:

y_i = Valor *i*da variável climática simulado pelo modelo;

\bar{y} = Média dos valores simulados;

O_i = Valor *i*da variável climática observado na estação meteorológica;

\bar{O} = Média dos valores observados nas estações meteorológicas;

σ_y = Desvio padrão dos dados simulados pelo modelo;

σ_O = Desvio padrão dos dados observados nas estações meteorológicas;

n = Número de pares de dados observados e simulados.

b) Viés ou Bias (B)

Para explicar quantitativamente o erro ou viés do dado simulado, é utilizado o cálculo do erro médio, que permite avaliar o viés ou "bias" de um modelo numérico. Esse viés pode ser calculado conforme Equação 9 e significa simplesmente a diferença entre a média simulada (\bar{y}) e a média observada (\bar{O}).

$$B = \bar{y} - \bar{O} \quad (9)$$

Como interpretação do resultado dessa expressão, as diferenças próximas de zero indicam que a simulação está mais próxima do valor observado, sendo que um bias positivo significa que a simulação superestima os valores observados, enquanto que um bias negativo significa que os valores simulados estão subestimados. No caso de simulação ou previsão de precipitação, de acordo com o erro sistemático das simulações, por exemplo, podem ser significativamente mais secas ou úmidas.

c) Erro Médio Absoluto

O Erro Médio Absoluto (MAE) é uma informação complementar ao erro médio, interpretado como o viés. Trata-se da média aritmética do valor absoluto da diferença entre cada par de valores simulado (y_i) e observado (O_i), sendo expresso de acordo com a Equação 10.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - O_i| \quad (10)$$

d) Raiz do Erro Médio Quadrático

Trata-se da raiz quadrada da média das diferenças entre os pares simulados e observados, elevados ao quadrado (Equação 11).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - O_i)^2} \quad (11)$$

Haas et al. (2011) mencionam que a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) pode ser considerado o método mais comum para se avaliar a incerteza de um modelo atmosférico. Então, como critério de decisão final, adotou-se o menor valor de RMSE (COQUARD et al., 2004; GLECKLER et al., 2008; PIERCE et al., 2009; DUAN e BASTIAANSSEM, 2013).

Além das saídas de dados dos 17 modelos globais, também foi avaliado o desempenho de duas rodadas do *Multimodel ensemble*. Foi realizado um Multimodel com a média dos dados do cenário 20C3M de todos os modelos, e outro Multimodel apenas com média dos dados dos cinco modelos que apresentaram melhor desempenho estatístico, a fim de verificar se a metodologia possui menor

erro estatístico em simular as variáveis climáticas no Espírito Santo, do que as saídas diretas dos modelos climáticos.

4.3 DOWNSCALING DOS DADOS CLIMÁTICOS

Após a seleção do MCG com melhor desempenho de simulação climática para o Espírito Santo, foi realizado o procedimento de *downscaling* (DICKINSON et al. 1989; GIORGI e BATES, 1989; LIU et al., 1994), a fim de transferir as informações climatológicas para a mesma escala dos dados observados, de forma a se obter o cenário futuro sobre o estado.

O *downscaling* foi obtido pelo método da interpolação das anomalias climáticas, conforme descrito nos trabalhos de Ramírez-Villegas e Jarvis (2010) e Tabor e Williams (2010). As anomalias foram calculadas no *software* MATLAB®, sendo obtidas pela diferença entre os dados gerados pelos cenários A2 do ano de 2050 e 20C3M do modelo global selecionado. Posteriormente, as anomalias foram acopladas aos valores observados nas estações climatológicas do Espírito Santo, provenientes da média da série histórica de 1977 a 1999 para temperatura, e 1971 a 1999 para precipitação, obtendo-se assim os mapas dos desvios futuros do clima na resolução espacial de 1km. Os fluxogramas apresentados na Figura 4 ilustram as etapas e procedimentos para obtenção do *downscaling* dos dados de temperatura e precipitação.

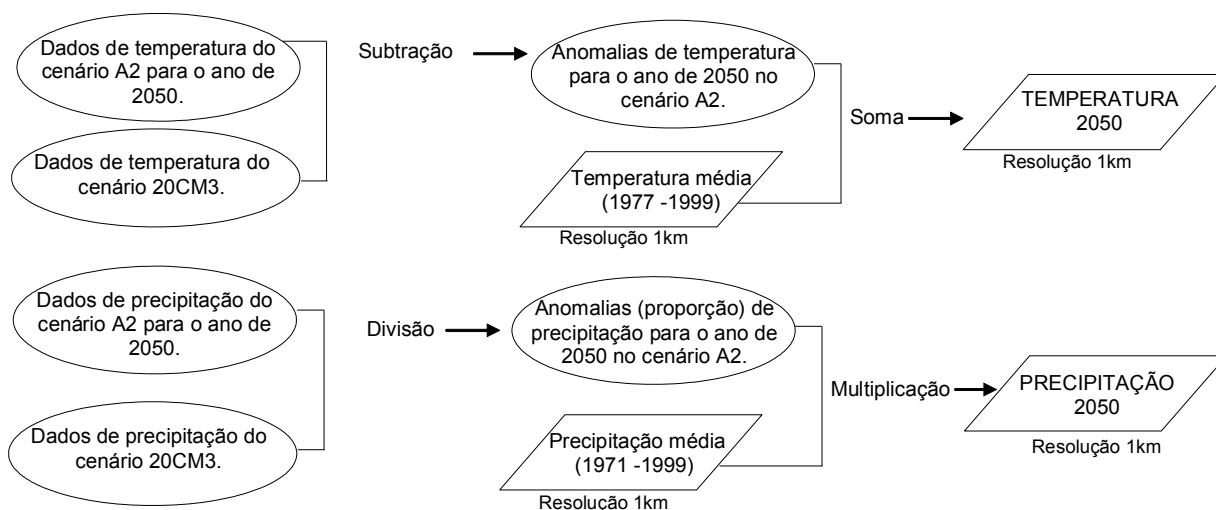


Figura 4 – Fluxogramas das etapas de obtenção de *downscaling* para dados climáticos de temperatura e precipitação no Estado do Espírito Santo.

Como medida de precaução, as anomalias da variável climática precipitação foram obtidas em valores percentuais e não absolutos, a fim de se evitar a falha da ocorrência de valores negativos de precipitação mensal ao subtrair a precipitação do século XX por anomalias que indiquem diminuição da precipitação.

4.4 ZONEAMENTOS DE APTIDÃO CLIMÁTICA ATUAL E FUTURA DAS ESPÉCIES FLORESTAIS NO ESPÍRITO SANTO

Esta etapa consistiu em duas delimitações de zonas agroclimáticas no Espírito Santo, uma considerando o clima atual e outra com as projeções climáticas para o estado com as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050, no cenário pessimista A2.

Para o zoneamento de aptidão agroclimática para o clima atual, foi utilizada a série histórica de dados climáticos atualizada, referente ao período de 1982 a 2011, dos postos meteorológicos para o Espírito Santo e estados vizinhos, apresentados anteriormente. Para interpolação dos dados de precipitação mensal, foram utilizados os modelos geoestatísticos com melhor desempenho, conforme relatado, considerando o tamanho da célula de 1 km, e para espacialização da temperatura média do ar foram consideradas as equações de regressão com os coeficientes atualizados para esta série de dados, desenvolvidas no presente estudo para o Estado do Espírito Santo.

Para o zoneamento de aptidão agroclimática para o clima futuro, foram utilizados os dados de precipitação mensal e temperatura média do ar, regionalizados para a resolução de 1 km (*downscaling*), no cenário A2 para o ano de 2050, do modelo climático de circulação global que obteve melhor desempenho estatístico em simular o clima do Estado do Espírito Santo.

4.4.1 Balanço Hídrico Climatológico Normal

De posse dos dados de temperatura média do ar e precipitação pluvial espacializados para o clima atual e futuro, foi calculado o balanço hídrico climático normal, pelo método proposto por Thornthwaite & Mather (1955) para cada *pixel* no mapa, utilizando rotina de programação no MATLAB®, em que os dados de entrada foram mapas de temperatura mensal, precipitação mensal e o mapa da capacidade de água disponível no solo (CAD) para o Espírito Santo, desenvolvido por Silva et al. (2013b).

Os valores de CAD para o estado foram obtidos por Silva et al. (2013b), utilizando os critérios adotados por Doorenbos & Kassam (1994), em que solos de textura pesada, média e grossa apresentam valores de CAD de 200 mm/m, 140 mm/m e 60 mm/m, respectivamente. O valor médio da profundidade efetiva do sistema radicular (Z) para espécies florestais foi considerado segundo Alfonsi et al. (1990) como sendo de 1500 mm. Têm-se então para o Espírito Santo, utilizando a carta de classes de solos produzida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), valores de CAD igual a 90 mm para os Neossolos Quartzarênico, Latossolos, Espodosolos e Neossolos Flúvico, considerados como solos com baixa capacidade de retenção (textura grossa), CAD de 210 mm para os Neossolos Litólicos e Argissolo (textura média), e 300 mm para Cambissolos, Gleissolo e Chernossolo.

A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948), que é um método empírico baseado apenas na temperatura média do ar e nas coordenadas geográficas do local. Escolheu-se esse método pela disponibilidade dos dados climáticos e por ter sido desenvolvido para regiões de clima úmido, apresentando boas estimativas para as condições do estado (PEREIRA et al., 2002). A estimativa da ETP é descrita segundo as Equações 12 a 14.

$$ETP = 16(10 * T_n/I)^a \quad (12)$$

em que:

T_n = Temperatura média do mês n em °C;

I e a = Índices térmicos regionais, sendo calculados pelas Equações 13 e 14 respectivamente:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 T_n)^{1,514} \quad (13)$$

O expoente a é em função de I , sendo calculado pela função polinomial:

$$a = 6,75 * 10^{-7} I^3 - 7,71 * 10^{-5} I^2 + 1,7912 * 10^{-2} I + 0,49239 \quad (14)$$

Com o cálculo do balanço hídrico climatológico normal com base na média dos anos da série histórica e os dados simulados pelo MCG, obteve-se o déficit hídrico anual no Espírito Santo para as condições climáticas atuais e, considerando as mudanças climáticas globais, respectivamente, utilizado como parâmetro para delimitação da aptidão hídrica das espécies.

4.4.2 Aptidão agroclimática das espécies florestais

O zoneamento agroclimático consistiu essencialmente na delimitação das áreas com aptidão climática para o cultivo das culturas florestais estudadas, baseando-se nas condições hídricas e térmicas ideais para o seu desenvolvimento e consequente produtividade. No presente trabalho, foram realizados zoneamentos agroclimáticos para quatro espécies florestais que têm despertado interesse nos produtores rurais do Espírito Santo: *Tectona grandis* (teca), *Toona ciliata* (cedro australiano), *Bactrys gasipaes* (pupunha) e *Azadirachta indica* (nim indiano). Também foram realizados zoneamentos agroclimáticos para quatro espécies do gênero *Pinus ssp*: *Pinus elliottii* var. *elliottii*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus oocarpa* e *Pinus taeda*.

Os índices térmicos e hídricos exigidos pelas espécies para o seu desenvolvimento, foram classificados de acordo com as necessidades de cada uma, dividindo-se em duas classes de aptidão climática: apta e inapta, como seguem:

- Apta: condições térmicas e hídricas da área apresentam-se favoráveis para o bom desenvolvimento e produção da espécie em escala comercial.
- Inapta: quando as características normais do clima não se apresentam adequadas à exploração econômica da espécie, devido a limitações severas dos fatores hídricos ou térmicos, ou ambos com marcante repercussão em sua produção.

No presente trabalho, não foi considerada a classe restrita, pois esta acontece quando a área apresenta limitações hídricas e/ou térmicas, necessitando de irrigação para suprir a deficiência hídrica, ou variedades resistentes ou adaptadas nos casos da limitação ser térmica. Tais práticas de manejo acabam tornando-se dificultosas e economicamente inviáveis para cultivos florestais. Os parâmetros térmicos e hídricos exigidos pelas espécies, conforme literaturas consultadas, encontram-se respectivamente nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Temperatura média anual (T_a) recomendada para as espécies florestais, utilizadas na delimitação de zonas aptas e inaptas no Estado do Espírito Santo

Cultura	Regiões		Referência
	Apta	Inapta	
<i>Tectona grandis</i>	$22^{\circ}\text{C} \leq T_a \leq 46^{\circ}\text{C}$	$22^{\circ}\text{C} > T_a > 46^{\circ}\text{C}$	IPEF (2003), Carvalho et al (1994), Salazar & Albertin (1974)
<i>Bactris gasipaes</i>	$20^{\circ}\text{C} \leq T_a \leq 25^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} > T_a > 25^{\circ}\text{C}$	Bastos et al (2008)- Embrapa, Neves et al (2007), Chaimsohn, (2000), Bovi (1998)
<i>Azadirachta indica</i>	$20^{\circ}\text{C} \leq T_a$	$20^{\circ}\text{C} > T_a$	Neves e Carpanezzi (2009) – Embrapa Florestas
<i>Toona ciliata</i>	$20 \leq T_a \leq 26^{\circ}\text{C}$	$20 > T_a > 26^{\circ}\text{C}$	Pinheiro et al (2003), Souza

			et al (2010), Carvalho (1994), Ricken et al (2011)
<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	$15 \leq Ta \leq 24^{\circ}\text{C}$	$15 > Ta > 24^{\circ}\text{C}$	Carpanezi et al.(1986) – Embrapa
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	$21 \leq Ta \leq 27^{\circ}\text{C}$	$21 > Ta > 27^{\circ}\text{C}$	
<i>Pinus oocarpa</i>	$13 \leq Ta \leq 21^{\circ}\text{C}$	$13 > Ta > 21^{\circ}\text{C}$	
<i>Pinus taeda</i>	$13 \leq Ta \leq 19^{\circ}\text{C}$	$13 > Ta > 19^{\circ}\text{C}$	

Tabela 5 – Déficit hídrico anual recomendado para as espécies florestais, utilizados na delimitação de zonas aptas e inaptas no Estado do Espírito Santo

Cultura	Regiões		Referência
	Apta	Inapta	
<i>Tectona grandis</i>	$\leq 100\text{ mm}$	$> 100\text{ mm}$	Carvalho et al (1994), Araújo et al. (2012), Nappo et al. (2005).
<i>Bactris gasipaes</i>	$\leq 350\text{ mm}$	$> 350\text{ mm}$	Bastos et al (2008)-Embrapa
<i>Azadirachta indica</i>	$\leq 180\text{ mm}$	$> 180\text{ mm}$	Martins (2008), Prates et al. (2005)
<i>Toona ciliata</i>	$\leq 400\text{ mm}$	$> 400\text{ mm}$	Carvalho (1994)
<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	$\leq 50\text{ mm}$	$> 50\text{ mm}$	Golfari et al. (1975)
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	$\leq 200\text{ mm}$	$> 200\text{ mm}$	
<i>Pinus oocarpa</i>	$\leq 200\text{ mm}$	$> 200\text{ mm}$	
<i>Pinus taeda</i>	$\leq 50\text{ mm}$	$> 50\text{ mm}$	

4.4.3 Procedimentos para geração dos mapas de zoneamento agroclimático para as espécies florestais

Os zoneamentos foram obtidos pelo cruzamento tabular de mapas que caracterizam a aptidão térmica e hídrica favoráveis ao desenvolvimento das espécies estudadas para o estado do Espírito Santo. Uma vez selecionadas as espécies e definidos seus índices climáticos, foi utilizado o *software* ArcGis 10.2 / ArcMap para realizar os cruzamentos e gerar todos os mapas digitais. Os mapas de temperatura média anual e deficiência hídrica anual, por meio do módulo “*ArcToolbox - Spatial Analyst Tools - Reclass*”, foram reclassificados considerando as faixas de aptidão térmica e hídrica, conforme os índices estabelecidos para cada espécie. Finalmente, os

mapas de zoneamento agroclimático foram obtidos por meio do cruzamento dos mapas de temperatura média anual e deficiência hídrica anual, já reclassificados.

Os fluxogramas de todas as operações envolvidas no processo de manipulação e execução das diversas etapas que resultaram nos mapas finais do zoneamento agroclimático para as espécies florestais são apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente para os zoneamentos considerando o clima atual e futuro.

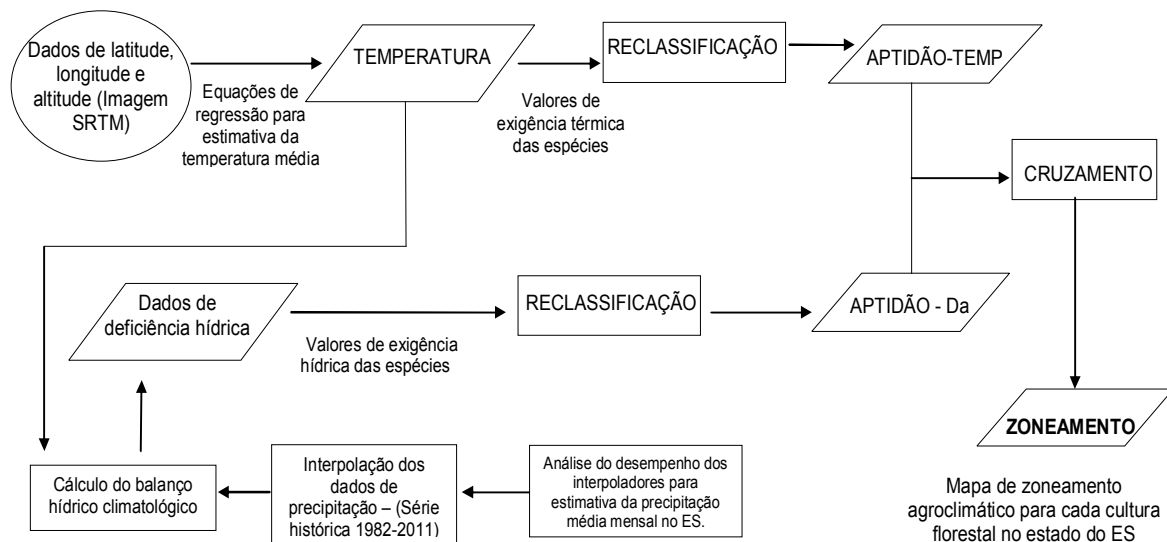


Figura 5 – Fluxograma das etapas realizadas para obtenção dos zoneamentos agroclimáticos de espécies florestais no Estado do Espírito Santo, para o clima atual.

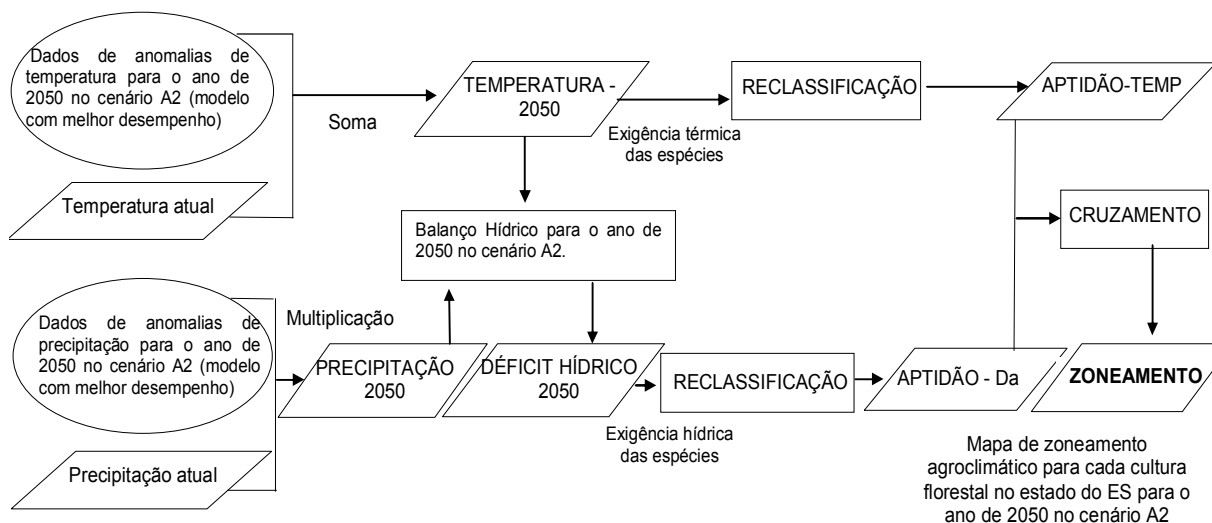


Figura 6 – Fluxograma das etapas realizadas para obtenção dos zoneamentos agroclimáticos de espécies florestais no Estado do Espírito Santo, considerando as mudanças climáticas globais para o ano de 2050, no cenário A2.

4.5 ANÁLISE DA FLUTUAÇÃO ESPACIAL DAS MUDANÇAS DE CLASSES DE APTIDÃO

Após a obtenção das saídas finais dos zoneamentos, foi realizada a álgebra com mapas, sobrepondo o mapa de aptidão agroclimática de cada espécie no Espírito Santo para o clima atual, ao mapa de aptidão agroclimática de cada espécie no Espírito Santo para 2050, a fim de gerar um novo mapa contendo as alterações das classes de aptidão ocorridas neste intervalo de tempo, mostrando as variações líquidas, com os ganhos, perdas e persistências ocorridas na área, para cada classe de aptidão agroclimática de cada espécie florestal.

Para analisar quantitativamente as mudanças ocorridas, foi aplicada a matriz de comparação pareada, segundo metodologia proposta por Pontius Jr. et al. (2004). Com base nos mapas de alteração espacial das classes de aptidão de cada espécie, obteve-se o cálculo das transições entre áreas aptas e inaptas para o clima atual e futuro. Em seguida, para confecção da matriz (Tabela 6), foram distribuídos os dados percentuais das classes da data atual na linha, e da data futura na coluna, de forma

a confrontá-las, a análise então desta comparação detectou as transições entre as classes.

Tabela 6 - Matriz de Comparação Pareada para dois mapas de aptidão agroclimática em duas condições climáticas distintas (atual e futuro), mostrando a proporção entre as combinações de mudanças de classe possíveis

Atual Futuro	Apta	Inapta	Total	Perda
Apta	P_{AA}	P_{AI}	T_{1A}	$T_{1A} - P_{AA}$
Inapta	P_{IA}	P_{II}	T_{1I}	$T_{1I} - P_{II}$
Total	T_{2A}	T_{2I}		
Ganho	$T_{2A} - P_{AA}$	$T_{2I} - P_{II}$		

PAI - proporção da área com transição da classe apta (A) para a classe inapta (I); PIA = proporção da área com transição da classe inapta (I) para a classe apta (A); PAA e PII = áreas que persistiram aptas e inaptas, respectivamente; T1 = total de área de cada classe para o clima atual; e T2 = área total de cada classe para o clima futuro. Adaptado de Pontius Jr. et al. (2004).

O “ganho” representado na linha da matriz corresponde ao total de ganhos relativos a uma dada classe entre a data atual e futura, calculado pela diferença entre o total da classe no clima futuro, e a persistência desta classe. A “perda” representada na coluna da matriz corresponde o total das perdas relativas a uma dada classe entre as datas atual e futura, calculada pela diferença entre o percentual total de área da classe no clima atual e o percentual de área da classe que persistiu.

O parâmetro “variação líquida” foi calculado, segundo a Equação 15, para medir o nível de alteração, com base no percentual de cada classe.

$$\text{Variação líquida} = \left| \%C_{j1} - \%C_{j2} \right| \quad (15)$$

em que:

$\%C_{j1}$ = Porcentagem da Classe j no zoneamento para o clima atual;

$\%C_{j2}$ = Porcentagem da Classe j no zoneamento para o clima futuro.

O parâmetro “troca” (*swap*) foi calculado segundo a Equação 16 e representa o total da área de uma classe que se perdeu em um local e foi compensado por um ganho de área desta mesma classe em outro local, e vice versa. Pontius Jr. et al. (2004) o define como o dobro da porcentagem mínima de ganho ou perda para uma dada classe.

$$S_j = 2 \cdot \min(\text{ganho}, \text{perda}) \quad (16)$$

5 RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA ATUAL DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

Os resultados descritos a seguir fazem parte das etapas necessárias para a obtenção e preparação das bases de dados de precipitação e temperatura observadas nos postos meteorológicos no estado, e que foram utilizadas para caracterização do clima atual (série histórica de 1982 a 2011).

5.1.1 Avaliação do desempenho de métodos interpoladores

Na Tabela 7 são apresentados os valores dos índices para os modelos geoestatísticos com melhor desempenho, segundo a metodologia de Camargo & Sentelhas (1997), na interpolação dos dados de precipitação média mensal e anual no Estado do Espírito Santo para o período de dados de 1982 a 2011, caracterizando a precipitação atual.

Tabela 7 - Índices estatísticos calculados para análise do desempenho dos interpoladores pelo método da krigagem para estimativa da precipitação média mensal e anual no Estado do Espírito Santo

Mês	Modelo	R ²	RMSE	d	C	Desempenho*	E'	EMA	EMP (%)
JAN	Esférico	0,80	15,90	0,94	0,84	Muito bom	0,78	11,9	7,47
FEV	Esférico	0,78	9,46	0,90	0,83	Muito bom	0,78	0,54	7,60
MAR	Esférico	0,67	17,18	0,89	0,73	Bom	0,67	13,14	8,92
ABR	Linear	0,78	11,61	0,94	0,83	Muito bom	0,79	8,54	9,75
MAI	Linear	0,69	8,45	0,90	0,75	Muito bom	0,67	5,63	11,94
JUN	Linear	0,80	5,83	0,94	0,85	Muito bom	0,80	3,74	12,28
JUL	Linear	0,85	7,27	0,96	0,89	Ótimo	0,85	4,98	14,90
AGO	Esférico	0,84	6,07	0,96	0,88	Ótimo	0,84	4,48	13,15
SET	Linear	0,77	10,93	0,93	0,82	Muito bom	0,76	7,70	12,60
OUT	Exponencial	0,69	11,33	0,90	0,75	Bom	0,69	8,80	8,42
NOV	Linear	0,56	18,57	0,85	0,64	Mediano	0,56	14,46	7,37
DEZ	Linear	0,69	22,03	0,90	0,76	Muito bom	0,70	16,69	7,52
ANUAL	Linear	0,70	114,43	0,91	0,76	Muito bom	0,70	87,79	7,04

R² = coeficiente de determinação da validação cruzada; RMSE = raiz do erro médio quadrático; d = índice de concordância; c = índice de confiança; E' = coeficiente de eficiência ajustado; EMA = erro médio absoluto; e EMP (%) = erro médio percentual.

* De acordo com Camargo & Sentelhas (1997).

O melhor desempenho com a interpolação pelo método da krigagem foi obtido para todas as precipitações mensais e a precipitação anual, sendo a maioria com o modelo linear, inclusive a precipitação do mês de junho, que obteve o menor valor da raiz do erro médio quadrático (RMSE), sendo este um dos meses mais secos do ano no estado.

Para quase todos os meses os modelos apresentaram desempenho de bom a ótimo, sendo que apenas no mês de novembro obteve-se desempenho mediano com baixo coeficiente de determinação (R^2). Pela análise do coeficiente de eficiência ajustado (E'), nota-se que as melhores performances de interpolação pelos modelos são obtidas nas estações mais secas do ano no Espírito Santo (junho a agosto), porém são também esses meses que apresentam os maiores valores de erro médio percentual (EMP).

Quanto ao índice de confiança (c), o mês de novembro teve o pior desempenho dos interpoladores, sendo o maior valor de índice de confiança entre os modelos encontrados para este mês igual a 0,64 para o modelo linear, ainda assim o classificando como mediano. Os meses de julho e agosto apresentaram os maiores valores de índice de confiança para os modelos linear e esférico, respectivamente.

A Figura 7 apresenta os mapas de precipitação mensal no Estado do Espírito Santo de acordo com a base de dados meteorológicos atual.

O período chuvoso no Estado do Espírito Santo vai de outubro a março, com maiores concentrações pluviométricas nos meses de novembro a janeiro. As regiões Sul, Serrana e Caparaó (Sudoeste) são as que apresentam os maiores valores de precipitação no período chuvoso, podendo alcançar o total mensal de 300 mm no mês de dezembro. As regiões Norte e Noroeste do estado possuem os menores valores de precipitação mesmo nos meses mais chuvosos, sendo caracterizadas ainda por um prolongamento da estação seca, perceptível no mês de setembro.

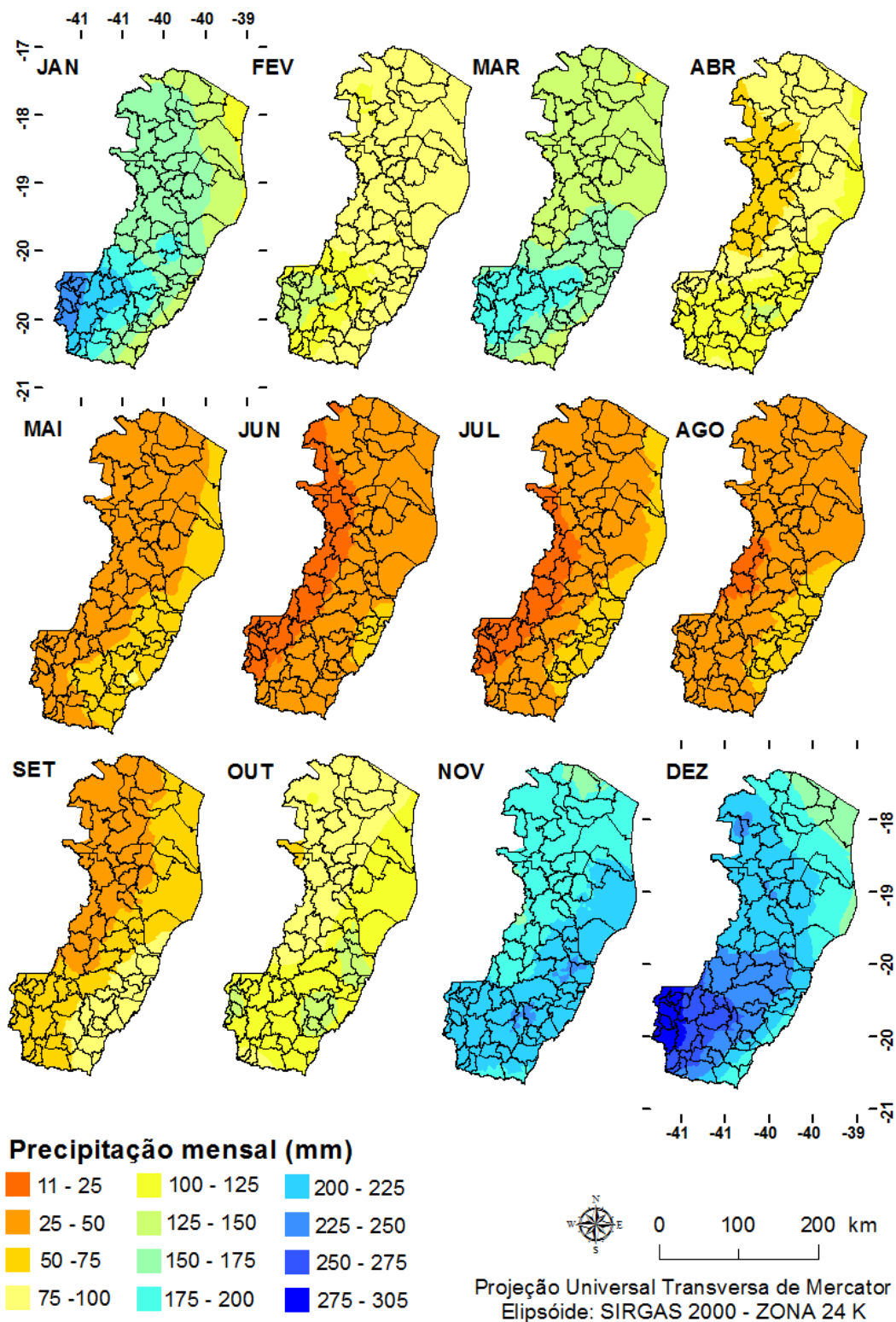


Figura 7 – Precipitação pluviométrica mensal para o período de 1982 a 2011 no Estado do Espírito Santo.

5.1.2 Espacialização da temperatura média do ar no Estado do Espírito Santo por meio de equações de regressão múltipla.

Os coeficientes de ajuste das equações de regressão para estimar a temperatura média do ar mensal e anual para o período atual, obtidos utilizando a base de dados da série histórica de 1982 a 2011 no Estado do Espírito Santo, encontram – se na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes das equações de regressão para estimativa dos valores mensais e anual de temperatura média do ar para o período atual, com seus respectivos coeficientes de determinação ajustados (R^2) para o Espírito Santo

Mês	Coeficiente (β_0)	Altitude (β_1)	Latitude (β_2)	Longitude (β_3)	R^2
JAN	-10,5297	-0,0067	ns*	-0,9406	0,93
FEV	-8,3819	-0,0070	ns*	-0,8999	0,92
MAR	-2,8703	-0,0068	0,4808	-0,9838	0,96
ABR	-2,3324	-0,0069	0,5545	-0,9729	0,95
MAI	24,4258	-0,0071	ns*	ns*	0,93
JUN	23,0662	-0,0074	ns*	ns*	0,92
JUL	22,6625	-0,0074	ns*	ns*	0,92
AGO	-26,1291	-0,0077	0,5904	-1,5007	0,95
SET	-29,9572	-0,0071	0,7029	-1,6677	0,95
OUT	-32,1183	-0,0068	0,8049	-1,8045	0,95
NOV	-21,9893	-0,0065	0,6559	-1,4980	0,96
DEZ	-11,3545	-0,0064	0,4716	-1,1688	0,96
ANUAL	-13,5899	-0,0070	0,5613	-1,2324	0,96

* Não significativo em nível de 5% de probabilidade pelo teste “t” de Student ($p < 0,05$).

Os valores do coeficiente de determinação (R^2) apresentam pequena variação entre os meses do ano, permitindo verificar o nível de ajuste dos dados à equação obtida. O maior valor de R^2 é de 0,97 para o mês de março, enquanto que o menor R^2 encontrado é de 0,92 para os meses de junho e julho e 0,96 para os meses de novembro, dezembro e temperatura média anual.

Nas equações de temperatura média para o período atual, a longitude não é significativa para os meses de maio a julho, assim como para a variável latitude, em que além desses meses, também não apresentou interação significativa para os meses de janeiro e fevereiro.

As temperaturas médias mensais estimadas pelas equações desenvolvidas por meio de análises de regressão linear, para o período atual, utilizando como dados de referência a série climática de 1982 a 2011, são apresentadas na Figura 8.

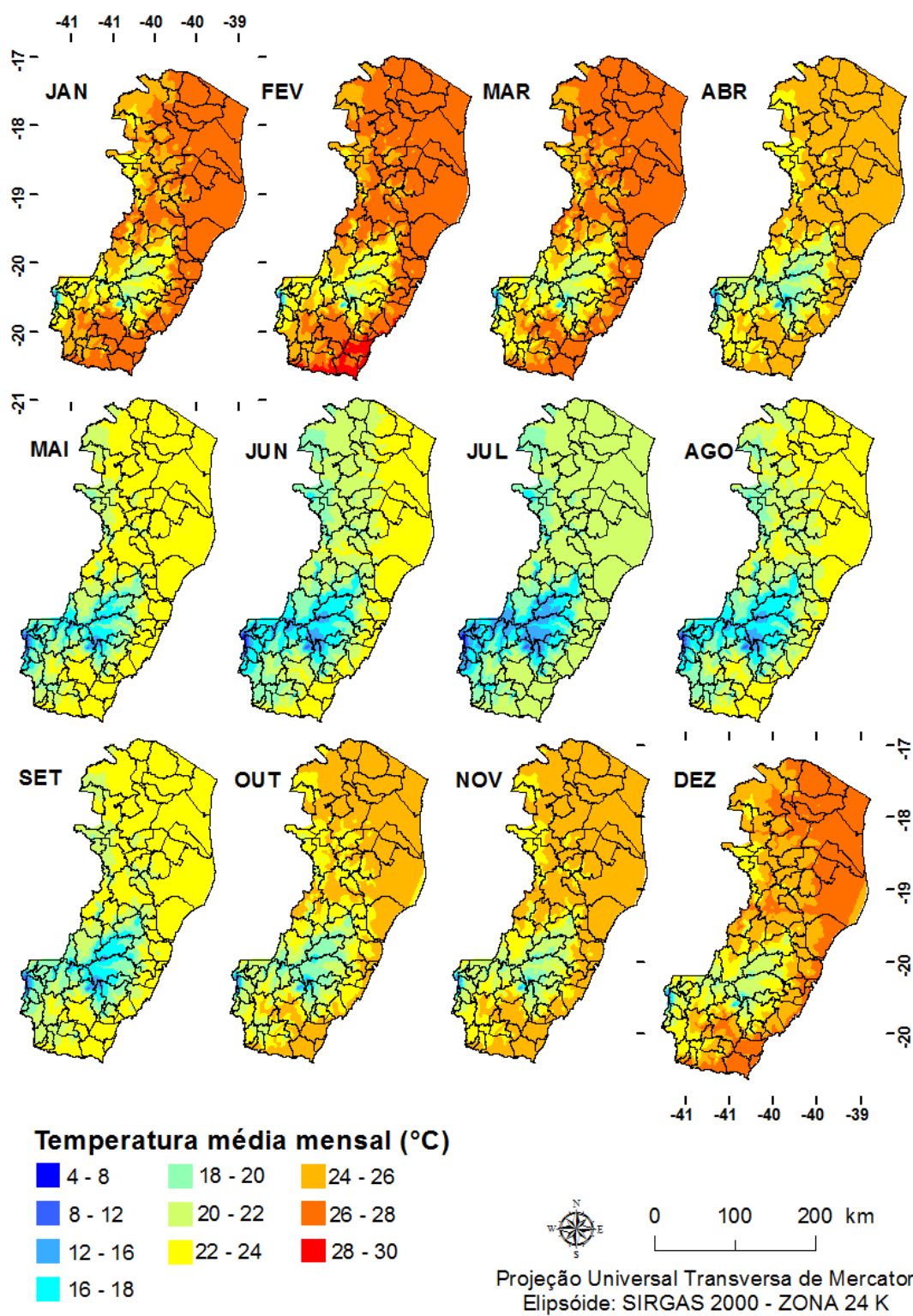


Figura 8 - Temperatura média mensal do ar para o estado do Espírito Santo, estimada por meio de equações de regressão.

A maior parte do estado apresenta temperaturas anuais entre 20 a 28°C, sendo que o período mais quente se concentra nos meses de dezembro a março (verão), quando as maiores temperaturas são registradas nas regiões Litorânea e Norte. Nas regiões Serrana e Caparaó, mesmo no verão, a temperatura média não ultrapassa 24°C, nessas regiões e a temperatura média do ar chega a 8 °C em áreas montanhosas nos meses mais frios do ano (maio a agosto), sendo influenciada pela altitude utilizada como variável independente nas equações de regressão.

5.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS (MCG'S) DO IPCC AR4 EM SIMULAR O CLIMA DO ESPÍRITO SANTO

Os valores dos índices estatísticos obtidos para os dados de precipitação anual simulados pelos MCG's e *Multimodels*, confrontados com os dados observados de precipitação nas estações meteorológicas no estado para a série climática do século XX (1971 – 1999), encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Índices estatísticos da precipitação média anual dos modelos globais do IPCC AR4 em relação aos dados climatológicos observados no estado do Espírito Santo para o período de 1971 a 1999: coeficiente de correlação (R), média dos valores de precipitação simulados pelo modelo global (mm), viés (Bias), erro médio quadrático (RMSE) e erro médio absoluto (MAE)

Modelo	R	Precipitação (mm)	Bias	% Bias	RMSE	MAE
HadCM3	0,49	1150,5	-58,1	-0,05	91,37	62,20
HadGEM1	0,51	1651,3	442,7	0,37	116,39	77,22
CGCM3 T47	0,36	945,6	-262,9	-0,22	87,82	59,98
CSIRO-MK3.0	0,38	1005,0	-203,6	-0,17	100,67	67,64
ECHAM5-OM	0,47	998,9	-209,7	-0,17	81,82	58,36
ECHO-G	0,62	1371,4	162,7	0,13	76,29	53,97
GF-CM2.0	0,42	866,7	-341,9	-0,28	105,52	74,02
GF-CM2.1	0,27	780,8	-427,8	-0,35	95,24	67,57
GISS E-R	0,59	1165,0	-43,6	-0,04	66,76	46,35
INM-CM3.0	0,26	437,5	-771,2	-0,64	102,75	72,26
MIROC3.2 medres	0,42	877,7	-330,9	-0,27	85,97	59,84
MRI -CGCM2.3.2	0,48	1144,2	-64,5	-0,05	82,53	56,13
NCAR-PCM	0,35	830,8	-377,8	-0,31	89,35	62,81
NCAR -CCSM3	0,44	636,3	-572,3	-0,47	87,88	60,95
BCM2.0	0,54	1788	579,3	0,48	108,64	76,75
CNRM-CM3	0,48	1763,9	555,3	0,46	99,41	74,65
IPSL-CM4	0,27	466,9	-741,8	-0,61	105,43	76,36
Multimodel	0,64	1011,4	-197,2	-0,16	64,70	43,87
Multimodel*	0,64	1111,4	-97,2	-0,08	64,60	45,31

* GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI -CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres.

Considerando os dados observados do século XX, a média de precipitação anual no estado do Espírito Santo foi de 1208,6 mm, e o modelo que apresentou resultado mais próximo a este foi o GISS E-R, com 1165 mm anuais.

Na escolha do MCG com melhor desempenho em simular o clima do século XX no Espírito Santo, levou-se em consideração o baixo valor de bias entre os dados observados e simulados, e o menor valor da raiz do erro médio quadrático (RMSE).

Para a variável climática precipitação, alguns modelos do IPCC superestimam os resultados (bias positivos), enquanto outros subestimam (bias negativos). O modelo INM-CM3.0 é o que apresentou maior bias de precipitação para o Espírito Santo, com -771,2 mm anuais, tendendo a um viés seco. Os modelos com viés úmido superestimaram a precipitação anual no estado em cerca de 500 mm, com exceção do modelo ECHO-G que estima 162,7 mm a mais de precipitação anual.

As duas rodadas do *Multimodel ensemble* para precipitação apresentaram melhores desempenho em simular a precipitação anual no estado em comparação com qualquer modelo isolado, pois apresentaram o menor valor de RMSE, melhor coeficiente de correlação e menor Erro Médio Absoluto (MAE). No entanto, o Multimodel realizado somente entre os cinco modelos que apresentaram melhores desempenhos estatísticos (GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI -CGCM2.3.2, MIROC3.2 medres) foi o selecionado para simulação dos efeitos das mudanças climáticas globais sob a variável climática precipitação, no estado do Espírito Santo, pois apresentou 100 mm a menos de bias em relação ao Multimodel contendo todos os MCG's.

Quanto à correlação entre os dados, para precipitação todos os modelos apresentam baixo valor do coeficiente (Figura 9), sendo que apenas o modelo ECHO-G e as duas rodadas do Multimodel estiveram em mais de 60% correlacionadas com os dados observados de precipitação no estado do Espírito Santo.

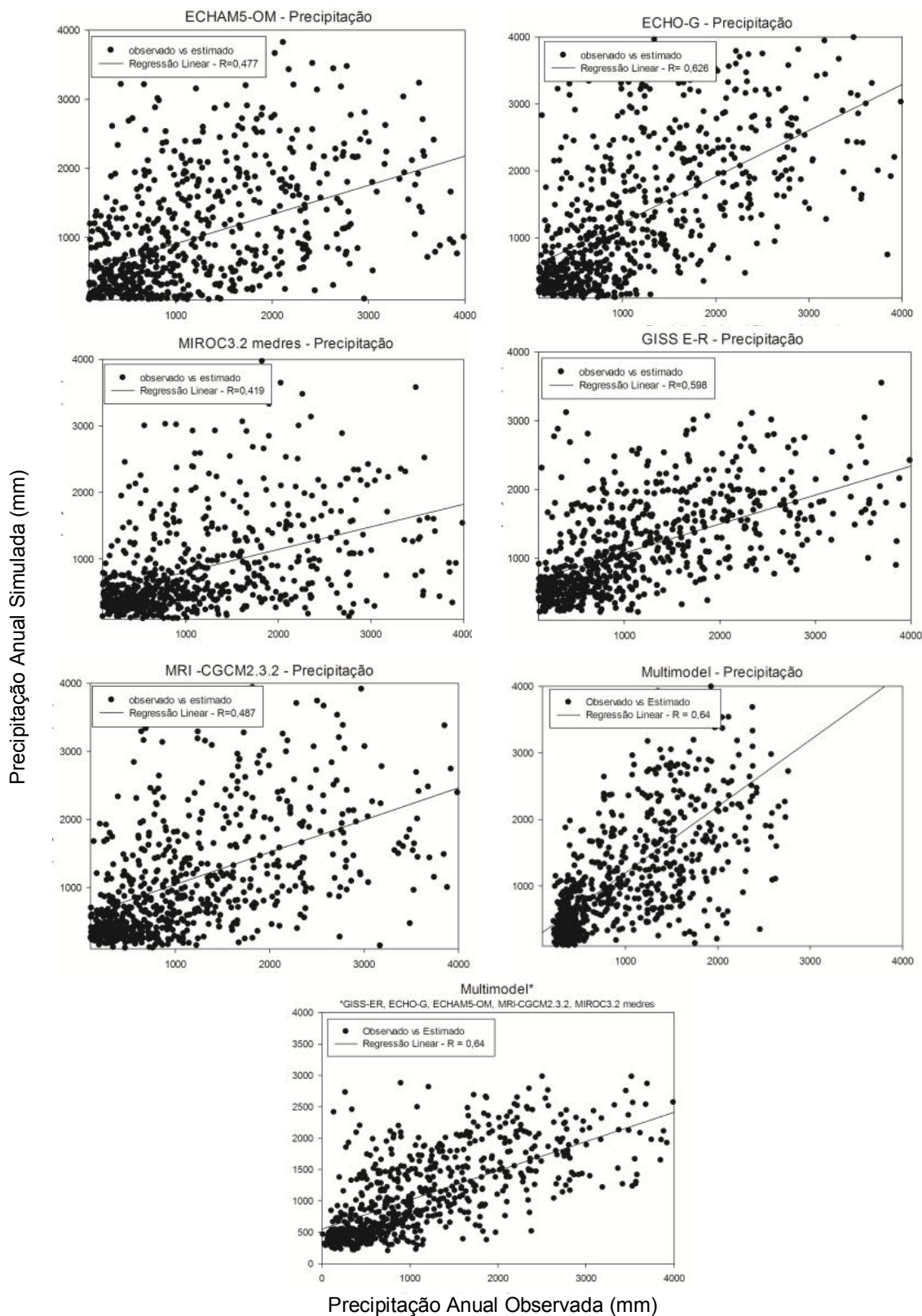


Figura 9 – Dispersão dos pares de dados de precipitação média anual observada e simulada pelos cinco modelos do IPCC AR4 com melhores desempenhos e Multimodel no estado do Espírito Santo.

Na Tabela 10, são apresentados os índices estatísticos dos dados de temperatura média do ar simulados pelos modelos de circulação geral atmosférica e pelo *Multimodel ensemble*, comparados com os dados de temperatura média do ar, observados nas estações meteorológicas do estado no período compreendido entre os anos de 1977 a 1999.

Tabela 10 - Índices estatísticos mensais da temperatura média do ar dos modelos globais do IPCC AR4 em relação aos dados climatológicos observados no estado do Espírito Santo para o período de 1977 a 1999: coeficiente de correlação (R), média dos valores simulados pelo modelo global, viés (Bias), erro médio quadrático (RMSE) e erro médio absoluto (MAE)

Modelo	R	Média – MCG (°C)	Bias	%Bias	RMSE	MAE
HadCM3	0,56	22,0	-1,7	-0,07	2,77	2,27
HadGEM1	0,76	21,2	-2,5	-0,10	2,96	2,56
CGCM3 T47	0,72	22,7	-1,1	-0,04	2,44	2,03
CSIRO-MK3.0	0,79	22,8	-0,9	-0,04	1,71	1,39
ECHAM5-OM	0,67	22,9	-0,8	-0,03	1,93	1,58
ECHO-G	0,67	22,3	-1,4	-0,06	2,19	1,81
GF-CM2.0	0,51	22,0	-1,8	-0,07	2,76	2,18
GF-CM2.1	0,70	21,1	-2,6	-0,11	3,27	2,75
GISS E-R	0,85	21,3	-2,5	-0,10	2,76	2,51
INM-CM3.0	0,82	20,6	-3,2	-0,13	3,55	3,20
MIROC3.2 medres	0,78	21,1	-2,7	-0,11	3,05	2,70
MRI -CGCM2.3.2	0,80	23,2	-0,5	-0,02	1,46	1,19
NCAR-PCM	0,81	21,4	-2,4	-0,09	3,01	2,49
NCAR -CCSM3	0,77	22,6	-1,1	-0,04	1,89	1,49
BCM2.0	0,84	21,1	-2,7	-0,11	2,97	2,72
CNRM-CM3	0,76	19,8	-3,9	-0,16	4,22	3,96
IPSL-CM4	0,74	22,8	-0,9	-0,04	2,07	1,63
Multimodel	0,81	21,8	-1,9	-0,99	2,31	1,98
Multimodel 2*	0,82	22,9	-0,9	-0,99	1,57	1,25

* MRICGCM2.3.2, CSIRO-MK3.0, NCAR -CCSM3, ECHAM5-OM e IPSL-CM4.

A média dos valores de temperatura média anual para todo o estado, considerando todas as estações da série de dados observados, é 23,8 °C, o MCG que mais se aproxima deste valor é o MRI -CGCM2.3.2, com uma média de 23,2 °C, sendo que este modelo subestima a temperatura média do ar no Espírito Santo em apenas - 0,5°C. O MRI-CGCM2.3.2 possui ainda o menor valor de raiz do erro médio quadrático (RMSE) e menor erro médio absoluto (MAE), baixo de valor de viés e boa correlação com os dados observados (0,80). Sendo assim, esse é o modelo que apresentou melhor desempenho em simular a temperatura do ar no estado, sendo escolhido para ser utilizado nas próximas etapas do trabalho.

A segunda rodada do Multimodel, na qual se considerou os cinco modelos com melhor desempenho (menores RMSE), também apresentou bom desempenho estatístico em simular a temperatura no Espírito Santo, sendo superada apenas pelo MRI-CGCM2.3.2 . Nota-se que houve relevante ganho estatístico em utilizar o Multimodel contendo a média dos cinco melhores modelos, em relação à utilização do Multimodel entre todos os MCG's.

Para o estado do Espírito Santo, todos os MCG's, assim como as duas rodadas do Multimodel, apresentam viés (Bias) negativo em relação aos dados observados, ou seja, subestimam os valores de temperatura média do ar, sendo que o modelo CNRM-CM3 é o que apresentou maior valor absoluto de bias ($- 3,9^{\circ}\text{C}$), entre os modelos avaliados.

Os gráficos de dispersão entre os pares de dados de temperatura observados e simulados dos cinco MCG's com melhores desempenhos e as duas rodadas do Multimodel encontram-se na Figura 10.

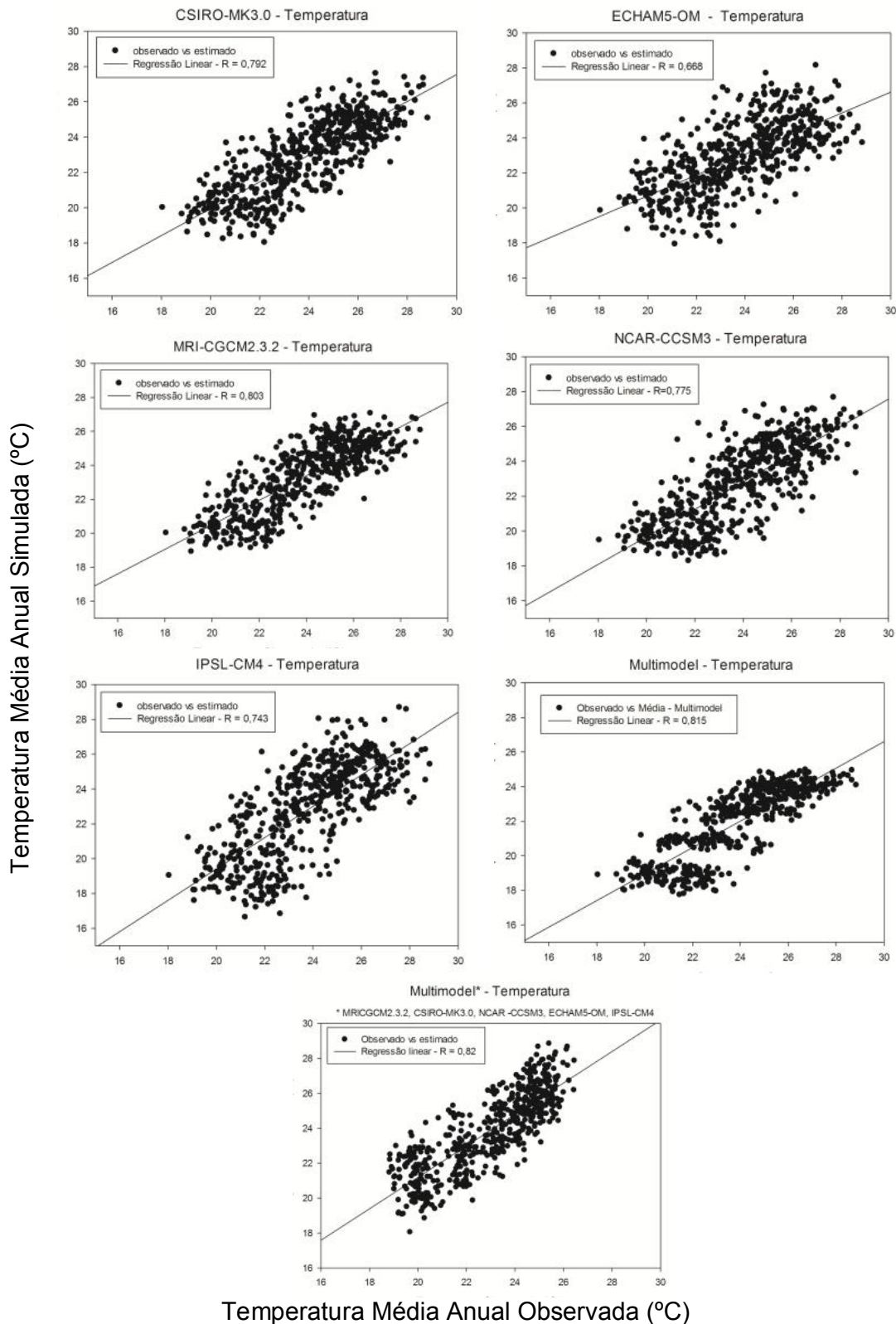


Figura 10 – Dispersão dos pares de dados de temperatura média do ar observada e simulada pelos cinco modelos do IPCC AR4 com melhor desempenho e Multimodel no estado do Espírito Santo.

As maiores correlações encontradas são as dos modelos GISS E-R e BCM2.0, porém estes modelos não apresentaram desempenho mais satisfatório do que os demais, ao considerar os erros estatísticos (bias, raiz do erro médio quadrático e erro médio absoluto), subestimando a temperatura do ar no estado em $-2,5^{\circ}\text{C}$ e $-2,7^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

5.3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

As anomalias mensais de precipitação no estado do Espírito Santo obtidas pelo Multimodel entre os modelos GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI-CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres para o ano de 2050 no cenário A2 (pessimista) encontram-se na Figura 11. Estas anomalias representam as alterações ocorridas com os valores da precipitação pluviométrica mensal, entre o período dos dados de referência do século XX (1971 – 1999) e o ano de 2050.

Na maior parte do ano, as anomalias de precipitação são negativas, indicando redução na precipitação mensal que atinge até a -36 mm em parte das regiões Sul e litorânea do estado para o mês de setembro. Nos meses de novembro e dezembro é possível verificar que as maiores reduções na precipitação localizam-se nas regiões Norte e Noroeste.

O mês de fevereiro foi o único a apresentar anomalia de precipitação positiva em todo o território do Espírito Santo, mostrando uma possível alteração na distribuição das chuvas em relação a Janeiro, quando o decréscimo da precipitação mensal chega a ser de -12 mm na maior parte do estado.

Com base nessas anomalias, os mapas das precipitações mensais no Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2 são apresentados na Figura 12.

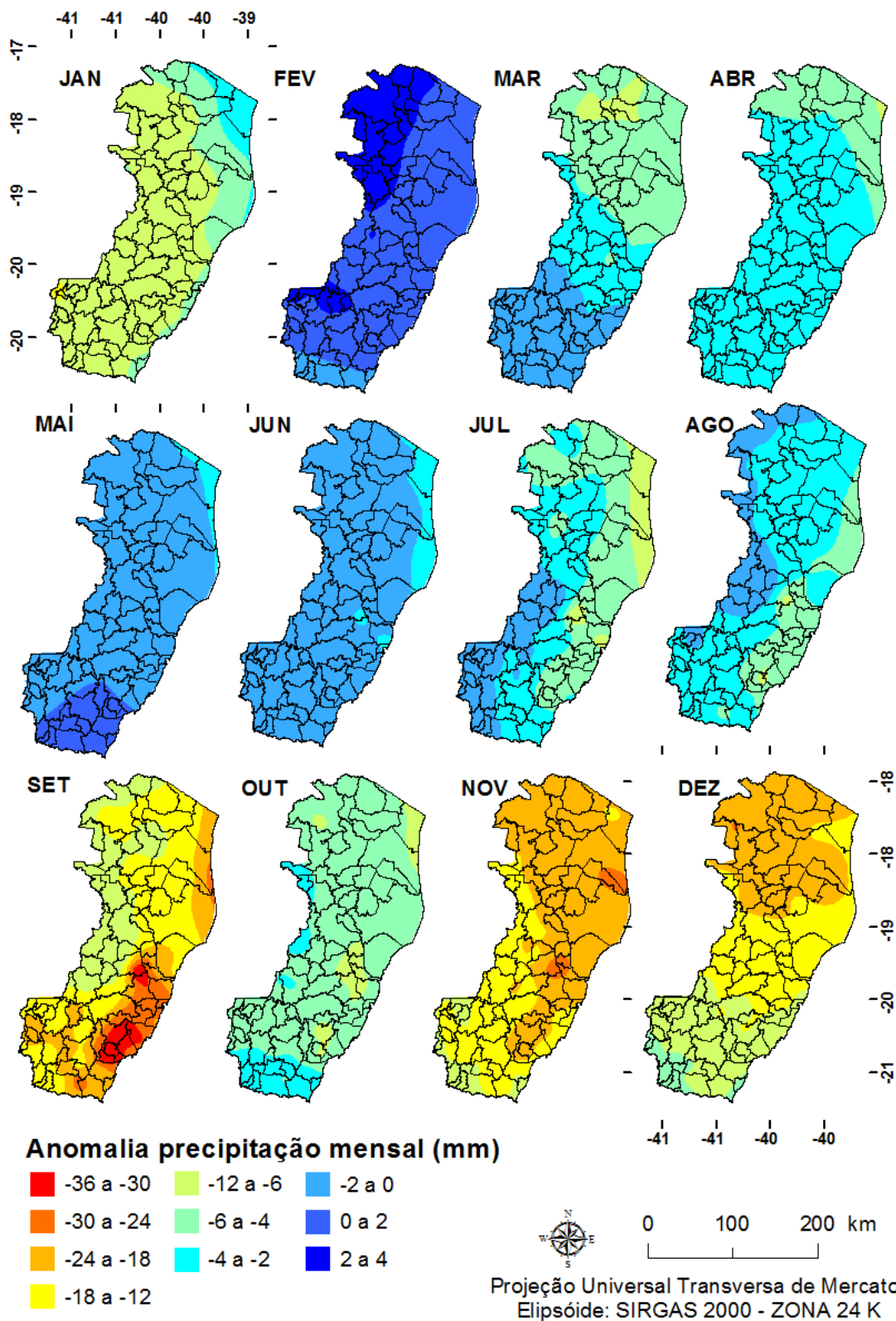


Figura 11 – Mapas das anomalias de precipitação mensal no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o Multimodel, entre os modelos GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI -CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres.

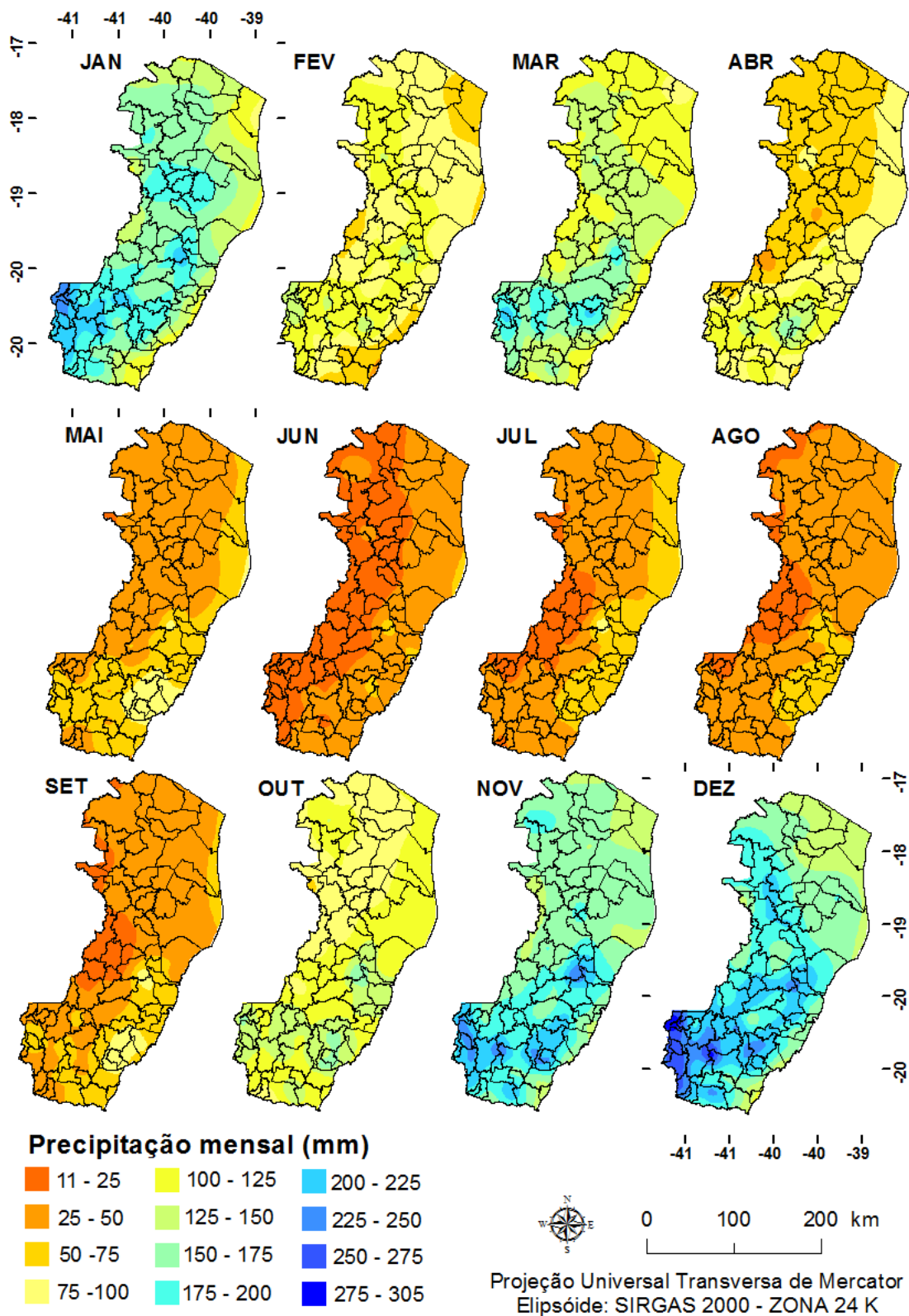


Figura 12 – Precipitação mensal no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o Multimodel, entre os modelos GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI-CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres.

O período chuvoso no estado permanece entre os meses de outubro a março, porém nota-se a redução nos valores da precipitação mensal. Onde atualmente a maior parte do território possui índices pluviométricos mensais acima de 200 mm (Figura 7), a simulação para o ano de 2050 nos meses de novembro e dezembro mostra que grande parte da região Norte e Noroeste não apresentarão mais que 150 mm mensais de chuva (Figura 12) segundo o Multimodel aplicado, sendo que os valores de precipitação mensal acima de 250 mm permanecerão apenas em alguns pontos da região do Caparaó.

A Figura 13 representa a anomalia da precipitação média anual no estado do Espírito Santo para o ano de 2050, segundo o Multimodel, em relação ao século XX (1971-1999).

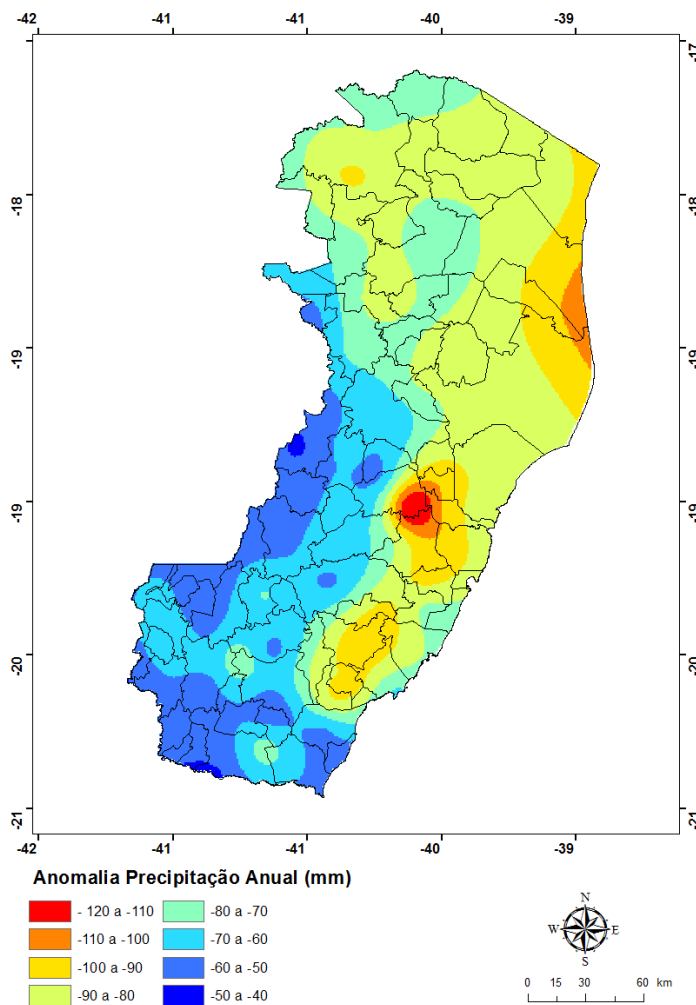


Figura 13 - Anomalia da precipitação média anual no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o Multimodel, entre os modelos GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI -CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres.

De acordo com os dados simulados pelo Multimodel selecionado, a precipitação pluviométrica no Espírito Santo sofrerá decréscimos entre 40 a 120 mm anuais. As regiões Norte e Central do estado serão as mais afetadas, apresentando em sua maior parte, reduções na precipitação anual acima de 70 mm, sendo que alguns pontos no litoral norte e no centro do estado apresentarão anomalias com decréscimos acima de 100 mm no valor da precipitação anual.

Essas anomalias para 2050 acopladas a precipitação do século XX geram os valores absolutos de precipitação média anual para 2050 visualizados na Figura 14, onde é possível comparar as alterações na distribuição e no valor da precipitação anual no Espírito Santo em relação à precipitação média anual para o período atual (1982-2011).

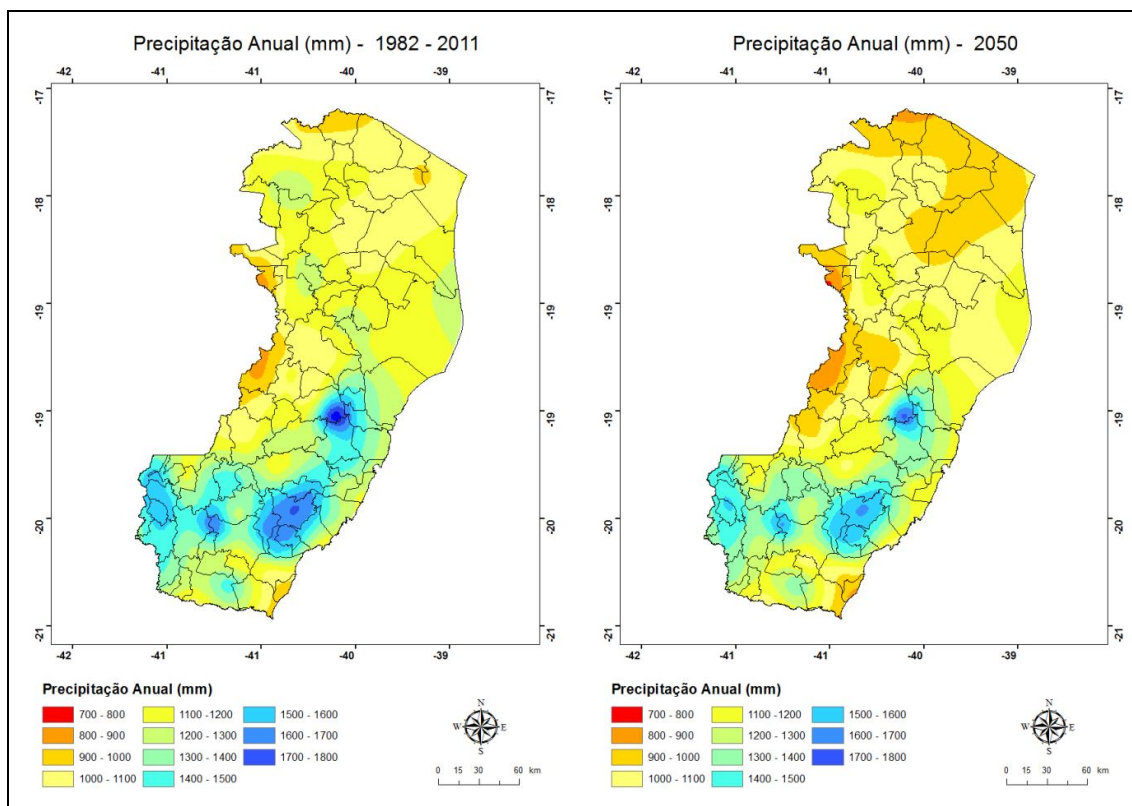


Figura 14 – Precipitação anual no estado do Espírito Santo no período atual e no ano de 2050 no cenário A2, segundo o Multimodel, entre os modelos GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI -CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres.

De acordo com os dados da série histórica 1982-2011, a maior parte do estado do Espírito Santo possui precipitação anual entre 1000 e 1300 mm, com exceção de uma parte da região Central e das regiões Serrana e Caparaó que possuem

manchas com valores acima de 1700 mm anuais. Em 2050, haverá redução dos locais mais úmidos e as manchas de maiores precipitações não ultrapassarão os 1600 mm anuais.

Grande parte da região Norte do estado sofrerá redução dos 1000 a 1100 mm anuais registrados atualmente, para 900 a 1000 mm em 2050 no cenário A2, além disso, pontos no extremo Norte e Noroeste do Espírito Santo passarão a apresentar no máximo 900 mm de precipitação anual, segundo o Multimodel utilizado.

As anomalias e valores de temperatura média do ar mensal no Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o modelo MRI -CGCM2.3.2, encontram-se nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

Em todos os meses do ano, o modelo MRI-CGCM2.3.2 prevê aumento nos valores de temperatura média do ar no estado do Espírito Santo. As maiores anomalias são verificadas no mês de julho, em que a maior parte do estado tende a apresentar um acréscimo de 1,8 a 2,1 °C, e no mês de setembro, em que apenas a região Norte apresenta aumento máximo de 1,5°C na temperatura média do ar.

Conforme o simulado pelo modelo, em 2050, nos meses de novembro a abril a maior parte do estado apresentará temperatura média mensal acima de 26°C, sendo que no mês de fevereiro, todo o litoral e parte das regiões Sul e Norte tendem a apresentar temperatura média mensal entre 28°C a 30°C.

As áreas da região Serrana que atualmente apresentam no inverno (julho a setembro), valores de temperatura média mensal abaixo de 18 °C tendem a diminuir, chegando a quase desaparecer neste último mês, passando então a apresentar nesses locais temperaturas médias entre 18°C e 20°C na época mais fria do ano.

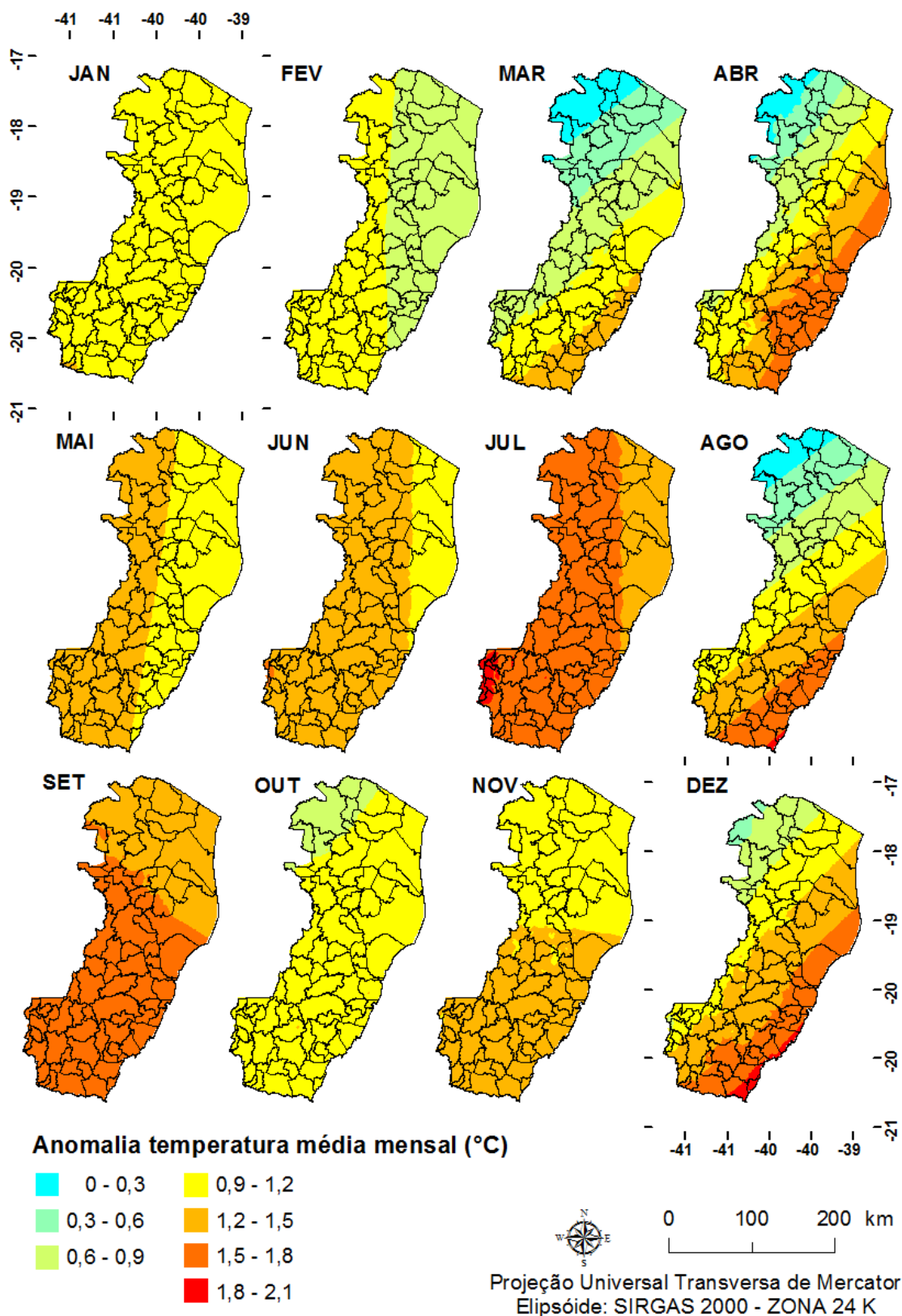


Figura 15 - Mapas das anomalias de temperatura média mensal no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2 segundo o modelo MRI - CGCM2.3.2.

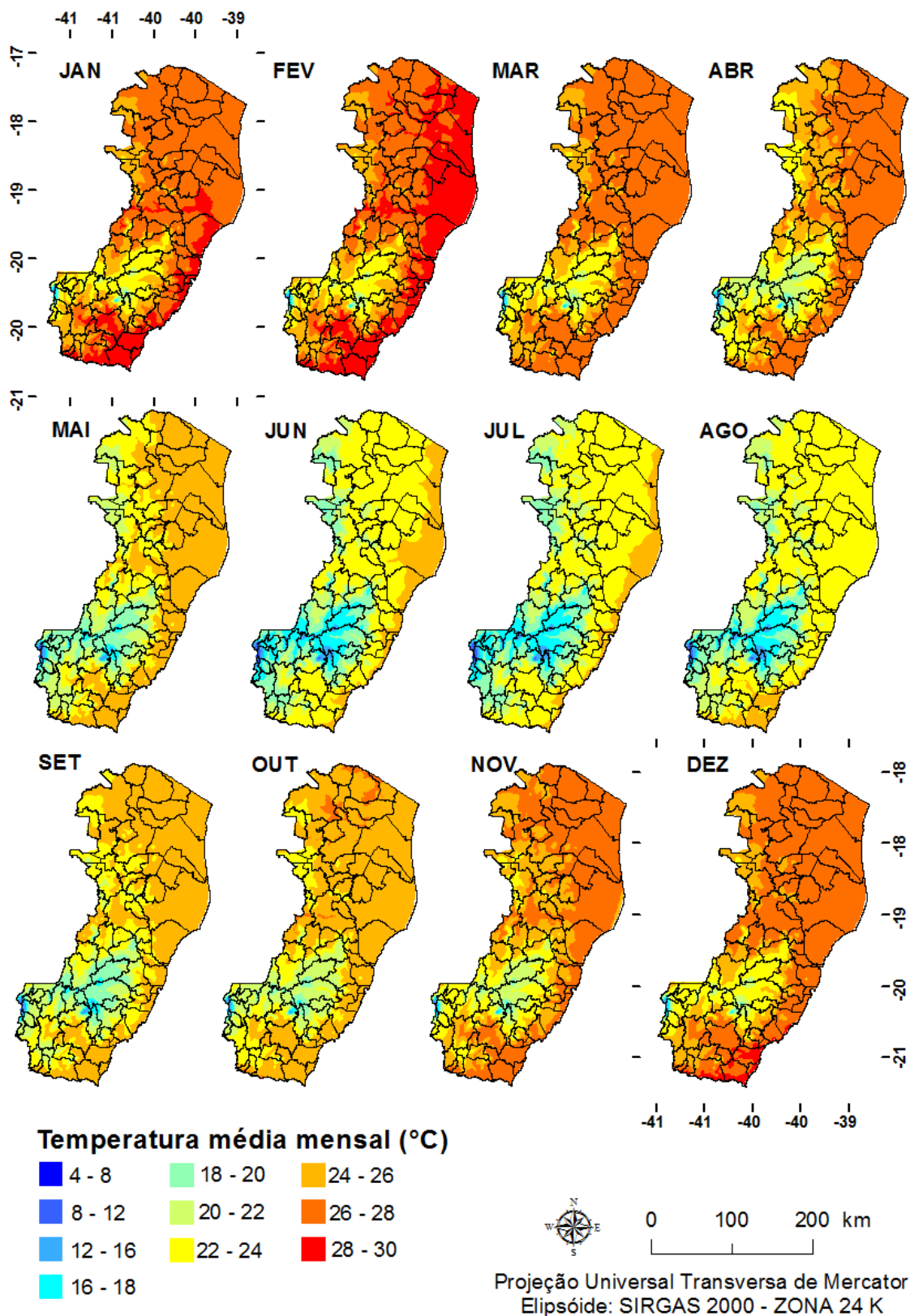


Figura 16 – Temperatura média mensal no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2 segundo o modelo MRI -CGCM2.3.2.

A Figura 17 apresenta a anomalia da temperatura média anual no estado do Espírito Santo, segundo o modelo MRI-CGCM2.3.2, para o ano de 2050 em relação ao século XX (1977-1999).

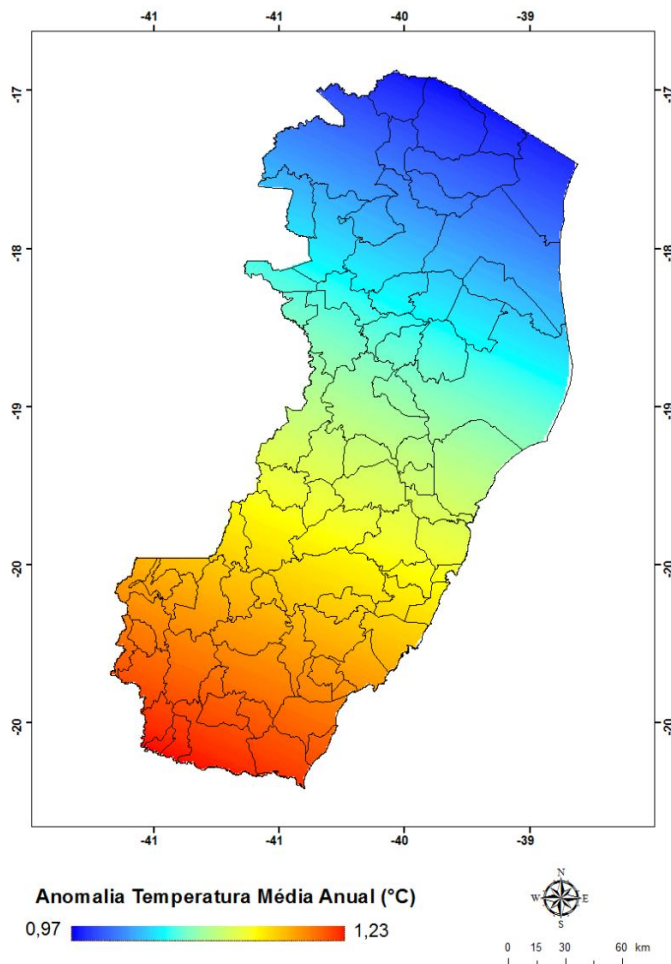


Figura 17 – Anomalia da temperatura média anual no estado do Espírito Santo para o ano de 2050 no cenário A2, segundo o modelo MRI-CGCM2.3.2.

O aumento da temperatura média anual no estado até o ano de 2050, segundo a previsão do modelo climático, tende a ficar entre 0,9°C a 1,2 °C. As faixas de anomalias do modelo no estado demonstram que os maiores acréscimos ficarão na região Sul, sendo os aumentos de temperatura amenizados à medida que se chega até a região Norte do Espírito Santo.

As alterações ocasionadas por essas anomalias de temperatura média anual podem ser visualizadas na Figura 18.

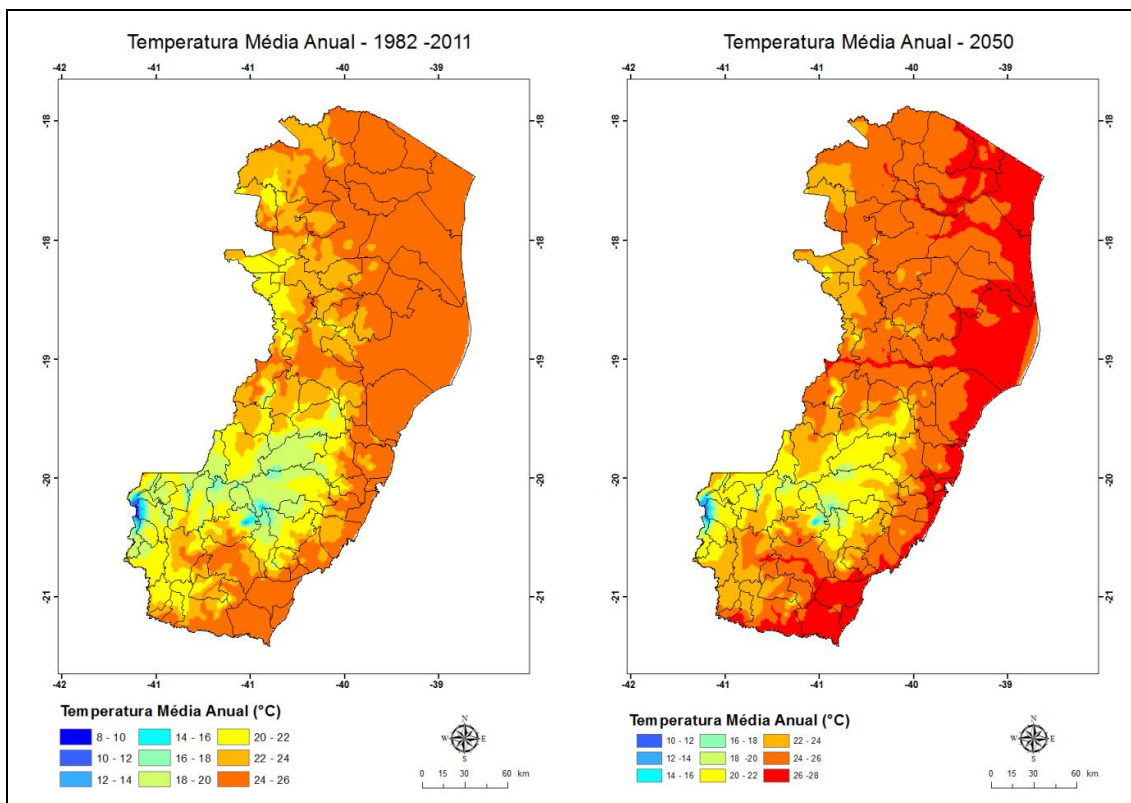


Figura 18 – Temperatura média anual no estado do Espírito Santo no período atual e no ano de 2050 no cenário A2 segundo o modelo MRI-CGCM2.3.2.

Conforme o previsto pelo modelo, no ano de 2050, percebe-se o surgimento de uma grande faixa ao longo da região litorânea, no Norte e vale do rio Doce, com temperatura média anual acima de 26°C, valor máximo registrado hoje para o estado do Espírito Santo.

As regiões de temperaturas mais amenas no estado (Serrana e Caparaó), que no clima atual em sua maior parte apresenta temperatura média anual entre 18°C e 20°C poderão alcançar em 2050 valores de até 22°C no máximo, restando apenas alguns pontos isolados na região com temperatura média anual inferior a 16°C.

Com a previsão dos modelos climáticos selecionados de aumento da temperatura média do ar e diminuição da precipitação, os resultados do cálculo do balanço hídrico climatológico normal, considerando valores de CAD de 90 mm, 210 mm e 300 mm de acordo com cada classe de solos para o estado, apontam para uma intensificação do déficit hídrico anual no estado do Espírito Santo (Figura 19).

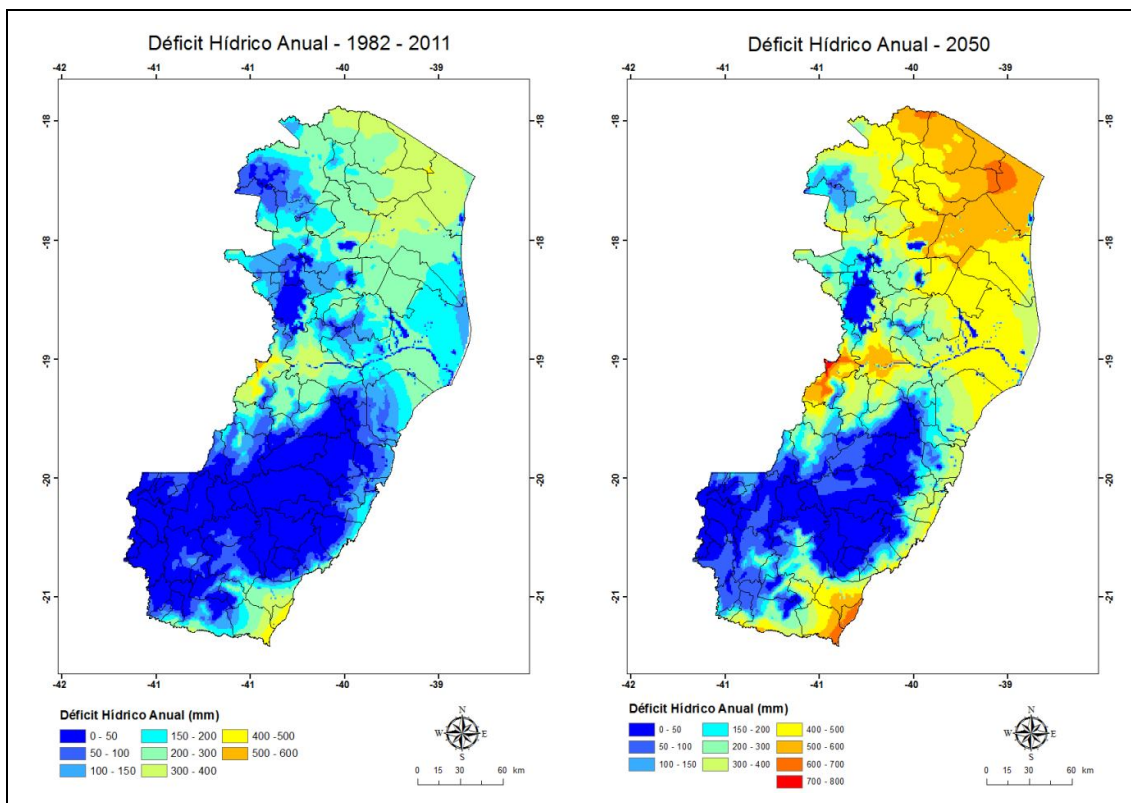


Figura 19 – Déficit Hídrico anual no estado do Espírito Santo no período atual e no ano de 2050 no cenário A2.

Atualmente, os locais de maior déficit hídrico no estado do Espírito Santo estão localizados na região Noroeste, na bacia do rio Doce com um máximo de 600 mm de déficit anuais e na região Norte com déficits variando entre 200 mm até 400 mm ao longo do ano. Com as mudanças climáticas previstas para 2050, a deficiência hídrica anual no estado tende a aumentar em todas as regiões, atingindo déficits acima de 600 mm e de até 800 mm anuais.

As regiões Serrana e Caparaó serão os únicos locais no Espírito Santo a sofrer menor impacto na deficiência hídrica anual com as mudanças climáticas globais, mantendo em sua maior parte déficits hídricos abaixo de 50 mm anuais.

5.4 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ZONEAMENTO DAS ESPÉCIES FLORESTAIS

A Tabela 11 apresenta as alterações em área apta ao cultivo das espécies florestais no Espírito Santo, segundo dados dos modelos do IPCC para 2050, em relação ao clima atual considerando o cenário pessimista (A2) de mudanças climáticas globais segundo os modelos selecionados.

Tabela 11- Áreas aptas ao cultivo de espécies florestais no estado do Espírito Santo para as condições climáticas atuais e segundo dados dos modelos do IPCC para 2050 no cenário A2

Espécies florestais	Clima atual		Cenário futuro		Alteração	
	(1982-2011)		2050 (A2)			
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
<i>Tectona grandis</i>	7.470,8	16,21	6.508,8	14,12	-961,9	-2,1
<i>Bactris gasipaes</i>	39.424,3	85,56	23.650,3	51,33	-15.774	-34,2
<i>Azadirachta indica</i>	19.923,1	43,24	12.258	26,6	7.665,1	-16,6
<i>Toona ciliata</i>	40.565,5	88,04	26.374,4	57,24	-14.191	-30,8
<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	13.743	29,83	8.384,7	18,20	-5.358,3	-11,6
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	23.000,4	49,92	13.396,7	29,07	-9.603,7	-20,8
<i>Pinus oocarpa</i>	12.239,7	26,56	6.641,3	14,41	-5.598,5	-12,1
<i>Pinus taeda</i>	4.893,8	10,62	1.224,7	2,66	-3.669	-7,9

Com o impacto das mudanças climáticas globais, todas as oito espécies florestais com aptidão agroclimática avaliada no estado do Espírito Santo sofrerão redução de área apta ao seu cultivo. A *Tectona grandis* (Teca) é a espécie que tende a experimentar menor impacto nas condições climáticas exigidas para o seu pleno desenvolvimento, com redução de 2,1% de sua área apta, segundo as previsões de mudanças nos padrões térmicos e hídricos empregados.

Nas condições climáticas atuais, as espécies *Bactris gasipaes* (Pupunha) e *Toona ciliata* (Cedro) são as que apresentam maior percentual de área apta ao seu cultivo no estado do Espírito Santo, porém essas espécies também são as que mais sofrerão alteração de aptidão agroclimática até 2050, com redução de área apta de 34,23% e 30,8%, respectivamente.

Entre as espécies do gênero *Pinus* avaliadas, a *Pinus caribaea var hondurensis* é a que mais perderá áreas aptas (-20,8%), no entanto, devido a sua capacidade de se desenvolver em temperaturas mais altas em relação aos demais pinus, esta permanece sendo a espécie desse gênero com maior aptidão de cultivo no estado do Espírito Santo.

5.4.1 *Tectona grandis*

Os mapas contendo os zoneamentos agroclimáticos da espécie *Tectona grandis* (Teca), segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para 2050 no cenário A2 do IPCC pelos modelos selecionados, encontram-se na Figura 20.

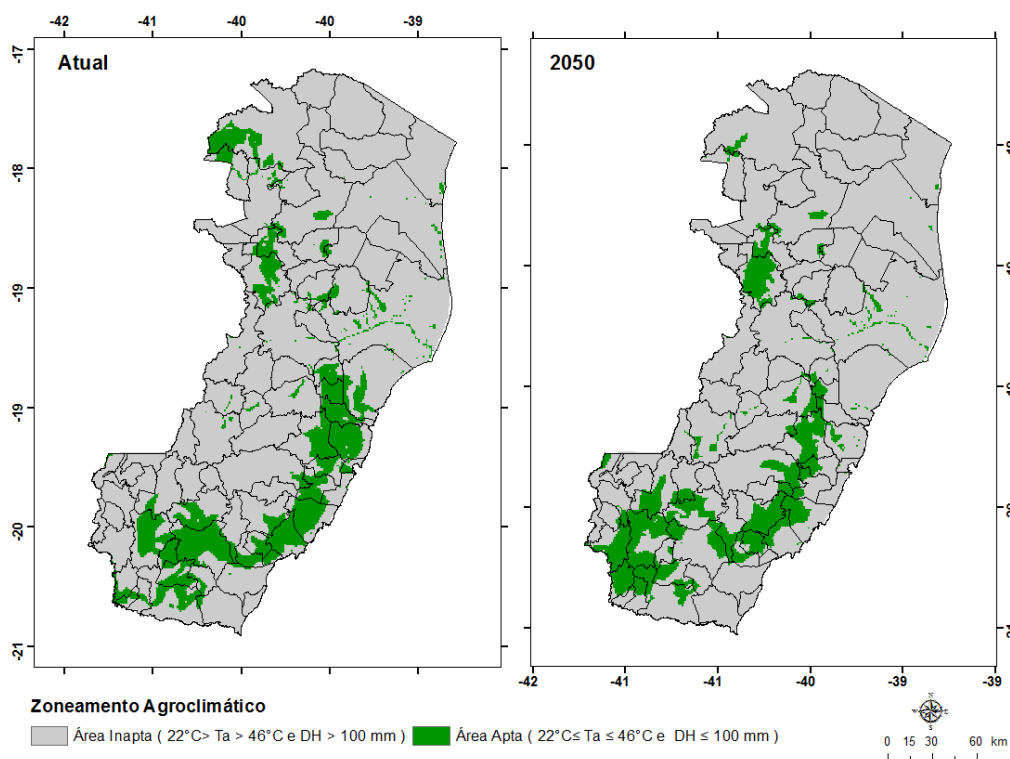


Figura 20 – Zoneamento agroclimático da espécie *Tectona grandis* no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2 do IPCC.

As áreas aptas ao cultivo de Teca no estado, tanto no clima atual quanto em 2050, ocorrem principalmente em uma faixa que vai da parte central ao Sul do estado, com algumas manchas de aptidão favorável ao seu cultivo na porção mais continental da região Norte, concentrando-se assim nos pontos de deficiência hídrica abaixo de 100 mm anuais no Espírito Santo, e evitando as áreas com temperatura média anual inferior a 22°C, como na região Serrana.

A flutuação espacial das classes de aptidão da Teca, com as mudanças climáticas globais previstas para 2050 é apresentada na Figura 21.

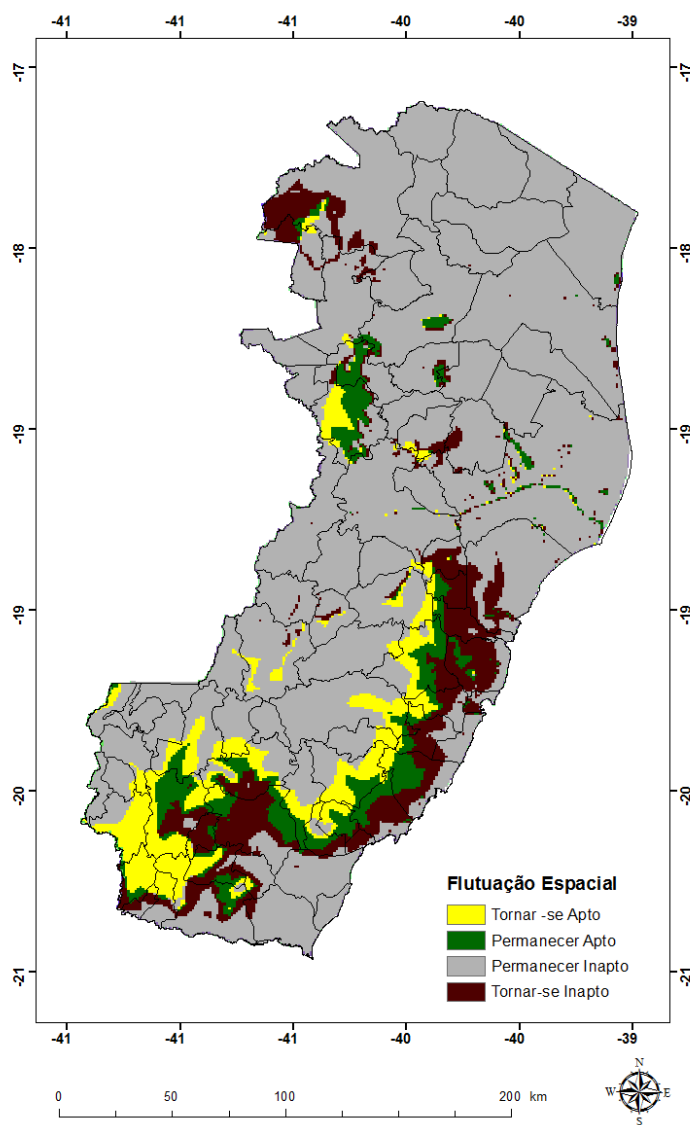


Figura 21 – Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de *Tectona grandis* no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.

Com as mudanças térmicas e hídricas previstas para 2050 no estado, as áreas aptas ao cultivo dessa espécie tendem a migrar das regiões próximas ao litoral para o interior do estado, em terras mais montanhosas. Isso acontece devido ao aumento de temperatura nesses locais, que hoje não apresentam o valor mínimo necessário para o desenvolvimento da Teca em escala produtiva. Além disso, as áreas que se tornaram inaptas passam em 2050 a possuir um valor de deficiência hídrica anual acima do tolerado por essa espécie florestal.

A Tabela 12 representa a matriz de comparação pareada entre as classes de aptidão agroclimática de *Tectona grandis*, onde é possível identificar o percentual de troca entre as classes apta e inapta, além dos valores de perda e ganho de cada classe.

Tabela 12 - Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km²) de *Tectona grandis* em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo

Atual	Futuro	Apta 2050	Inapta 2050	Total atual	Perda
Apta atual		2.852,1	4.618,7	7.470,8	4.618,7
Inapta atual		3.656,7	34.949,9	38.606,7	3.656,7
Total 2050		6.508,8	39.568,6		
Ganho		3.656,7	4.618,7		
Variação líquida (%)		-2,1	2,1		
				Troca (2x % min.) 15,87	

Os resultados apresentados nessa matriz demonstram que, apesar do baixo valor de variação líquida entre as classes (2,1%), no zoneamento considerando as mudanças climáticas previstas para 2050, a espécie *Tectona grandis* perde mais da metade de sua área apta, porém a perda é compensada pelo ganho de aptidão favorável ao seu cultivo em outros locais.

O valor de troca de 15,87% é o percentual de áreas aptas e inaptas que mudaram sua localização no mapa do estado, representando a alteração nos locais de cultivo de *Tectona grandis*, com as mudanças climáticas globais.

5.4.2 *Bactris gasipaes*

A Figura 22 apresenta os mapas dos zoneamentos agroclimáticos da espécie *Bactris gasipaes* (Pupunha) para o clima atual e para as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2 do IPCC.

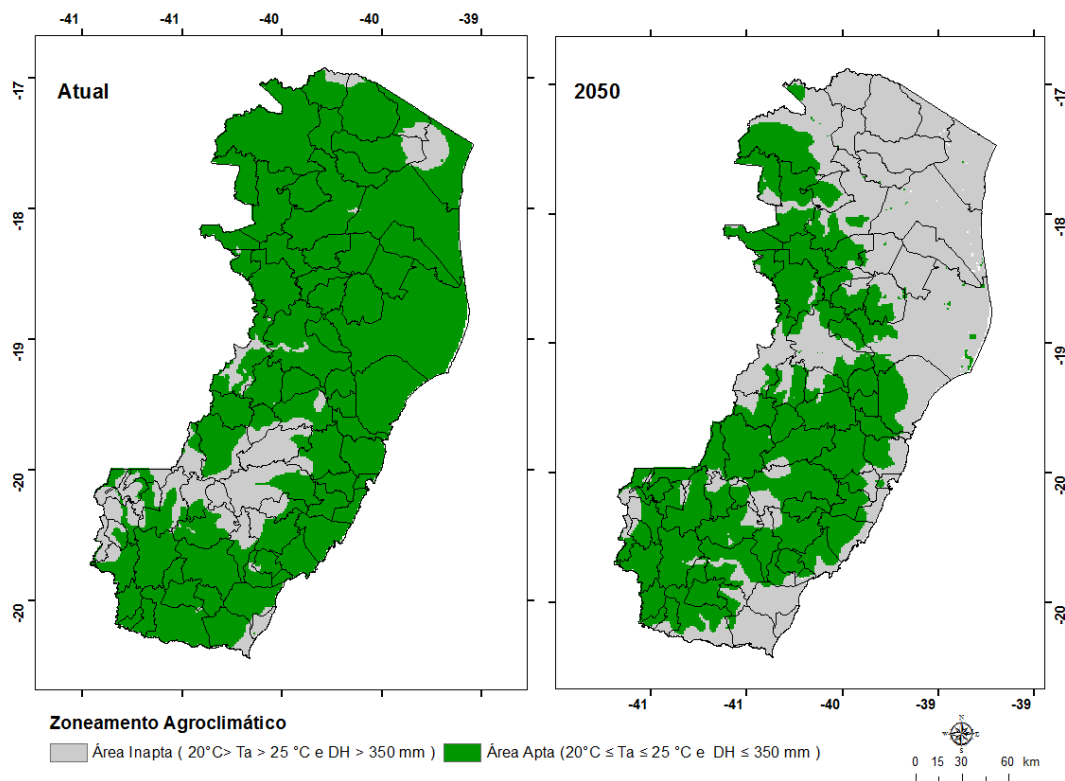


Figura 22 - Zoneamento agroclimático da espécie *Bactris gasipaes* no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2.

Nas condições climáticas atuais, a maior parte do estado do Espírito Santo é apta climaticamente ao cultivo de pupunha, sendo que partes das regiões Serrana e Caparaó são inaptas devido à restrição térmica à ocorrência de temperaturas médias anuais inferiores a 20°C .

Na Figura 23, é possível visualizar a flutuação espacial entre as classes de aptidão de *Bactris gasipaes* entre o clima atual e do ano 2050.

Com as mudanças climáticas previstas para 2050, a maior parte da região Norte do estado passa ser inapta ao cultivo de Pupunha devido o aumento da temperatura do ar e da deficiência hídrica anual, ultrapassando os 350 mm tolerados pela espécie.

O aumento de temperatura favorece o surgimento de áreas aptas ao cultivo de Pupunha nas regiões Serrana e Caparaó, porém esta espécie apresenta grande quantidade de perda de área apta no estado do Espírito Santo com as mudanças climáticas globais, como pode ser visualizado na Tabela 13.

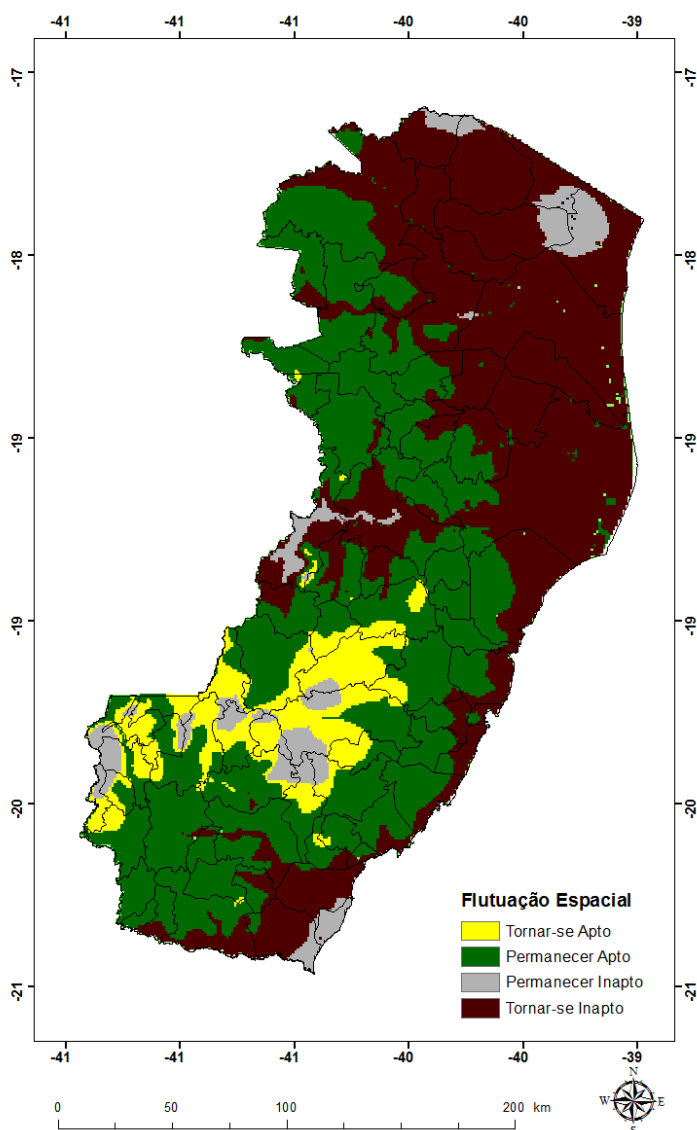


Figura 23 - Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de *Bactris gasipaes* no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.

Tabela 13 - Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km²) de *Bactris gasipaes* em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo

Atual	Futuro	Apta 2050	Inapta 2050	Total atual	Perda
Apta atual		19.699,3	19.724,9	39.424,3	19.724,9
Inapta atual		3.950,9	2.702,2	6.653, 2	3.950,9
Total 2050		23650,33	22427,18		
Ganho		3.950,9	19.724,9	Troca (2x %min.) 17,14	
Varição líquida (%)		-34,2	34,2		

Confrontando na matriz os dados do mapa de flutuação entre classes, percebe-se que a espécie florestal Pupunha apresenta percentual de variação líquida das classes de aptidão de 34,2% a menos para as áreas aptas e a mais para as áreas inaptas. A quantidade de perda de área apta se equivale ao ganho de área inapta, porém a troca de 17,14% representa o percentual de mudança na localização dessas classes.

5.4.3 *Azadirachta indica*

A Figura 24 apresenta os mapas dos zoneamentos agroclimáticos de *Azadirachta indica* (Nim indiano) no estado do Espírito Santo para o clima atual, considerando as mudanças climáticas previstas para 2050 no cenário A2.

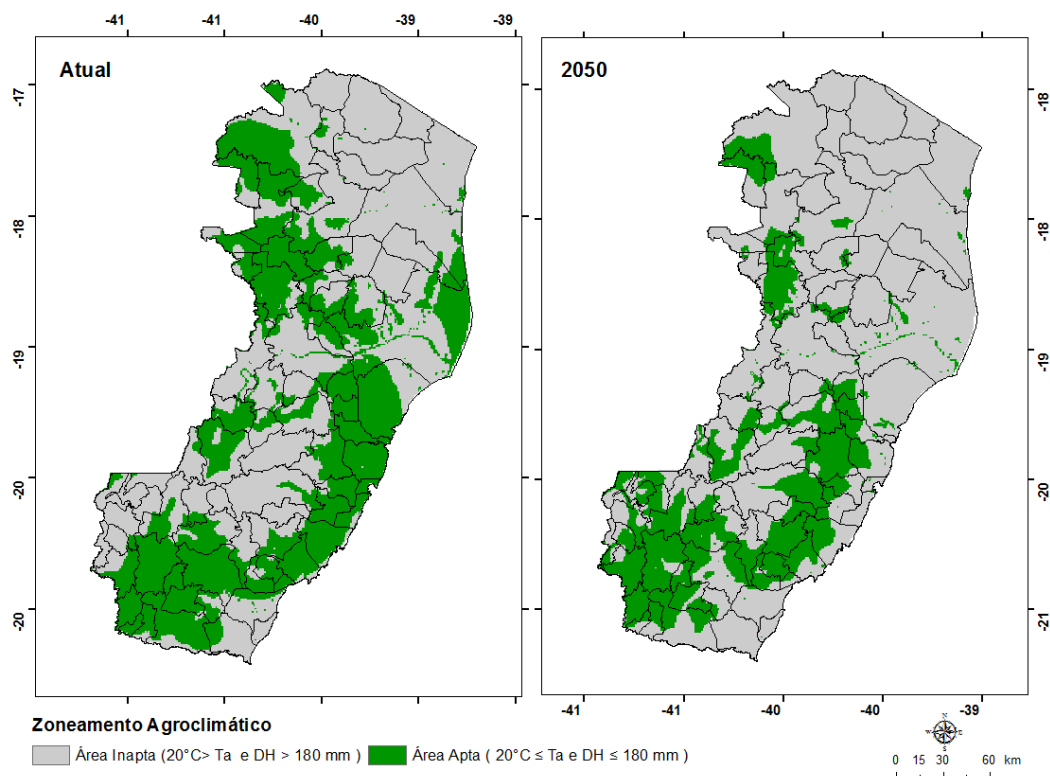


Figura 24 - Zoneamento agroclimático da espécie *Azadirachta indica* no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2.

Tanto nas condições climáticas atuais quanto com as mudanças climáticas previstas para 2050, o Nim apresenta áreas aptas para o seu cultivo no Espírito Santo, somente em parte das regiões Sul, Litorânea e Norte. Na Figura 25 é possível visualizar a flutuação de suas classes de aptidão agroclimática com as mudanças climáticas globais.

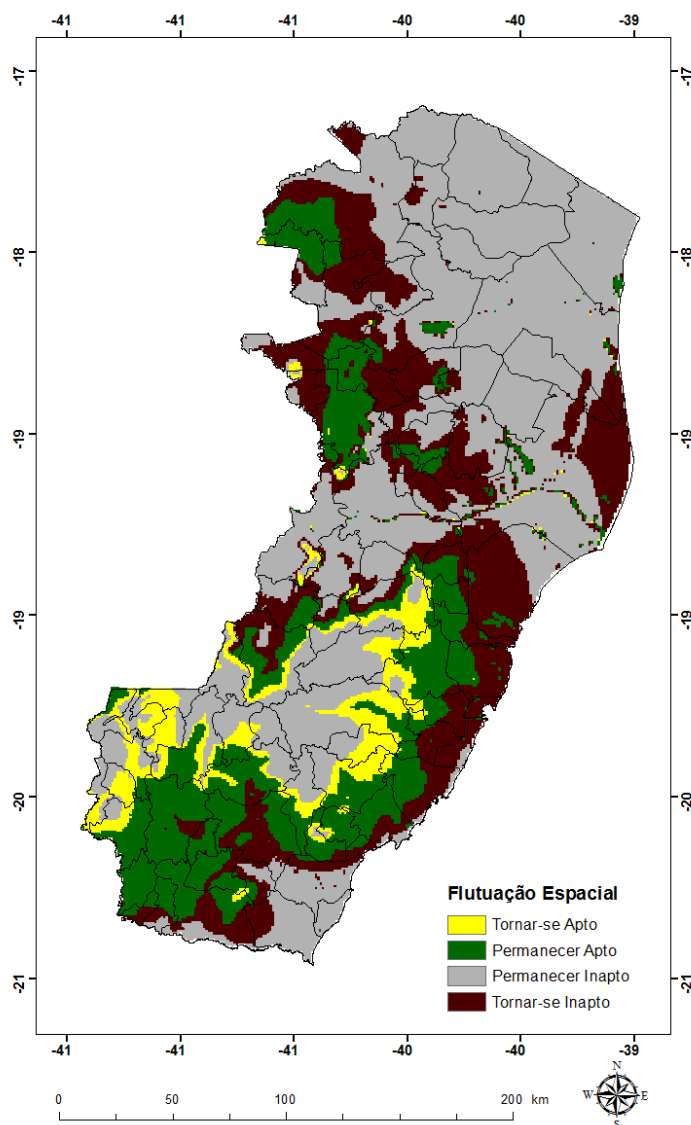


Figura 25 - Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de *Azadirachta indica* no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.

Os acréscimos de temperatura e déficit hídrico no estado do Espírito Santo previstos para 2050 favorecem o surgimento de áreas aptas ao cultivo de Nim em direção à região Serrana, devido ao aumento de temperatura média anual nessas áreas, a valores acima de 20 °C, onde hoje não apresenta esse valor mínimo exigido pela espécie. Além disso, o aumento de déficit hídrico a valores acima do tolerado (180 mm anuais) nas regiões litorânea e Norte, resulta em perda de área apta sendo substituída por área inapta como pode ser verificado na matriz de comparação da transição entre classes de aptidão apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km²) de *Azadirachta indica* em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo

Atual	Futuro	Apta 2050	Inapta 2050	Total atual	Perda
Apta atual		9.149,9	10.723,7	19.873,6	10.723,7
Inapta atual		3.099,2	22.882,7	25.981,9	3.099,2
Total 2050		12.249,1	33.606,4		
Ganho		3.099,2	10.723,7	Troca (2x %min.) 13,45	
Varição líquida (%)		-16,6	16,6		

Os resultados da matriz de comparação pareada demonstram que o ganho de área apta ao cultivo de Nim (3.099,2 km²) em regiões diferentes da atual gera um percentual de troca de 13,45% entre as classes de aptidão com as mudanças climáticas globais. Entre as transições entre classes, a maior parte da área (22.882,7 km²) permanece inapta ao cultivo desta espécie florestal.

5.4.4 *Toona ciliata*

Os mapas dos zoneamentos agroclimáticos da espécie *Toona ciliata* (Cedro australiano) para o clima atual e para as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no estado do Espírito Santo encontram-se na Figura 26.

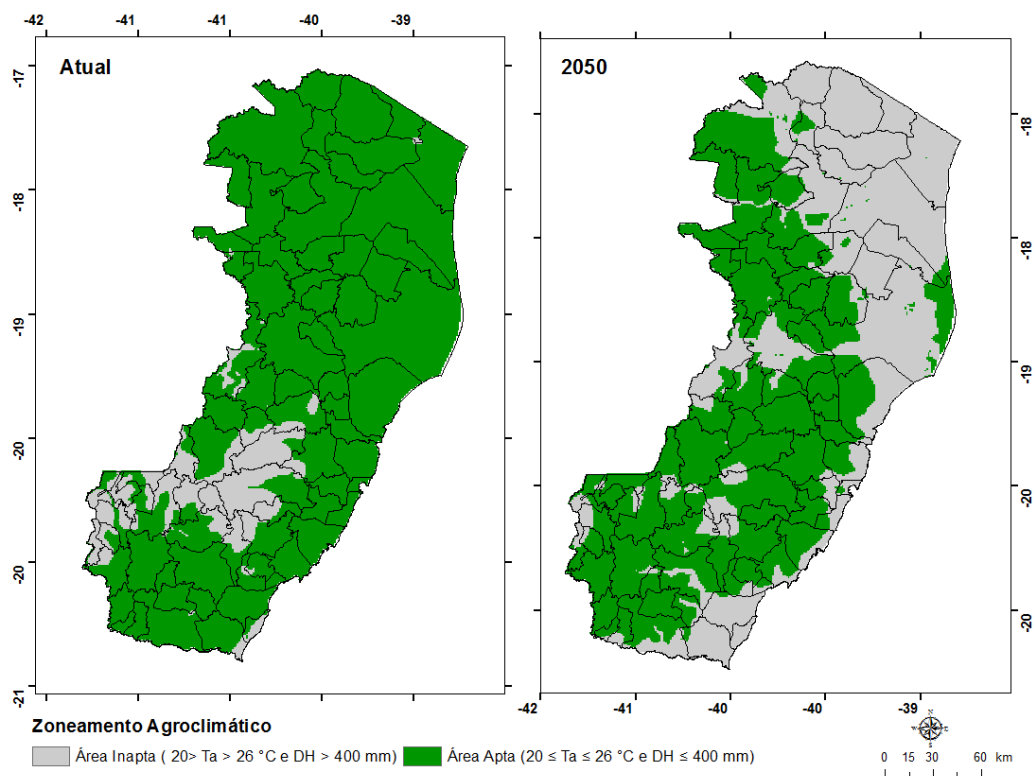


Figura 26 - Zoneamento agroclimático da espécie *Toona ciliata* no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2.

Atualmente, a maior parte do estado do Espírito Santo possui condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento em escala comercial de *Toona ciliata*. Com as mudanças climáticas, em 2050 grande parte da área apta (30,8%) desta espécie é perdida na região Norte em consequência do aumento do déficit hídrico nessa região a valores acima de 400 mm.

Na Figura 27 é possível visualizar as alterações espaciais ocorridas com as classes de aptidão agroclimática de *Toona ciliata* com os efeitos das mudanças climáticas.

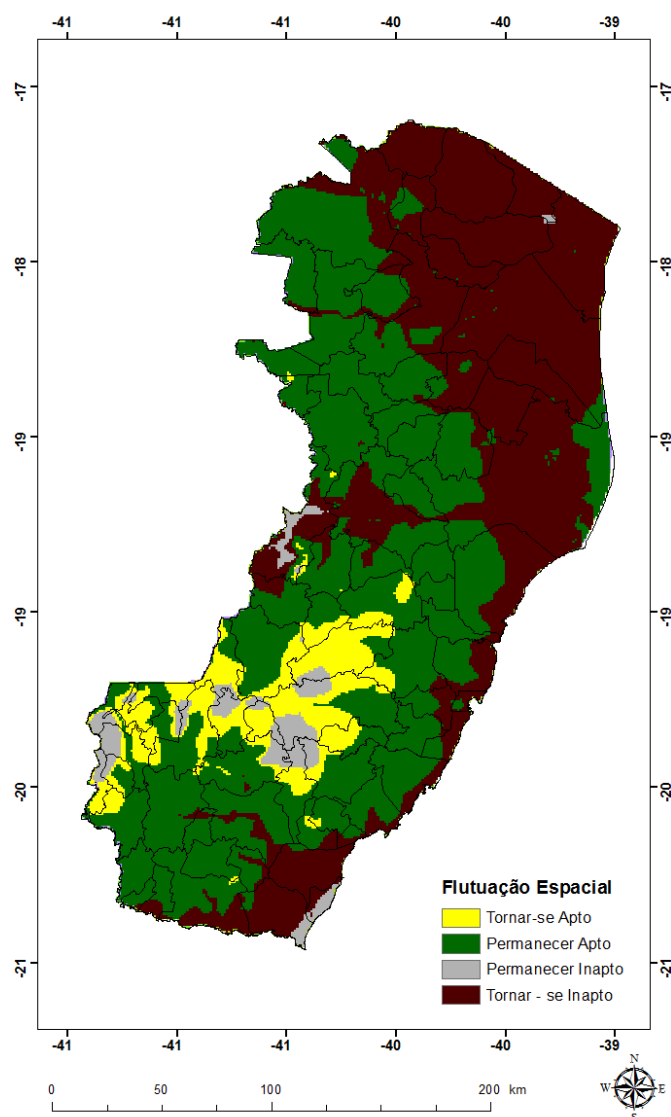


Figura 27 - Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de *Toona ciliata* no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.

Enquanto grande parte da região Norte e um trecho de faixa litorânea e na região Sul tornam-se inaptos ao cultivo de cedro, principalmente devido ao aumento do déficit hídrico, boa parte da região Serrana torna-se apta ao cultivo desta espécie devido ao aumento da temperatura média anual nessas áreas, que antes estavam abaixo do mínimo exigido por esta espécie (20°C).

A Tabela 15 contém as perdas, ganhos, variação líquida e troca entre as classes de aptidão agroclimática de *Toona ciliata*, confrontados na matriz de comparação pareada entre as classes.

Tabela 15 – Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km²) de *Toona ciliata* em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo

Atual	Futuro	Apta 2050	Inapta 2050	Total atual	Perda
Apta atual		22.429,1	18.136,3	40.565,5	18.136,3
Inapta atual		3.945,3	1.566,8	5.512	3.945,3
Total 2050		26.374,4	19.703,1		
Ganho		3.945,3	18.136,3	Troca (2x %min.) 17,12	
Varição líquida (%)		-30,8	30,8		

A espécie *Toona ciliata* obtém um pequeno ganho de área apta no estado com as mudanças climáticas (3.945,3 km²), mas os locais desfavoráveis ao cultivo da espécie ganham mais área (18.136,3 km²) com a alteração das variáveis térmicas e hídricas, assim as classes de aptidão agroclimática ao Cedro apresentam variação líquida de 30,8%. O percentual de troca entre classes é de 17,12 %, representando as áreas que se tornaram aptas e inaptas com o impacto das mudanças climáticas globais.

5.4.5 *Pinus elliottii* var. *elliottii*

Os mapas dos zoneamentos agroclimáticos de *Pinus elliottii* var. *elliottii* no estado do Espírito Santo para o clima atual, considerando as mudanças climáticas previstas para 2050 no cenário A2 encontram-se na Figura 28.

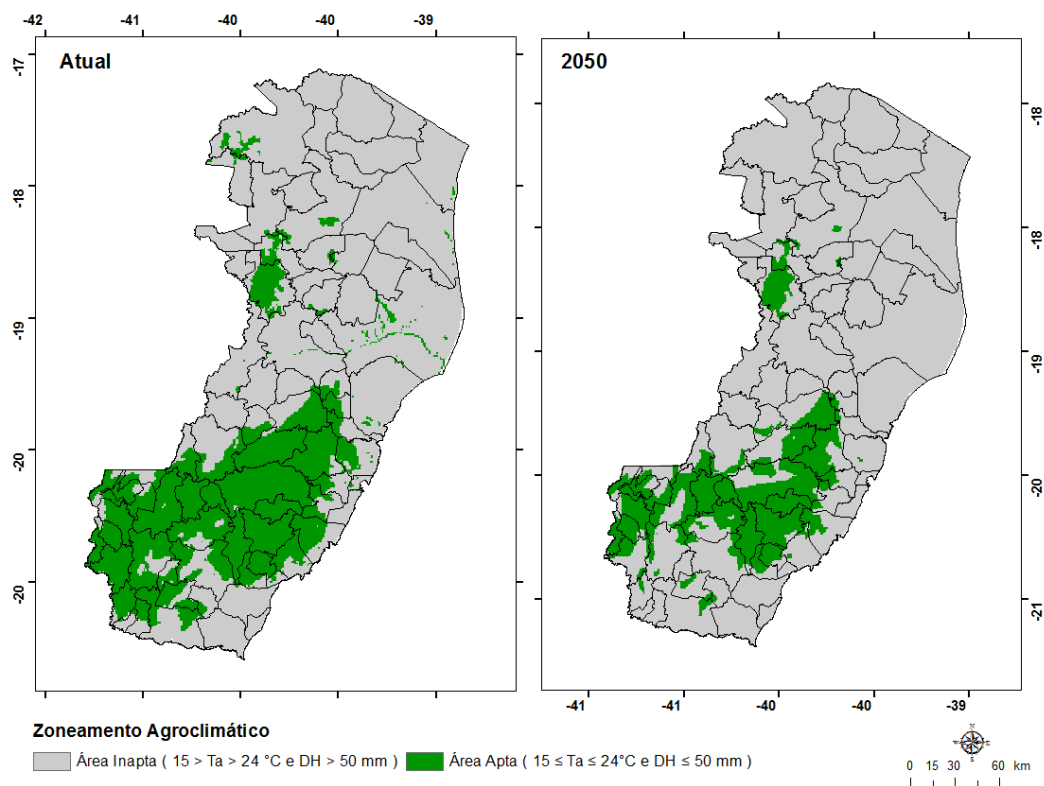


Figura 28 - Zoneamento agroclimático da espécie *Pinus elliotii* var. *elliotii* no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2.

As áreas aptas ao cultivo de *Pinus elliotii* se concentram principalmente nas regiões de temperaturas mais amenas do estado (Serrana e Caparaó) e de ocorrência de déficit hídrico anual abaixo de 50 mm. O aumento dessas variáveis climáticas provoca redução dos locais com aptidão agroclimática para o cultivo desta espécie, além disso, esse novo padrão climático simulado para o Espírito Santo em 2050 não proporciona o surgimento de extensões de áreas de cultivo em novas regiões como pode ser visualizado na Figura 29, no mapa de flutuação espacial das classes de aptidão.

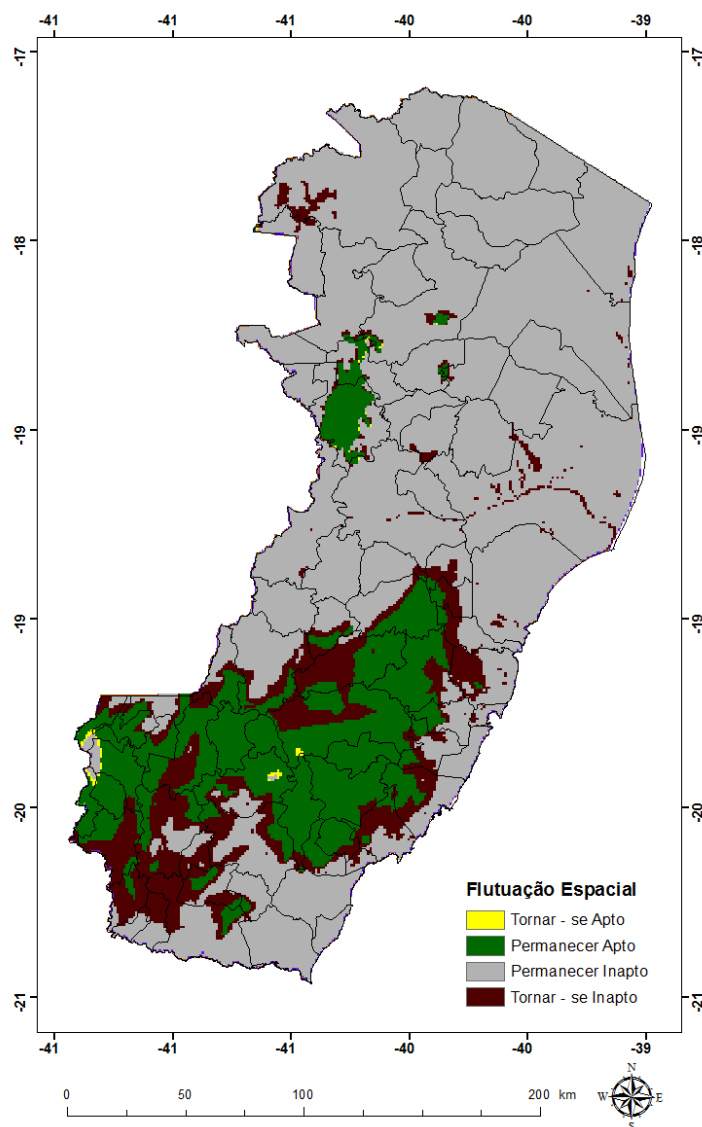


Figura 29 - Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de *Pinus elliottii* var. *elliottii* no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.

Entre as classes de alteração espacial das áreas de aptidão, nota-se a ocorrência de áreas que se tornam inaptas ao cultivo de *Pinus elliottii* com as mudanças climáticas, no entanto ainda há uma grande quantidade de locais que permanecem aptos ao cultivo da espécie, esses valores de área podem ser visualizados na Tabela 16.

Tabela 16 - Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km²) de *Pinus elliottii* var. *elliottii* em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo

Atual	Futuro	Apta 2050	Inapta 2050	Total atual	Perda
Apta atual		8.264,4	5.478,6	13.742,9	5.478,6
Inapta atual		120,3	32.214,2	32.334,5	120,3
Total 2050		8.384,7	37.692,8		
Ganho		120,3	5.478,6		
Varição líquida (%)		-11,6	11,6		
				Troca (2x %min) 0,52	

As áreas que se tornaram inaptas ao cultivo de *Pinus elliottii* no estado do Espírito Santo com as mudanças climáticas contabilizam 5.478,6 km², em consequência, esse valor corresponde à perda de área apta ao cultivo da espécie em relação ao clima atual. Praticamente não houve trocas entre as classes de aptidão agroclimática, e o valor de 0,52% é justificado pelo pequeno ganho de 120,3 km² de área apta em regiões em que a temperatura média atingiu o mínimo de 15°C exigidos pelo cultivo.

5.4.6 *Pinus caribaea* var *hondurensis*

A Figura 30 contém os mapas dos zoneamentos agroclimáticos de *Pinus caribaea* var *hondurensis* no estado do Espírito Santo para as condições climáticas atuais e para as mudanças climáticas previstas para 2050 no cenário A2.

Nas condições climáticas atuais, essa espécie florestal apresenta área apta em uma faixa que vai desde a região Sul do Espírito Santo até a região Noroeste passando pelo litoral.

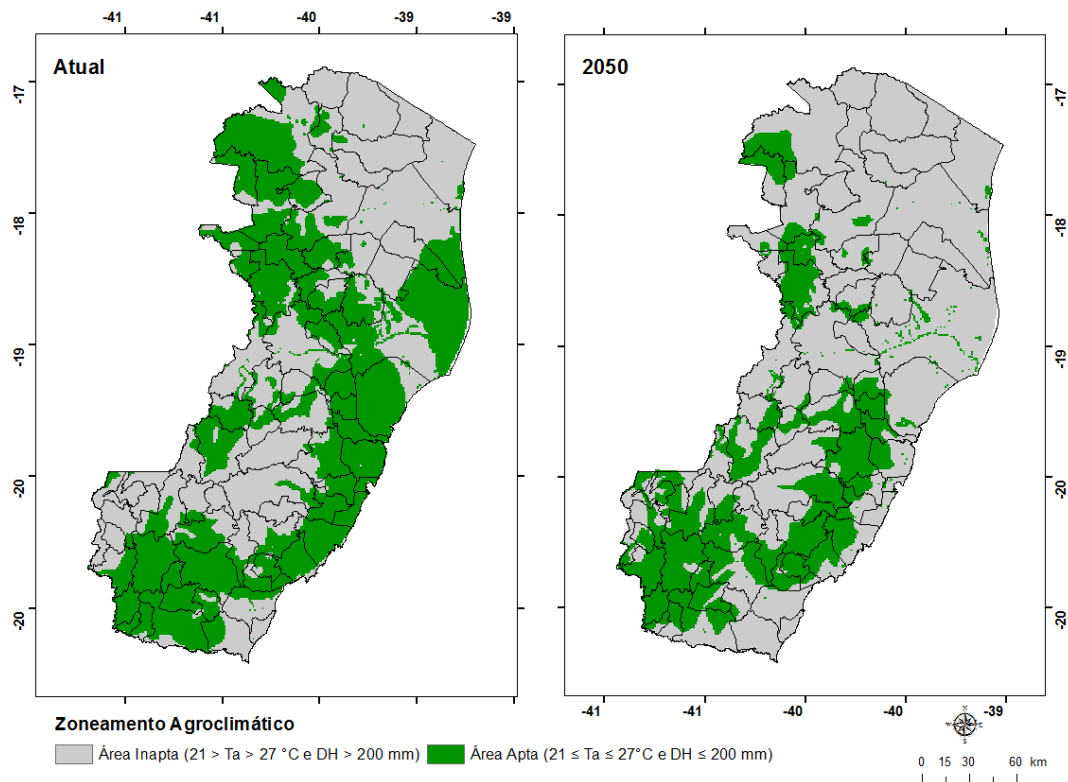


Figura 30 - Zoneamento agroclimático da espécie *Pinus caribaea var hondurensis* no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2.

No mapa do zoneamento agroclimático para o ano de 2050, nota-se uma considerável perda dessas áreas aptas, como no litoral Norte onde a ocorrência de déficit hídrico acima de 200 mm prejudica o cultivo de *Pinus caribaea*.

O mapa contendo as alterações na flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática pode ser visualizado na Figura 31.

Há o surgimento de áreas aptas com as mudanças climáticas em direção as áreas mais montanhosas do estado favorecido pelo aumento dos valores da temperatura média do ar nesses locais, alcançando o mínimo de 21°C exigidos pela espécie. Os ganhos e perdas de áreas aptas e inaptas climaticamente ao cultivo de *Pinus caribaea* são apresentados na Tabela 17, contendo a matriz de comparação pareada entre as transições de classes e as possíveis trocas entre elas devido à alteração climática nos locais de aptidão.

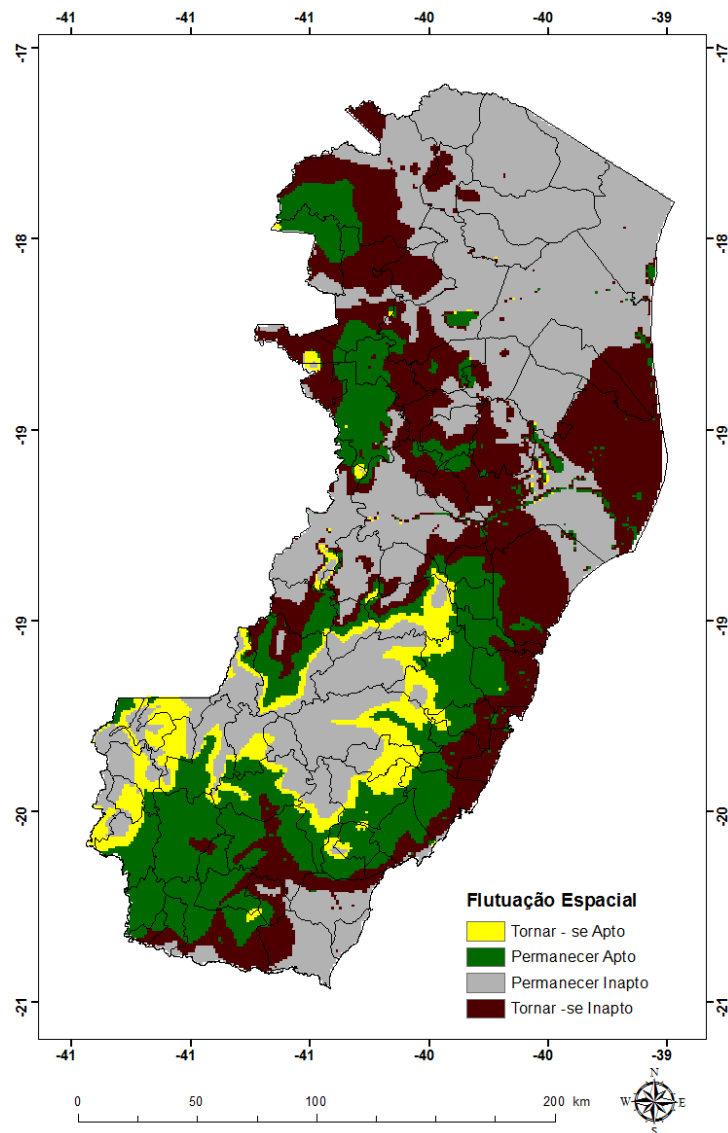


Figura 31 - Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de *Pinus caribaea var hondurensis* no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.

O total atual de áreas aptas e inaptas para *Pinus caribaea* no estado praticamente se equivalem, com cerca de 23.000 km². Houve maior perda das áreas impróprias ao cultivo do que das áreas aptas, no entanto, ocorreu um relevante ganho de áreas inaptas em outros locais (12.744 km²), caracterizado por um acréscimo de 20,8%. Nas condições climáticas de 2050, as áreas aptas ao plantio da espécie contabilizam 13.396,7 km², entre este total, 13,63% correspondem aos locais em que houve troca com a classe inapta.

Tabela 17 - Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km²) de *Pinus caribaea var hondurensis* em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo

Atual	Futuro	Apta 2050	Inapta 2050	Total atual	Perda
Apta atual		10.256,4	12.744	23.000,4	12.744
Inapta atual		3.140,3	19.936,8	23.077,1	31.40,3
Total 2050		13.396,7	32.680,8		
Ganho		3.140,3	12.744	Troca (2x %min.)	
Variação líquida (%)		-20,8	20,8	13,63	

5.4.7 *Pinus oocarpa*

Os mapas dos zoneamentos agroclimáticos para o clima atual e para o ano de 2050 considerando as mudanças climáticas previstas no cenário A2 do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) para a espécie *Pinus oocarpa* no estado do Espírito Santo encontram-se na Figura 32.

A exigência de temperatura média anual máxima de 21°C, aliada à tolerância a déficits hídricos abaixo de 200 mm anuais, faz com que as áreas aptas climaticamente ao cultivo de *Pinus oocarpa* predominem, tanto no clima atual quanto com as mudanças climáticas previstas para 2050 nas localidades de clima mais ameno no Espírito Santo, nas regiões Serrana e Caparaó. Com o aumento da temperatura do ar e elevação do déficit hídrico, percebe-se no zoneamento para o clima futuro a perda total de área apta no Noroeste do estado, além da diminuição das zonas favoráveis ao plantio da espécie.

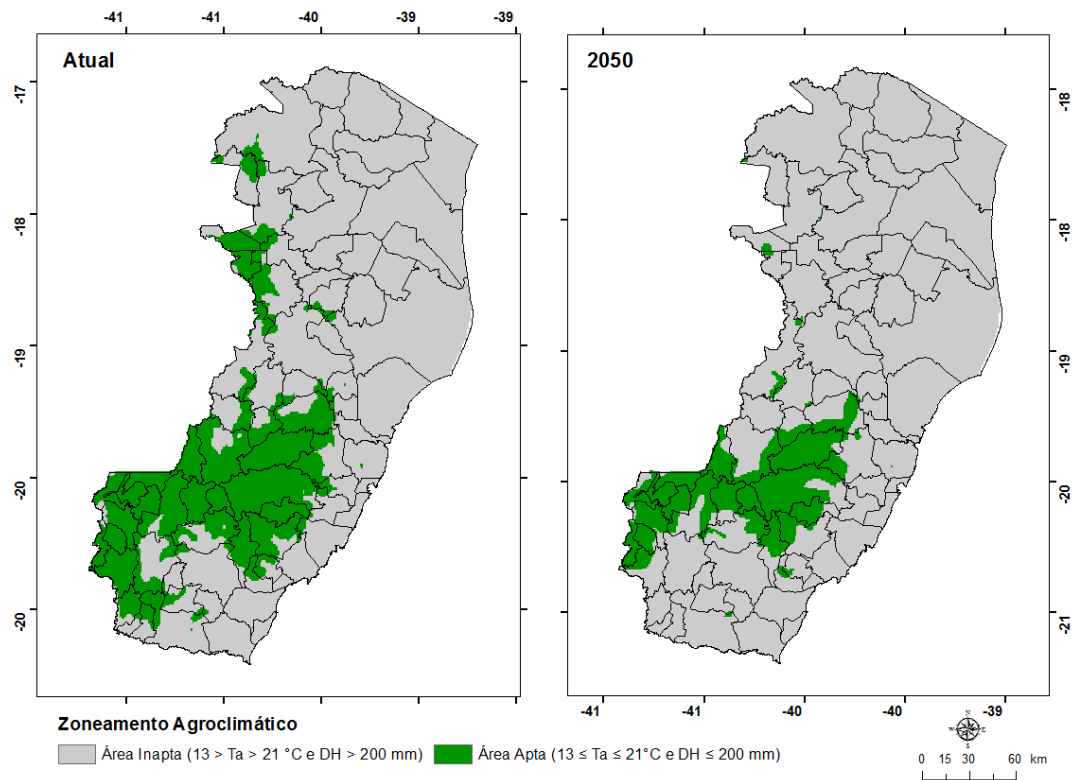


Figura 32 - Zoneamento agroclimático da espécie *Pinus oocarpa* no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2.

A Figura 33 contém as alterações espaciais nas classes de aptidão agroclimática do *Pinus oocarpa* com as mudanças climáticas previstas no Espírito Santo.

Com o aumento da temperatura do ar, uma pequena área em localidades de temperatura média inferior a 13°C passa a ser apta ao plantio de *Pinus oocarpa*. Apesar da predominância da classe que permaneceu apto, é possível verificar a grande quantidade de áreas que se tornaram inaptas ao cultivo da espécie no estado, representando perda de áreas aptas, devido ao aumento do déficit hídrico no Noroeste e elevação da temperatura média do ar acima dos 21°C, tolerados por esta espécie de Pinus.

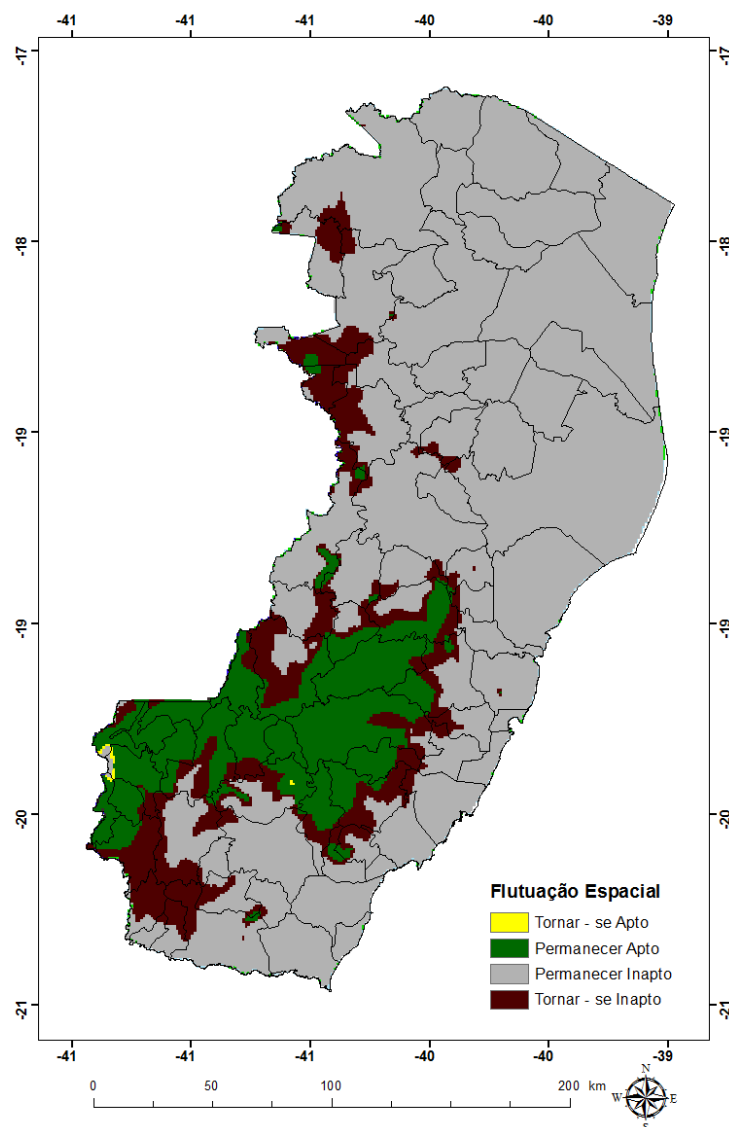


Figura 33 - Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de *Pinus oocarpa* no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.

A Tabela 18 contém a matriz de comparação pareada mostrando as possíveis perdas, ganhos e trocas entre classes.

Para o zoneamento agroclimático do *Pinus oocarpa*, a classe inapta teve maior ganho e menor perda, sendo a variação líquida de 12,1%. O pequeno ganho de 64,9 km² da classe apta entre o período atual e 2050, gerou uma porcentagem de troca entre classes, praticamente desprezível, de apenas 0,28%, demonstrando que as mudanças climáticas globais geram redução das zonas favoráveis ao plantio desta espécie no Espírito Santo.

Tabela 18 - Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km²) de *Pinus oocarpa* em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo

Atual	Futuro	Apta 2050	Inapta 2050	Total atual	Perda
Apta atual		6.576,43	5.663,3	12.239,7	5.663,3
Inapta atual		64,9	33.772,9	33.837,7	64,9
Total 2050		6.641,3	39.436,2		
Ganho		64,9	5.663,3	Troca (2x %min) 0,28	
Varição líquida (%)		-12,1	12,1		

5.4.8 *Pinus taeda*

A Figura 34 apresenta os mapas dos zoneamentos agroclimáticos da espécie *Pinus taeda* no estado do Espírito Santo, considerando o clima atual e as mudanças climáticas previstas para 2050 no cenário A2.

Entre as espécies do gênero *Pinus* avaliadas, esta é a que possui menor área apta no estado do Espírito Santo, devido a sua exigência de temperaturas mais amenas, abaixo de 19°C, e baixa tolerância a estresse hídrico, suportando no máximo uma deficiência anual de 50 mm. Esses parâmetros climáticos fazem com que o *Pinus taeda* apresente área apta ao seu plantio somente em parte das regiões Serranas e Caparaó.

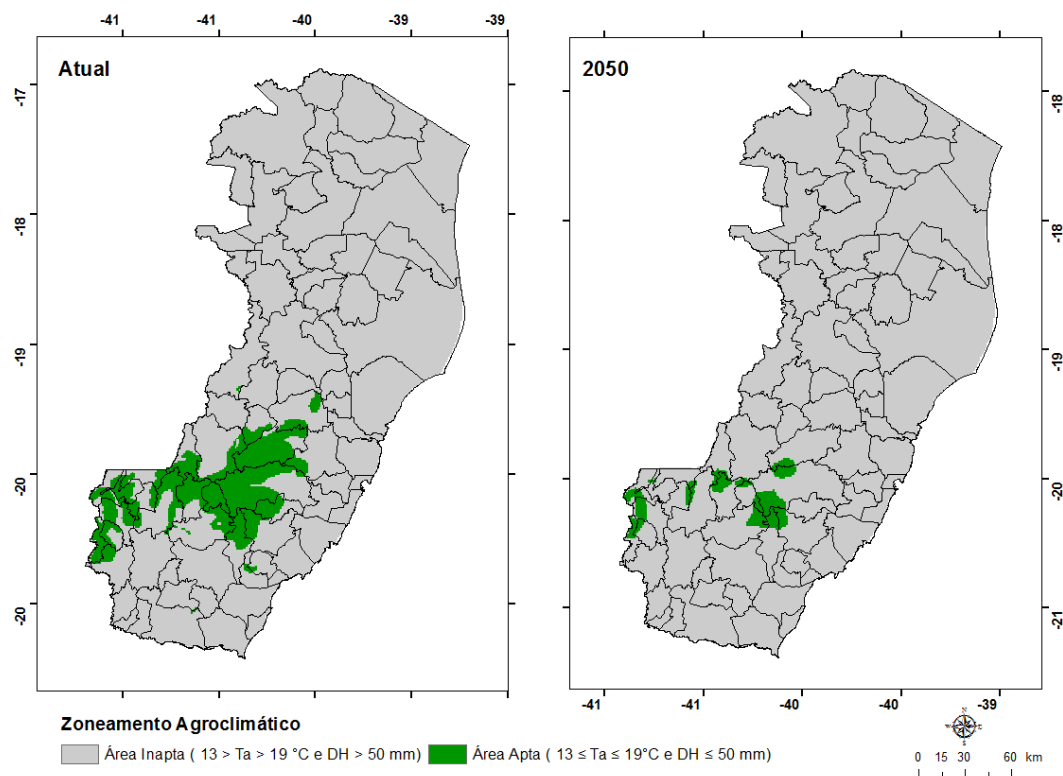


Figura 34 - Zoneamento agroclimático da espécie *Pinus taeda* no estado do Espírito Santo, segundo as condições climáticas atuais e as mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 no cenário A2.

O zoneamento para as condições climáticas do ano de 2050, no cenário A2, devido ao aumento da temperatura do ar e intensificação do déficit hídrico, aponta para redução das zonas favoráveis ao cultivo de *Pinus taeda*, restando apenas pequenas áreas aptas ao plantio nos locais em que hoje essa espécie é cultivada. O mapa das alterações espaciais das classes de aptidão de *Pinus taeda* no Espírito Santo entre o clima atual e 2050 pode ser visualizado na Figura 35.

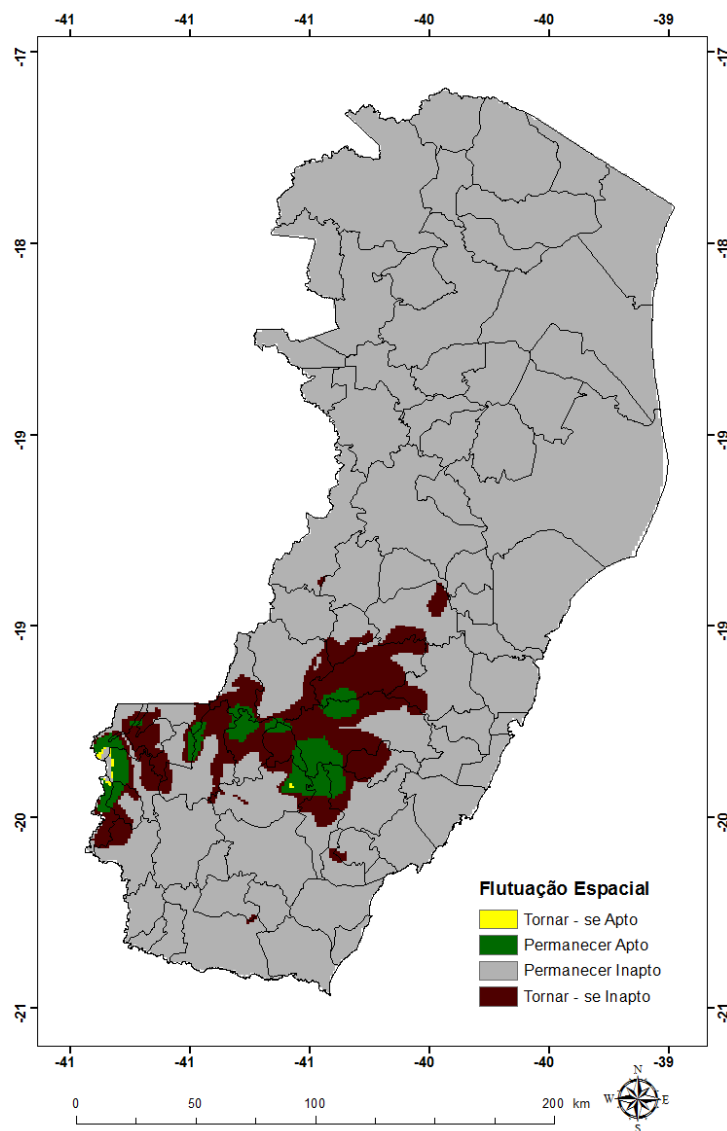


Figura 35 - Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática de *Pinus taeda* no estado do Espírito Santo entre o período atual e o ano de 2050.

Observa-se o predomínio da classe contendo as áreas que podem se tornar inaptas ao cultivo da espécie e quase não há ganho de área apta em outras regiões, sendo o surgimento da pequena área da classe que tende a se tornar apta, devido ao aumento da temperatura, atingido o mínimo de 13°C exigido pelo *Pinus taeda*.

A quantificação das classes de flutuação espacial, bem como os valores das perdas, ganhos e troca entre as classes de aptidão agroclimática encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Matriz de comparação pareada para as classes de aptidão agroclimática (km²) de *Pinus taeda* em duas condições climáticas distintas (atual e futura) no estado do Espírito Santo

Atual \ Futuro	Apta 2050	Inapta 2050	Total atual	Perda
Apta atual	1.152,2	3.741,6	4.893,8	3.741,6
Inapta atual	72,5	41.111,2	41.183,7	72,5
Total 2050	1.224,7	44.852,8		
Ganho	72,5	3.741,6		
Varição líquida (%)	-7,9	7,9	Troca (2x % min.) 0,31	

Com as mudanças climáticas globais, a espécie *Pinus taeda* tende a apresentar reduzida área com clima favorável ao seu cultivo (1.224,7 km²), sendo que as alterações nos padrões térmicos e hídricos não favorecerão o surgimento de novas áreas de plantio dessa espécie, sendo a percentual de troca entre as classes de aptidão praticamente desprezível (0,31%).

Na Figura 36, é possível visualizar as porcentagens de troca e variação líquida das classes de aptidão agroclimática das oito espécies florestais avaliadas.

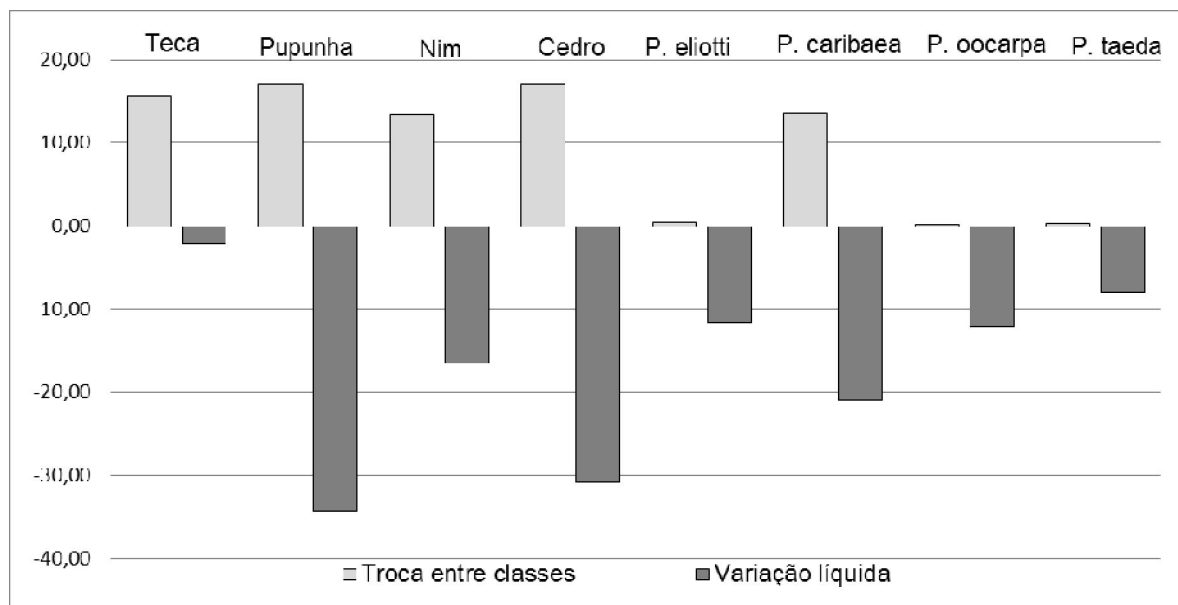


Figura 36 – Porcentagem de variação líquida e troca entre classes de aptidão agroclimática de espécies florestais no estado do Espírito Santo, entre o clima atual e as mudanças climáticas previstas para 2050 no cenário A2.

As espécies com maior variação líquida de classes de aptidão agroclimática no Espírito Santo com as mudanças climáticas são a Pupunha e o Cedro, no entanto, juntamente com a Teca, o Nim e o *Pinus caribaea*, essas são as espécies que apresentam maior percentual de troca entre classes, podendo ocorrer o surgimento de novas áreas aptas ao plantio com as mudanças climáticas globais.

6 DISCUSSÃO

6.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS (MCG'S) DO IPCC AR4 EM SIMULAR O CLIMA DO ESPÍRITO SANTO

A comparação dos resultados da simulação gerada pelos modelos climáticos globais (MCG's) do IPCC, com os dados observados nas estações climatológicas do estado, permitiu selecionar, por meio de métodos quantitativos, os MCG's com menor erro estatístico ao projetar as mudanças climáticas para o Espírito Santo.

Segundo Lima e Alves (2009), ao realizar uma análise com base em uma série histórica longa de dados observados e modelados, é comum que os resultados da modelagem dinâmica da atmosfera apresentem erros sistemáticos (tendências).

Para a variável climática precipitação anual, a maior parte dos modelos climáticos apresenta bias seco ou negativo para o Espírito Santo, sendo que entre eles o valor mais próximo do observado foi obtido pelo GISS E-R, com -43,6 mm anuais. Esse modelo também se destacou na simulação da precipitação no trabalho de Valverde e Marengo (2010) para a América do Sul, uma vez que juntamente com o HadCM3, que para o Espírito Santo apresentou bias de -58,1 mm, configurou melhor a zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS), e conseqüentemente subestimou menos a chuva sobre a região da Amazônia .

Os modelos que apresentam bias úmido ou positivo para o estado são apenas HadGEM1, BCM2.0, CNRM-CM3 e ECHO-G, este último apresenta o menor erro entre esses com 162,7 mm. Estudos como o de Ramírez e Orsini (2007) demonstram que esses resultados tendem a diferir de região para região, pois esses autores concluíram que para a região Nordeste do Brasil os modelos MIROC3.2 medres e GF-CM2.0 foram os que mais superestimaram a precipitação, enquanto que para a região amazônica e bacia do Prata, os modelos CSIRO-MK3.0 e GFDL foram os que apresentaram maior bias de precipitação.

Sales et al. (2011) realizaram um teste comparando os ciclos anuais da precipitação com dois bancos de dados em quatro regiões (Amazônia, Nordeste Brasileiro – NEB, Caribe e México-América Central), sendo calculados a correlação, o erro quadrático médio e o viés entre os dados observados e modelados. Nesse caso, em

quase todas as configurações, os autores detectaram a ocorrência de um bias seco. No trabalho de Neves et al. (2011) no Amapá, utilizando o modelo regional RegCM3, verifica-se a ocorrência predominante de viés úmido na região litorânea e o viés seco nas áreas Sul-Sudeste, não se observando regiões com valores estimados de precipitação próximos aos valores observados, no entanto, destaca-se a significativa variabilidade espacial e temporal do clima na região amazônica.

No estado do Espírito Santo, não foram encontrados na literatura trabalhos desta natureza. No entanto, Hamada et al (2011) avaliando a precipitação projetada por 15 modelos climáticos globais do IPCC AR4 para a região Sudeste do Brasil no período de 2071-2100 no cenário A2, observaram que as previsões dos MCG's não apresentam tendências uniformes de aumento ou de diminuição de precipitação no futuro na região.

Os resultados dos desempenhos dos modelos para temperatura média do ar no estado do Espírito Santo mostram que todos os MCG's subestimam os valores de temperatura do ar no estado em relação ao século passado, ou seja, apresentam bias negativo, sendo que os modelos CNRM-CM3 e INM-CM3.0 foram os que mais subestimaram a temperatura do ar no Espírito Santo em relação aos dados observados, enquanto que os modelos MRI -CGCM2.3.2, ECHAM5-OM e Multimodel apresentam resultados mais próximos à temperatura média do ar observada. No trabalho de Valverde e Marengo (2010), considerando os dados observados na América do Sul, os modelos HadCM3 e CGCM3 T47 apresentaram os vieses mais extremos para temperatura do ar.

Com base em uma análise preliminar dos valores de temperatura da superfície do mar produzidos pelos modelos do IPCC comparados com as observações do século XX, Barbosa e Marengo (2008) mencionam entre os modelos mais indicados para “*downscaling*” de mudanças climáticas sobre a América do Sul o GFDL-CM2.1, o HadCM3, o ECHAM5 e o CSIRO-Mk3. Neste trabalho, estes dois últimos modelos mencionados estão entre os cinco com mais baixos valores de RMSE selecionados para o Multimodel, estando no grupo de modelos com melhor desempenho em simular a temperatura média do ar no Estado do Espírito Santo.

Radic' e Clarke (2011) analisaram o desempenho dos modelos climáticos do IPCC para a América do Norte, usando as mesmas métricas do presente estudo durante o período 1980-1999. Com base nos resultados estatísticos, esses

autores relacionaram os cinco modelos de alto desempenho como sendo o HadCM3, o CGCM3.1 (T47), o CGCM3.1 (T63), o MIROC3.2 (medres) e o ECHAM5, este último está neste trabalho para o Espírito Santo entre esse grupo de cinco melhores modelos utilizados no Multimodel, tanto para precipitação quanto para temperatura, enquanto que o MIROC3.2 medres está entre os modelos de melhor desempenho estatístico apenas para a temperatura média do ar no estado.

Para todos os modelos avaliados, observa-se melhor correlação entre os dados de temperatura do ar do que de precipitação, devendo-se o fato à característica do comportamento desse elemento climático, que depende de maior número de parâmetros para sua simulação e apresenta maior variabilidade sazonal, do que dos próprios MCG's.

Apesar de ser utilizado em diversos trabalhos de mudanças climáticas (TANAJURA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011a; CAMPANHARO et al., 2011), o HadCM3 é um dos modelos que apresenta mais baixo valor de correlação com os dados observados de temperatura do estado do Espírito Santo, sendo que apenas o modelo GF-CM2.0 apresenta valor do coeficiente de correlação menor que este.

Rusticucci et al. (2010) avaliaram o desempenho de oito modelos climáticos globais acoplados do IPCC AR4 e o Multimodel na simulação de índices anuais de temperatura extrema e eventos climáticos de precipitação na América do Sul, e enfatizou que existe a necessidade de analisar se os modelos são capazes de simular bem os valores médios observados e a sua variabilidade, esses autores constataram que o Multimodel (*ensemble*) mostra os valores simulados de extremos de precipitação mais próximos das observações.

O desempenho do Multimodel na simulação da precipitação também foi superior a utilização dos modelos individualizados na avaliação de Gleckler et al. (2008). O melhor desempenho da utilização conjunta de modelos é atribuído à distribuição dos erros quando é realizada a média entre os dados (PIERCE et al., 2009).

A utilização do Multimodel, tanto para a variável climática precipitação quanto para temperatura demonstra menor erro (RMSE e Bias) quando aplicado com a média dos cinco modelos com melhor desempenho do que com todos os modelos do IPCC. Hidalgo e Alfaro (2012) selecionaram MCG's do IPCC para o Leste do Oceano Pacífico, também baseados em seu desempenho em reproduzir o clima do

século XX, e mencionam que a inclusão de maior número de modelos degrada a habilidade do Multimodel (*ensemble*).

Essa seleção dos MCG's com melhor desempenho para o estado do Espírito Santo confia no pressuposto de que os modelos que simulam melhor o clima do século XX, também produzirão as melhores projeções do futuro com as mudanças climáticas globais.

6.2. MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO DE ACORDO COM OS MCG'S SELECIONADOS

A diferença entre os dados gerados pelo cenário A2 do modelo global e os valores observados nas estações meteorológicas do estado do Espírito Santo, no período de 1971 – 1999 (precipitação) e 1977 – 1999 (temperatura), gerou anomalias climáticas dos desvios futuros do clima para o ano de 2050, regionalizadas pela técnica de *downscaling* aplicada no estado.

Nota-se que com as mudanças climáticas globais, o padrão de espacial das áreas mais e menos chuvosas no estado permanece o mesmo, no entanto o decréscimo nos valores das precipitações irá configurar uma caracterização mais seca em todo o estado ao longo do ano, ao se comparar com a precipitação total anual atual. Alguns estudos já vêm demonstrando que as mudanças climáticas podem acentuar eventos extremos (IPCC, 2007; MARENGO e VALVERDE, 2007; SILLMANN et al., 2013). Segundo IPCC (2012), o aquecimento global causará tantas tempestades, secas e ondas de calor nos próximos anos que as nações devem estar prontas para enfrentar desastres em uma frequência nunca antes observada.

O mês de Setembro apresenta a maior anomalia de redução de precipitação mensal no Espírito Santo, ressaltando-se que este mês caracteriza o fim da estação mais seca no estado, antecedendo o início do período chuvoso, sendo quando o déficit hídrico de água no solo é mais intenso, oferecendo maior estresse aos cultivos. Este resultado diferido encontrado por Oliveira et al (2011b), que concluiu que a região Sudeste têm projeções de diminuição de precipitação nos meses de inverno, para a maioria das projeções dos MCG's, diferente do presente trabalho onde a maior anomalia de redução da precipitação se deu no início da primavera.

As mudanças no ciclo global da água em resposta ao aquecimento ao longo do século XX não será uniforme, podendo haver aumento dos contrastes na precipitação entre as regiões e entre as estações úmida e seca, embora possa haver exceções regionais, de acordo com o relatório do IPCC (2013).

Segundo os dados do modeloMRI-CGCM2.3.2, no Espírito Santo, o aquecimento tende a ser maior no inverno, pois o mês de julho apresentará maior anomalia de temperatura, com aumentos entre 1,2 a 2,1 °C na média mensal. Estes resultados corroboram as análises de Marengo e Camargo (2007) na região Sul do Brasil, onde o aquecimento observado parece ser mais intenso no inverno em comparação ao verão, possivelmente ocorrendo um aumento de dias quentes no inverno.

Para a maior parte do Espírito Santo, os dados do modelo MRI-CGCM2.3.2 para a década centrada em 2050 no cenário A2, acoplados aos valores observados do século XX de temperatura média anual, vão de 22°C a 28°C. Essa faixa de valor é semelhante à encontrada por Hamada et al. (2009), que avaliando a similaridade entre projeções dos modelos climáticos globais do IPCC-AR4 para temperatura média na região Sudeste do Brasil no período de 2071 a 2100 neste mesmo cenário, encontraram para o MRI-CGCM2.3.2 23,9°C de temperatura média para a região Sudeste.

O aumento máximo na temperatura média anual no estado do Espírito Santo projetado pelo cenário e modelo utilizado neste estudo está em torno de 0,9°C a 1,2°C, sendo o acréscimo mais acentuado na região Sul do que no Norte do estado. No entanto, a combinação com os decréscimos de precipitação pluvial com as mudanças climáticas globais faz com que o Norte do Espírito Santo apresente acentuação do déficit hídrico, o que acaba sendo determinante para o desenvolvimento de cultivos agrícolas e florestais nessa região. Segundo estudos realizados por Marengo & Valverde (2007), ainda que a chuva tendesse a aumentar no futuro, as elevadas temperaturas do ar simuladas pelos modelos poderiam, de alguma forma, comprometer a disponibilidade de água para agricultura, consumo ou geração de energia, devido a um acréscimo previsto na evaporação ou evapotranspiração.

Campanharo et al. (2009) também observaram clima mais seco e quente para o futuro no estado. Apesar de terem utilizado uma modelagem climática futura diferente, esses autores também verificaram maior acentuação do déficit hídrico no

Norte do estado, ao realizarem a classificação climática de Thorthwaite, utilizando os dados das mesmas 110 estações pluviométricas (período de 1977-2006) também utilizadas neste trabalho e, para previsão do clima futuro os dados do modelo HadCM3, concluíram que com os possíveis impactos das mudanças climáticas as regiões Norte e Noroeste do Espírito Santo passarão do clima Subúmido seco a classificação de Semi-árido.

6.3. IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ZONEAMENTO DAS ESPÉCIES FLORESTAIS

Entre as espécies florestais avaliadas a *Tectona grandis* (Teca) é a que sofre menor impacto no zonemamento agroclimático. Cotta (2010) encontrou em zoneamento para o clima atual que 58,5% do território capixaba apresenta área apta ao cultivo de teca, e 41,5% de área inapta, já Klippel et al. (2013) em zoneamento para o clima atual identificou 33,3% de área apta ao cultivo de Teca no Espírito Santo. Esses resultados diferem do observado neste trabalho, porém a metodologia de obtenção do balanço hídrico nos zoneamentos foram diferentes, sendo que esses dois autores realizaram o cálculo do balanço hídrico para cada posto pluviométrico (110 pontos) e não para cada *pixel*, e utilizando série de dados de período diferente de 1982 – 2011, outro fator que contribuiu para esta diferença é que a pesquisa bibliográfica realizada neste estudo revelou menor tolerância a déficit hídrico para a Teca (100 mm) do que a informação utilizada por esses autores (150 mm).

Percebe-se que a metodologia adotada para espacialização das variáveis climáticas e a obtenção da base de dados atualizada influencia fortemente o resultado do zoneamento agroclimático, revelando a necessidade de atualização das informações de delimitação de zonas de aptidão de periodicamente.

Segundo Figueiredo et. al. (2005), a espécie florestal Teca, apesar de se estabelecer em diversas áreas de condições climáticas diversas, cresce melhor em condições tropicais moderadamente úmidas e quentes e uma estação biologicamente seca de até três meses. Ao se considerar as mudanças climáticas previstas para a década centrada em 2050 segundo o modelos selecionados no cenário A2, ocorre redução das áreas aptas, principalmente na região litorânea,

observando-se uma migração da espécie para o interior do estado devido à diminuição da precipitação nos meses mais secos do ano, fazendo com que o déficit hídrico anual ultrapasse os 100 mm, tornando as áreas litorâneas impróprias ao cultivo de Teca sem irrigação.

A espécie *Bactris gasipaes* (pupunha) está entre as que apresentam maior percentual de área apta agroclimaticamente no Espírito Santo, evitando apenas as regiões de maior deficiência hídrica. Bastos et al (2008) mencionam que em áreas onde há forte restrição hídrica de quatro a cinco meses, a adoção de irrigação é a alternativa para sanar esse impedimento no cultivo de pupunha, porém precauções devem ser tomadas para evitar riscos econômicos e ambientais. Klippel et al. (2013), também verificaram este problema e relatou que nessas regiões, deve ser estudada a possibilidade de realização de irrigação, para que a cultura da pupunha possa ser implantada. Nota-se que, juntamente com a espécie *Toona ciliata* (cedro), a pupunha está entre as espécies florestais a sofrer maior impacto com as mudanças climáticas globais, evidenciado pelos maiores valores de variação líquida.

Quanto a *Azadirachta indica* (Nim indiano), apesar de esta espécie apresentar áreas aptas ao seu plantio em quase metade do território do estado, a intensificação do déficit hídrico ocasiona impacto na redução das áreas de plantio. Com a crescente utilização do Nim indiano para os mais diversos fins, faz-se necessário um maior número de informações sobre o cultivo dessa espécie, inclusive sobre suas respostas a situações de deficiência hídrica. Martins (2008) verificou em condições de casa de vegetação que o déficit hídrico reduziu a altura, o número de folhas e o diâmetro do caule das plantas de Nim.

Segundo Neves & Carpanezzi (2009), o cultivo do nim indiano estendeu-se no Brasil por tipos climáticos desde o semiárido até o tropical chuvoso, sem a influência do ambiente natural ou dos mercados regionais. Desta forma zoneamentos agroclimáticos dessa natureza são importantes a fim de se selecionar áreas para melhor desenvolvimento da espécie.

De acordo com Klippel et al. (2013), a espécie nim indiano é um dos cultivos florestais que melhor se adaptou às condições climáticas do Espírito Santo. No entanto, essas alterações tanto na temperatura quanto na precipitação, podem não prejudicar a ocorrência de regiões favoráveis ao desenvolvimento dessa espécie no Espírito Santo, se algumas práticas forem adotadas no cultivo, como, por exemplo, a

utilização de irrigação, pois no clima futuro essa espécie estará mais restringida por ocorrência de déficit hídrico acima do valor tolerado, do que por temperaturas mais elevadas.

A maior parte do estado do Espírito Santo é apta agroclimaticamente ao cultivo de *Toona ciliata* (Cedro australiano), sendo que esta espécie não se desenvolve bem apenas nas regiões mais frias do estado. Paiva et al (2007), em zoneamento agroecológico de pequena escala na bacia do rio Itapemirim (ES), também verificaram restrição ao plantio dessa espécie nas áreas de maior altitude, que se localizam nas regiões Serrana e Caparaó do estado, sendo que o restante da área apresenta boas condições para o cultivo de cedro.

No entanto, o cedro australiano é uma das espécies a sofrer maior impacto nas áreas de cultivo com as mudanças climáticas, apresentando considerável redução da área apta agroclimaticamente. Um estudo avaliando os impactos globais da mudança do clima e a variabilidade climática em florestas e produtos florestais indica que a mudança do clima poderá afetar a produtividade de florestas, com consequente impacto no mercado e no suprimento de madeira para outros usos como, por exemplo, a geração de energia com biomassa (PEREZ-GARCIA et al., 2002).

Entre as espécies do gênero *Pinus* avaliadas, no clima atual, *Pinus elliottii* é a única a possuir área apta ao plantio na região Norte do Espírito Santo, sendo ainda uma pequena mancha isolada. Estes resultados para o clima atual do Espírito Santo também foram encontrados por Oliveira et al. (2011a), que mencionam que as áreas com aptidão para o plantio do *Pinus elliottii* var. *elliottii* abrangem grande parte do sul do Estado, principalmente aquelas mais elevadas onde a temperatura do ar é mais baixa e a deficiência hídrica anual é baixa ou ausente.

Segundo Castro et al. (2010b), o *Pinus elliottii* var. *elliottii* é a espécie mais indicada para implantação nas regiões com altitudes acima de 500 metros, onde as temperaturas são mais amenas.

No trabalho de Araújo et al. (2012) no Distrito Federal, a área potencial para o cultivo de *P. elliottii* foi restringida pela combinação dos valores de déficit hídrico (até 200 mm/ano) pela precipitação (1400 a 1800 mm/ano) e pelo clima (A_w – temperatura

média do mês mais frio maior ou igual a 18 °C e do mês mais quente maior ou igual a 22 °C).

Com a intensificação do déficit hídrico ocasionado pelas mudanças climáticas, em 2050 apenas parte das regiões Serrana e Sul são aptas ao plantio de *Pinus elliottii*. Esse resultado encontrado para 2050, difere de Oliveira et al. (2011a), quando avaliaram os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre o zoneamento agroclimático de *Pinus elliottii* no estado do Espírito Santo, e verificaram a existência de 100% de áreas inaptas na década de 2050, porém no trabalho desses autores a realização do balanço hídrico atual e futuro foi com base no modelo HadCM3, e não foi utilizada a técnica de *downscaling* para regionalizar os dados de anomalias, sendo que a utilização desses dados de modelos de circulação global em escala regional necessita desses cuidados especiais.

A espécie *Pinus caribaea*, em relação às outras espécies deste gênero é a que apresenta maior aptidão agroclimática no Espírito Santo, e a que sofre menor impacto de redução de áreas de plantio com as mudanças climáticas globais, por se desenvolver em maiores temperaturas que as demais. Esses resultados estão de acordo com Oliveira et al. (2011a), verificando que esta espécie pode ser cultivada por quase todo o litoral e alguns municípios do norte do Espírito Santo, o que não ocorre para o *Pinus elliottii* var. *elliottii*, *Pinus oocarpa* e *Pinus taeda*.

Araújo et al. (2012), em zoneamento de pequena escala no distrito federal, verificaram que a espécie *Pinus caribaea* não apresentou restrição aos parâmetros altitude, precipitação e déficit hídrico, sendo que a característica que mais influenciou na distribuição das áreas potenciais foi o clima.

Esse relato também foi feito por Oliveira et al. (2011a), pois o impacto das mudanças climáticas no comportamento dessa espécie foi menor quando comparado ao do *Pinus elliottii* var. *elliottii*, devido à sua exigência hídrica ser menor suportando mais a redução das precipitações e o aumento da temperatura ao longo das décadas. Sabe-se que a região Serrana do estado é a que apresenta maior extensão de áreas de plantio com gênero *Pinus* para serraria. Portanto, a perda de áreas aptas às outras espécies do gênero (principalmente *Pinus elliotti* e *oocarpa*) nessa região com as mudanças climáticas previstas, pode ser recompensada pela substituição de algumas áreas de plantio para a espécie *Pinus caribaea*, dessa forma o mercado de

madeira de pinus serrada no estado poderia continuar sendo abastecido por esta espécie mais tolerante ao aquecimento.

A ocorrência de fatos dessa natureza é mencionada por Campos (2011), quando afirma que anomalias positivas de temperatura podem contribuir para uma delimitação de cultivares adequados à determinadas regiões, sendo que quanto maior a anomalia, menos apta se tornará a região até o limite máximo de tolerância biológica ao calor, mas que por outro lado, outras culturas mais resistentes ao calor poderão ser beneficiadas até o seu limite próprio de tolerância ao estresse térmico.

As espécies *Pinus oocarpa* e *Pinus taeda* apresentam áreas aptas ao cultivo apenas nas regiões mais frias do estado (Sul e Serrana) e o aumento da temperatura média do ar com as mudanças climáticas reduzem significativamente essas áreas. Tal característica foi observada de forma similar nos trabalhos desenvolvidos por Castro et al. (2010b) e Oliveira et al. (2011a), utilizando outra série histórica de dados meteorológicos compreendida entre o período de 1977 a 2006, os autores concluíram que essas espécies, podem se desenvolver apenas em uma pequena porção da região serrana do Espírito Santo, por possuir maior altitude, com temperaturas do ar mais amenas.

Esses resultados para as condições climáticas atuais são semelhantes aos de Castro et al. (2010b), ressaltando-se que áreas climaticamente aptas para a implantação do *Pinus oocarpa* são maiores quando comparadas ao *Pinus taeda*, sendo que as duas espécies apresentam exigências térmicas muito próximas, porém com relação à deficiência hídrica, o *Pinus oocarpa* consegue tolerar deficiência hídrica de até 200 mm, enquanto o *Pinus taeda* tolera somente até 50 mm.

Entre essas quatro espécies de Pinus, no estado do Espírito Santo, tem-se menor área apta ao cultivo de *Pinus taeda*, corroborando Castro et al. (2010b), que também observaram a espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis* com maior área apta para o cultivo e o *Pinus taeda* com menor área apta agroclimaticamente para sua implantação. Esses autores mencionam que como esta espécie não tolera deficiência hídrica maior que 50 mm, ela não é indicada para implantação na maior parte do estado, pois este apresenta deficiência hídrica maior que esse limite tolerado em quase todo o seu território.

Oliveira et al (2011a) constataram que o comportamento da espécie *Pinus taeda* foi o mais afetado face às mudanças climáticas, com as áreas aptas desaparecendo por completo em 2050 no Espírito Santo devido a restrita faixa de aptidão térmica e baixa tolerância a deficiência hídrica, ressalta-se que os autores consideraram apenas os dados do modelo HadCM3 sem utilizar *downcalling*.

6.3.1 Flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática das espécies florestais no Espírito Santo com as mudanças climáticas globais

Os estudos envolvendo os impactos que as mudanças climáticas podem ocasionar nos setores agrícolas e florestal tem se intensificado nos últimos tempos (ASSAD et al., 2004; GHINI et al., 2007; CAMPOS et al., 2010; CAMPANHARO et al., 2011). No entanto, percebe-se que somente a avaliação quantitativa do percentual de mudança em uma área, não fornece informação suficiente para o planejamento e direcionamento das políticas públicas com base na interpretação do zoneamento das áreas impactadas, de forma que a análise espaço temporal da mudança ocorrida entre as classes de aptidão das espécies foi um importante diferencial deste trabalho de zoneamento agroclimático.

Entre as espécies avaliadas neste trabalho, a maior variação líquida com as mudanças climáticas no estado do Espírito Santo são da pupunha e do cedro, enquanto a teca apresenta o menor valor de variação das classes de aptidão com as alterações nos padrões climáticos. Pontius Jr. et al. (2004) ressaltam que a falta de mudança líquida não indica necessariamente a falta de alteração entre uma data e outra. Pode ser que a mudança ocorra de tal forma que, modifique a localização das classes entre as datas, mas a quantidade ou percentual de área continue o mesmo, por exemplo, um percentual de perda de área apta pode ser acompanhado pelo mesmo percentual de ganho de área apta, porém em outra localização, denominando-se que houve uma “troca” entre as classes.

A maior parte das espécies avaliadas neste trabalho, apresentam percentual considerável de troca entre classes de aptidão com as mudanças climáticas, sendo elas em ordem crescente de valor: a pupunha, o cedro, a teca, o *Pinus caribaea* e o nim indiano, demonstrando a possibilidade de cultivo dessas espécies em novas

regiões de plantio com as alterações climáticas. Manandhar et al. (2010) ressaltam que ao avaliar a mudança líquida isoladamente, pode se estar subestimando drasticamente a mudança total, uma vez que anula o ganho bruto de uma categoria em um local com uma mesma perda bruta da mesma categoria em outro local.

Na literatura, são encontrados diversos trabalhos, utilizando essa metodologia de análise de flutuação espacial de classes, em estudos de ecologia da paisagem e análise de mudanças de uso da terra (DORNELLES, 2003; PONTIUS JR. JR et al., 2004; LOURENÇO et al., 2008; GALANTE et al. , 2009; MANANDHAR et al. , 2010; PÉREZ-HUGALDE et al., 2011; NAGABHATLA et al., 2012; ALDWAIK e PONTIUS JR., 2012; TAVARES et al., 2012; ROMERO-RUIZ et al, 2012; SCHARLAU et al., 2013), a fim de detectar alterações com o tempo, porém não foram encontrados relatos e trabalhos que avaliem as mudanças climáticas globais, mostrando as transições entre as classes atuais e futuras, pela análise da flutuação espacial das classes geradas pelo zoneamento.

Cabe ressaltar que este estudo não consiste em um parecer definitivo com respeito à implantação dessas espécies florestais, pois as práticas de manejo silvicultural, o melhoramento genético e a utilização de clones mais resistentes ao calor podem consistir em estratégias a serem adotadas para contornar os possíveis impactos negativos que o aquecimento global causará à produção florestal.

7 CONCLUSÃO

Os resultados alcançados neste trabalho permitiram concluir que:

A seleção dos modelos climáticos revelou que o *Multimodel ensemble* entre os modelos GISS E-R, ECHO-G, ECHAM5-OM, MRI -CGCM2.3.2 e MIROC3.2 medres apresenta melhor desempenho estatístico em simular a precipitação anual no estado, enquanto o modelo MRI -CGCM2.3.2 apresenta melhor resultado para estimativa da temperatura média anual. A aplicação da técnica de *downscaling* a esses dados possibilitou a obtenção de um cenário climático futuro mais confiável de ser aplicado em escala regional.

As mudanças climáticas projetadas pelos modelos selecionados causam impacto de redução da área apta ao cultivo de todas as oito espécies florestais estudadas para o ano de 2050 (cenário A2).

A análise da flutuação espacial das classes de aptidão agroclimática entre o clima atual e as mudanças climáticas projetadas para o ano de 2050 permitem melhor visualização dos resultados do zoneamento agroclimático, sendo uma ferramenta de grande importância para o produtor florestal, auxiliando no planejamento dos locais de plantio e na escolha da espécie a ser implantada.

A espécie com menor variação líquida entre áreas aptas e inaptas, sofrendo menor impacto das mudanças climáticas globais para o ano de 2050 no estado do Espírito Santo será *Tectona grandis*.

As espécies com maior variação líquida entre áreas aptas e inaptas, sofrendo maior impacto das mudanças climáticas globais para o ano de 2050 no estado do Espírito Santo serão *Bactris gasipaes* e *Toona ciliata*.

8 REFERÊNCIAS

- ADDINK, E.A.; STEIN, A.A. A comparison of conventional and geostatistical methods to replace clouded pixels in NOAA-AVHRR images. **International Journal of Remote Sensing**, Dundee, v.20, n.5, p.961-77, 1999.
- AGRIOS, G. N. **Plant pathology**. San Diego: Elsevier, 2005. 922 p.
- ALDWAIK, S. Z.; PONTIUS JR. JRJR, R.G. Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. **Landscape and Urban Planning**, 106: 103– 114, 2012.
- ALFONSI, R.R.; PEDRO JUNIOR. M.J.; ARRUDA, F.B. Métodos agrometeorológicos para o controle de irrigação. **Boletim técnico** n.133, 1990, IAC/PRONI. 62p.
- ALVES, J. M. B.; BRISTOT, G.; COSTA, A. A.; MONCUNNIL, D. F.; SILVA, E. M. da; SANTOS, A. C. S. dos; BARBOSA, W. L.; NÓBREGA, D. do S. B. de; SILVA FILHO, V. de P.; SOUZA, I. A. de. Uma aplicação da técnica de “downscaling” dinâmico no setor Norte da região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.18, n.2, 161-180, 2003.
- 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, 191-206, 2005.
- AMORIM, R. C. F.; RIBEIRO, A.; LEITE, C. C.; LEAL, B. G.; SILVA, J.B. G. Avaliação do desempenho de dos métodos de espacialização da precipitação pluvial para o estado de Alagoas. **Acta Scientiarum Technology**, v.30, n.1, p.87-91, 2008.
- ANDRADE, G.A.; RICCE, W.S.; CARAMORI, P.H.; ZARO, G.C.; MEDINA, C.C. Zoneamento agroclimático de café robusta no Estado do Paraná e impactos das mudanças climáticas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 4, p. 1381-1390, jul./ago. 2012.
- ANDRADE, L.A. **Classificação ecológica do território brasileiro situado a leste do meridiano de 44° oeste e ao norte do paralelo de 16° sul: uma abordagem climática**. Viçosa, 1998. 147 f. Tese. (Doutorado em Ciência Florestal). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- ARAÚJO, R. F. de ; MATRICARDI, E. A. T. ; NAPPO, M. E. Zoneamento ecológico de pequena escala para espécies florestais tradicionais no Distrito Federal. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 42, n. 2, p. 421 - 430, abr./jun. 2012.
- ASSAD, E. D.; MARTINS, S.C.; BELTRÃO, N.E. de M.; PINTO, H. S. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.48, n.1, p.1-8, jan. 2013.

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

BAESSO, R.C.E., RIBEIRO, A., SILVA, M.P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 335-344, abr.-jun., 2010.

BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Jaguaribe-CE. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, n.1, p.24-33, 2005.

BARBOSA, H. M. J.; MARENGO, J. A. Análise preliminar da TSM dos modelos acoplados utilizados no IPCC-AR4. **Anais... CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, São Paulo: SBMet, 2008.

BARBOSA, J. P. M. Utilização de método de interpolação para análise e espacialização de dados climáticos: O SIG como ferramenta. **Caminhos da Geografia (UFU)**, v.9, n.17, p.85-96, 2006.

BARCELLOS, C. **Mudanças climáticas e ambientais e seus efeitos na saúde: cenários e incertezas para o Brasil**. 40 p. Brasília, DF, 2008.

BASTOS, T.X.; MÜLLER, A.A.; PACHÊCO, N.A.; CREÃO, L.G.C. **Zoneamento Agroclimático para a Cultura da Pupunheira para a Produção de Palmito no Estado do Pará**. Embrapa Amazônia Oriental, Documentos n°318, Belém, PA, 2008.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2002. p177-231.

BOVI, M. L. A. **Palmito pupunha: informações básicas para cultivo**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1998. 50p. (Boletim Técnico, 173).

BROADMEADOW, M.; RAY, D. Climate Change and British Woodland. Information note. **Forest Research**, june-2005.

BUCKERIDGE, M. S., MORTARI, L. C. & MACHADO, M. R. **Respostas fisiológica de plantas às mudanças climáticas: alterações no balanço de carbono na plantas podem afetar o ecossistema?** In: Rego, G. M., Negrelle, R. R. B & Morellato L. P. C. Fenologia - Ferramenta para conservação e manejo de recursos vegetai arbóreos. - Colombo, PR: Embrapa Florestas. Cap. 12: 213-230. 2007.

BUCKERIDGE, M. S.; AIDAR, M. P. M. Carbon sequestration in the rain forest: alternatives using environmentally friendly biotechnology. **Biota Neotropica**, v.2, p.1-4 2002.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMPANHARO, W.A.; CECÍLIO, R.A.; SPERANDIO, H.V.; JESUS JÚNIOR, W.C. de; PEZZOPANE, J.E.M. Potencial impacto das mudanças climáticas sobre o zoneamento agroclimático para a seringueira no Espírito Santo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 105-116, mar. 2011.

CAMPANHARO, W.A.; GUARIZ, H.R.; CECÍLIO, R.A.; HOLLANDA, M.P. de. Caracterização climática atual e previsões futuras para o estado do Espírito Santo. **Anais...** XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belo Horizonte, MG, 22 a 25 de setembro de 2009.

CAMPOS, C. G. C. **Padrões climáticos atuais e futuros de temperatura do ar na região Sul do Brasil e seus impactos nos cultivos de pêssigo e de nectarina em Santa Catarina**. Tese de Doutorado (Curso de Pós-Graduação em Meteorologia – INPE), São José dos Campos – SP, 2011.

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

CARPANEZZI, A. A. et al. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado do Paraná**. Brasília: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, 1986. 89 p.

CARTER, T. **General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and adaptation Assessment**. IPCC Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment (TGICIA). 2007. Disponível em: http://www.ipccdata.org/guidelines/TGICA_guidance_sdclaa_v2_final.pdf. Acesso em 31/05/2013.

CARUSO, C.; QUARTA, F. Interpolation Methods Comparison. **Computers Mathematical application**. v.35, p. 109-126, 1998.

CARVALHO, D. M. de. **Downscaling estocástico para extremos climáticos via interpolação espacial**. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal-RN, 2010.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo: Comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.2, p.377-384, 2005.

CARVALHO, P. E. R., **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Florestas. - Colombo: EMBRAPA – CNPF; Brasília-DF, 1994. 640p.

CASTRO, F. da S.; PEZZOPANE, J.E.M.; CECÍLIO, R.A.; PEZZOPANE, J.R.M.; XAVIER, A.C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.8, p.871-880, Campina Grande – PB, 2010. (a)

CASTRO, F. S. **Zoneamento agroclimático para a cultura do *pinus* no estado do espírito santo**: UFES, 2008. 60 a 77p. Dissertação de Mestrado.

CASTRO, F.S.; PEZZOPANE, J.E.M.; CECÍLIO, R.A.; PEZZOPANE, J.R.M.; XAVIER, A.C. Zoneamento agroclimático para espécies do gênero *Pinus* no estado do Espírito Santo. **FLORESTA**; 40:235-250. 2010.(b)

CCSP, 2008: **Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations**. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research [Bader D.C., C. Covey, W.J. Gutowski Jr., I.M. Held, K.E. Kunkel, R.L. Miller, R.T. Tokmakian and M.H. Zhang (Authors)]. Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington, D.C., USA, 124pp.

CHAIMSOHN, F.P. **Cultivo de pupunha e produção do palmito**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000. 121p.

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**, 479: 200–214, 2013.

CHMURA, D. J.; ANDERSON, P.D.; HOWE, G.T.; HARRINGTON, C.A.; HALOFSKYD, J.E.; PETERSON, D. L.; SHAW, D. C.; CLAIR, J.B. ST. Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations for adaptive management. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 1121-1142, 2011.

CHONG, S.K., GREEN, R.E., AHUJA, L.R. Infiltration prediction based on estimation of Green-Ampt wetting front pressure head from measurements of soil water redistribution. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.235-239, 1982.

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 31/05/2013.

COQUARD, J.; DUFFY, P. B.; TAYLOR, K. E. Present and future surface climate in the western U.S. as simulated by 15 global climate models. **Climate Dynamics**, n. 23, p. 455–472, 2004.

CORDEIRO, S. A.; SOUZA, C. C. de; MENDOZA, Z. M.S.H. Florestas Brasileiras e as Mudanças Climáticas. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal** – Issn 1678-3867. Edição Número 11 – Fev. 2008.

COTTA, T.R. **Zoneamento climatológico para o cultivo de teca no estado do Espírito Santo**. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

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

DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. **Estudos irrigação e drenagem** n.33, 1994.306p.

DORNELLES, T.F. **Análise da alteração do uso do solo em bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2003.

DUAN, Z.; BASTIAANSEN, W.G.M. First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling–calibration procedure. **Remote Sensing of Environment**, 131, 1–13, 2013.

ERENER, A.; DÜZGÜN, H.S. A methodology for land use change detection of high resolution pan images based on texture analysis. **Italian Journal of Remote Sensing**, 41: 47-59, 2009.

EVANGELISTA, R. C. **Impacto das mudanças climáticas na produtividade de eucalipto em duas regiões do Brasil**. 2006. 48 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa.

FAN, L.-J. Statistically downscaled temperature scenarios over China, **Atmospheric and Oceanic Science Letters**, 2, 208–213. 2009.

FEITOSA, L. R.; SCÁRDUA, J. A.; SEDIYAMA, G.C.; VALLE, S. S. Estimativas das temperaturas médias mensais e anuais do Estado do Espírito Santo. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v. 9 n. 3, 1979, p. 79-91.

FIGUEIREDO, E. O; OLIVEIRA, L. C de. BARBOSA, L. K. F. **Teca (*Tectona grandis* L.f.): principais perguntas do futuro empreendedor florestal**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2005. 87 p.

FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDI, C. Linking Climate Change Modelling to Impacts Studies: Recent Advances in Downscaling Techniques for Hydrological Modelling. **International Journal of Climatology**, 27, 1547-1578. 2007.

GALANTE G., MANDRONE S., FUNARO M., COTRONEO R., Panetta S. Spatial and temporal changes in Aniene river basin (Latium, Italy) using landscape metrics and moving window technique. **Italian Journal of Remote Sensing**, 41: 157-172, 2009.

GHINI, R.; HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V.; GASPAROTTO, L.; PEREIRA, J. C. R. Análise de Risco das Mudanças Climáticas Globais sobre a Sigatoka-negra da Bananeira no Brasil. **Fitopatol. Bras.** 32(3), maio - jun 2007.

GIORGI, F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. **Journal of Climate** 3, 941–963, 1990.

GIORGI, F.; BATES, G. T. On climatological skill of a regional model over complex terrain. **Mon. Wea. Rev.**, Boston, v.117, n.11, p.2325-2347. 1989.

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

GODOY, J.R.L. **Ecofisiologia do estabelecimento de leguminosas arbóreas da Mata Atlântica, pertencentes a diferentes grupos funcionais, sob atmosfera enriquecida com CO₂: uma abordagem sucessional**. Tese de doutorado, Instituto de Botânica, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo. 113 pp. 2007.

GOLFARI, L., **Zoneamento ecológico do estado de Minas Gerais para reflorestamento**. PNUD/FAO/IBDF –BRA/71/545, 1975. 65p. (Série Técnica no 3).

GONDIM, R.S.; CASTRO, M.A.H. de; EVANGELISTA, S.R. de M.; TEIXEIRA, A. dos S.; FUCK JÚNIOR, S.C. de. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. **Pesq. agropec.bras.**, Brasília, v.43, n.12, p.1657-1664, dez. 2008.

HAAS, R.; SAKAGAMI, Y.; PASSOS, J.C.; OLIVEIRA, P.M. de; CERVELIN, L. do N. Validação de um downscaling climático para o Sul do Brasil. **Anais...** IV Simpósio Internacional de Climatologia, João Pessoa – PB, 2011.

HAMADA, E.; GHINI, R.; MAIA, A. de H. N.; PEDRO JÚNIOR, M. J. Avaliação da temperatura média prevista pelos modelos climáticos globais no Sudeste do Brasil. **Anais...** XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belo Horizonte – MG , 22 a 25 de setembro de 2009.

HAMADA, E.; MAIA, A.H.N.; GHINI, R.; THOMAZ, M.C.; GONÇALVES, R.R.V.; LANA , J.T.O.; ALMEIDA, E.G. Avaliação da precipitação projetada pelos modelos climáticos globais para o Sudeste do Brasil utilizando SIG. **Anais...** XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.4047.

HANSEN-BAUER, I.; ACHBERGER, C.; BENESTAD, R. E.; CHEN, D.; FORLAND, E. J. Statistical downscaling of climate scenarios over Scandinavia. **Climate Research**. Vol. 29: 255-268, 2005.

HEWISTON, B. C.; CRANE, R. G. "Climate downscaling: techniques and application", **Climate Research**, Vol. 7, pág. 85-95, 1996.

HIDALGO, H.; ALFARO, E. J. Global Model selection for evaluation of climate change projections in the Eastern Tropical Pacific Seascape. **Rev. Biol. Trop.** 60 (Suppl. 3): 67-81. 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS – IPEF. **Identificação de espécies florestais – *Tectona grandis***. Texto atualizado em 05/05/2003. Disponível em <http://www.ipef.br/identificacao/tectona.grandis.asp>. Acesso em 09/10/2012.

IPCC. Summary for Policymakers, in Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. **Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, edited by M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, pp. 7-22, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2007.

IPCC, 2010: **Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections**

[Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, pp. 117.

IPCC.Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp. 2012

IPCC.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. 2013.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal.** 2a ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008.

KERR, R.A. Rising global temperature, rising uncertainty.**Science**, v.292, p.192-194, 2001.

KLIEJUNAS, J.T.; GEILS, B.W.; GLAESER, J.M.; GOHEEN, E.M.; HENNON, P.; KIM, M.S.; KOPE, H.; STONE, J.; STURROCK, R.; FRANKEL, S.J. **Review of literature on climate change and forest diseases of western North America.** General Technical Report, PSW-GTR-225.U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA, USA.2009.

KLIPPEL, V. H.; PEZZOPANE, J. E. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; CECÍLIO, R. A.; CASTRO, F. da S.; PIMENTA, L. R. Zoneamento climático para teca, cedro australiano, nim indiano e pupunha no estado do Espírito Santo. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 43, n. 4, p. 671 - 680, out. / dez. 2013.

KRUG, T. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das florestas à mudança do clima. **Parcerias estratégicas**, Brasília, DF n. 27, 2008.

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

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal.** São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000. 531p.

LARCHER,W. **Ecofisiologia Vegetal.** Translation: Prado CHBA. Ed. Rima,10, São Carlos. 2006.

LEGATES, D.R.; McCABE Jr., G.J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v.35, n.1, p.233-241, 1999.

LIMA, J.P.R.; ALVES, J.M.B. Um estudo de *downscaling* dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica alto-médio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.3, 323-338, 2009.

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.

LLOYD, J. & FARQUHAR, G.D. (2008) – Effects of rising temperatures and [CO₂] on the physiology of tropical forests trees. **Phil. Trans. R. Soc. B** 363: 1811-1817.

LOURENÇO, J.M.; DANKO, C.C.; FERNANDES, D.; RAMOS, L. Alterações dos usos do solo: o caso do Vale do Douro. **Engenharia Civil**, 30: 33-50, 2008..

MAFIA, R. G.; ALFENAS, A. C.; LOOS, R. A. **Impacto potencial das mudanças climáticas sobre doenças na eucaliptocultura no Brasil**. In.: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL (Ed). Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente. 2011.

MANANDHAR, R.; ODEH, I.O.A PONTIUS JR. JR, R.G. Analysis of twenty years of categorical land transitions in the Lower Hunter of New South Wales, Australia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 135: 336–346, 2010.

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. (Biodiversidade, 26).

MARENGO, J. A. Cenários de mudanças climáticas para o Brasil em 2100. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 34, p. 97-114, jan./jun. 2007.

MARENGO, J. A. Água e Mudanças Climáticas. **Estudos Avançados**, 22 (63), 2008.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C.; LABORBE, R.; ROCHA, R. P. da. **Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Relatório 5, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, fevereiro 2007.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/joc.1863. 2009.

MARENGO, J.A.; CAMARGO, C.G. Trends in Extreme air temperatures in Southern Brazil, **International Journal Climatology**, v.28, p. 893-904, 2007.

MARENGO, J.A; VALVERDE, M.C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4 (2007). **Revista Multiciência**. Campinas, Edição no. 8. Maio 2007.

MARIN, F.; PANDORFI, H.; FERREIRA, A. S. Estimativas das temperaturas máximas, médias e mínimas mensais para o Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: CBA, 2003. p.761-762.

MARTINS, M. de O. **Aspectos fisiológicos do nim indiano sob déficit hídrico em condições de casa de vegetação**. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2008.

MATLAB-MATHWORKS. Matlab 11 R13. Boston: MathWorks, 2011. (Software).

MEARNS, L.O.; GIORGI, F.; WHETTON, P.; PABON, D. HULME, M.; LAL, M. 2003. **Guidelines for use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments**. Data Distribution Centre of the IPCC. Disponível em :http://www.ipcc-data.org/guidelines/dgm_no1_v1_10-2003.pdf . Acesso em 31/05/2013.

MINUZZI, R.B.; SEDIYAMA, G.C.; BARBOSA, E.M., MELO JÚNIOR, J.C.F. Climatologia do comportamento do período chuvoso da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia** , 2007; 22(3):338-344.

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.

MORAES, C. **Geografia do Espírito Santo**. Vitória: Instituto Histórico e Geográfico do Espírito Santo; 2004.

MORIONDO, M.; BINDI, M. Comparations of Temperature Simulated by GCM's, RCM's and Statistical Downscaling: Potencial Application in Studies of Future Crop Development. **Climate Research**, 30, 149-160. 2006.

MOURA, M. S. B. de.; SOUZA, L. S. B. de.; SÁ. I. I. S.; SILVA, T. G. F. da. Aptidão do Nordeste Brasileiro ao Cultivo da Palma Forrageira sob Cenários de Mudanças Climáticas. **Anais...** Simpósio de Mudanças Climáticas e Desertificação no Semiárido Brasileiro, 3., 2011, Juazeiro. Experiências para mitigação e adaptação. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011.

NAGABHATLA, N.; FINLAYSON, C.M.; SELLAMUTTU, S.S. Assessment and change analyses (1987-2002) for tropical wetland ecosystem using earth observation and socioeconomic data. **European Journal of Remote Sensing**, 45: 215-232, 2012.

NAPPO, M.E.; NAPPO, A.E.; PAIVA, H.N. Zoneamento ecológico de pequena escala para nove espécies arbóreas de interesse florestal no estado de Minas

Gerais. **Revista científica eletrônica de engenharia florestal**, edição número 5–janeiro de 2005.

NEVES, D.G. das; DA CUNHA, A.C.; DE SOUZA, E.B.; BARRETO, N.J. da C. Modelagem climática regional durante dois anos de extremos de precipitação sobre o estado do Amapá: teste de sensibilidade aos esquemas convectivos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, 569 - 578, 2011.

NEVES, E.J.M.; CARPANEZZI, A.A. **Prospecção do Cultivo do Nim (*Azadirachta indica*) no Brasil**. Embrapa Florestas, Documentos n° 185, Colombo – PR, 2009.

NEVES, E.J.M.; SANTOS, A.F.; RODIGHERI, H.R.; CORRÊA JÚNIOR, C.; BELLETTINI, S.; TESSMANN, D.J. **Cultivo da Pupunheira para Palmito nas Regiões Sudeste e Sul do Brasil**. Embrapa Florestas, Circular técnica n° 143, Colombo – PR, 2007.

OLIVEIRA, L. T.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A. Potencial Impacto das Mudanças Climáticas no zoneamento do Pinus no Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, 18(1):37-49; jan./mar. 2011. (a)

OLIVEIRA, B. S.; HAMADA, E.; LANA, J. T. DE O. Avaliação dos modelos climáticos globais do IPCC para o Brasil: Precipitação pluvial. **Anais...** 5º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica - CIIC 2011 9 a 11 de agosto de 2011 – Campinas, SP, 2011. (b)

OREN, R., ELLSWORTH, D.S., JOHNSEN, K.H. et al. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂-enriched atmosphere. **Nature**, 411, 469– 472. 2001.

PAIVA, Y.G.; MENDONÇA, G.S.; SILVA, K. R.Da.; NAPPO, M. E.; CECÍLIO, R. A. ; PEZZOPANE, J. E. M. Zoneamento agroecológico de pequena escala para *Toona ciliata*, *Eucayptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim – ES, utilizando dados SRTM. **Anais...** XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 1785-1792.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 433-443, 478p.

PEREZ-GARCIA, J. et al. Impacts of climate change on the global forest sector. **Climatic Change**, n. 54, p. 439-461, 2002.

PÉREZ-HUGALDE, C.; ROMERO-CALCERRADA, R.; DELGADO-PÉREZ, P.; NOVILLO, C.J. Understanding land cover change in a Special Protection Area in Central Spain through the enhanced land cover transition matrix and a related new approach. **Journal of Environmental Management** , 92: 1128 – 1137, 2011.

PEZZOPANE, J. E. M; SANTOS, E. A.; ELEUTÉRIO, M. M., REIS, E. F. dos.; SANTOS, A. R. dos. Espacialização da temperatura do ar no estado do Espírito Santo. **Revista de agrometeorologia**, Santa Maria, n.1, v.12 p. 151-158, 2004.

PHILIP, G.M. & WATSON, F. How ore deposits can be overestimated through computational methods. In: RESOURCES AND RESERVES SYMPOSIUM, Sydney,

1987. **Proceedings**...Sydney, THE AUSTRALASIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY, p. 49-58, 1987.

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.

PINHEIRO, A. L.; LANI, L. L.; COUTO, L. **Cultura do cedro australiano para produção de madeira serrada**. Viçosa: UFV, 2003. 42 p.

PONTIUS JR., R.G., THONTTEH, O., CHEN, H., Components of information for multiple resolution comparison between maps that share a real variable. **Environmental and Ecological Statistics** 15: 111–142, 2008.

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

PRATES, H. T.; RIBEIRO, P. E. A.; FORATO, L. A.; WAQUIL, J. M.; VIANA, P. A.; GUIMARÃES, D. P.; PIRES, C. H. P.; BARBOSA, L. V. Avaliação da sazonalidade da concentração de azadiractina nas folhas de nim (*Azadirachta indica* (A. Juss.)). In: **ENCONTRO BRASILEIRO DE ECOLOGIA QUÍMICA**,4., 2005, Piracicaba. Programação e livro de resumos. Piracicaba: ESALQ, 2005. p. 117.

QUADRO, M., MACHADO, L.H.R., CALBETE, S., BATISTA, N., OLIVEIRA, G.S. **Climatologia e Precipitação e Temperatura no período de 1986 a 1996**. Climanálise, 1996; 1:90.

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. 5257 – 5274, oct 2011.

RAMÍREZ, M. C. V.; ORSINI, J.A.M. **Desempenho dos modelos climáticos do IPCC em simular a precipitação presente e futura sobre o território brasileiro**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2007.

RAMÍREZ-VILLEGAS J; JARVIS A. Downscaling global circulation model outputs: The delta method. Decision and Policy Analysis Working Paper No. 1.CIAT, Cali, Colombia. Disponível em: <http://www.ccafs-climate.org/downloads/docs/Downscaling-WP-01.pdf>. Acesso em 31/05/2013.2010.

RIBAS, R.P. **Estratégias de empresas de petróleo no cenário de mudanças climáticas globais**. 2008. 158 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,RJ, 2008.

RIBEIRO, C. A. D.; PEZZOPANE, J. R. M; PEZZOPANE, J. E. M.; LOOS, R. A.; XAVIER, A. C.; CECÍLIO, R. A.; NEVES, M. A. Delimitação de microrregiões agroclimáticas e suas relações com o potencial produtivo da cultura do Eucalipto. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 41, n. 4, p. 779 - 786, out./dez. 2011.

RICKEN, P.; MATTOS, P.P.; BRAZ, E.M.; KALIL FILHO, A. N. **Crescimento diamétrico de povoamento de *Toona ciliata* var. *australis* em Adrianópolis, PR.** Embrapa Florestas. Comunicado técnico n°285, Colombo-PR, 2011.

ROBINSON, T.P.; METTERNICHT, G. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. **Computers and Electronics in Agriculture** , v., p. 97-108, 2006.

ROMERO-RUIZ, M.H.; FLANTUA, S.G.A.; TANSEY, K.; BERRIO, J.C. Landscape transformations in savannas of northern South America: Land use/ cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia. **Applied Geography** , 32: 766 – 776, 2012.

RUSTICUCCI, M.; MARENGO, J. A.; PENALBA, O.; RENOM, M. An intercomparison of model-simulated in extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century. Part 1: mean values and variability. **Climatic Change**, 98:493–508, 2010.

SALAZAR, R. & ALBERTIN, W. Requerimentos edáficos y climáticos para *Tectona grandis*. **Turrialba**.24(1). 1974. P.66-71.

SALES, D.C.; COSTA, A.A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. das C.; GUIMARÃES, S.O. Teste de configurações do modelo RAMS6.0 através da técnica de *downscaling* dinâmico com os dados do ERA-INTERIM. **Anais...IV Simpósio Internacional de Climatologia**, João Pessoa – PB, 2011.

SANT'ANNA NETO, J.L. Decálogo da climatologia do Sudeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2005; 1(1):43-60.

SCHARLAU, L.A.T.; DISPERATI, A.A.; MALDONADO, F.D.; ARAUJO, A.J. de. 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, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013.

SEGUÍ, P.Q.; RIBES, A.; MARTIN, E.; HABETS, F.; BOÉ, J. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. **Journal of Hydrology**, 383: 111–124, 2010.

SILLMANN, J.; KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X.; BRONAUGH, D. Climate extremes indices in the CMIP5 Multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, VOL. 118, 2473–2493, 2013.

SILVA K.R.; CECÍLIO, R.A.; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.R.M., GARCIA, G.O. Interpolação Espacial da Precipitação no Estado do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, 18 (4): 417-427, out./dez, 2011.

SILVA, J.W., GUIMARÃES, E.C., TAVARES, M. Variabilidade temporal da precipitação mensal e anual na estação climatológica de Uberaba-MG. **Ciência & Agrotecnologia**, 2003; 27(3):665-674.

SILVA, K. R.; PAIVA, Y. G.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. E. M. Avaliação de interpoladores para a espacialização de variáveis climáticas na bacia do rio Itapemirim-ES. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2007. p.3141-3146.

SILVA, V. de P.R. da; OLIVEIRA, S. D. de; SANTOS, C.A.C. dos; SILVA, M.T. Risco climático da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.180–189, 2013.(a)

SILVA, K. R. da; CECÍLIO, R.A.; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.R.M.; GARCIA, G. de O. Zoneamento edafoclimático para a cultura da seringueira no Espírito Santo. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 1, p. 1-12, janeiro-março, 2013. (b)

SIQUEIRA, J. D. P. et al. Estudo ambiental para os programas de fomento florestal da Aracruz Celulose S. A. e extensão florestal do governo do estado do Espírito Santo. **Floresta**, Edição especial, nov/2004, p. 3-67.

SOUZA, J.C.A.V.de; BARROSO, D.G.; CARNEIRO, J.G. de A. **Cedro australiano (*Toona ciliata*)**. Manual técnico 21, Programa Rio Rural, Niterói – RJ, 2010

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.9, p.1351- 1359, 2006.

TABOR, K.; WILLIAMS, J.W. Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. **Ecological Applications**, 20(2), p. 554–565, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2008.

TANAJURA, C.A.S.; GENZ, F.; ARAÚJO, H.A. de. Mudanças climáticas e recursos hídricos na Bahia: Validação da simulação do clima presente do HadRM3p e comparação com os cenários A2 e B2 para 2070-2100. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, 345 - 358, 2010.

TATAGIBA, S.D.; PEZZOPANE, J.E.M.; REIS, E.F dos.; DARDENGO, M.C.J.D.; EFFGEN, T.A. Comportamento fisiológico de dois clones de Eucalyptus na época seca e chuvosa. **Cerne**, Lavras, v. 13, p. 149-159, 2007.

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.

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**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

TONELLO, K. C.; TEIXEIRA FILHO, J. Ecofisiologia de três espécies arbóreas nativas da mata Atlântica do Brasil em diferentes regimes de água. **Irriga**, v.17, p. 85-101, 2012.

VALVERDE, M.C.; MARENGO, J.A. Mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetados pelos modelos globais do IPCC AR4. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.1, 125 - 145, 2010.

VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV; 2000. 448p.

WILBY R. L.; FOWLER H. J. Regional Climate Downscaling. In: **Modelling the Impact of Climate Change and Water Resources**. Edited by: Fung, C. F., Lopez, A., and New, M. John Wiley&Sons, 200 pp. 2010.

WILBY, R.L.; WHITEHEAD, P.G.; WADE, A.J.; BUTTERFIELD, D.; DAVIS, R.; WATTS, G. Integrated Modeling of Climate Change Impacts on the Water Resources and Quality in a lowland Catchment: River Kennet, UK. **Journal of Hydrology**, 330, 204-220. 2006.

WILBY, R.L.; WIGLEY, T.M.L. Precipitation Predictors for Downscaling: Observed and General Circulation Model Relationships. **International Journal of Climatology**, 20, 641-661. 2000.

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

XAVIER, A.C.; CECÍLIO, R.A.; LIMA, J.S. de S. Módulos em MATLAB para interpolação espacial pelo método de krigagem ordinária e do inverso da distância. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 62 (01), 2010.

XU, C.Y. From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modeling approaches. **Progress in Physical Geography**, 23(2), pp. 229-249. 1999.

ZORITA, E.; VON STORCH, H.; The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods. **Journal of Climate**, 12,2474– 2489. 1999.